



Stroomversnelling

DE VOLGENDE ELEKTRISCHE INNOVATIEGOLF

REDACTIE: IR. J.M. MEIJ

STT 61

Stichting
Toekomstbeeld
der Techniek



Stroomversnelling

Stichting
Toekomstbeeld
der Techniek



De Stichting Toekomstbeeld der Techniek is in 1968 opgericht door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs.

Het werk van STT bestaat voornamelijk uit het opzetten, begeleiden en sturen van studieprojecten. Een STT-studie wordt uitgevoerd door 3 of 4 werkgroepen onder leiding van een stuurgroep. Aan een STT-studie werken gemiddeld 30 tot 40 deskundigen mee die afkomstig zijn uit het veld, van bedrijven, onderzoeksinstellingen, universiteiten, enzovoorts.

Het tastbare resultaat van een studie is een boek waarin de bevindingen worden vastgelegd. Een minder tastbaar, maar daarom niet minder belangrijk gevolg van de studie is de uitwisseling van kennis en ervaringen tussen de werkgroepleden onderling. De resultaten worden ook uitgedragen op symposia en via aandacht in de media.

STT richt zich bij haar projecten op het Nederlandse taalgebied, Nederland en Vlaanderen.

Het adres van STT is Prinsessegracht 23, Den Haag.

Correspondentieadres:

Postbus 30424, 2500 GK Den Haag, Nederland.

Telefoon +31 70 3029830

E-mail info@stt.nl

Stroomversnelling

DE VOLGENDE ELEKTRISCHE INNOVATIEGOLF

REDACTIE: IR. J.M. MEIJ

1999

STICHTING TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK (STT)
DEN HAAG, NEDERLAND

BIJ DE OMSLAG

Op satellietwaarnemingen gebaseerde weergave van de aarde, waarbij alle tijd-zones bij nacht worden getoond. Bron: The Living Earth inc. (Zie ook pag. 566).

COLOFON

Boekontwerp Salabim, bureau voor vormgeving BNO, Rotterdam

Illustraties pagina 355, 356, 494 Peter A. Weustink (Salabim BNO)

Drukwerk Drukkerij Macula, Boskoop

CIP-DATA KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

ISBN 90-804496-2-8

NUGI 841

© 1999 Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this work may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

Voor de reproductie(s) zoals bedoeld in art. 16b en 17 van de Auteurswet 1912 (ten bate van eigen oefening, studie enz. en/of ten bate van organisaties, instellingen enz.) van een of meer pagina's is een vergoeding verschuldigd. Voor inlichtingen betreffende de hoogte en afdracht van de vergoeding kan men zich wenden tot de Stichting Reprorecht Amstelveen.

Inhoud

	Voorwoord	12
	Samenvatting	14
	Executive summary	24
Deel 1	1. Inleiding	32
	1.1 Overzicht	32
	1.2 Elektriciteit als energiedrager	35
	1.3 Elektromagnetische vermogenstechniek	37
	1.4 Trends in vermogenselektronica	38
	1.5 Historie	47
	1.6 Veldsynthese	51
	1.7 Over dit boek	55
	Referenties	56
	2. Elektriciteit in de wijk	58
	2.1 Inleiding	58
	2.1.1 Uitgangspunten	59
	2.1.2 Algemene ontwikkelingen	61
	2.2 Integratie en optimalisatie op gebouwniveau	63
	2.2.1 Integratie en optimalisatie op gebouwniveau	63
	2.2.2 Toepassing van gelijkstroom in een woning	73

Deel 1

2.3	Integratie en optimalisatie op wijkniveau	78
2.3.1	Inleiding	78
2.3.2	Systeemintegratie op wijkniveau	78
2.3.3	Tijdsafhankelijkheid van vraag en aanbod	84
2.3.4	Opslag of uitwisseling van energie	86
2.4	Toekomstbeelden voor de voorbeeldwijken	90
2.4.1	Inleiding	90
2.4.2	Voorbeeldwijken voor 2020	91
2.5	Opwekking, gebruik en opslag in de wijk	104
2.5.1	Mogelijkheden voor lokale opwekking	104
2.5.2	Lokale mogelijkheden voor elektrificatie en efficiëntieverhoging	108
2.5.3	Mogelijkheden voor lokale opslag	114
2.6	Het lokale elektriciteitsnet	118
2.6.1	Reëel en blindvermogen	118
2.6.2	Transport van het vermogen in de wijk	122
2.6.3	Energie-uitwisseling met vermogenselektronische omzetter	127
2.6.4	Kwaliteit van de levering	131
2.6.5	Netvervuiling en elektromagnetische compatibiliteit (EMC)	135
2.6.6	Informatietechnologie voor nieuwe energiediensten	139
2.7	Conclusies en aanbevelingen	144
2.7.1	Conclusies	144
2.7.2	Aanbevelingen voor onderzoek	144
2.7.3	Kansen voor industrie en dienstensector	147
2.7.4	Opinies over het belang en de termijn van maatregelen	147
	Referenties	148
3.	Een nationaal en internationaal perspectief op elektriciteit	150
3.1	Inleiding	150
3.2	Toekomstbeelden voor 2020	152
3.2.1	Het toekomstbeeld van de werkgroep	152
3.2.2	Vergelijking toekomstbeeld STT met scenario's van ECN	155
3.3	Liberalisatie	158
3.3.1	Liberalisatie en handel	158
3.3.2	Liberalisatie en energiebesparing, duurzaamheid en milieu	162
3.4	Duurzaam opgewekte elektriciteit	164
3.4.1	Inleiding	164
3.4.2	Nationaal potentieel	164
3.4.3	Mondiale bronnen	173
3.4.4	De plaats van grootschalige fotovoltaïsche (PV) opwekking	180
3.4.5	Transport bij centrale fotovoltaïsche (PV) opwekking buiten Nederland	184

Deel 1

3.5	Het nationale transportnet	191
3.5.1	Opbouw van het Nederlandse hoogspanningsnet	191
3.5.2	Doel van koppeling op hoogspanningsniveau	192
3.5.3	Beperkingen van het huidige koppelnet	194
3.6	Transport van elektriciteit over de landsgrenzen heen	196
3.6.1	Opbouw van het Europese net	196
3.6.2	Het benutten van internationale koppelingen	198
3.6.3	Technische opties voor transport over grotere afstand	200
3.6.4	Naar grootschalige gekoppelde elektriciteitssystemen	201
3.6.5	Stabiliteit van elektriciteitsvoorzieningssystemen	209
3.7	Grootschalige opslag van elektriciteit	214
3.8	Grootschalige projecten in opwekking en interconnectie	217
3.9	Conclusies	220
	Referenties	225
4.	Elektriciteit in vervoer	228
4.1	Inleiding	228
4.2	Toekomstbeeld en scenario's	231
4.2.1	Gunstige voorwaarden voor elektrificatie van vervoer	231
4.2.2	Elektrisch vervoer in de scenario's van Sep	234
4.3	Invloeden op elektrificatie van vervoer	236
4.3.1	Van toekomstbeeld naar technologie	236
4.3.2	De invloed van concepten voor verkeer en vervoer	238
4.3.3	De belangrijkste voertuigconcepten bij elektrificatie van vervoer	239
4.3.4	Elektrische aandrijving in de scheepvaart	246
4.3.5	Elektrische voortstuwing in de luchtvaart	248
4.4	Consequenties voor de elektrische infrastructuur	252
4.4.1	Elektriciteitsvraag voor elektrisch vervoer	252
4.4.2	Capaciteit van de elektrische infrastructuur	253
4.4.3	Elektrische infrastructuur voor railvervoer	257
4.5	Sleuteltechnologieën	265
4.5.1	Revolutie of evolutie?	265
4.5.2	Sturing van de elektriciteitsvraag	267
4.5.3	Elektromotoren voor mobiele toepassingen	268
4.5.4	Vermogensregeling	273
4.5.5	Accu- en laadtechnologie	280
4.5.6	Supercondensatoren	287
4.5.7	Brandstofcellen voor mobiel gebruik	289
4.5.8	Automatische voertuiggeleiding	296
4.5.9	Integraal ontwerpen	303

	4.6	Conclusies	309
		Referenties	314
Deel 2	1.	Inleiding	318
	1.1	Inleiding	318
	2.	Materialen en componenten	320
	2.1	Materialen voor elektrische isolatie	321
	2.1.1	Elektrische isolatiematerialen voor kabels	321
	2.1.2	Monokristallijne en keramische diëlektrica	325
	2.1.3	'Intelligente' materialen	326
	2.1.4	Diamantlagen	328
	2.1.5	Elektrisch isolerende gassen: alternatieven voor SF6	329
	2.2	Geleiders	330
	2.2.1	Conventionele geleidermaterialen en kabels	330
	2.2.2	Supergeleiders	333
	2.2.3	Geleidende kunststoffen	343
	2.3	Halfgeleidermaterialen	345
	2.4	Permanente magneten en magneetmaterialen	348
	2.5	Omzetters voor spanning en stroom	353
		Referenties	366
	3.	Opwekking	368
	3.1	Inleiding	368
	3.2	Statische opwekking	369
	3.2.1	Fotovoltaïsche omzetters	369
	3.2.2	Halfgeleider thermo-elektrische elementen voor opwekking	375
	3.2.3	Brandstofcellen	377
	3.3	Dynamische omzetters	382
	3.3.1	Innovatieve combinaties van generator en omzetter	382
	3.3.2	Nieuwe motoren voor elektriciteitsopwekking	388
	3.3.3	Piëzo-elektrische elementen	395
	3.4	Omzettingmogelijkheden verder in de toekomst	396
	3.4.1	Perspectieven van kernfusie	396
	3.4.2	Zonne-energie uit de ruimte	404
	3.4.3	Exotische concepten voor elektriciteitsopwekking	406
		Referenties	407

Deel 2		
	4.	Transport en distributie 410
	4.1	Transport en distributie 411
	4.1.1	Netten en stations 411
	4.1.2	Wisselstroom (AC) of gelijkstroom (DC)? 411
	4.2	Toepassingen van vermogenselektronica 414
	4.2.1	Omzetters voor hoogspanningsgelijkstroom (HVDC) 414
	4.2.2	FACTS en Unified Power Conditioners 416
	4.3	Online monitoring 419
	4.4	Draadloze overdracht van energie 422
	4.4.1	Draadloze inductieve energieoverdracht 422
	4.4.2	Energieoverdracht met microgolven 425
		Referenties 426
	5.	Opslag 428
	5.1	Geavanceerde batterijen 429
	5.1.1	Nikkel-metaalhydridebatterij 430
	5.1.2	Lithium-ionbatterij 431
	5.1.3	Natrium-nikkelchloridebatterijen 434
	5.1.4	Metaal-luchtbatterijen 435
	5.1.5	Redoxflowbatterijen 438
	5.2	Condensatoren en supercondensatoren 440
	5.2.1	Condensatoren 440
	5.2.2	Supercondensatoren 442
	5.3	Supergeleidende magnetische energieopslag (SMES) 445
	5.4	Elektromagnetische vliegwheels 449
	5.5	Systemen op basis van potentiële energie 452
	5.6	Chemische omzettingen en warmte 454
		Referenties 455
	6.	Ontwikkelingen in gebruik 456
	6.1	Licht 456
	6.1.1	Verlichtingstechnologie 456
	6.1.2	Beeldschermen 463
	6.1.3	Lasersystemen voor zichtbaar licht 463
	6.2	Warmte 467
	6.2.1	Inleiding 467
	6.2.2	Weerstandverwarming 469
	6.2.3	Inductieve verwarming 471
	6.2.4	Diëlektrische verwarming 473
	6.2.5	Verwarming met infrarood, ultraviolet of elektronenstralen 477

Deel 2		
	6.2.6	Boogverwarming 482
	6.2.7	Plasmaverwarming 484
	6.2.8	Laser 486
	6.2.9	Mechanische dampcompressie 488
	6.2.10	De warmtepomp 489
6.3	Koude	495
	6.3.1	Koeling als poort naar nieuwe mogelijkheden 495
	6.3.2	Koeling door middel van halfgeleiderelementen 500
6.4	Kracht en voeding voor elektronische apparaten	503
	6.4.1	De elektromotor en de elektrische generator 503
	6.4.2	Luchtdruk voor drogen en scheiden 507
	6.4.3	Magnetische lagers 508
	6.4.4	Asloze propelleraandrijving 511
	6.4.5	Elektromagnetische verdichting 513
	6.4.6	Voeding van elektronische apparatuur en stand-by verbruik 515
	6.4.7	Elektronische transformatoren voor kleine vermogens 518
6.5	Scheiding en reiniging	520
	6.5.1	Inleiding 520
	6.5.2	Capacitieve deïonisatie 521
	6.5.3	Gepulste corona 521
	6.5.4	Plasmareiniging 524
	6.5.5	Elektromagnetische sterilisatie 525
	Referenties	526
Bijlage 1	Basisbegrippen	528
Bijlage 2	Voorvoegsels en eenheden	534
	Organisatie van de studie	536
	STT-publicaties	540
	Subsidieverleners STT	546
	Sponsors voor deze uitgave	548
	Trefwoordenregister	554

Een snelweg voor elektriciteit



Dit boek brengt de visie dat aan het begin van de 21e eeuw – ruim honderd jaar na de introductie van elektriciteit in het industriële tijdperk – een volgende elektrische innovatiegolf zal kunnen ontstaan. Een golf van vernieuwing in techniek en samenleving, waardoor elektriciteit versneld zal doordringen als ideale drager van energie. Ideaal voor transport van duurzaam opgewekte energie, ideaal voor schone en gebruikersvriendelijke producten en processen, ideaal voor energiebesparing en ideaal voor de ondersteuning van economie en milieu.

Is dat nu zo? En is elektriciteit zo ideaal? Zelfs voor iemand die doorgaans gedachteloos de lichtschakelaar overhaalt, is er nog wel wat overredingskracht nodig om de elektrische innovatiegolf te zien. En voor de gemiddelde Nederlander die zijn huis verwarmt met het schone en kostbare aardgas en zich verplaatst in een auto met katalysator lijkt de elektrische innovatiegolf zelfs niet relevant. Wat is er gebeurd sinds de donkere dagen van de energiecrisis dat de Stichting Toekomstbeeld der Techniek zo'n zonnige visie kan geven in dit boek 'Stroomversnelling'?

Maar, zo gek is het nader beschouwd helemaal niet. Alleen al de elektrificatie van industriële processen kan belangrijke milieuverbeteringen en energiebesparingen brengen. STT schreef daarover in 1992 al een boek, getiteld 'Electriciteit in perspectief'. Het is daarom een goede zaak dat het blikveld nu is verlegd naar andere aspecten van de samenleving. En dan blijkt het proces van elektrificatie daar eigenlijk ook al op gang te zijn gekomen. Dat komt enerzijds doordat elektrische apparaten nu eenmaal veel comfort bieden. Maar het komt ook doordat het beleid – ook tegen de achtergrond van internationale afspraken – een elektrische energiehuishouding bevordert.

Het aandeel van elektriciteit in de totale energieconsumptie zal nog tientallen jaren laag blijven. Dat sluit aan op de beschikbaarheid van fossiele brandstoffen, waarvan over het algemeen de overtuiging bestaat dat deze zeker tot halverwege de 21e eeuw reikt. Door nu een versnelling in onze gehele elektriciteitsketen na te streven, waarmee we direct al doelen van economie en milieu kunnen dienen, hebben we straks de snelheid om in te voegen op de snelweg van de duurzame energiehuishouding. De metafoor van een ‘internet’ voor elektriciteit spreekt mij in dat verband enorm aan.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'R' followed by a series of overlapping, diagonal strokes.

ir. R.M.J. van der Meer
Lid raad van bestuur Akzo Nobel
Voorzitter van STT

Samenvatting

ir. J.M. Meij

INLEIDING

Dit is een samenvatting van het boek ‘Stroomversnelling’, resultaat van een studieproject van de Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT). STT verricht verkenningen op het snijvlak van ontwikkelingen in techniek en samenleving. ‘Stroomversnelling’ gaat over de wisselwerking tussen elektrische technologie, economie en milieu. Het project is in 1999 afgesloten. Aan het boek hebben 62 auteurs bijgedragen. Deze samenvatting biedt een sterk verkorte weergave van de hoofdlijnen en conclusies met als doel deze onder een breed publiek kenbaar te maken.

De basis van ‘Stroomversnelling’ ligt in de toenemende kennis en kunde van theorie en praktijk van vermogenslektronica. Daarmee kan efficiënter en effectiever met elektrisch vermogen worden omgegaan ten behoeve van industrie en bedrijven, huishoudens, verkeer en vervoer, en alle producten en processen die een rol spelen in de gehele elektriciteitsketen. Bovendien spelen er tegelijkertijd vele andere technische en maatschappelijke ontwikkelingen:

- Nieuwe halfgeleiders, geleiders, isolatoren en magneten.
- Nieuwe elektrochemische processen.
- Integratie van informatietechnologie in elektrotechniek.
- Liberalisatie van de elektriciteitsmarkt.
- Decentralisatie van elektriciteitsopwekking.
- Duurzame energiehuishouding en energiebesparing.
- Behoeftte aan technologie voor economie èn milieu.

Tezamen hebben deze ontwikkelingen tot gevolg dat de snelheid van innovatie in de gehele keten fors kan toenemen ('stroomversnelling'), zodat er nu een eeuw na de introductie van elektriciteit in onze samenleving een volgende elektrische innovatiegolf ontstaat. Deze visie wordt in het boek onderbouwd.

Het aandeel elektriciteit in het totale energiegebruik neemt toe en daarmee weer het belang van nieuwe elektrische technologie. Deze wederzijdse ontwikkeling duiden we aan met 'elektrificatie'. Elektrificatie kan met succes worden ingezet voor energiebesparing. Nog belangrijker is dat elektrificatie bevorderend werkt voor een duurzame energiehuishouding, want veel duurzame energie komt ter beschikking in de vorm van elektriciteit. Elektrische innovaties zijn doorslaggevend voor de economische haalbaarheid van de winning van duurzame energie.

'Stroomversnelling' volgt op de publicatie van 'Elektriciteit in perspectief' (1992) die vooral de industrie als onderwerp had. 'Stroomversnelling' richt zijn blik daarom op processen buiten de industrie. Het jaar 2020 is als richtjaar voor de beschouwingen genomen. Het boek bestaat uit twee delen. Deel 1 biedt een toekomstvisie vanuit perspectieven op de historische ontwikkeling, de elektriciteitsketen op lokaal, nationaal en mondiaal niveau, de woonomgeving en elektriciteit in verkeer en vervoer. Deel 2 biedt een uiteenzetting van de technische ontwikkelingen die ten grondslag liggen aan de visies van deel 1. Beide delen leiden tot het inzicht dat uiteenlopende doelen voor economie en milieu met elektrificatie gediend kunnen worden.

ELEKTRIFICATIE, ECONOMIE EN MILIEU

De elektriciteitsproductie en -levering zijn in 2020 geliberaliseerd. Het beheer van transport en distributie is losgekoppeld van de productie en ondergebracht bij verschillende partijen die door de overheid worden gereguleerd.

Producenten, handelaars en makelaars beconcurreren elkaar op de vrije elektriciteitsmarkt.

Schaalvergroting en internationalisatie zijn de sleutelwoorden voor de traditionele productiesector in de eerstkomende jaren. De verwachting is dat er in 2020 naast vele decentrale onafhankelijke opwekkers een klein aantal mondiale spelers zullen zijn die de centrale opwekking zullen verzorgen. Distributiebedrijven zullen zich vooral gaan onderscheiden door het aanbieden van nieuwe energie-gerelateerde diensten, zoals het beheren en beheersen van het elektriciteitsgebruik van huishoudelijke apparatuur.

Investerings in energiebesparing, milieuverbetering en duurzaamheid zullen op de vrije elektriciteitsmarkt worden geremd door het lage rendement op de korte termijn. De prijsverhouding tussen duurzame en fossiele energiebronnen

speelt hierbij een doorslaggevende rol. Het beleid van de overheid moet er daarom op gericht zijn zulke investeringen marktonafhankelijk te laten plaatsvinden, bijvoorbeeld door scherpe milieu- en energieprestatienormen te specificeren of door op te treden als 'launching customer'.

Duurzame elektriciteit

Waterkracht biedt op dit ogenblik 80% van alle duurzame elektriciteit op wereldschaal. Nederland heeft vrijwel geen eigen locaties voor waterkrachtcentrales. Toch kan Nederland zelf grote hoeveelheden duurzame elektriciteit opwekken. De voornaamste mogelijkheden voor grootschalige opwekking liggen in de winning van wind- en van zonne-energie. Het Nederlands Continentaal Plat biedt plaats voor grootschalige windparken, in theorie voldoende voor de totale Nederlandse *energie*consumptie van 1996. Op de gunstig gelegen daken in Nederland is plaats voor PV-modulen tot ca. 10% van de *elektriciteits*consumptie in 1996. Duurzame fotovoltaïsche elektriciteit kan economischer via het zogenaamde koppelnet (de connector tussen landelijke elektriciteitsnetten) geïmporteerd worden uit zuidelijker landen met een hogere zon-instraling. Hetzelfde geldt voor elektriciteit uit biomassa, waterkracht, geothermie, enzovoorts. Het koppelnet moet daarvoor worden uitgebreid.

Ook op mondiaal niveau blijken zon en wind de beste groeimogelijkheden te bieden. Het totale potentieel is in beide gevallen afhankelijk van de beschikbare oppervlakte en kan een veelvoud bedragen van de totale wereldenergieconsumptie. De maximale bijdrage van elektriciteit uit waterkracht is 50 tot 70% van het elektriciteitsgebruik, maar zal om sociale en ecologische redenen waarschijnlijk beperkt blijven tot 3 à 4 PWh, ofwel 10 tot 15% van het elektriciteitsgebruik in 2020. Getijdenenergie is locatiegebonden en zal maximaal 0,7 tot 2,2% van het elektriciteitsgebruik in 2020 kunnen leveren. De geschatte potentiële bijdrage van golfslagenergie is ca. 5%, maar deze technologie moet eerst verder ontwikkeld worden. Biomassa blijft een rol spelen, maar zal op de lange termijn door het hoge grondgebruik moeten concurreren met de voedselproductie.

Toenemende koppeling van elektrische netwerken

Door liberalisatie en door grootschalig opgewekte duurzame elektriciteit op veraf gelegen winningslocaties is transport van grote hoeveelheden elektriciteit over lange afstand nodig. Niet alleen voor binnenlands gebruik, maar ook voor transport tussen landen en aangrenzende continenten. Het koppelnet wordt steeds meer een bulktransportnet.

Als de internationale transporten toenemen, zal in de verbindingen tussen het Nederlandse 380 kV-net en de buitenlandse netten een grotere capaciteit geïnstalleerd moeten worden, anders zullen de betrouwbaarheid en de leveringszekerheid achteruitgaan. In het 380 kV-net zelf geldt dit eveneens. Toenemende

aanvoer uit het koppelnet maakt een uitbreiding van het transformatorvermogen naar de deelnetten noodzakelijk, gevolgd door een uitbreiding van het aantal koppelpunten met deze netten.

Er zal op termijn een nieuw 'Ultra High Voltage AC- of DC-supernet' kunnen ontstaan met een zeer grote capaciteit dat alle vraag en aanbod tussen aangrenzende continenten met elkaar verbindt. In de onderliggende netten zal waarschijnlijk ook de capaciteit van een aantal verbindingen uitgebreid moeten worden. 'Unified Power Flow Controllers' zullen dan nodig zijn om het vermogen over de verbindingen te verdelen. De HVDC-verbindingen kunnen dan onder bepaalde voorwaarden gebruikt worden om de bestaande AC (wisselstroom)-netten stabiel te maken.

Ook de zich ontwikkelende landen zullen van het gebruik van lokale netten evolueren in de richting van internationale koppelingen. Door de aanleg van een supernet naar de vraagcentra wordt het op die manier mogelijk dat een aantal van deze landen exporteurs van duurzame energie worden. Supernetten tussen aangrenzende continenten kunnen interessante voordelen voor milieu en economie bieden. Sociale en economische stabiliteit is echter een voorwaarde voor het slagen van dergelijke projecten. De economische haalbaarheid van nationale en internationale verbindingen neemt toe, naarmate er meer vermogen wordt uitgewisseld.

De toekomstige situatie van bulktransporten over grote afstanden gecombineerd met veel ongeregelde lokale opwekking geeft reden tot zorg over de stabiliteit van het elektriciteitssysteem. Bij grootschalige toepassing van wind- en zonne-energie zal energieopslag de tijdsverschillen in vraag en aanbod kunnen bufferen. Zulke buffers kunnen de stabiliteit ten goede komen. Als opslagsysteem zullen vooral waterkrachtcentrales benut worden. In aanvulling hierop komen ook andere opslagsystemen in aanmerking; het voor de stabiliteit zo belangrijke snel inzetbare vermogen kan opgeslagen worden in SMES¹, vliegwielen, batterijen of condensatorbanken.

WOONHUIZEN EN KANTOREN

Het huishoudelijk energieverbruik bedraagt in Nederland en veel andere landen op dit ogenblik al meer dan een kwart van het totaal. Bovendien neemt de elektriciteitsvraag in huishoudens sterk toe. Het is daarom verstandig om de aandacht op de woonomgeving te richten. De nieuwe woonwijken, die in de eerste decennia van de 21e eeuw gebouwd worden zullen voor een belangrijk deel bestaan uit energiezuinige woningen, die waar mogelijk voorzien zijn van middelen om zelf warmte en elektriciteit te kunnen genereren. De Nederlandse overheid streeft ernaar om in 2020 in totaal een miljoen daken met fotovoltaïsche

¹ Supergeleidende magnetische energieopslag.

panelen uit te rusten, gemiddeld 15 m² per dak. Zuidoriëntatie² en lage-temperatuurwarmteoverdrachtsystemen zijn belangrijk voor een optimale benutting daarvan. Met de integratie van systemen in de woonwijk kan een groot aandeel duurzame energie in de landelijke energieconsumptie worden bereikt. Lokale elektriciteitsopwekking op basis van duurzame bronnen is daarbij een optie. De in het boek beschreven voorbeeldwijken 'Autark' en 'Synergie' werken die integratie van systemen nader uit.

Fotovoltaïsche energie kan zonder tussenopslag worden gebruikt in kantoren, bedrijfspanden en andere plaatsen waar vooral overdag en in de zomer (airco) elektriciteit nodig is, maar 's nachts en in de winter minder. Voor huishoudens ligt dat anders. De aanbodcurve van fotovoltaïsche energie heeft zowel in de dagcyclus als in de jaarcyclus een tegengesteld verloop aan de vraagcurve van huishoudens. Opvallend is dat de gemiddelde aanbodcurve van windenergie wel redelijk overeenkomt met de vraagcurve van de woonwijk. Het momentane aanbod van windenergie is echter onzeker.

Dat leidt tot de vraag of de duurzaam bij de woonwijk opgewekte elektriciteit moet worden opgeslagen totdat er lokale vraag is, of beter kan worden teruggeleverd aan het net ten behoeve van andere, mogelijk veraf gelegen gebruikers. Voor elektriciteit die op laagspanningsniveau (PV) is opgewekt blijken de verliezen die ontstaan door het transport via het laagspannings- en middenspanningsnet naar verbruikers in de omgeving, geringer te zijn dan de laad- en ontlaadverliezen van de (nu nog gangbare) loodaccu's. Als de gebruikers zich op grote afstand bevinden waardoor transport ook via het hoogspanningsnet moet plaatsvinden, is het plaatselijk opslaan van elektriciteit in loodaccu's juist efficiënter.

DE VERVOERSSECTOR

Het energieverbruik van de vervoerssector is vergelijkbaar met dat van huishoudens en de helft van de industrie. Er is daarom alle reden de mogelijkheden van het besparingspotentieel van elektrificatie van het vervoer te verkennen. Elektrische wegvoertuigen zijn tenminste 20% zuiniger dan voertuigen met een conventionele verbrandingsmotor, het rendement van elektriciteitsopwekking daarbij in aanmerking genomen. Het voordeel van elektrisch vervoer zit vooral in de veel lagere emissie van stoffen zoals NO_x en SO₂. De elektrificatie van het vervoer zal daarom energie besparen en milieuwinst opleveren.

De eerste succesvolle elektrisch aangedreven voertuigen zullen hybriden zijn met een elektromotor en een verbrandingsmotor. Serie-hybriden, met beide motoren in serie geschakeld, hebben minder mechanische onderdelen dan de zogenaamde parallel-hybriden, en kunnen daarnaast profiteren van het gunstige constante toerental van de primaire aandrijfmotor. Alle hybriden kunnen

² Waarbij een groot deel van het dakoppervlak is georiënteerd tussen zuidoost en zuidwest.

profiteren van de nieuwe ontwikkelingen op het gebied van interne verbrandingsmotoren.

Met krachtig beleid en een breed maatschappelijk draagvlak kan batterij-elektrisch vervoer in 2020 tot 20% van het personenwagenvoerpark gaan uitmaken. Batterij-elektrisch vervoer zal echter pas doorbreken, wanneer de *specifieke energie* (in kWh/kg) van de batterij drie à vier maal groter is dan die van loodaccu's, en wanneer snellaadtechnologie het (incidenteel) laden onderweg mogelijk maakt. De eerste succesvolle batterij-elektrische voertuigen zullen daarom klein en licht zijn, bedoeld voor de korte afstand als vervanger van de tweede (boodschappen- of woon-werk) auto. Veel milieuwinst is te behalen door de vervanging van tweetakt-tweewielers door elektrische tegenhangers.

Batterijen

Veelbelovende batterijtypen voor het vervoer zijn op dit moment de NiMH- en de lithium-ionbatterijen. Het ziet ernaar uit dat de toekomstige elektrisch aangedreven voertuigen met geavanceerde lithium-polymeerbatterijen zullen kunnen concurreren met conventionele voertuigen. Als we de levensduur in laadcyclus in de berekening betrekken, dan zijn de nieuwe batterijtypen – mits industrieel geproduceerd – flink goedkoper in gebruik dan loodaccu's. Supercondensatoren kunnen in hybriden en batterij-elektrische voertuigen spanningspieken opvangen en vermogenspieken leveren en daarmee de levensduur en de prestaties van het batterijsysteem vergroten.

Om een 30 kWh batterij van een elektrisch voertuig in 15 minuten op te laden, is een snellader nodig van 120 kW. Dergelijke snelladers kunnen geplaatst worden bij benzinstations, waarbij ze gekoppeld worden aan het middenspanningsnet. Dit zal wat betreft het vermogen geen problemen opleveren. Het thuis kunnen laden met 'snel' laders van 11 kW (het maximaal met een driefasengroep te leveren vermogen, laadtijd 3 uur) zou een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het eventuele succes van batterij-elektrische voertuigen met geavanceerde batterijen. Als een paar procent van de mensen in een woonwijk op hetzelfde moment een elektrische auto met een dergelijke lader oplaadt, zullen er echter problemen optreden in het laagspanningsnet. Belastingsturing zou een (tijdelijke) oplossing kunnen bieden. De enige echte oplossing voor dit probleem is uitbreiding van de capaciteit van het distributienet.

De brandstofcel zal allereerst zijn intrede doen in een hybride systeem (met batterijen en supercondensatoren voor o.a. terugwinning van remenergie) in combinatie met een 'reformer' voor vloeibare brandstof. Het moment van introductie hangt af van de prijsontwikkeling van de brandstofcel en de ontwikkeling van 'on-board' reformers. Recente berichtgevingen wijzen erop dat deze

reformers voor de toepassing van conventionele brandstoffen binnen vijf jaar beschikbaar zullen komen. Autorijden zonder netto koolstofdioxideproductie komt met de brandstofcel pas in beeld als de productiemethoden voor vloeibare brandstof uit biomassa verder ontwikkeld zijn, of als op duurzame wijze gegenereerde waterstof efficiënt en veilig opgeslagen kan worden. Hoe groter het maatschappelijk draagvlak voor duurzaamheid en hoe groter de economische groei, des te meer elektrische auto's verschijnen er in het straatbeeld.

Zonering en het stimuleren van specifieke vervoermiddelen voor de verschillende zones zullen waarschijnlijk de elektrificatie van het vervoer bevorderen. Verwacht wordt dat ook het stimuleren van vervoersconcepten zoals autodeel-systemen, elektrisch spoorvervoer, milieuvriendelijk stadsverkeer en verhuur-systemen een positieve invloed zullen hebben op de elektrificatie van het personenvervoer. Voor het goederenvervoer zullen het stimuleren van elektrisch spoorvervoer en de aanleg van stadsdistributiecentra verdere elektrificatie bevorderen. Het elektrisch railvervoer zal toenemen, en er zal efficiënter met energie worden omgegaan. Bij grote stations kan een forse energiebesparing verkregen worden door de remenergie van vertragende treinen via de bovenleiding op te slaan en weer af te staan aan de eerstvolgende versnellende trein. Ook opslag in de locomotief zelf is mogelijk.

Elektrificatie van de scheepvaart biedt verschillende voordelen en kan op zichzelf waardevolle kennis en technologie opleveren. Baggerschepen zijn nu al in grote mate geëlektrificeerd. Met de toenemende belangstelling voor de toepassing van elektrische aandrijving in schepen lijkt het voor de zeevaart interessant om de energiebesparingsmogelijkheden door de plaatsing van windturbines op het schip te onderzoeken. Ook maakt elektrificatie nieuwe vormen van aandrijving mogelijk, zoals de asloze schroef. Elektrificatie van transportvliegtuigen is niet aan de orde, maar wel van vliegtuigjes voor onderzoeks- of satellietfuncties.

DE TECHNIEK

Deel 2 van het boek geeft een overzicht van technische ontwikkelingen op het gebied van elektriciteit en magnetisme.

Om de elektriciteitsgeleiding beter te beheersen, worden steeds geavanceerder materialen en fabricage voor kabels gebruikt. Supergeleidende materialen komen dichter bij praktische toepassingen. Dit heeft mede te maken met verbeterde productiemethoden en het beschikbaar komen van nieuwe koelmethoden. Toepassingen zoals stroombegrenzing en supergeleidende magnetische opslag (SMES) komen binnen handbereik.

Bij de halfgeleiderschakelaars zien we een toename in het vermogen, de vermogensdichtheid, de spanning en de schakelfrequentie. Dit maakt een aanzienlijke miniaturisatie van systemen mogelijk. Bovendien zijn ze goedkoper en een-

voudiger. Het schept echter ook een probleem: de onderlinge beïnvloeding van de componenten in de schakeling is niet meer verwaarloosbaar. De elektromagnetische velden gaan het gedrag van de schakeling sterk beïnvloeden. Er is nog onvoldoende kennis om dit gedrag te kunnen voorspellen. Hiervoor is kennis nodig van de synthese van elektromagnetische velden, vooral ook omdat de voorziene volgende stap in de ontwikkeling betrekking heeft op de integratie van passieve en actieve componenten tot één vermogenschip.

De geavanceerde regelingen en besturingen die met de halfgeleiders mogelijk zijn geworden ontleen hun effectiviteit mede aan de vergaande koppeling en zelfs integratie met informatietechnologie. Bij het regelen van het vermogen vormt de vermogenselektronica de spieren, de informatietechnologie het brein. Zo kan een elektromotor precies zo aangestuurd worden dat hij altijd het maximale koppel levert. Ook wordt het mogelijk het rijgedrag van een elektrisch aangedreven voertuig te bepalen met software. De integratie van deze technieken levert zogenaamde ‘smart power’ chips, waarin de besturende logica is geïntegreerd met de vermogenselektronische halfgeleiders. Voor alle elektrisch aangedreven voertuigen geldt dat het integraal beschouwen van de keten van stroombron via de vermogenselektronica naar de aandrijving in combinatie met de voertuigkarakteristieken een essentiële voorwaarde is voor het bereiken van optimale prestaties. Veel componenten zullen worden uitgerust met sensoren en communicatieaansluitingen. Een tijdige standaardisatie van de gegevensuitwisseling tussen de componenten van het aandrijfsysteem kan tot grotere flexibiliteit en kosteneffectiviteit leiden.

Deel 2 gaat verder in op elektrische isolatiematerialen, geleiders, supergeleiders, halfgeleiders en permanente magneetmaterialen. In het verlengde daarvan komen vermogenselektronische omzeters aan bod. Deze basistechnologieën worden aangevuld met een overzicht van nieuwe technieken in alle schakels van de elektriciteitsketen.

Op het gebied van de elektriciteitsopwekking worden nieuwe statische en dynamische omzettingprincipes behandeld, aangevuld met enkele mogelijkheden verder in de toekomst, zoals kernfusie en zonnecentrales in de ruimte.

Ten aanzien van transport en distributie is er aandacht voor de keuze voor wisselstroom of gelijkstroom, gelijkstroomconverters en moderne hulpmiddelen zoals FACTS³ en ‘Power Quality Conditioners’. Methoden voor ‘online monitoring’ van de componenten in het distributiesysteem worden behandeld. Ook draadloze energieoverdracht komt aan de orde.

Opslagmethoden krijgen aandacht met de behandeling van geavanceerde batterijen, (super)condensatoren, SMES, vliegwielsystemen en pompaccumulatiesystemen.

Uiteraard komen ook de nieuwe ontwikkelingen in de conversie van elektriciteit

uitgebreid aan bod, waarbij het accent ligt op energiebesparing. Ingedeeld naar licht, warmte, koude, kracht en voeding voor elektronica, en scheiding en reiniging worden 30 conversietechnieken besproken.

CONCLUSIE

Veel van de nieuwe technieken die in dit boek aan de orde komen zullen een belangrijke rol spelen bij de ontwikkeling van een wereldwijd elektriciteitssysteem, waarin een vrije markt en voorzieningszekerheid zijn verenigd. Het elektriciteitsnet zal met een grote verscheidenheid van kleine en grote aanbieders en gebruikers zich ontwikkelen tot een ‘internet’ voor elektriciteit.

Maatregelen blijven noodzakelijk voor het terugdringen van de in alle scenario’s voorspelde forse groei van het energiegebruik op wereldschaal. De in het boek beschreven technieken kunnen daaraan bijdragen door besparing en efficiëntieverhoging.

Daarnaast biedt de techniek steeds betere mogelijkheden om onze maatschappelijke wensen op het gebied van duurzaamheid te vervullen. Grootschalige en kleinschalige projecten voor duurzame opwekking, efficiënte omzetting, beheersing en transport van elektriciteit zullen daarbij cruciaal zijn. De benodigde kennis en kunde voor de overgang naar een duurzame energiehuishouding komen binnen bereik. Of deze transitie zelf in een stroomversnelling geraakt, hangt vooral af van economie en politiek.

Executive summary

J.M. Meij

INTRODUCTION

This is a summary of the book ‘Rapid Current’ (in Dutch), which is the tangible result of a study project of the Netherlands Study Centre for Technology Trends (STT). STT explores future developments at the interface of technology and society. ‘Rapid Current’ deals with the interaction of electrical technology and developments in society. The project was concluded in 1999. More than 60 authors participated in the project. This summary offers a survey of the major trends and conclusions, with the aim to inform a wide audience.

‘Rapid Current’ is based on the increasing theoretical knowledge and practical experience of power electronics. This allows for more efficiency and efficacy in the application of electrical power for industry, companies, domestic purposes, transportation and all products and services that play a role in the total electrical chain. In addition, many other developments in technology and society come into play:

- New semiconductors, conductors, insulators and magnets.
- New electrochemical processes.
- Integration of information technology in power electronics.
- Liberalisation of the electricity market.
- Decentralisation of electricity generation.
- Sustainable energy management and energy saving.
- Demand for technology serving economy and environment.

Together, these developments may result in an increased pace of innovation in the entire electricity chain ('rapid current'). Thus, a century after the introduction of electricity in our society, the next electrical wave may be induced. This vision is supported in the book.

Of the overall energy expenditure, the fraction of electricity is increasing, and in turn the importance of electrical technology increases too. This mutual development is coined 'electrification'. Also, electrical technology can be used to save energy. Even more importantly, electrification ameliorates sustainable energy management, since sustainable energy often becomes available in the form of electricity. Electrical innovations are crucial for the economic feasibility of the production of sustainable energy.

'Rapid Current' is a sequel to the publication of 'Electricity in perspective' (1992) that was mainly focused on industry. In the Netherlands the process industry is the largest consumer of energy. 'Rapid Current' deals with products and processes outside industry. The book consists of two parts. Part 1 offers a future vision from the perspective of historical development, the local, national and global grids, urban innovations and electrical transportation. Part 2 displays the technical developments that support the vision of part 1. Both parts combined lead to the conclusion that various goals for economy and environment can be met by electrification.

ELECTRIFICATION, ECONOMY AND ENVIRONMENT

Electricity production and supply will be fully liberalised in 2020. Transport and distribution will be separated from production, and will be the responsibility of independent entities that are regulated by government. Producers, traders and brokers will compete on the free electricity market.

Scaling up and globalisation will be the key words for the traditional production sector for the coming years. It is expected that in 2020, in addition to many regional independent utilities, a few global players will control large scale electricity generation. Distribution companies will distinguish themselves by offering new energy-related services, such as the management and control of electricity consumption of domestic appliances.

Short-term investments in energy saving, environmental improvement and sustainability by competitors on the electricity market will be reduced by low return on investment. The ratio of sustainable and fossil energy prices is of crucial significance. Government policy therefore must encourage such investments, for instance by demanding rigid environmental performance requirements or by acting as a launching customer.

Sustainable electricity

Hydroelectric power currently takes care of 80% of global sustainable electricity. The Netherlands currently has no potential hydroelectric sites. Nevertheless, the Netherlands can generate large amounts of sustainable electricity. The prime potentials for large scale generation are in tapping wind- en solar energy. The continental shelf offers a site for large- scale wind parks, in theory sufficient to cover the total Dutch *energy consumption* of 1996. On favourably situated roofs in Holland, there is room for photovoltaic modules covering up to 10% of the *electricity consumption* of 1996. Sustainable photovoltaic electricity may be imported more economically via the so-called 'connector-grid' (the connector between national grids) from southern countries with higher solar irradiation. The same applies for electricity from biomass, hydropower, geothermal power etc. The connector-grid needs to be expanded for this.

Globally, sun and wind offer the best potential for growth. In both cases, the accumulated potential is dependent on the available surface area and may reach a multiplicity of total world energy consumption. The maximum fraction of hydroelectricity is 50 - 70% of electricity consumption, but for social and ecological reasons the contribution will probably be limited to 3 - 4 PWh, or 10 - 15% of the electricity demand in 2020. Tidal energy is limited to certain locations and can supply not more than 0.7 - 2.2 % of electricity consumption in 2020. The estimated potential of wave energy is about 5%, but the associated technology still needs to be developed. Biomass continues to play a role, but in the long term it will have to compete with agriculture for the use of soil.

The increased connectivity of electrical grids

Through liberalisation and large-scale generation of sustainable electricity at remote locations, transport of considerable amounts of electricity over long distances will be necessary. Not just for national use, but also for transport between countries and adjacent continents. The interconnector evolves into a net for bulk transport. Should the international transports increase, then higher capacity connections with the Dutch 380 kV net and the foreign grids will have to be installed to prevent deterioration of the reliability. The same applies for the 380 kV grid itself. Increasing supply from the interconnector calls for an expansion of the transformer capacity of the sub-grids and subsequently an increase of the amount of connection points with these grids.

In the long run, a new large capacity Ultra High Voltage AC or DC supergrid may evolve, connecting all supply and demand between adjacent continents. The capacity of the connection with the grids will most likely have to be upgraded as well. 'Unified Power Controllers' will then be needed to equalise the power on all connectors. Under certain circumstances the HVDC connections may then be applied to stabilise the existing AC-grids.

In addition, developing countries will shift from local grid use to international connections. Some of these countries may become net exporters of sustainable energy by connecting to the global supergrid, supplying the centres of demand. Continental supergrids may thus offer interesting advantages for environment and economy. Social and economical stability is a prerequisite for the success of such projects. The economic feasibility of transnational connections increases with the intensity of power exchange.

The future situation of bulk transport over long distances, combined with a lot of irregular local power generation, gives reason to worry about the stability of the electrical system. With large-scale implementation of wind and solar energy, storage may buffer the difference in time of supply and demand. Such buffers may improve stability. Most importantly, hydropower units will be used for storage. In addition, other storage systems will become important. For instance, the rapid power availability needed for stability may be accumulated in SMES¹, flywheels, batteries or rows of capacitors.

HOMES AND OFFICES

Already, domestic energy consumption in the Netherlands and in many other countries amounts to over one fourth of the total. Also, domestic electricity demand is rising. It is therefore appropriate to focus on residences. The new residential areas that will be built in the next twenty years will largely consist of low-energy homes, if possible supplied with means to generate heat and electricity. The Dutch government aims for a million photovoltaic roofs in 2020, with an average of 15 m² solar panels per roof. Orientation to the south² and low temperature heat transfer systems are important to use that power optimally. With integrated systems in the residential area, including offices, a considerable fraction of sustainable energy in relation to total energy consumption can be realised, with local electricity generation from sustainable sources as an option. The urban dwellings ‘Autark’ and ‘Synergy’ described in the book exemplify that integrated systems approach.

Without intermittent storage, photovoltaic energy may be used in offices and commercial buildings where electricity is needed during the day for airconditioning and appliances, and hardly needed at night. For homes this is different. The supply curve of solar energy has a mirror shape with respect to domestic demand, both during the 24-hour cycle as well as the annual cycle. Average wind energy supply is reasonably coherent with domestic demand. This leads to the question whether sustainable, locally generated electricity should be supplied to the grid to satisfy existing demand elsewhere, or whether it should be stored, waiting for local demand. It turns out that for low voltage (photovoltaic) electricity, the losses that occur with transport across the low

¹ Superconducting Magnetic Energy Storage.

² With the majority of the roof's surface area oriented between south-east and south-west

and medium voltage grid are smaller than the charge and discharge losses in currently used lead-acid batteries. Should the electricity demand occur at very remote locations, in such a way that electricity has to be transported over the high-voltage power lines, then local storage in lead-acid batteries is more efficient.

TRANSPORTATION

The energy demand of transportation in the Netherlands is comparable to that of homes, and half of that of industry. In terms of energy saving, electrification is therefore worth studying. Electric vehicles are at least 20% more efficient than their combustion engine counterparts, taking into account the efficiency of electricity generation. The big advantage of electric transportation is clearly the reduced emission of NO_x and SO₂. Electrification of transportation will therefore save both energy and the environment.

The first successfully electric powered road vehicles will be hybrid cars, with an electric motor and a combustion engine. Serial hybrids, with both engines connected in series, are constructed with less mechanical parts than so-called parallel-hybrids. Also, they can profit from ongoing improvements of internal combustion engines.

With strong policy and strong support from society, battery-electric transportation may constitute up to 20% of the total fleet of cars. Battery-electric transportation, however, will proliferate only when the *specific energy* (in kWh/kg) of the battery amounts to 4 - 5 times the capacity of lead-acid batteries, and as soon as technology for rapid charging will allow for occasional charging when on the road. The first successful battery-electric vehicles will therefore be small and lightweight, designed for short distances to replace the second car generally used for shopping or commuting. By replacing mopeds with two-stroke engines by electrical versions, considerable environmental progress can be made.

Batteries

Promising types of batteries for transportation are currently the NiMH and the lithium-ion batteries. It appears that future cars with lithium-polymer batteries can compete with internal combustion engine cars. If we take the life cycle in terms of charge cycles into account, then the new battery types - provided they are industrially produced - will be significantly cheaper in use than conventional ones. Super capacitors may be used in hybrids and battery-electric vehicles to buffer the voltage-spikes and deliver the power needed for peak performance, thus increasing the life and the performance of the battery system.

To charge a battery of 30 kWh of an electric vehicle in 15 minutes, a rapid charger of 120 kW is needed. Such chargers may be located at gas stations, where they can be coupled to the medium voltage grid. This setup will cause no power problems. Rapid charging at home with chargers of 11 kW (which is the highest available power with 3 phase connections and 3 hours charging time) would contribute largely to the possible success of battery-electric cars with advanced batteries. However, if only a small fraction of people in a residential area try to charge their cars at the same time, there will be blackouts in the low voltage grid. A temporary solution may be offered by power management. The only permanent solution, however, is expansion of the capacity of the supply grid.

The fuel cell will show up at first in a hybrid system (with batteries and supercapacitors to reclaim brake energy) in combination with a reformer for liquid fuel. The moment of introduction depends on the cost development of fuel cells and the development of onboard reformers. Recent publications point out that such reformers for fossil fuels may become available within five years. Driving without carbon dioxide production will only be possible if fuel can be generated from biomass, or if reliable, economical and safe methods for hydrogen storage become available. The larger the support in society for sustainable energy management and the larger the economic progress, the more electric cars will show up on the street.

Zoning and stimulating specific vehicles for dedicated areas will probably help to electrify transportation. It is expected that transportation concepts such as car sharing systems, electric rail transport, environmentally friendly city transport and rental systems may also have a positive influence on the electrification of people movers. Electrification of freight transportation can further be intensified by electric rail transportation and the realisation of centres for urban distribution. Electric rail transportation will intensify, and it will become more energy-efficient. At large railway stations, significant amounts of energy can be saved by storing the braking energy via the overhead contact wire and subsequently making it available for the next departing train. Also, braking energy storage in the train itself is possible.

Electrification of ships may offer some specific advantages, not in the least increased knowledge and spin-off technology. Dredgers already display an increased level of electrification. Given the increased interest in the application of electric propulsion, it may be worthwhile to investigate the possibilities for generating electricity from onboard windturbines. In addition, electrification allows for innovative propulsion design, such as the shaftless propeller. Electrification of airlines is not an issue, but small airplanes and -ships for research or satellite purposes are being conceptualised and tested.

THE TECHNOLOGY

Part 2 of the book provides an overview of technological developments in electricity and magnetism. To improve the management of the transmission of electricity over power lines and cables, advanced materials and manufacturing technologies are being implemented. Superconducting materials already have reached the stage of application for specific applications. An important factor in this is the advancement of cryogenic technologies. Applications such as current limitation and accumulation (SMES) therefore come within reach. Increased power capacity, voltage level and switching frequency is apparent in semiconductor switches. Moreover, they are more robust and cheaper than conventional switches. However, there is also an induced problem: the mutual influence of components can no longer be disregarded. The electromagnetic fields will influence the behaviour of the circuit as a whole. There is insufficient knowledge to predict this change in behaviour. More knowledge of the synthesis of electromagnetic fields is required, particularly with regard to the ongoing miniaturisation and integration of active and passive components.

Advanced power control has become available through coupling and even integration of semiconductor components with information technology. Information technology is the brain, and power electronics the muscles in controlling electrical power. Thus an electric motor can be controlled to deliver the maximum momentum at any rotation speed. This also allows (software) design of the acceleration behaviour of electric cars. Integration of these kinds of technologies leads to so-called smart power chips in which the software control is integrated with the power electronic semiconductors. Integrated approach of the complete electricity chain from source through power electronics to traction is crucial to reach the optimum performance in driving characteristics of all electric vehicles. Many components will be fitted with sensors and interfaces. Timely standardisation of these interfaces between the various components of the traction system will lead to greater flexibility and cost saving.

Part 2 continues to deal with materials for electric isolation, conduction, superconduction, semiconduction and permanent magnets. Additionally, power-electronic transformers are described. These fundamental technologies are broadened with an overview of new technologies in all parts of the electricity chain. With respect to power generation, new principles of static and dynamic transformation are discussed and extrapolated to provide a long-term future vision, including nuclear fusion and space power stations.

With regard to transmission and distribution, the choice between AC and DC is discussed including DC-converters and modern devices such as 'FACTS'³ and 'Power Quality Conditioners'. Methods for on-line monitoring of components in

the distribution system are also discussed, as well as wireless power transmission. Attention is then geared to storage systems with advanced batteries, (super)capacitors, SMES, flywheel systems and pump-accumulator systems. Obviously, new electrical conversion developments are being focused on extensively, with emphasis on energy saving. Classified into light, heat and cold, force, power supplies and separation and cleaning, more than 30 conversion technologies are discussed.

CONCLUSION

Many of the new technologies in this book will play an important role in developing a world-wide electricity system, combining free market and reliability. With an increasing diversity of small and large suppliers and users, the grid will evolve into an 'internet' for electricity.

Measures will remain necessary to curb the rise in global energy consumption that pops up in each future scenario. The technologies described in this book may be applied to assist these measures through energy saving and increased efficiency. Also, the technology offers possibilities to help fulfilling our wishes in terms of sustainability. Both large and regional projects for sustainable generation, transmission, storage, distribution and conversion of electricity will be crucial. The knowledge and know-how that are required for this transition are coming within reach. Whether the transition itself will create a *rapid* change in the world of electrical *current* is dependent above all on politics and economy.

1

1 Inleiding

1.1 OVERZICHT

ir. J.M. Meij

‘Stroomversnelling’ gaat over de wisselwerking tussen nieuwe elektrische technologie en de maatschappij.

De aanleiding voor de STT-studie die heeft geleid tot deze publicatie ligt in de activiteiten van de Initiatiefgroep Elektromagnetische Vermogenstechniek. Zij signaleerden in 1995 op basis van technische ontwikkelingen in de vermogenselektronica dat er een nieuwe golf van elektrische innovaties op handen was [Kampen, 1995] (meer hierover in par. 1.3 van dit hoofdstuk).

In de studie is deze gedachte uitgewerkt door het potentieel van combinaties van technische en maatschappelijke ontwikkelingen op dit gebied te inventariseren:

- Nieuwe materialen voor halfgeleiders, geleiders, elektrische isolatoren en magneten.
- Nieuwe elektrochemische processen.
- Nieuwe componenten en nieuwe toepassingen.
- Integratie van informatietechnologie in de elektrotechniek.
- Liberalisatie van de elektriciteitsmarkt.
- Decentralisatie van de opwekking.
- Toenemende aandacht voor duurzaamheid en efficiëntieverhoging.

Zo worden bijvoorbeeld om het elektrische veld beter te sturen steeds geavanceerder isolatiematerialen voor kabels gebruikt. Daarmee evolueert ook het ontwerp van de kabels. Naast de bekende geleidermaterialen aluminium en koper komen de supergeleidende materialen steeds dichterbij praktische toepassingen. Dit heeft mede te maken met verbeterde productiemethoden en het

beschikbaar komen van nieuwe koelmethoden. Toepassingen als stroombegrenzing en opslag komen binnen handbereik.

Bij de halfgeleiders zien we een toename in het te schakelen vermogen, terwijl de blokkeerspanningen en de schakelfrequenties hoger worden. Tegelijkertijd wordt de vermogensdichtheid groter. De compacte elektronische schakelaars maken een aanzienlijke verkleining van schakelingen voor hoge vermogens mogelijk. Dit maakt de toepassing ervan goedkoper en eenvoudiger. Het schept echter ook een probleem. De onderlinge beïnvloeding van de componenten in de schakeling is niet meer verwaarloosbaar. De elektromagnetische velden gaan het gedrag van de schakeling sterk beïnvloeden. Er blijkt kennisontwikkeling nodig om dit gedrag te kunnen voorspellen op een gebied dat met veldsynthese wordt aangeduid. In par. 1.3 en 1.6 wordt hierop nader ingegaan.

De geavanceerde regelingen en besturingen die met de halfgeleiders mogelijk zijn geworden ontlenen hun effectiviteit mede aan de vergaande koppeling en zelfs integratie met informatietechnologie. De vermogenselektronica vormt de spieren, de informatietechnologie het brein. Zo kan een elektromotor precies zo aangestuurd worden dat hij altijd het maximale koppel levert. Ook wordt het mogelijk het rijgedrag van een elektrisch aangedreven voertuig te bepalen met software. Integratie van de technieken levert zogenaamde 'smart power' chips, waarin de besturende logica is geïntegreerd met de vermogenselektronische halfgeleiders.

De liberalisatie van de elektriciteitsmarkt zal grote invloed hebben op de organisatie en inrichting van die markt. De verwachting is dat er meer vermogenstransport zal plaatsvinden en dat er hogere eisen gesteld zullen worden aan de beheersing van de stromen door de netten.

De toename van het aandeel decentrale opwekking stelt strengere eisen aan de handhaving van de kwaliteit van de spanning en de stroom. Geavanceerde regelmethoden in combinatie met snelle regelaars zullen nodig zijn om bij vergaande decentralisatie de kwaliteit en veiligheid te garanderen. Ook de beveiliging van het net moet opnieuw worden bezien.

Het verminderen van de CO₂-uitstoot en het verduurzamen van de energievoorziening komen nationaal en internationaal steeds hoger op de agenda te staan. De derde energienota uit 1996 [EZ, 1996] geeft 'streefcijfers' voor het terugdringen van de CO₂-uitstoot: een aandeel van 10% bespaarde fossiele brandstof (door duurzame energie) en een efficiencyverbetering van 33% in 2020. Voor de elektriciteitsvoorziening betekent dit dat in 2020 17% van de elektriciteit duurzaam opgewekt moet worden.

De afspraken die in december 1997 in Kyoto zijn gemaakt, verplichten Nederland

tot een reductie van de uitstoot van broeikasgassen met 8% ten opzichte van het niveau van 1990. Dit betekent een reductie naar 160 Mton (in 1996 bedroeg de uitstoot 187 Mton [CBS, 1998]). Dit niveau dient bereikt te worden tussen 2008 en 2012. Op dit moment is hiervan nog geen vertaalslag gemaakt naar een verdeling over de verschillende maatregelen. Het zal in ieder geval een behoorlijke inspanning vergen om aan de afspraak te voldoen.

Naast het broeikaseffect maakt ook de eindigheid van de voorraad fossiele brandstoffen het wenselijk op de lange termijn een groot deel van onze energievoorziening met duurzame bronnen te realiseren. De Nederlandse aardgasvoorraad zal tussen 2025 en 2040 uitgeput raken [ECN, 1998] (afhankelijk van de economische ontwikkeling). Eventuele meevallers in de schattingen van nog te ontdekken voorraden (futures) kunnen dit jaartal enige jaren opschuiven. Voor olie liggen de schattingen voor de mondiale uitputting tussen 2060 en 2070. Reeds na 2010 is het punt bereikt dat de productie achterblijft bij de toegenomen vraag, terwijl de productie steeds meer in de gebieden rond de Perzische golf zal plaatsvinden. De verwachting is dan ook dat de olieprijs tussen 2010 en 2020 sterk zal toenemen [Campbell, 1998]. Steenkool is er nog voor ongeveer 200 jaar [EZ, 1997]. Steenkool is echter moeilijk te winnen en veroorzaakt veel CO₂-uitstoot bij de omzetting. Ook de in de zeebodem in grote hoeveelheden aanwezige methaanhydraten zijn moeilijk te winnen [Collet, 1998]. De inzet van duurzame bronnen in de opwekking is daarom robuuster dan het opslaan van CO₂. Dit leidt tot de wens meer duurzame elektriciteitsopwekking toe te passen, wat onder andere vraagt om efficiënte koppelingen naar het elektriciteitsnet voor grote en kleine vermogens.

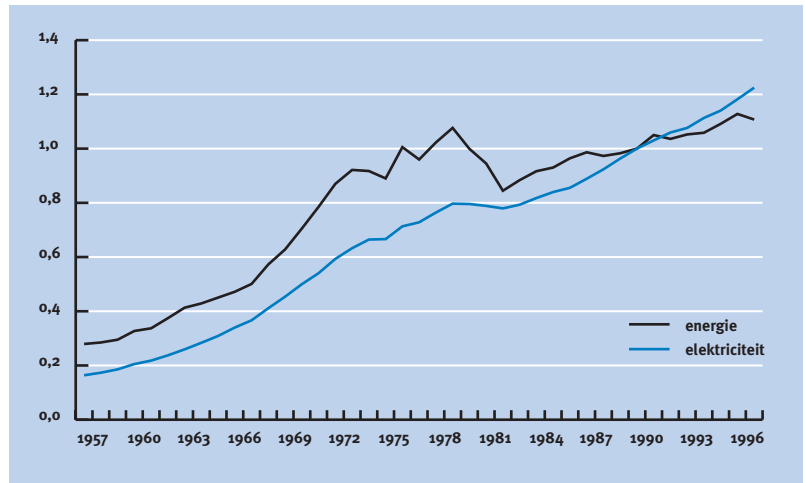
Naast duurzame opwekking is ook energiebesparing van essentieel belang voor het bereiken van de doelstellingen. Door de elektrische energie precies daar toe te passen waar dit nodig is in precies de juiste hoeveelheid, kunnen aanzienlijke besparingen worden gerealiseerd. Dit maakt dat de elektrische alternatieven vaak een besparing mogelijk maken ten opzichte van de oude werkwijze. Hoewel besparing zonder meer noodzakelijk is en vooral in de beginfasen zeer rendabel kan zijn, treedt hier uiteindelijk een effect van afnemende meerwaarde op. De investeringen voor besparingen worden steeds hoger ten opzichte van voorgaande jaren, terwijl de besparingseffecten steeds kleiner worden.

1.2 ELEKTRICITEIT ALS ENERGIEDRAGER

Bij de bespreking van elektrische technologie en de invloed ervan op de maatschappij (en omgekeerd) komen onvermijdelijk vragen naar voren over de rol van elektriciteit in de totale energievoorziening. We zullen daar slechts in zeer algemene zin op ingaan, omdat deze discussie buiten het kader van dit project zou vallen. Wel kunnen we aangeven dat de rol van elektriciteit in de energievoorziening groot is, en gestaag zal toenemen. Uit fig. 1.2.1 blijkt dat de groei van het elektriciteitsgebruik in Nederland sneller toeneemt dan het totale energiegebruik.

Fig. 1.2.1

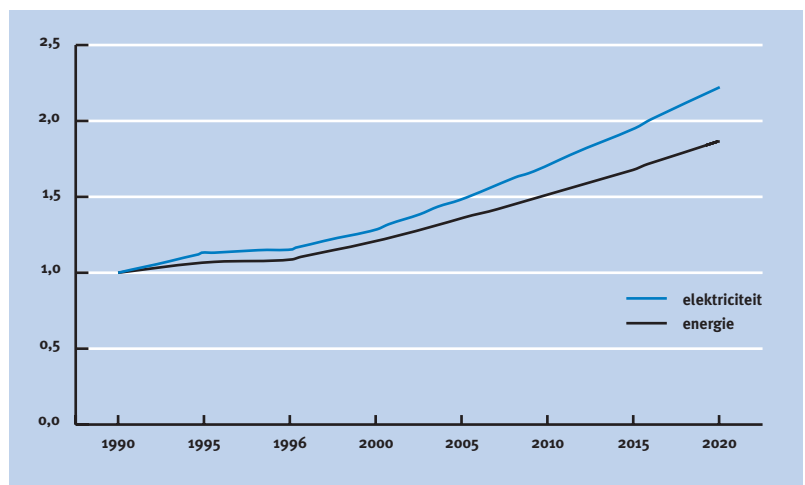
Het elektriciteits- en energiegebruik in Nederland ten opzichte van het gebruik in 1990. In beide gevallen is het verbruik van 1990 gelijk gesteld aan 1. In dat jaar vond 10,7% van het energiegebruik plaats via elektriciteit [CBS, 1997; CBS, 1998].



Ook op mondiaal niveau is dit zichtbaar: de International Energy Outlook 1997 [IEO, 1998] voorspelt een toename van het totale elektriciteitsgebruik met bijna 2,7% per jaar tot 2020, terwijl het totale energieverbruik met 2,3% zal groeien (zie fig. 1.2.2).

Fig. 1.2.2

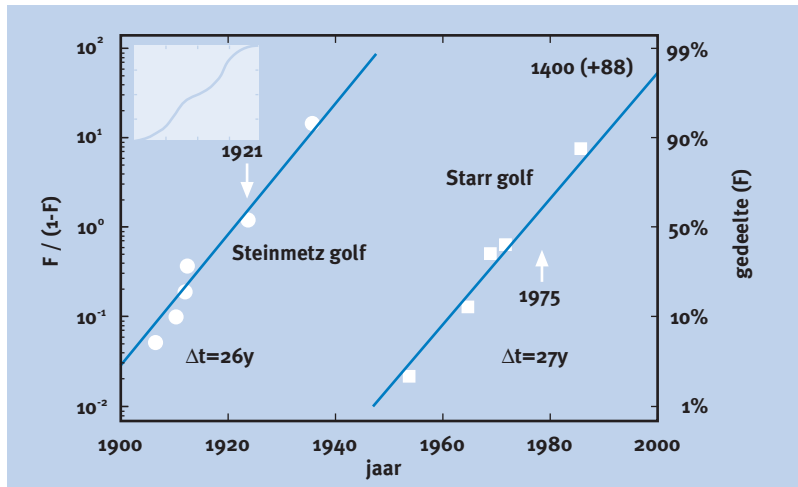
Wereldtoename elektriciteits- en energiegebruik ten opzichte van het verbruik van 1990. Ook hier zijn beide waarden in 1990 gelijk gesteld aan 1. [IEO, 1998].



Wanneer de historische evolutie van de capaciteit van het elektriciteitssysteem wordt beschouwd, zijn S-vormige groeicurven zichtbaar waarbij de tweede S-curve bovenop de eerste komt (zie inzet in fig. 1.2.3). Deze curven kunnen worden gelineariseerd tot twee lijnen. Fig. 1.2.3 toont de evolutie van de maximale capaciteit van de hoogspanningslijnen in de VS. De maximale capaciteit groeit in twee curven, een met het centrum in 1921, de tweede met het centrum in 1975¹. De tweede curve toont een tijdelijk plafond bij een lijnspanning van 1,5 megaVolt (750 kV wordt nu reeds toegepast). De periode van innovatieve activiteit strekt zich echter slechts uit over de eerste helft van de golf, het resterende deel bestaat uit consolidatie. Volgens het in fig. 1.2.3 getoonde model zal het patroon zich herhalen, waarbij het begin van een nieuwe golf rond 1995 ligt. Hoewel het begin van de curve plat en dus moeilijk te plaatsen is, lijkt het waarschijnlijk dat we aan de vooravond staan van een nieuwe innovatieperiode, die uiteindelijk zal leiden tot lijnen met een zeer hoge capaciteit (5 - 10 GW) die continenten overbruggen [Ausubel, 1996]. Ongetwijfeld zullen de in dit boek geschetste technologieën een grote rol spelen in deze nieuwe innovatieperiode, die zichtbaar zal worden in het begin van de volgende eeuw.

Fig. 1.2.3

Evolutie van de maximale capaciteit van de hoogspanningslijnen in de VS. Als maat voor de capaciteit is het kwadraat van het hoogste operationele voltage genomen ($kV^2/1.000$). Het cijfer wijkt weliswaar af van de echte capaciteit, maar geeft een consistente maat voor trendanalyse. De methode die Ausubel gebruikt heeft voor het lineariseren van de S-curven komt uit [Meyer, 1994]. De gegevens zijn afkomstig van het Edison Electric Institute, Washington D.C.



De toename van het elektriciteitsgebruik heeft voor een groot deel te maken met een toename in welvaart, maar ook met een aantal bijzondere eigenschappen van elektriciteit. Deze eigenschappen worden hieronder besproken.

¹ Ausubel en Marchetti hebben de curven vernoemd naar C.P. Steinmetz, een belangrijke innovator bij General Electric in het begin van de 20e eeuw, respectievelijk naar C. Starr, de leider van het in 1975 opgerichte Electric Power Research Institute.

Het gebruik van elektriciteit gaat niet gepaard met chemische omzettingen. De omzetting van elektriciteit naar warmte, licht, koude, beeld, of geluid geschiedt zonder schadelijke afvalstoffen zoals NO_x , CO_2 of SO_2 . Voor de gebruiker is dit van groot belang. Het maakt een ongecompliceerd gebruik in de directe omgeving van de gebruiker mogelijk. Het enige wat de gebruiker hoeft te doen om de gewenste functie te vervullen is het juiste apparaat inschakelen.

Deze eenvoudige toepassing heeft er tevens toe geleid dat een grote hoeveelheid hulpmiddelen voorzien is van elektriciteitsopslag, waardoor de gebruiker gedurende beperkte tijd onafhankelijk wordt van het stopcontact. Voorbeelden lopen uiteen van boormachines tot mobiele telefoons.

Omdat de omzetting van elektriciteit in de meeste gevallen zonder chemische bijproducten of zeer hoge temperaturen geschiedt, is het onderhoud meestal beperkt tot het mechanische gedeelte van de omzetters. Ter illustratie: een elektromotor gaat (vrijwel onderhoudsvrij) 250.000 uur mee, een benzinemotor (waarvan ook nog eens regelmatig de olie ververst wordt) 5.000 uur.

Het regelbereik van elektrische energie strekt zich uit van het loslaten van één elektron tot het sturen van de enorme stromen die gebruikt worden voor het hoogspanningstransport van elektriciteit. De goede regelmogelijkheden maken het mogelijk de elektrische energie (met een minimum aan verspilling) precies daar toe te passen waar het nodig is. Voorbeelden zijn het maken van een puntlas in staal of de extreem nauwkeurige verplaatsingen van een waferstepper voor de productie van IC's.

1.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERMAGENSTECHNIEK

Ook in Nederland ontstond enige jaren geleden in beperkte kring de overtuiging dat een nieuwe golf van innovatie in de elektrotechniek op handen was. Deze overtuiging was gebaseerd op de technische ontwikkelingen die op dat moment plaatsvonden en in gang gezet werden. Vooral de toepassing van halfgeleiderschakelaars voor hoge vermogens gaf aanleiding tot het signaleren van een behoefte aan kennisontwikkeling en de introductie van de term elektromagnetische vermogenstechniek [Kampen, 1995]. In 1996 werd de Vereniging voor ElektroMagnetische VermogensTechniek² opgericht, waarin industrie en kennisinstellingen zijn verenigd. Doel van de vereniging is het stimuleren van de ontwikkeling van nieuwe kennis en producten waarin vermogenselektronica en elektromagnetisme een centrale rol spelen. Elektromagnetische vermogenstechniek werd door de vereniging gedefinieerd als:

‘ontwikkeling en onderzoek op het gebied van elektromagnetische systemen met een hoge schakelfrequentie, een hoog vermogen en een hoog rendement’.

De beoogde kennisontwikkeling ligt onder andere op het gebied van de veldsynthese (zie par. 1.6) en is niet alleen van toepassing op systemen met hoge vermogens. Zij is ook van belang voor kleine vermogens, zoals die bijvoorbeeld voorkomen in een elektrische auto (motor, vermogenselektronische regeling, opslagmiddelen) of in een spaarlamp. De kennis is eigenlijk toepasbaar voor alle systemen, waarin elektromagnetische velden zoveel invloed hebben dat de

² Vereniging EMVT,
Postbus 190
2700 AD Zoetermeer
emvt@fme.nl

gangbare (netwerk) rekenmethoden niet meer alleen van toepassing zijn. Dit kan veroorzaakt worden door miniaturisatie, grote stroomdichtheden en hoge frequenties, maar speelt uiteraard ook bij het ontwerp van elektromechanische omzeters.

Een bredere, meer natuurkundige definitie is de volgende:

Elektromagnetische vermogenstechniek is de techniek die betrekking heeft op het ontwerpen, genereren, beheersen en benutten van elektromagnetische velden in ruimte en tijd.

Dat wil zeggen dat op elk tijdstip en op elke plaats in de driedimensionale ruimte zowel het elektrische veld E als het magnetische veld H bekend zijn en beheerst of bestuurd kunnen worden. Naast de onderlinge faserelatie en grootte is ook de richting van deze vectorgrootheden van belang.

Welke definitie ook gehanteerd wordt, de rol van de elektromagnetische vermogenstechniek in onze maatschappij kan niet los gezien worden van de overige ontwikkelingen in de elektriciteitsvoorziening en in het gebruik van elektriciteit. In dit boek wordt behalve aan de elektromagnetische vermogenstechniek dan ook ruime aandacht geschonken aan andere innovaties op het gebied van elektrische technologie.

1.4 TRENDS IN VERMOGENSELEKTRONICA

prof. J.A. Ferreira³

ALGEMENE TRENDS

De 'bouwstenen' van de vermogenselectronica zijn in de afgelopen jaren gestaag verbeterd, en nieuwe technologieën zijn geïntroduceerd. De belangrijkste stuwende kracht werd gevormd door verbeteringen aan de halfgeleider-elementen. Deze elementen worden toegepast als elektronische schakelaars, die gestuurd kunnen worden door speciale analoge stuurschakels. De halfgeleider-elementen worden tussen duizend en een miljoen keer per seconde (met schakelfrequenties van 1 kHz tot 1 MHz) geschakeld. Door de duur (breedte) van een schakelpuls te variëren, wordt het mogelijk de gemiddelde waarde van spanning en stroom te veranderen. Door filters toe te voegen kunnen 'nette' spanningen en stromen gegenereerd worden, waarmee het vermogen voor de aansturing van bijvoorbeeld elektromotoren geregeld kan worden.

Ook deze filters moeten de ontwikkelingen in de halfgeleider-elementen bijhouden. Hoewel de ontwikkelingen in transistoren en thyristoren de meeste aandacht krijgen, zijn de technologische ontwikkelingen in passieve componenten zoals condensatoren, spoelen en hoogfrequente transformatoren minstens even belangrijk. In feite vormen deze passieve componenten in veel gevallen

³ Technische Universiteit Delft,
Faculteit ITS, Opleiding
Elektrotechniek,
Postbus 5031
2600 GA Delft
J.A.Ferreira@ITS.TUdelft.NL

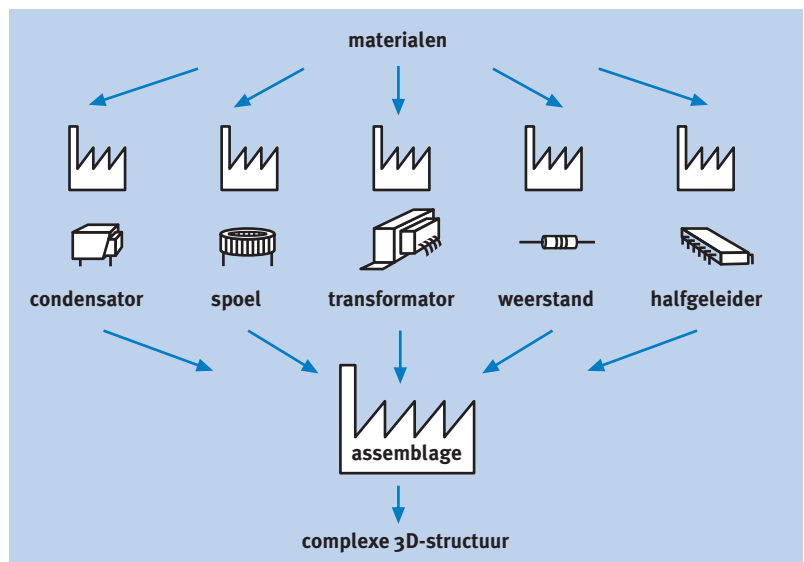
een probleem, zoals blijkt uit het toegenomen aantal bijdragen over passieve componenten bij conferenties over vermogenselektronische toepassingen.

Vermogensklasse en schakelsnelheid bepalen het gebied van en de variaties in toepassingen. Hoge-schakelspanningen en maximale stroomsterkten betekenen meer 'spierkracht' en maken omzetter voor grotere vermogens mogelijk. Snellere aan- en uitschakelkarakteristieken maken hogere schakelsnelheden mogelijk, wat weer leidt tot hogere vermogensdichtheden. Het streven naar hogere vermogens is nog steeds een belangrijk speerpunt, maar het streven naar (nog) hogere schakelsnelheden heeft aan belangstelling ingeboet. Dit komt omdat snel schakelen een aantal ongewenste neveneffecten heeft. Allereerst vergroot het de kansen op interferentie met andere apparatuur. Deze interferentie wordt elektromagnetische interferentie (EMI) genoemd en kan optreden in de vorm van hoge frequenties in de netgeleiders, maar ook als straling door de antennewerking van het convertercircuit. Fabrikanten worden gedwongen converters te ontwikkelen met lage EMI-emissies om te voldoen aan de regels voor elektromagnetische compatibiliteit (EMC). Het is dan ook niet ongebruikelijk voor fabrikanten van omzetter om compromissen in schakelfrequentie en energiedichtheid te sluiten om daarmee interferenties in het hogere frequentiespectrum te vermijden.

Een tweede probleem met snel schakelen komt voor in snelheidsregelingen voor aandrijvingen. Studies geven aan dat de snel veranderende spanningen ook leiden tot snellere veroudering van het isolatiemateriaal in de machinewikkelingen. De snelle spanningsveranderingen kunnen ook reflecties veroorzaken in de kabels die de vermogenselektronische inverter met de elektrische machine verbinden, wat te hoge spanningen over de motor veroorzaakt. Ook dit heeft als

Fig. 1.4.1

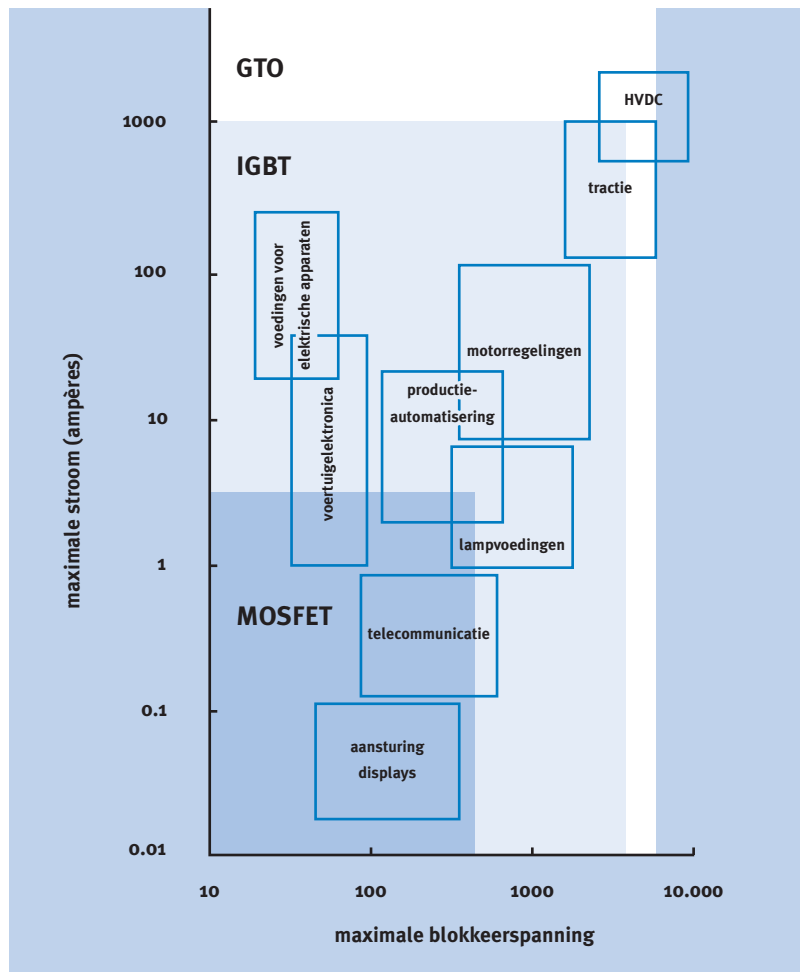
Stappen in de fabricage van vermogenselektronische systemen.



resultaat dat fabrikanten de schakelsnelheden van de halfgeleider-elementen bewust beperken.

De integratie van elektronische schakelingen⁴ introduceerde een spiraal van lagere kosten bij toenemende functionaliteit. Hiermee werd de huidige informatie-revolutie mogelijk gemaakt. Helaas hebben vermogens-elektronische schakelingen nog weinig geprofitteerd van deze technologieën en worden de meeste vermogensomzeters nog steeds beschouwd als discrete elementen. Zoals in fig. 1.4.1 te zien is, worden de verschillende componenten in verschillende fabrieken geproduceerd met uiteenlopende technieken. De componenten worden dan gemonteerd tot een schakeling, over het algemeen via handmatige, arbeidsintensieve fabricagemethoden. De industrie heeft de meeste aandacht voor het goedkoper en efficiënter maken van dit proces. De belangstelling is verschoven van schakelingen en architectuur naar technologieën voor fabricage, behandeling en behuizing van vermogenshalfgeleiders en andere componenten [Staffiere, 1998].

Fig. 1.4.2
Toepassingsgebieden voor vermogenshalfgeleiders. Vrij naar [Baliga, 1996].



4 Tot Integrated Circuits (IC's of chips).

De belangrijkste trend voor het begin van het volgende millennium is misschien wel de integratie van vermogenselektronica, bedoeld om de converters goedkoper te maken. Verschillende methoden van integratie en behuizing worden momenteel onderzocht, en we kunnen op dit gebied belangrijke ontwikkelingen verwachten.

HALFGELEIDERELEMENTEN

De ontwikkelingen in halfgeleiders hebben de laatste jaren over een breed gebied groei veroorzaakt in de toepassing van vermogenselektronica. De industrietaak is met meer dan 10% per jaar gegroeid en de verwachtingen zijn dat deze trend doorzet [Bloom, 1998]. Fig. 1.4.2 toont enige toepassingen. De verschillen in spanning en stroom zijn zo groot dat een logaritmische schaal nodig is. Bij spanningen beneden 500 V en maximale vermogens beneden 2 kW hebben MOSFET's hun positie als meest geschikte actieve componenten gehandhaafd. Technologische ontwikkelingen in de laatste 15 jaar hebben het mogelijk gemaakt de aan-weerstand van MOSFET's te reduceren met een factor 10, zodat vermogensschakelaars nu in IC-behuizingen kunnen worden geplaatst zonder dat extra koeling nodig is.

Dit effent de weg naar nieuwe toepassingsgebieden zoals microsystemen voor mobiele telefoons. Nieuwe op MOSFET-gebaseerde componenten worden ontwikkeld met gebruikmaking van kennis en fabricageprocessen uit de IC-technologie, en worden gefabriceerd met dezelfde productiefaciliteiten [Scharf, 1998].

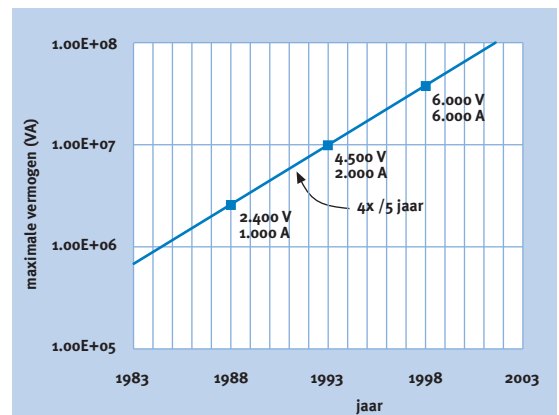
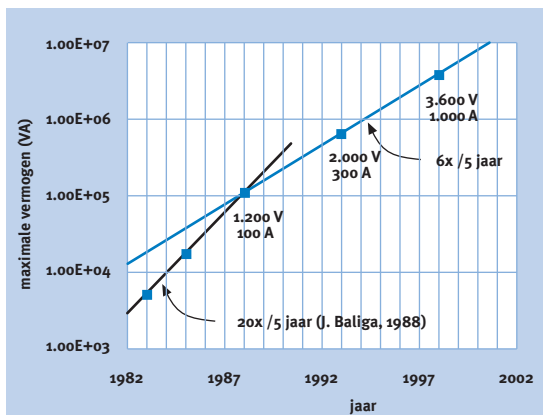
Bij spanningen tussen 400 V en 1 kV die gewoonlijk toegepast worden in drie-fasenapparatuur in de industrie hebben Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT's) de Darlington bipolaire transistors vervangen. De IGBT combineert de stroomdichtheid en de lage verliezen van de bipolaire transistor met de schakelsnelheid en de eenvoudige aansturing van de MOSFET. De stroomdichtheid is drastisch verbeterd in de laatste jaren, en ook de blokkeerspanning is gestaag toegenomen.

Fig. 1.4.3

[links] Vooruitgang in het maximale vermogen van Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT)-schakelaars tussen 1983 en 1998. Naar [Brown, 1998].

Fig. 1.4.4

[rechts] Vooruitgang in het maximale vermogen van de Gate Turn Off thyristor (GTO). Naar [Brown, 1998].



men. De relatief hoge uitgangsimpedantie⁵ van IGBT's heeft een opschaling van de stroom mogelijk gemaakt door meer elementen parallel te schakelen.

Het spanningsgebied boven 1 kV behoort traditioneel aan thyristors, en sinds het begin van de jaren tachtig heeft de Gate Turn Off thyristor (GTO) een belangrijke rol gespeeld in toepassingen voor hoge spanning en hoog vermogen, zoals aandrijving in treinen en omzetters in de elektriciteitsvoorziening. Zoals blijkt uit fig. 1.4.3 hebben ook de IGBT's een ontwikkeling doorgemaakt in zowel vermogen als in maximale spanning en daarmee worden ze ook geschikt voor toepassingen in dit spanningsgebied.

In beide gevallen zijn deze verbeteringen het gevolg van het opschalen van de stroom. Steeds meer IGBT's worden parallel geschakeld, en GTO's worden tot een diameter van 150 mm geproduceerd en maken gebruik van de ontwikkelingen in de substraat- en productietechnologie voor digitale schakelingen.

Wat betreft het vermogen kan de IGBT niet op tegen de GTO. Dit is het gevolg van compromissen, die in de halfgeleiderkarakteristieken moeten worden gemaakt om snel schakelen mogelijk te maken. In de geleidende staat hebben beide halfgeleiderelementen extra ladingsdragers om de weerstand te verlagen. Deze techniek, de modulatie van het geleidingsvermogen, is essentieel voor het snel schakelen van grote vermogens. Voordat een bipolair halfgeleider-element uitgeschakeld kan worden, moet het overschot aan ladingsdragers (gaten en elektronen) worden verwijderd. Bij een IGBT vindt deze ontlading intern plaats, net zoals een lekkende condensator zichzelf ontladend. Ook kan een extern circuit gebruikt worden om de lading uit de halfgeleider te halen, zoals een condensator via een externe weerstand kan ontladen. De GTO werkt op de laatste manier en omdat daar de interne condensator niet hoeft te 'leken', is het mogelijk om hogere 'extra' ladingsconcentraties te creëren. Dit heeft tot gevolg dat met de GTO behoorlijk hogere stroomdichtheden en blokkeerspanningen te bereiken zijn dan met de IGBT.

In een vergelijking tussen de vermogens van de IGBT en de GTO bleek de GTO een 40% hogere blokkeerspanning en een drie maal grotere benutting van het siliciumoppervlak te hebben [Bernet, 1998].

Een interessant alternatief ten opzichte van de conventionele GTO is de 'hard driven' versie die geïntroduceerd werd door ABB, de Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT). Door enkele technische verbeteringen, de optimalisatie voor hoge stroomdichtheden en hoge spanningen, en een slim elektronisch circuit voor de aansturing werd een grote stap gemaakt in halfgeleiderschakelaars. De IGCT kan zeer hoge vermogens schakelen, en kan bovendien zo snel schakelen dat de extra schakelingen (snubbers) die een conventionele thyristor nodig heeft om de schakelverliezen te reduceren, overbodig zijn.

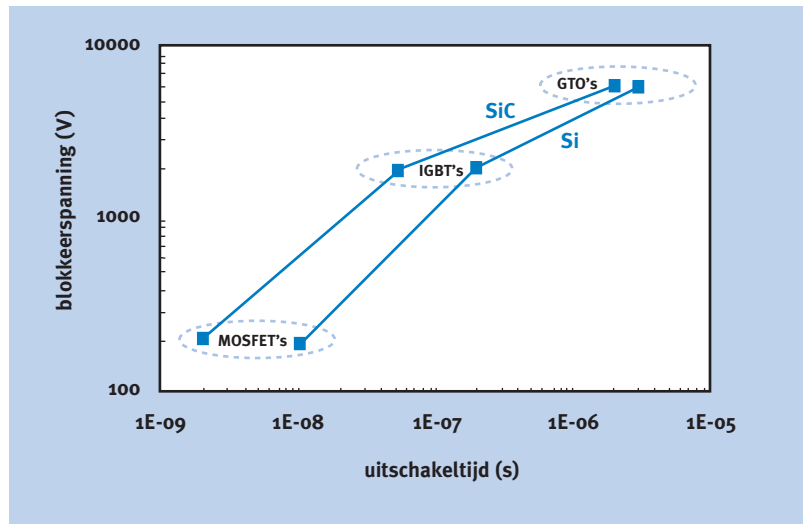
⁵ Frequentieafhankelijke weerstand.

HOGERE BEDRIJFSTEMPERATUREN

Het onderzoek naar en de ontwikkeling van hoge-temperatuurelektronica is de afgelopen jaren sterk toegenomen. Dit werd gestimuleerd door eisen voor de toepassing in auto's, vliegtuigen, ruimteschepen en 'data-logging' systemen. Voedingen en vermogenselektronica zijn in dergelijke toepassingen altijd aanwezig en deze systemen moeten dan ook voldoen aan de gestelde eisen. De standaard op silicium gebaseerde componenten hebben een maximale werkt temperatuur van 85 °C. Met een behuizing volgens de militaire specificaties kunnen ze functioneren tot 125 °C. Voor het bereiken van temperaturen tot ongeveer 200 °C is een gecoördineerde inspanning nodig die alle componenten van de schakeling onder de loep neemt.

Fig. 1.4.5

Vergelijking tussen blokkeerspanning en uitschakeltijd van SiC- en Si-componenten. Een kortere uitschakeltijd maakt een hogere schakelfrequentie mogelijk. Naar [Brown, 1998].



Voor de halfgeleidervermogens-elementen kan een alternatief halfgeleidermateriaal, siliciumcarbide (SiC) functioneren tot 400 °C. De ontwikkeling van componenten op basis van deze en andere materialen zal een belangrijke stuwende kracht vormen voor de vermogenselektronica. De ontwikkelingen voor hoge temperatuurbestendigheid zijn niet alleen van belang voor het functioneren onder verhoogde temperatuur. Hoe hoger de toegestane interne bedrijfstemperatuur van een component is, hoe hoger de vermogensdoorvoer van de component kan zijn. Dit geldt voor de pn-junctie van een halfgeleider, maar ook voor de windingen van een elektromagneet of het diëlektricum van een condensator. De hogere temperatuurbestendigheid is een middel om de vermogensdichtheid te vergroten. Naar [Rodrigues, 1998; White, 1998].

PASSIEVE COMPONENTEN

Passieve componenten zoals spoelen, transformatoren en condensatoren moeten meegroeien met de ontwikkelingen in de halfgeleideren. Betere, betrouwbare converters eisen dat de passieve componenten kunnen functioneren bij snel wisselende stromen en spanningen en hogere vermogens. De magneetmaterialen zijn gestaag verbeterd en betere isolatiematerialen zijn geïntroduceerd⁶. Enige fundamentele elektromagnetische beperkingen maken dat de combinatie van hoge schakelfrequentie en hoog vermogen moeilijk te implementeren is in magnetische componenten, speciaal in converters waar een hoogfrequente verbinding nodig is.

In converters voor inductieverwarming⁷ (met een hoog vermogen en hoge frequenties) zijn de magnetische componenten en de condensatoren de beperkende factor, niet de halfgeleiders.

Gelukkig is een hoogfrequente verbinding niet noodzakelijk voor aandrijvingen en tractie, de grootste markt voor hoog-vermogenshalfgeleiders.

Hoog-vermogensinverters die gebruik maken van de nieuwe hoog-vermogens-halfgeleiderschakelaars moeten worden aangesloten op een DC-voeding, en er zijn goede condensatoren nodig om de spanning constant te houden. Een andere belangrijke toepassing van condensatoren is de met hoge energiepulsen werkende 'power conditioning'⁸ waar pulstijden van 0,05 tot 1.000 μs op megavolt-niveau nodig zijn. Daarbij zijn pulsvermogens van gigawatts nodig. Helaas zijn de elektrolytische condensatoren de meest kwetsbare componenten in vermogensomzetters. In deel 2, par. 5.2 wordt dieper ingegaan op condensatoren en supercondensatoren.

Ook bij de passieve componenten wordt onderzoek verricht naar componenten voor hoge temperaturen. Voor magnetische componenten kunnen hogere-temperatuurisolatiematerialen gecombineerd worden met magneetmaterialen, zoals permalloy en molypermalloy, die succesvol hebben gefunctioneerd tot 200 °C. Voor condensatoren bieden keramische diëlektrica de beste mogelijkheden, en maken dan temperaturen tot 500 °C mogelijk.

Over het algemeen blijven de ontwikkelingen in de passieve componenten achter bij de eisen die gesteld worden voor toepassing in schakelingen met steeds snellere halfgeleiders.

6 Zie deel 2, par. 2.4, Permanente magneten en magneetmaterialen.

7 Zie deel 2, par. 6.2.3, Inductieve verwarming.

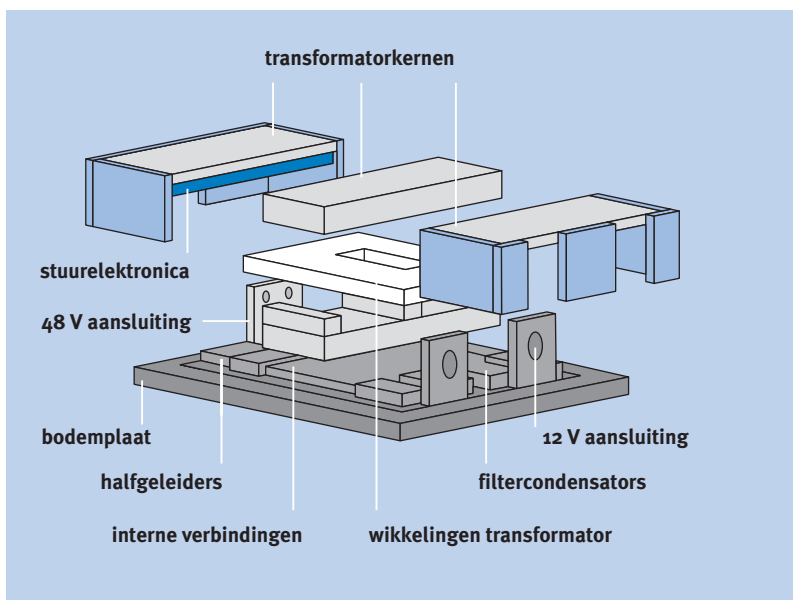
8 'Power conditioning' wordt gebruikt voor het beheersen van de kwaliteit en de stabiliteit van de elektriciteitslevering.

INTEGRATIE

De integratie van vermogenselektronica stelt ons voor grote uitdagingen. Ware integratie vereist een driedimensionale structuur, omdat volume nodig is om de energie op te slaan die nodig is voor het schakelend omzetten van vermogens. Het uiteindelijke doel is het integreren van een converter uit halfgeleiders en passieve componenten in één module.

Fig. 1.4.6

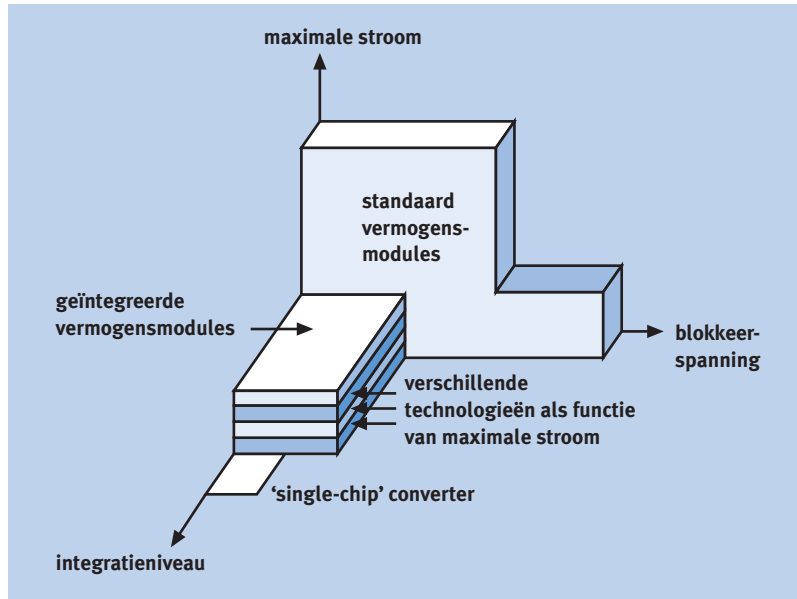
Gelaagde vermogensomzetter
[Ferreira, 1997].



Een dergelijke module zou een platte vorm hebben om een groot contactoppervlak te creëren voor de effectieve afvoer van warmte naar een koelelement. Een grote uitdaging ligt in het vinden van technologieën voor de verschillende passieve componenten, die met elkaar gecombineerd kunnen worden in het productieproces. De snelheid van materiaaldepositie beperkt het volume van de structuren die met de bestaande productieprocessen voor micro-elektronica gemaakt kunnen worden. Deze processen zijn daarom ongeschikt voor het maken van toepassingen met vermogens boven enkele Watts. Een mogelijkheid om hogere vermogens te halen is het toepassen van keramische diëlektrica, magnetische materialen en geleiders in een meerlaagsstructuur (zie fig. 1.4.6). Enige vooruitgang op dit gebied wordt beschreven in [Ferreira, 1997] en [Bower, 1997]. Hoewel er beperkte vooruitgang is geboekt in het integreren van passieve componenten zijn er snelle ontwikkelingen in het integreren en verpakken (in de behuizing) van het halfgeleiderdeel van de vermogensomzeters. Niet alleen de productiekosten zijn hierdoor verlaagd, maar ook het ontwerp en de invoering van vermogensomzeters is eenvoudiger geworden. Voor de integratie van het halfgeleiderdeel van omzeters voor lage vermogens kunnen bestaande micro-elektronicotechnieken gebruikt worden. De eerste stap was het integreren van de aansturing-, diagnostische en beschermingsfuncties op één siliciumchip. Monolithische integratie met MOSFET's wordt momenteel met groot succes toegepast tot spanningen van 75 V en stroomsterkten tot 5 A. Een recent ontwikkelde techniek maakt het mogelijk om IGBT's in een blok te integreren tot spanningen van 600 V. Nieuwe isolatietechnieken worden gebruikt om de IGBT's van de omzetter van elkaar te isoleren, en van de sturing en controlesecties. Het is mogelijk alle functies van een motorregeling

Fig. 1.4.7

Vermogen van op de markt verkrijgbare IGBT-modules. Vrij naar [Bruckmann, 1998].



of een DC-voeding op een enkele chip te integreren, inclusief een interface naar een microcontroller [Endo, 1998]. Volgens de stand van de techniek van 1998 is het mogelijk converterchips te maken tot 2 A., die direct op de gelijkgerichte 230/380 V AC-spanning functioneren.

De trend naar het integreren van halfgeleiderfuncties ten opzichte van de maximale spanning en stroom wordt zichtbaar gemaakt in fig. 1.4.7. De IGBT leent zich voor de integratie bij hogere vermogens, omdat deze weinig vermogen nodig heeft voor de stuurschakelingen, terwijl de bipolaire werking hoge spanningen en stroomsterkten mogelijk maakt.

Op het hoogste integratieniveau zien we de 'single-chip' converter, op het laagste integratieniveau zien we grote halfgeleiderelementen die gemonteerd worden op een grondplaat, onderling verbonden en van een behuizing voorzien.

Externe aansluitklemmen zijn voorzien voor vermogensaansluitingen en stuursignalen. Op het lage integratieniveau zijn de behuizing en de fysieke integratie van grote halfgeleiderelementen de aandachtspunten, terwijl functionele integratie geen aandacht krijgt. Voor de hoogste niveaus van spanning en stroom is niet alleen de prestatie van de halfgeleiders van belang. De toepassing van geschikte technieken voor het delen van spanningen en stroom in combinatie met een goede warmteafvoer maken vermogens tot in het megawattgebied mogelijk. De stroom- en spanningsassen van de grafiek in fig. 1.4.7 zullen zich in het komende decennium dan ook sprongsgewijs verlengen.

Bij de middelgrote vermogens worden hybride integratietechnieken gebruikt om de aansturings-, de beschermings- en de diagnostische functies in een behuizing te integreren. Deze geïntegreerde modules zorgen voor DC-isolatie van de stuursignalen, zodat deze direct aangestuurd kunnen worden door een

microcontroller. De modules zijn echter nog kostbaar en de interface met de overige elektronica is nog niet flexibel genoeg. De huidige oplossingen zullen dan ook vervangen worden door hogere niveaus van systeemintegratie. Daarvoor worden nieuwe concepten met nieuwe materialen voor warmteafvoer, nieuwe chipconfiguraties en betere 'bonding'⁹-technieken ontwikkeld. Het scala van hybride technieken zal zich verder uitbreiden. Met printplaten is het vermogen beperkt tot ongeveer 750 W, dikke-filmtechnieken maken vermogens tot 4 kW mogelijk en 'direct copper bonding' (DCB) op keramisch materiaal maakt vermogens tot 10 kW mogelijk. Naar [Scharf, 1998].

CONCLUSIE

Het eerste accent bij de ontwikkeling van vermogenshalfgeleiders zal liggen op een verlaging van de kostprijs en op de integratie rond de reeds gerealiseerde schakelfrequenties.

De huidige vermogenshalfgeleiders zijn reeds zo krachtig dat bij de toepassing ervan in converters de eigenschappen van de passieve componenten een beperkende factor vormen. De condensatoren en magneetelementen lopen in specificaties zo ver achter bij de halfgeleiders dat voor de meeste toepassingen de verdere ontwikkeling hiervan nu belangrijker is dan de ontwikkeling van nog krachtiger halfgeleiders.

Dit gegeven speelt in sterke mate bij het realiseren van compacte omzeters (modules) met deze componenten. Hierbij moet op basis van de elektromagnetische en thermische eigenschappen van diëlektrica, condensatoren, magneetmaterialen, geleiders en halfgeleiders een driedimensionale structuur ontworpen en gebouwd worden. Nieuwe kennis over de modellering en beheersing van elektromagnetische velden is noodzakelijk voor de succesvolle toepassing van deze componenten.

1.5 HISTORIE

De eerste vorm waarin elektriciteit werd onderkend was statische lading. De Griekse filosoof Thales van Milete ontdekte in 600 v. Chr. dat wanneer er met bont over stukjes amber (gefossiliseerde hars) gewreven werd, de amber veertjes en dergelijke kon aantrekken. De Grieken noemden de stukjes amber 'elektrons'. In de 16e eeuw ontdekte William Gilbert dat er twee soorten statische elektriciteit bestonden, die van amber en die van glas. De verschillende soorten trekken elkaar aan en stoten dezelfde soort af. Gilbert introduceerde als eerste het woord 'electricity'.

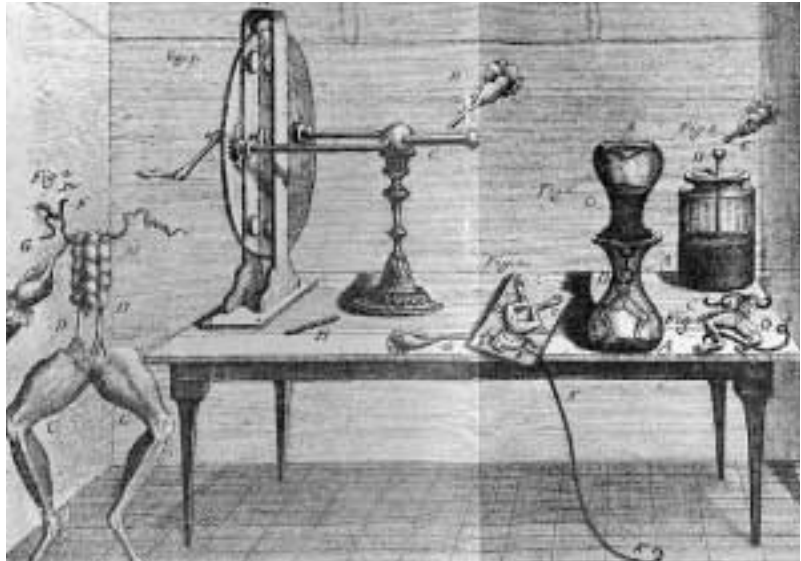
Benjamin Franklin en William Watson concludeerden in 1747 onafhankelijk van elkaar dat alle materialen een 'elektrische vloeistof' bezaten, die vrijelijk in materie kon doordringen, maar die niet gecreëerd of vernietigd kon worden.

.....
⁹ De verbindingen van het halfgeleidermateriaal naar de overige halfgeleiders en naar de soldeervlakken van de behuizing.

Het wrijven met een doek of met bont draagt de vloeistof van het ene voorwerp naar het andere, waardoor beide voorwerpen 'geëlektrificeerd' worden. Twintig jaar later leidde Joseph Priestley, een vriend van Franklin, af dat de aantrekkingskracht tussen twee geladen voorwerpen kwadratisch afneemt bij een toenemende afstand tussen de voorwerpen. Charles de Coulomb slaagde er via experimenten in de theorie van Priestley uit te werken tot wat wij nu kennen als de wet van Coulomb, die een mathematische beschrijving geeft van de elektrostatische aantrekkingskracht. De naam Coulomb leeft voort in de eenheid van lading de Coulomb (C).

Fig. 1.5.1

Hulpmiddelen waarmee Galvani 'dierlijke elektriciteit' onderzocht. Hoewel Galvani met kikkers ook werkende elektrochemische cellen bouwde, was Volta de eerste die een houdbare verklaring voor het fenomeen vond.



In 1780 dacht Luigi Galvani dat de in zijn laboratorium waargenomen samen-trekking van een kikkerpootje het gevolg was van elektriciteit. Volgens Galvani ontstond de elektriciteit in het dier of in de atmosfeer. Tijdens zijn experimenten met 'atmosferische elektriciteit' ontdekte Galvani dat ook een kikkerpoot die tussen een messing haak en een stalen rooster hing, samentrok. Alessandro Volta toonde aan dat de combinatie van messing en ijzer, gescheiden door de (geleidende) weefsels van de kikkerpoot elektriciteit genereerde. De kikkerpoot fungeerde slechts als detector. In 1800 slaagde Volta erin dit effect te versterken in de eerste batterij: een stapeling van platen van koper en zink, gescheiden door karton of vilt dat was gedrenkt in pekkel. Hiermee ontdekte Volta een bron van elektriciteit die vloeide als een stroom water in tegenstel-ling tot de plotselinge (statische) ontladingen die tot dusver bekend waren.

De beweging van de lading (die hier met de batterij gegenereerd werd), wordt elektrische stroom genoemd. De grootte van de stroom is de hoeveelheid lading die per seconde een bepaald punt passeert.

Fig. 1.5.2

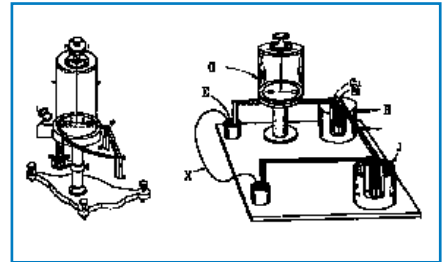
[links] *Replica van de batterij van Volta.*

Fig. 1.5.3

[rechtsboven] *Het laboratorium van Edison.*

Fig. 1.5.4

[rechtsonder] *Testopstellingen van Ohm.*



De Deense natuurkundige Hans Cristian Oersted ontdekte in 1819 dat een ladingverplaatsing door een draad de stand van een kompasnaald veranderde. Kort daarna formuleerde André Ampère de wet van de magnetische kracht. Michael Faraday en Joseph Henry beschreven het ontstaan van een elektrisch veld door een veranderend magnetisch veld, het principe van magnetische inductie. Faraday was de eerste die erin slaagde uit beweging een elektrische stroom van enige praktische waarde te genereren. Hij slaagde daarin in 1831 door een magneet in een spoel te bewegen.

In 1827 demonstreerde Georg Ohm dat de stroom door een draad toeneemt in directe verhouding met de spanning en de oppervlakte van de draaddoorsnede. Ook ontdekte hij dat de stroom bij toenemende lengte evenredig afnam. Zo introduceerde hij het begrip weerstand. De weerstand wordt uitgedrukt in ohm, ofwel volt/ampère.

Ampère, Faraday en Henry bereidden de weg voor de algemene elektromagnetische theorie van James Clerk Maxwell, die gebundeld werd in zijn boek 'Treatise on electricity and magnetism' dat uitkwam in 1873.

Fig. 1.5.5

Twee van de vergelijkingen van Maxwell. De linker vergelijking beschrijft het ontstaan van een spanning over een geleider die beweegt door een magnetisch veld (magnetische krachtlijnen snijdt). De rechter stelt dat een elektrische stroom altijd omringd is door een magnetisch veld. Beide vergelijkingen zijn wetenschappelijke uitwerkingen van eerdere ontdekkingen van Faraday.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \qquad \nabla \times H = i + \frac{\partial D}{\partial t}$$

In 1870 bouwde Thomas Edison de eerste praktische gelijkstroomgenerator die hij gebruikte voor zijn laboratorium. In 1882 verlichtte hij de eerste straat in New York ermee. Inmiddels – in 1878 – had de Engelse wetenschapper Joseph

Swan de elektrische gloeilamp uitgevonden. Een gezamenlijk bedrijf van Edison en Swan produceerde de eerste bruikbare gloeilampen. Tot die tijd werd elektrisch licht verzorgd door onhandige booglampen.

In 1886 werd in Nederland de eerste elektrische centrale gebouwd. Deze centrale produceerde gelijkstroom en stond in Kinderdijk. De eerste centrale met een algemene nutsfunctie werd in 1899 geopend in Bloemendaal. Deze centrale had een vermogen van 132 kW en produceerde eveneens gelijkstroom. De elektriciteit werd voornamelijk gebruikt voor verlichting.

Fig. 1.5.6

[links] De gloeilamp van Joseph Swan. Hoewel sinds 1838 lampen met gloei-elementen van houtskool of platina in vacuüm gemaakt werden, werd de gloeilamp die in 1879 door Swan en Edison werd ontwikkeld, pas echt een succes.

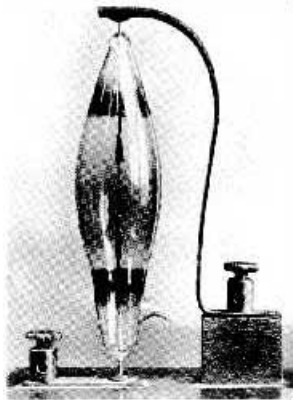
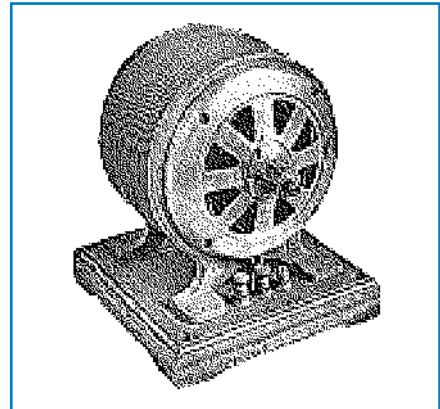


Fig. 1.5.7

[rechts] Tesla's meervasenmotor/wisselstroomgenerator.



Hoewel Edison overtuigd was van de voordelen van gelijkstroom voor het genereren van elektriciteit, werd die mening niet door iedereen gedeeld. In 1888 patenteerde Nicolai Tesla het principe van het roterende magnetische veld, wat resulteerde in de eerste wisselstroomgenerator. Het is deze generator die aan de basis ligt van onze huidige elektriciteitsvoorziening.

In 1901 werd in IJmuiden de eerste wisselstroomcentrale in Nederland geopend met een vermogen van 200 kW. Doordat de wisselstroom eenvoudig met een transformator naar 5.000 V hoogspanning te brengen was, kon een groot gebied van elektriciteit worden voorzien. Tot ver in de 20e eeuw zouden in Nederland wisselstroom- en gelijkstroomcentrales naast elkaar blijven bestaan, ieder met hun eigen verzorgingsgebieden.

Het bestaan van het elektron als kleinste discrete eenheid van elektrische lading werd aan het eind van de 18e eeuw bewezen door Sir Joseph Thomson en anderen. In 1906 slaagde Robert Millikan samen met zijn student Harvey Fletcher erin de lading van een elektron te bepalen. De lading bleek negatief te zijn en een grootte te hebben van $1,60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Millikan kreeg de Nobelprijs voor zijn ontdekking.

Fig. 1.5.8

Zwevende kikker in een buis in een zeer sterke magneet. De moleculaire magnetische krachten in de kikker (en in andere objecten) blijken in zeer sterke magneetvelden voldoende voor magnetische levitatie.



In 1997 speelt de kikker weer een grote rol in het elektromagnetische onderzoek, wanneer een kikker het eerste levende wezen wordt dat zweeft in een magneetveld (van 16 tesla). De kikker scheen deze keer geen last te hebben van het experiment.

Voor deze paragraaf werd gebruik gemaakt van [Taylor, 1996; Wagner, 1994; TUD, 1998a; TUD, 1998b; Smit, 1997, Geim, 1997].

1.6 VELDSYNTHESE

*dr. W.A. van Kampen*¹⁰

INLEIDING

De algemene toepassing van snel schakelende vermogenshalfgeleiders in de schakelende elektrische netwerken¹¹ heeft nog niet geleid tot een goed toepasbaar theoretisch model. In principe zijn de bouwstenen aanwezig in de vorm van de theorie van Faraday-Maxwell. De wijze waarop de theorie is geformuleerd, staat echter ver af van onderzoek en ontwikkeling van nieuwe elektromagnetische constructies. De verwachting bestaat dat een nog grotendeels ontbrekend onderdeel van de theorie van het elektromagnetische veld – de veldsynthese – het kernonderdeel zal gaan vormen van de toekomstige onderbouw van nieuwe methoden en toepassingen in de elektrotechniek en de elektrofysica.

¹⁰ Magnetics Enterprise,
Wolsteeg 2c
2311 TP Leiden
magnetics@worldaccess.nl

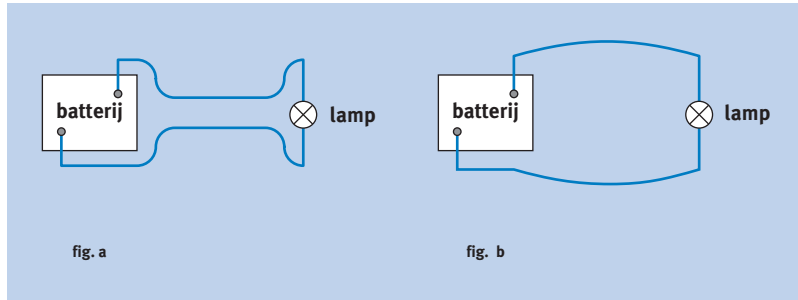
¹¹ Vermogenselektronische
schakelingen berusten vaak op het
zeer snel in- en uitschakelen van
stromen.

HET NETWERKCONCEPT

De schijnbare eenvoud van een lamp die met een batterij wordt verbonden en gaat branden blijkt op een wonder te berusten. Worden de draden die de batterij met de lamp verbinden op een geheel andere wijze neergelegd, zoals afgebeeld in fig. 1.6.1a en b, dan brandt de lamp even hard. Dit leidde oorspronkelijk tot de idee dat de elektrische energie van de batterij via de draden naar de lamp stroomt.

Fig. 1.6.1

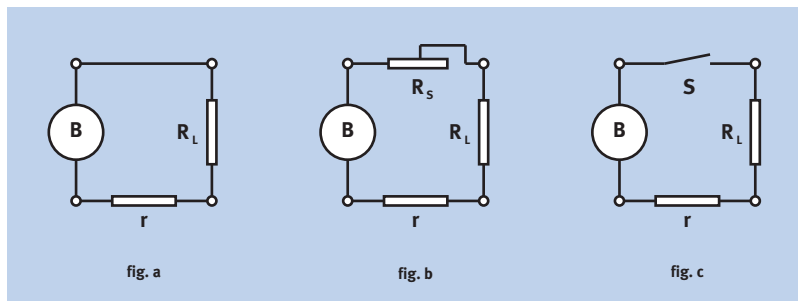
Twee opstellingen van een batterij met een lamp.



De theorie van het elektromagnetische veld leert anders. Niet de verbindingsdraden vervoeren de elektrische energie, maar het elektromagnetische veld in de ruimte rondom de draden. De grootte en de vorm van het elektromagnetische veld worden mede bepaald door de wijze waarop de draden in de ruimte zijn gepositioneerd. Het wonder schuilt in het feit dat hoewel de elektromagnetische velden in fig. 1.6.1a en b zeer verschillend zijn in beide gevallen evenveel energie van de batterij naar de lamp stroomt.

Fig. 1.6.2

Elektrisch netwerk.



Het verschijnsel dat de opstelling van elektrische onderdelen en verbindingen in veel gevallen een te verwaarlozen invloed heeft leidde tot het theoretische model van het elektrische netwerk. In fig. 1.6.2a is het circuit van fig. 1.6.1 als elektrisch netwerk getekend met één maas en vier knooppunten. De netwerkelementen zijn de elektrische bron B, de totale elektrische weerstand r van de verbindingen, en de weerstand R_L van de lamp die de belasting vormt. De fysiek aanwezige weerstand wordt verondersteld te zijn samengebracht in de weerstand r . In het model van een netwerk wordt tot uitdrukking gebracht hoe de

componenten samenhangen, niet hoe de componenten en de verbindingen ruimtelijk zijn opgesteld. Twee fysiek verschillende netwerken kunnen eenzelfde netwerkpresentatie hebben en worden geanalyseerd met eenzelfde model. De netwerkanalyse is een uitgebreid bestudeerd onderwerp, mede vanwege het feit dat de mathematische beschrijving van een elektrisch netwerk elegant en sluitend is.

Het vraagstuk van het samenstellen van een netwerk als de eigenschappen waaraan het netwerk moet voldoen gegeven zijn, vormt het gebied van de netwerksynthese. Een gevraagde eigenschap kan bijvoorbeeld zijn hoe in een van de netwerkelementen de elektrische spanning dient te variëren. Een aantal methoden zijn bekend om netwerken met gevraagde eigenschappen samen te stellen. Met behulp van een computer is een netwerk in korte tijd te analyseren. Hierdoor is het mogelijk iteratiemethoden toe te passen om een netwerk met gevraagde eigenschappen te vinden. De netwerksynthese levert geen uitsluitend over hoe het netwerk ruimtelijk is opgesteld.

SCHAKELENDE NETWERKEN

Om de sterkte waarmee de lamp van fig. 1.6.2a brandt te regelen, kan in serie met de lamp een regelbare weerstand worden opgenomen (zie fig. 1.6.2b). Voorheen werden veel regelingen op deze wijze uitgevoerd. De aandrijfmotor van een tram werd geregeld met een weerstand die mechanisch met de hand of met elektrische relais van grootte werd veranderd. De regeling berust op het feit dat er minder energie in de belasting terecht komt door een gedeelte van de door de bron geleverde energie in warmte om te zetten. Ook in de elektronica werd vermogen voor het merendeel geregeld door energie te dissiperen in weerstanden. Het gevolg van de dissipatie was een laag rendement van bijv. 50%. Een geheel ander wijze van regelen is om met een schakelaar de energiestroom al dan niet te laten vloeien (fig. 1.6.2c). Om de energiestroom gelijkmatig te kunnen veranderen, moet de schakelaar zeer snel kunnen schakelen. Met de komst van vermogenshalfgeleiders werd dit mogelijk. Zowel in de open als gesloten toestand dissipeert de halfgeleider weinig energie, waardoor het rendement van schakelende regelingen 98 à 99% kan bedragen.

PROBLEMEN MET HET NETWERKCONCEPT

Tijdens het schakelen veranderen de stroom en de spanning in het netwerk en het elektromagnetische veld tussen de geleiders snel. Het elektromagnetische veld tussen de geleiders straalt energie uit naar de omgeving. Hierdoor wordt het nu *wel* van belang hoe de verbindingen zijn gepositioneerd in de ruimte, en treden er onvoorspelbare elektrische spanningen op over de uiteinden van de verbindingen in het netwerk. Dit heeft als *fundamenteel* gevolg dat het netwerkconcept niet meer geldig is en dat de resultaten die op grond van het model worden verwacht, niet meer in overeenstemming zijn met de werkelijke situatie.

Het toch toepassen van het netwerkmodel leidt met schakelende netwerken tot grote problemen met betrekking tot het defect raken van componenten en een vaak onbekende verlaging van de levensduur.

De analyse van een schakelend netwerk kan slechts plaatsvinden als het elektromagnetische veld dat het netwerk opwekt, in de analyse wordt meegenomen. Dit werkt in systemen ver door: niet alleen in het netwerk, maar ook in de samenstellende componenten zoals motoren, actuators en generatoren is het noodzakelijk het elektromagnetische veld te analyseren en te kennen. Hiermee is veldanalyse noodzakelijk geworden waar voorheen met netwerkanalyse kon worden volstaan.

Het belang van het hoge rendement en de soepelheid en snelheid van regelen heeft tot gevolg dat schakelende netwerken algemeen worden toegepast. Daarmee worden alle moderne systemen, waarin het elektromagnetische veld voor energietransport wordt gebruikt, aangestuurd door vermogenselektronische systemen. Voorbeelden zijn te vinden in vervoer, opslag en in actuators. Wordt een nieuwe elektrische constructie ontworpen of een nieuw concept onderzocht, dan dient men in de eerste plaats het elektromagnetische veld in de constructie vorm te geven om het gewenste resultaat te bereiken. Dit houdt in dat veldsynthese de kern vormt van de nieuwe ontwikkeling in elektromagnetische constructies.

NOODZAAK TOT ONTWIKKELEN VAN VELDANALYSE EN VELDSYNTHESE

De verschijnselen in een elektromagnetisch veld zijn abstract en sluiten beperkt aan bij zintuiglijke waarnemingen.

De theorie van het elektromagnetisme zoals deze werd geformuleerd door Faraday en Maxwell is gecompliceerd en moeilijk te doorgronden. Nog steeds ontbreekt een formulering en een voorstelling van het elektromagnetische veld die aansluiten bij ons voorstellingsvermogen.

Alleen in eenvoudige gevallen is het mogelijk bij gegeven randvoorwaarden een elektromagnetisch veld theoretisch te analyseren in ruimte en in tijd.

Numerieke oplossingen zijn soms mogelijk voor problemen die niet analytisch zijn op te lossen. Ook wanneer een krachtige computer ter beschikking staat, is het bepalen van een enigszins gecompliceerd driedimensionaal veld uit gegeven randvoorwaarden tijdrovend en moeilijk.

Veldsynthese bestaat uit het vinden van de fysieke randvoorwaarden die een gewenst veld opleveren. Die randvoorwaarden zijn de verdeling van de materie: waar bevinden zich magnetisch of elektrisch geleidend materiaal, isolerend materiaal, materiaal met bijzondere eigenschappen en de energiebronnen.

Om een elektromagnetisch veld vorm te geven, wordt een vertaalslag gemaakt van wat er in de stoffelijke wereld dient te gebeuren naar een samenvoeging van materialen en energiebronnen die leiden tot het elektromagnetische veld

dat voldoet. Bij veldsynthese is geen systematische methode voorhanden voor het vinden van een oplossing. Bij een nieuwe constructie wordt daarom vaak teruggegrepen op bestaande configuraties. In dat geval is de vorm in hoofdlijnen bekend en ligt het zwaartepunt op het analyseren van veranderingen. Men is nu aangewezen op het voorstellingsvermogen van uitvinders en ontwerpers. Industrieel zal kennis van veldsynthese een sterk wapen zijn. Nu gaat nog veel geld en tijd verloren in het uitproberen van constructies via ‘trial and error’ en blijven mogelijkheden onbenut. Met deze kennis kunnen nieuwe constructies worden geconcipeerd, worden kostbare vergissingen vermeden en zal de ontwikkeltijd van nieuwe producten worden bekort.

Het is waarschijnlijk dat veldsynthese een fundamenteel gereedschap in de industrie zal worden en daarom is het belangrijk om in een vroeg stadium aan deze ontwikkeling deel te nemen.

Wetenschappelijk gezien is veldsynthese een grote uitdaging, de theorie staat nog aan het begin. Een eerste stap zou kunnen zijn een theoretisch juiste formulering van het elektromagnetische veld te vinden die aansluit bij ons voorstellingsvermogen. Dat is ook van groot belang bij het analyseren van velden. Wanneer we deze weg verder volgen, valt een doorbraak in de ontwikkeling van veldanalyse en veldsynthese te verwachten.

1.7 OVER DIT BOEK

Stroomversnelling is het resultaat van de samenwerking van 77 deskundigen uit Nederland en België. Zij hebben in een stuurgroep en vier werkgroepen in belangrijke mate inhoud gegeven aan het project. Een groot deel van hen vindt u terug bij de in totaal 62 auteurs van dit boek. STT is alle betrokkenen dan ook veel dank verschuldigd. Achterin het boek kunt u meer lezen over de organisatie van de studie en de betrokkenen.

Het boek bestaat uit twee delen. In Deel 1 wordt vanuit drie belangrijke toepassingsgebieden een beeld geschetst van de veranderingen in de elektriciteitsvoorziening en in het gebruik van elektriciteit. Dit beeld wordt aangevuld met de verwachtingen voor belangrijke technologieën op die specifieke toepassingsgebieden. Over het algemeen is 2020 als tijdshorizon gehanteerd.

Deel 2 biedt een overzicht van elektrische technologieën die in de komende decennia een rol zullen spelen, inclusief de technologieën die in de toekomstvisies van Deel 1 genoemd worden. De invalshoek is hier de technologie, met het accent op werkingsprincipes, stand van de techniek en toekomstverwachtingen. Ook de basisbegrippen op het gebied van elektriciteit zijn opgenomen in Bijlage 1 van Deel twee. Deze zijn vooral bedoeld voor lezers die geen (elektro)technische achtergrond hebben.

De scheiding in twee delen is aangebracht om de technische innovaties, die vaak op meer hoofdstukken van Deel 1 van toepassing zijn overzichtelijk samen te brengen en ze in één keer de aandacht te geven die zij verdienen. Ook komt er zo in Deel 1 ruimte voor meer toepassings specifieke aspecten van de technologie. Alleen wanneer de technische informatie onontbeerlijk is voor het begrip van onderwerpen in het eerste deel, is van deze scheiding afgeweken.

Terwijl het accent van de vorige publicatie van STT over elektriciteit (Elektriciteit in perspectief) vooral lag bij op industriële toepassingen, is deze keer gekozen voor een breder kader. Daarbij staat de elektriciteitsvoorziening op verschillende schaalniveaus centraal, aangevuld met de toepassingen in het vervoer.

REFERENTIES

- Ausubel, J.H., C. Marchetti, *Electron: electrical systems in retrospect en prospect*, Deedalus No. **125**, Journal of American Academy of Arts and Sciences, Cambridge, MA USA, Summer (1996), <http://phe.rockefeller.edu/Deedalus/Elektron/>
- Bernet, S., R. Teichmann, A. Zucherberger, P. Steiner, “Comparison of High Power IGBT’s and Hard Driven GTO’s for High Power Inverters”, 1998 IEEE Applied Power Electronic Conference Record, pp 711 - 718. IEEE (1998)
- Bloom, L.J., “Past, Present and Future Dynamics within the Power Supply Industry”, 1998 IEEE Applied Power Electronic Conference Record, pp 278 - 283. IEEE (1998)
- Bower, J.S., D.C. Hopkins, W.J. Sarjeant, “Packaging issues for next generation high voltage, high temperature power electronic modules”, 1997 IEEE Applied Power Electronic Conference Record, pp 413-418. IEEE (1997)
- Brown, E.R., “Megawatt solid-state electronics”, Darpa Electronics Technology Office, <http://web-ext2.darpa.mil/ETO/HPSS/1998MgWts.html> (1998)
- Bruckmann, M., R. Sommer, M. Fasching, J. Sigg, “Series connection of High Voltage IGBT Modules”, 1998 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp1067 - 1072. IEEE (1998)
- Campbell, C.J., J.H. Laherrère, *The end of cheap oil*, Scientific American, March (1998)
- CBS, *Energiedragerbalansen* (1997)
- CBS, *Tijdreksen energie* (1998)
- Colett, T.S., V.A. Kuuskraa, *Hydrates contain vast store of world gas resources*, Oil & Gas Journal, 11 May 1998 pp. 90-95 (1998)
- ECN, *Nationale energieverkenningen 1995-2020*, ECN Beleidsstudies (1998)
- Endo, K., T. Kawano, Y. Koashi, K. Otsuka, Y. Osawa, “A 500V, 1A 1-Chip inverter on SOI Wafer”, Proceedings of PCIM’98, pp. 145-149, PCIM (mei 1998)
- EZ, *De derde energienota*, Ministerie van Economische Zaken (1996)

- EZ, *Vervolgnota klimaatverandering*, Ministerie van Economische Zaken (1997)
- Ferreira, J.A., Hofsaier, I.W., Wyk, J.D. van, “Exploiting the third dimension in power electronics packaging”, 1997 IEEE Applied Power Electronic Conference Record, pp 419-423. IEEE (1997)
- Geim, A.K., M.V. Berry, *Of flying frogs and levitrons*, European Journal of Physics, Vol. **18** (1997)
- Geim, A.K., *Molecular magnetism and levitation* (1997), <http://www-hfml.sci.kun.nl/hfml/levitate.html>
- IEO, *International energy outlook 1998*, Energy Information Administration, USA (1998)
- Jayant Baliga, B., “Trends in Power Semiconductor Devices”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol 43, No. 10, October 1996. IEEE (1996)
- Kampen, W.A. van, *Elektromagnetische vermogenstechniek in de maatschappij, de wetenschap en de industrie*, Initiatiefgroep EMVT (1995)
- Meyer, P., *Bi-logistic growth*, Technological Forecasting and Social Change, No. **47** (1994)
- Rodriques, R.G., et al, “Operation of Power Semiconductors at their thermal limit”, 1998 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp 942 -953. IEEE (1998)
- Scharf, A., “State-of-the art and future trends”, PCIM Europe, issue 3/1998, pp 106-126 PCIM Europe (1998)
- Smit, J.J., *De levensduur van de elektrische infrastructuur*, rede bij aanvaarding hoogleraarschap, Technische Universiteit Delft, 28 mei (1997)
- Staffiere, D., J. Sarjeant, “Power Technology Roadmap”, 1998 IEEE Applied Power Electronic Conference Record, pp 3-8, IEEE (1998)
- Staffiere, D., J. Sarjeant, “Capacitors as an element in advanced power sources in power electronic systems”, 1997 IEEE Applied Power Electronic Conference Record, pp 596-601, IEEE (1997)
- Taylor, L., *Gallery of electromagnetic personalities 1996*, <http://www.ee.umd.edu/~taylor/frame1.htm>
- TUD, Werkgroep Geschiedenis der Elektrotechniek TUD, *James Clerk Maxwell*, Technische Universiteit Delft (1998b), <http://historia.et.tudelft.nl/wggesch/geschiedenis/personen/maxwell>
- TUD, Werkgroep Geschiedenis der Elektrotechniek TUD, *The history of electricity*, Technische Universiteit Delft (1998a), <http://historia.et.tudelft.nl/wggesch/geschiedenis/electricity/>
- Wagner, J.W., Oersted, Faraday and Tesla (1994), <http://www.personal.umich.edu/~wagnerb/homepage.htm>
- White, C.S., et al, “High temperature electronic systems using silicon semiconductors”, 1998 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp 967-976. IEEE (1998)

1

2

Elektriciteit in de wijk

2.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden mogelijkheden geschetst voor de toekomst van de elektriciteitsvoorziening in de woonomgeving. Duurzaamheid en betrouwbaarheid vormen met een aantal andere afwegingen de uitgangspunten. Deze worden gecombineerd met verwachtingen voor algemene ontwikkelingen en vervolgens uitgewerkt in een aantal toekomstbeelden van woonwijken. Om te illustreren hoever de mogelijkheden uiteenlopen, is gekozen voor een omschrijving van vier duidelijk verschillende situaties.

De eerste wijk 'all electric' wekt per jaar evenveel energie op als er gebruikt wordt en is verbonden met het elektriciteitsnet, maar heeft geen verbinding met het aardgasnet. De tweede wijk 'synergie' is zowel met het aardgasnet als het elektrische net verbonden en bestaat als enige gedeeltelijk uit bestaande bouw. De derde wijk 'groene weelde' is een ruim opgezette duurere wijk met aandacht voor duurzame opwekking. Tot slot schetsen we in 'autark' een zelfvoorzienende wooneenheid, die in principe alleen is aangesloten op de waterleiding.

Voordat de wijken beschreven worden gaan we in op de integratie en optimalisatie in gebouwen, waarna we het blikveld verruimen naar de wijk. De toekomstige wijk zal een complexe structuur van vraag en aanbod van energie kennen met als kenmerk dat een groot deel van het aanbod ongeregeld is. Dat wil zeggen dat er elektriciteit aan het net geleverd wordt, onafhankelijk van de vraag naar elektriciteit op dat moment. Dit vraagt meer inzicht in de patronen van vraag en aanbod. Daarom is er behalve voor de energiebalans ook aandacht voor de patronen van vraag en aanbod.

Na de beschrijving van de wijken wordt een overzicht gegeven van de techniek die deel zal uitmaken van de toekomstige elektrische infrastructuur in de wijk. Het hoofdstuk wordt afgesloten met conclusies, een agenda voor mogelijke onderzoeksrichtingen en een korte beschrijving van opties voor de industrie en de dienstensector.

Allereerst zullen we de uitgangspunten beschrijven. Het algemene toekomstbeeld voor de beschreven wijken is een energievoorziening die veel minder afhankelijk is van fossiele brandstoffen dan nu het geval is.

2.1.1 UITGANGSPUNTEN

Duurzaam

Duurzame ontwikkeling is een belangrijke factor in de komende eeuw. De nieuwbouwwijk van 2020 zal reeds in ruime mate door het streven naar duurzaamheid beïnvloed zijn. Een vaak geciteerde definitie voor duurzame ontwikkeling is die van de commissie Brundtland: *Die ontwikkeling die voorziet in de behoeften van het heden zonder aantasting van de mogelijkheden van toekomstige generaties om te voorzien in hun eigen behoeften.*

Het is een definitie die voor veel interpretaties vatbaar is, maar die als zij voldoende serieus genomen wordt impliceert dat ieder gebruik van grondstoffen uit eindige bronnen gecompenseerd moet worden door deze weer aan te vullen, of door het beschikbaar maken van even veel grondstoffen uit nieuwe bronnen. Voor de grondstoffen voor energie geldt dat aanvullen noch compenseren mogelijk is. Het benutten van schijnbaar onuitputtelijke bronnen als zon en wind biedt een oplossing.

Wanneer we dit betrekken op de elektriciteitshuishouding op lokaal niveau, kunnen we daarvoor de volgende uitgangspunten formuleren:

- Zo efficiënt mogelijk opwekken, transporteren, distribueren en gebruiken van elektriciteit.
- Daarnaast zo veel mogelijk duurzame elektriciteit lokaal opwekken. Deze duurzame elektriciteit ook weer zo veel mogelijk lokaal gebruiken.
- Duurzame zelfopwekking wordt bevoordeeld ten opzichte van zelfopwekking uit fossiele brandstoffen.
- Schadelijke emissies in dichtbebouwde gebieden worden zo veel mogelijk teruggedrongen.

Comfortabel

De levering van elektriciteit moet blijven voldoen aan de wensen van de klant, zowel in kwantitatief als in kwalitatief opzicht. Maximale betrokkenheid van

consumenten bij het energieverbruik wordt gestimuleerd, maar beheer en onderhoud gebeuren bij voorkeur door professionele organisaties om te voorkomen dat de (veelal niet technische) consument extra belast wordt.

Rechtvaardig

Verdeling kosten infrastructuur

Iedereen met een aansluiting betaalt voor die aansluiting. Volledig autarkische wooneenheden hebben geen aansluiting, en betalen dus niet.

Energiekosten

In de 'energieongunstige' oude wijken zijn de aanpassingsmogelijkheden beperkt. Bovendien hebben veel huurders niet de mogelijkheid om verbeteringen aan te brengen. Dit dient mee te wegen bij eventuele beleidsmaatregelen (energieheffingen) en de verrekening van infrastructuurkosten.

Eigendom van oppervlak

Een moeilijk punt is het eigendom van oppervlak. De bewoners van meergezinswoningen (flats) hebben minder mogelijkheden om zelf energie te winnen dan bewoners die de beschikking hebben over veel dak- of grondoppervlak.

Betrouwbaar

De betrouwbaarheid van de levering van elektriciteit aan de consument moet minstens vergelijkbaar blijven met het huidige niveau. Hoewel goedkope stroomvoorziening met veel stroomstoringen regelmatig als mogelijkheid genoemd wordt, kleven hieraan vooral nadelen voor de consument. Het geringe percentage consumenten dat met 'doe het zelf' maatregelen als noodstroomvoorzieningen en accu's zal willen profiteren van een lagere prijs rechtvaardigt niet de overlast voor de anderen of de enorme investeringen in een dubbel net, dat per consument in betrouwbaarheid verschilt. Voor de grootverbruikers is differentiatie in kwaliteit en betrouwbaarheid wellicht wel zinvol.

Het net moet met behulp van intensief energiemanagement in staat zijn om de productiepieken van duurzame decentrale opwekkers te verwerken. Daarnaast dient het net de vraagpieken te kunnen verwerken, ook bij een tijdelijk gebrek aan capaciteit bij de decentrale opwekkers.

Betaalbaar

Algemeen wordt aangenomen dat elektriciteit in 2020 flink duurder zal zijn dan nu (1998). De prijzen van duurzaam opgewekte en fossiel opgewekte elektriciteit zullen (en moeten) naar elkaar toegroeien. Tevens is een deel van de consumenten bereid meer te betalen voor duurzaam opgewekte elektriciteit. Hoge energiekosten kunnen echter leiden tot een afname van het besteedbaar inkomen en van de overige consumptie.

Veilig

De veiligheid van het net moet minstens vergelijkbaar blijven met de huidige situatie. Kortsluitveiligheid en aanraakveiligheid moeten gewaarborgd blijven.

2.1.2 ALGEMENE ONTWIKKELINGEN

ir. P.G.M. Boonekamp¹, ir. J. Cace², ir. H.F.A. Sidler³

In aanvulling op de uitgangspunten kunnen algemene ontwikkelingen geschetst worden, die van invloed zullen zijn op alle typen wijken die hierna besproken worden. Men verwacht dat deze ontwikkelingen zich in meer of mindere mate zullen voordoen in de komende 25 jaar.

Prijzen van energie en de rol van de overheid

In de 19e eeuw was ‘materiaal’ de kostprijsbepalende factor, in de 20e eeuw werd dat ‘arbeid’, in de 21e eeuw zullen ‘kennis’, ‘energie’ en ‘water’ sterk bepalend zijn. Milieu, duurzaamheid, productiematiging en verwachtingen van schaarste zullen hierbij een rol spelen. De invulling van consumentenbehoeften zal over de gehele cyclus van grondstofwinning tot en met de afvalfase sterker worden beïnvloed door de energiekosten. Het energiegebruik van veel toepassingen zal flink dalen.

Het overheidsbeleid op het gebied van besparing, duurzame energie en ruimtelijke ordening zal een duidelijke rol spelen bij de ontwikkeling van de energievoorziening. Ook de invloed van de overheid op de marktwerking in de energievoorziening, de tarieven, de betrouwbaarheid en de kwaliteit van de elektriciteitslevering zijn van belang. Energie wordt duurder door een regulerende energiebelasting en ecologisering van het belastingstelsel.

Kosten van nieuwe infrastructuur

De kosten van de energie-infrastructuur zullen met toenemende besparingen en steeds meer duurzame energiesystemen op of nabij de woningen een steeds groter deel gaan vormen van de totale energieprijzen; het reduceren van de kosten van nieuwe infrastructuur zal toenemende aandacht krijgen.

Woningbouw

Bij het ontwerp van nieuw te bouwen wijken zal men steeds meer naar twee hoofdrichtingen neigen: naast ruim opgezette individualistische wijken worden wijken gebouwd met een hoge bebouwingsdichtheid en een combinatie van privé- en collectieve voorzieningen. De eerste categorie heeft een lage dichtheid en een groot te isoleren oppervlak, maar ook goede mogelijkheden voor het plaatsen van duurzame energiesystemen.

De tweede categorie heeft stedelijke bebouwingsdichtheden (en dus gestapel-

1 ECN Beleidsstudies,
Postbus 1
1755 ZG Petten
boonekamp@ecn.nl

2 ENW Duurzame Energie,
Postbus 9111
1800 GC Alkmaar

3 C.O.R.E. International,
Heuvelenweg 18
7241 HZ Lochem
CORE_international@
compuserve.com

de en geschakelde bouw) met veel openbaar groen. Auto's zijn 'weggewerkt' in de bebouwing, de woningen zijn voorzien van dak- en balkontuinen met een behoorlijke omvang. Door het relatief kleine transmissieoppervlak en de goede isolatie zijn hoge verwarmings- en afkoelingstijdconstanten te bereiken, waardoor airconditioning niet nodig zal zijn. Optimaal gebruik van daglicht zal de architectuur beïnvloeden.

Water

Water zal schaars en duur worden. Het gebruik van drinkwater wordt beperkt tot toepassingen die zuiver water nodig hebben. Lokale kleinschalige waterzuivering met behulp van waterpartijen en rietbedden zal in toenemende mate worden toegepast voor de productie van gebruikswater voor het bewateren van de planten en het wassen. Organisch afval en 'zwart water' zullen worden benut voor biogasproductie. De hoeveelheid groente- en fruitafval en de uitwerpselen van een gemiddeld gezin zijn onder bepaalde voorwaarden⁴ goed voor de productie van zo'n 3.500 MJ per jaar, genoeg voor het genereren van 390 kWh.

Toenemende zelfvoorziening

Door de al genoemde toenemende energiekosten en het toenemend 'energiebewustzijn' zal een tendens ontstaan naar meer eigen elektriciteitsproductie. De duurzame voorlopers in dit traject zullen de mensen met hogere inkomens in lage-dichtheidswijken zijn. Zij kunnen deze pioniersrol betalen en verwerven daarmee aanzien en status.

In bestaande woningen met een hoog warmtegebruik heeft de warmtegestuurde micro warmte/kracht (w/k) een kans als vervanger van de cv-ketel. Er komen eisen voor de uitstoot en de efficiëntie van deze w/k-eenheden. Ook geldt voor niet duurzaam opgewekte (decentrale) elektriciteit een andere terugleverregeling dan voor duurzaam opgewekte (decentrale) elektriciteit.

Rol nutsbedrijven

De nutsbedrijven zullen dicht bij hun klanten (moeten) komen. Dat zal beginnen met het beheer van kleine op biogas gestookte lokale w/k-centrales als aanvulling op de warmte en elektriciteit uit de andere duurzame systemen. Uiteindelijk kan ook waterzuivering gecombineerd met biogasproductie in de wijk plaatsvinden.

Er zal een verschuiving van het aanbieden van energiedragers naar het vervullen van functies (energiediensten) plaatsvinden. De grens tussen installateur en energiebedrijf vervaagt. Ook advies over energie aan de kleinverbruiker kan een taak worden van de energiebedrijven. Waar consumenten zich laten vertegenwoordigen door corporaties en verenigingen verschuift de consumentenmarkt in de richting van een zakelijke markt.

⁴ De vergisting dient dicht bij de bron plaats te vinden, de toiletten worden met weinig water en een onderdrukstelsel gespoeld. Het organische afval wordt geconserveerd door verzuring totdat de vergisting plaatsvindt.

2.2 INTEGRATIE EN OPTIMALISATIE OP GEBOUWNIVEAU

In deze paragraaf zullen we eerst aandacht besteden aan de mogelijkheden voor energiesystemen in gebouwen, waarna we een afweging maken tussen het toepassen van gelijkstroom en wisselstroom in de woning. De paragraaf geeft daarmee een overzicht van systemen die in toekomstige wijken kunnen worden toegepast.

2.2.1 INTEGRATIE EN OPTIMALISATIE OP GEBOUWNIVEAU

dr. W. Gilijamse⁵

Het patroon van vraag en aanbod van elektriciteit in de gebouwde omgeving zal de komende decennia sterk veranderen. Met de opkomst van de elektrische warmtepomp kan er bijvoorbeeld extra vraag naar elektriciteit optreden, met een nadruk op de winterperiode. Fotovoltaïsche systemen (PV) kunnen zorgen voor extra aanbod van elektriciteit, vooral in de zomerperiode. Toepassing van warmte/kracht (w/k)-koppeling kan tot elektriciteitsoverschotten leiden. In elk geval zal er een wisselend patroon van vraag en aanbod ontstaan. Opslag- en regelsystemen kunnen worden ingezet om dit patroon van vraag en aanbod bij te sturen.

In deze bijdrage zal nader op de ontwikkelingen in vraag en aanbod in de energievoorziening in de gebouwde omgeving worden ingegaan. Een gebouw of complex van gebouwen zal daarbij worden opgevat als een deelsysteem in het totale systeem van de elektriciteitsvoorziening. In dit deelsysteem dient een integrale afweging van de mogelijkheden voor efficiëntieverbetering en duurzame energieopwekking plaats te vinden. Dit houdt in dat de mogelijkheden op gebouwniveau op elkaar worden afgestemd, maar ook op ontwikkelingen in de elektriciteitsvoorziening op hogere schaalniveaus.

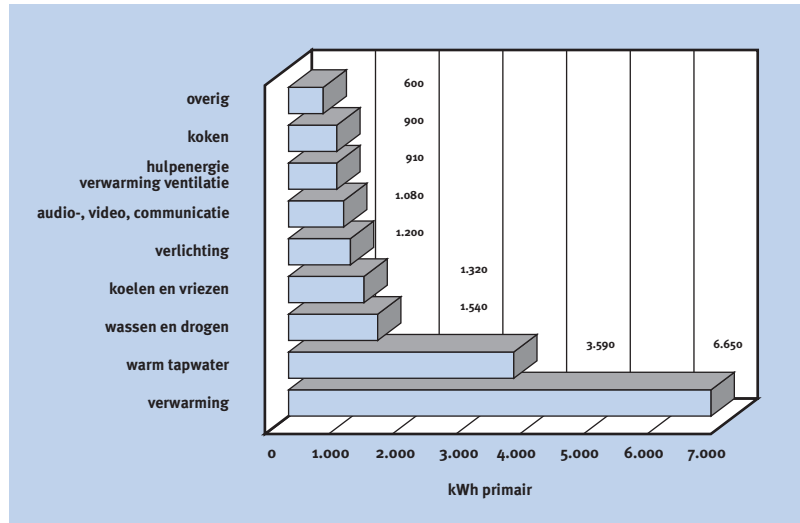
In gebouwen wordt energie ingezet voor een heel scala aan functies. Fig. 2.2.1 laat zien hoe het verbruik van energie in de verschillende functies eruit ziet in een gemiddelde nieuwbouwwoning die is gebouwd volgens de huidige normen. Ruimteverwarming en warm tapwater zijn de overheersende energievragers. In bestaande woningen is het aandeel ruimteverwarming in het totale energiegebruik nog groter. In kantoren maken de functies verlichting en kantoorapparatuur naast ruimteverwarming de hoofdmoot van de energievraag uit, met gebouwkoeling als energievragers in opkomst.

Voor ruimteverwarming en warm tapwater wordt in Nederland hoofdzakelijk aardgas gebruikt. Elektriciteit wordt gebruikt voor bijna alle andere energie-

.....
5 ECN Duurzame Energie;
Zon en Wind,
Postbus 1
1755 ZG Petten
gilijamse@ecn.nl

Fig. 2.2.1

Energiegebruik in een gemiddelde nieuwbouwwoning gebouwd volgens de normen van 1998. Getoond wordt het primaire energiegebruik in kWh, berekend volgens een gemiddeld opwekkingsrendement van 0,45. Cijfers op basis van [EnergieNed 1998a, EnergieNed 1998b], aangepast voor een nieuwbouwwoning volgens de normen van 1998, met een HR-combiketel, mechanische ventilatie met natuurlijke luchttoevoer en een energieprestatienorm (EP) van 1,2.



functies. Voor het koken wordt zowel aardgas als elektriciteit gebruikt. Slechts aan een klein deel van de gebouwen wordt lage-temperatuurwarmte geleverd via een warmtedistributienet, voornamelijk via een aantal grootschalige stadsverwarmingssystemen.

Zoals we zullen zien, gaat het bij systeemintegratie op gebouwniveau van de toekomstige elektriciteitsvoorziening niet alleen om de functies die thans met elektriciteit worden ingevuld, maar ook om functies waarvoor nu nog overwegend aardgas wordt gebruikt. Daarom worden in de volgende beschouwing van een integrale aanpak van de energievoorziening alle energiefuncties meegenomen, dus ook ruimteverwarming en warm tapwater.

VERMIJDEN-DUURZAAM-EFFICIËNT

Duurzaamheid is in de inleiding naar voren gebracht als een van de uitgangspunten bij de toekomstige energievoorziening. Het minimaliseren van het gebruik van eindige energiebronnen – met name fossiele brandstof – is hierbij de belangrijkste leidraad. Drie categorieën maatregelen kunnen hieraan bijdragen:

- De eerste categorie bestaat uit maatregelen die zorgen voor het vermijden van ‘onnodig’ energiegebruik. Beperking van de warmtevraag en het gebruik van efficiënte apparatuur zijn voorbeelden van zulke maatregelen.
- De tweede categorie maatregelen omvat het gebruik van lokale duurzame energiebronnen (zoals zon en wind) om zoveel mogelijk in de resterende energiebehoefte te voorzien.
- Voorzover lokale duurzame energiebronnen niet toereikend zijn, zullen extern aan te voeren energiedragers worden gebruikt zoals aardgas, elektriciteit uit het landelijk net, warmte uit grootschalige distributienetten. Deze energiedragers zo efficiënt mogelijk inzetten vormt de derde categorie maatregelen.

Deze drie categorieën samen vormen de zogenaamde energieladder ‘vermijden-duurzaam-efficiënt’.

Om tot een afweging tussen de verschillende mogelijkheden voor duurzame energievoorziening te komen, zullen verschillende criteria in acht worden genomen:

- Energetische criteria. Hierbij gaat het om de vraag of energetische doelstellingen worden gehaald. Voor nieuwe gebouwen geldt sinds 1995 in Nederland een energieprestatienormering, waarbij per gebouwtype is vastgesteld hoeveel energie gebruikt mag worden voor de belangrijkste ‘gebouwbonden’ energiefuncties zoals ruimteverwarming, warm tapwater, koeling en verlichting. Per locatie kunnen betrokken gemeenten of initiatiefnemers aanvullende eisen stellen.
- Economische criteria. Maatregelen met een gunstige verhouding tussen kosten en baten zullen het eerst voor marktintroductie in aanmerking komen. De energieprestatienormering laat de keuze van maatregelen vrij, zolang de energieprestatie maar gehaald wordt. Dit laat de initiatiefnemer of toekomstige gebruiker vrij om zelf de goedkoopste oplossing te kiezen. Fiscale maatregelen kunnen voor de verschillende maatregelen tot het bijsturen van de verhouding tussen kosten en baten leiden. Zo kunnen ‘groene hypotheek’ of andere vormen van ‘groenfinanciering’ de toepassing van ambitieuze pakketten maatregelen aantrekkelijker maken.
- Gebruikersaspecten. Hierbij gaat het om zaken zoals gebruiksgemak en comfort, die de gebruikersacceptatie beïnvloeden. Bij het ontwerp dient hiermee terdege rekening te worden gehouden. Als gebruikerswensen worden genegeerd, kan dit tot tegenvallende resultaten leiden. Zo worden ventilatiesystemen die te veel geluid maken of tochtverschijnselen teweegbrengen door bewoners uitgezet. Als een woning in de zomer te heet wordt, zal de bewoner alsnog airconditioning aanschaffen. Meer energiegebruik kan het resultaat zijn in plaats van de beoogde afname.
- Toekomstwaarde. Van een gekozen combinatie van maatregelen kan geëist worden dat deze ook op de iets langere termijn voldoet aan bovenstaande criteria. De levensduur van maatregelen is daarbij van belang, maar ook de mate waarin de energievoorzieningssystemen in het gebouw zich kunnen aanpassen aan veranderende omstandigheden. Maatregelen die structureel het energiegebruik verlagen – onafhankelijk van het aanbod van energiedragers in de toekomst – hebben een hoge toekomstwaarde.

EEN INTEGRALE AANPAK OP GEBOUWNIVEAU: VERMIJDEN VOOROP

Een integrale aanpak van de energievoorziening in een gebouw vraagt om een ‘bottom-up’ benadering van het energetisch ontwerp volgens de energieladder ‘vermijden-duurzaam-efficiënt’. De reden om met ‘vermijden’ te beginnen is dat

een energieaanbodstelsysteem alleen kan worden gedimensioneerd als de energievraag goed gedefinieerd is, wat inhoudt dat alle maatregelen om die vraag te beperken, dienen te zijn overwogen. De toekomstwaarde van gebouwen vraagt ook om maximale aandacht voor maatregelen die energiegebruik vermijden.

De belangrijkste maatregelen om energiegebruik in gebouwen te vermijden, liggen in het gebouwontwerp (of in bestaande bouw het renovatieontwerp). Met het ontwerp wordt de vraag naar warmte, koude en verlichting vastgelegd.

Ontwerpprincipes die tot beperking van de energievraag kunnen leiden, zijn:

- Passief gebruik van zonnewarmte. Dit houdt in dat zoveel mogelijk gebruik gemaakt wordt van invallende zoninstraling op het gebouw om de gewenste binnentemperatuur te handhaven. Dit kan door het optimaliseren van het raamoppervlak op de zuidgevel en een gebouwindeling die daaraan is aangepast. Ook complexere systemen kunnen worden toegepast, bijvoorbeeld zogenaamde ‘Trombe-wanden’ waarbij de invallende zonnewarmte met enige vertraging aan het gebouw wordt doorgegeven.
- Vasthouden van warmte. Dit kan door het toepassen van een hoog isolatieniveau en door het terugwinnen van warmte uit ventilatielucht. Op dit terrein zijn er de laatste jaren veelbelovende ontwikkelingen gaande: beglazing wordt in zeer hoog tempo verbeterd, rendementen op de terugwinning van warmte zijn inmiddels naar 90% gestegen. Intelligente regelsystemen kunnen zorgen voor ventilatie naar behoefte, waardoor onnodig warmteverlies wordt voorkomen.
- Passief koelen. In het Nederlandse klimaat kan in veel gevallen gebruik gemaakt worden van buitenlucht om te koelen. Tijdens de warmste periode van het jaar wordt dan vooral van de nachtelijke afkoeling gebruik gemaakt door het toepassen van zomernachtventilatie. Een combinatie van een goede zonwering en een hoge gebouwmassa maakt airconditioning in de meeste gevallen overbodig. Ook hier kunnen intelligente regelsystemen tot een betere beheersing van energiestromen leiden, bijvoorbeeld ‘schakelbare’ beglazing waarvan de eigenschappen kunnen worden gewijzigd al naar gelang de omstandigheden.
- Optimaal gebruik van daglicht. De gevelindeling en de gebouwplattegrond bepalen in hoge mate de mate waarin daglicht kan bijdragen aan de verlichtingsbehoefte. Bij een gekozen indeling kunnen nog aanvullende maatregelen genomen worden om daglicht zo diep mogelijk het gebouw in te krijgen: lichtplanken, spiegels, prisma’s, lichtkokers, bovenlichten. Omdat de lichtverhoudingen voortdurend wijzigen, is een goede sturing van de lichttoetreding nodig.

Hoofddoel is het maken van een gebouwontwerp waar de gebouwschil niet zozeer functioneert als ‘warme overjas’, maar als een flexibele omhulling die

naar gelang de omstandigheden lucht, zonnewarmte of zonlicht doorlaat of juist tegenhoudt. Het aanpassen van gebouwschileigenschappen aan de omstandigheden vraagt wel om goede regelsystemen. Integratie op gebouwniveau – zowel in het ontwerp als in het regelsysteem – is dan ook het leidende principe.

Het gebouwontwerp beïnvloedt met name de vraag naar ruimteverwarming en eventuele gebouwkoeling, en in mindere mate ook de vraag naar kunstverlichting. Ook bij het invullen van andere energiefuncties zijn belangrijke ontwikkelingen ten aanzien van de efficiëntie gaande. Hierbij kan gedacht worden aan koelapparatuur, kunstverlichting, wasmachines, vaatwassers, kookapparatuur en beeldschermen. Of deze ontwikkelingen tot een daadwerkelijke daling van de elektriciteitsvraag per huishouden of per m² kantooroppervlak leiden, is de vraag. Tot nu toe zijn deze ontwikkelingen tenietgedaan door een uitbreiding van de vraag naar meer functies: meer verlichting, grotere koelkasten, krachtigere computers, enz. Ook komen steeds nieuwe functies op: wasdrogers en waterbedden zijn energievreters waarvan de penetratie sterk toeneemt.

INTEGRAAL ONTWERP VAN HET ENERGIEVOORZIENINGSSYSTEEM: DUURZAAM EN EFFICIËNT

Naast de 'passieve' vormen van zonne-energie die met het gebouwontwerp samenhangen zijn er ook 'actieve' vormen van zonne-energie die kunnen bijdragen aan de energievoorziening.

Fotovoltaïsche zonne-energie (PV) op daken en gevels van gebouwen is in opkomst. Het potentieel is groot, en via groene financiering ontstaan langzamerhand meer mogelijkheden. Een goede integratie in het gebouwontwerp bespaart kosten en verhoogt de architectonische kwaliteit.

Zonnecollectoren kunnen worden ingezet voor ruimteverwarming of warm tapwater. Het meest simpele systeem is de zonneboiler die bestaat uit enkele vierkante meters zonnecollector en een warmteopslagvat van ongeveer 150 liter, waarmee in ongeveer de helft van de vraag naar tapwater in een woning voorzien kan worden. Naverwarming kan zowel met elektriciteit als met aardgas gebeuren. Vergroting van het collectoroppervlak maakt een bijdrage in de ruimteverwarming mogelijk, maar zeker in zuinige nieuwbouwwoningen is deze bijdrage beperkt, omdat de vraag slechts optreedt in een beperkt aantal wintermaanden waarin de zonnecollectoren slecht presteren. Alleen seizoenopslag van de door zon geproduceerde warmte maakt een substantiële bijdrage aan de ruimteverwarming mogelijk. De afgelopen jaren is in Nederland veel ervaring opgedaan met een relatief goedkope vorm van deze opslag, namelijk opslag in aquifers (ondergrondse watervoerende aardlagen).

Ontwikkelingen in een efficiënte energievoorziening van gebouwen zijn vooral van belang in de productie van lage-temperatuurwarmte. Dit deel van de energievraag is vooralsnog een dominante factor. Alternatieven voor de gebruikelijke cv-ketel zijn:

- Elektrische warmtepompen. Warmtepompen maken gebruik van restwarmte of omgevingswarmte door op lage temperatuur warmte te onttrekken en deze warmte af te geven aan een verwarmingssysteem bij hoge temperatuur. Potentiële warmtebronnen zijn bodemwarmte, oppervlaktewater en ventilatielucht. Met name bodemwarmte wint op dit moment aan aandacht, omdat het mogelijk blijkt om via heipalen warmte aan de bodem te onttrekken, hetgeen tot aanzienlijke kostenbesparingen leidt. Er bestaat een synergie tussen een vermindering van de warmtevraag en toepassing van warmtepompen: bij weinig warmtevraag met name in de winter kunnen de investeringen in de warmtepomp omlaag, en worden lage-temperatuurverwarmingssystemen mogelijk waardoor de efficiëntie van de warmtepomp verbetert. Naast elektrische warmtepompen zijn ook gasgestookte absorptiewarmtepompen een optie.
- W/k-koppeling. Bij toepassing van w/k in gebouwen wordt restwarmte die vrijkomt bij lokale elektriciteitsopwekking nuttig gebruikt ten behoeve van ruimteverwarming en of warm tapwater. W/k wordt toegepast op verschillende schaalniveaus:
 - In grootschalige stadsverwarmingssystemen, waarbij meestal stoom- en gasturbine (STEG)-eenheden worden gebruikt.
 - Gasmotoren of gasturbines in de iets grotere gebouwen, of in blok- of wijkverwarmingssystemen.
 - Micro w/k op gebouwniveau. Gasmotoren zijn te groot om in een enkele woning te worden toegepast. Kleinere alternatieven zijn de Stirling-motor en de brandstofcel.

Er is nauwelijks synergie tussen een vermindering van de warmtevraag en de toepassing van w/k. In de gevallen dat warmtedistributie wordt toegepast worden bij een geringere warmtevraag de leidingverliezen relatief hoog. Voor systemen zonder warmtedistributie – op gebouwniveau – geldt in het algemeen dat het elektrisch rendement lager wordt als de systeemgrootte daalt.

Brandstofcellen zouden in de toekomst wel een gunstig rendement bij kleinschalige toepassingen kunnen geven.

Het toepassen van combinaties van deze opties voor de energievoorziening kan tot verslechtering van de verhouding tussen kosten en baten leiden: een dubbel systeem dat hogere kosten met zich meebrengt, maar niet evenredig meer energiebesparing oplevert. Dit geldt bijvoorbeeld voor een gelijktijdige toepassing van de zonnecollector en de warmtepomp, die gebruik maken van dezelfde

warmteopslag. Ook is al opgemerkt dat een vermindering van de warmtevraag en w/k-koppeling en warmtedistributie slecht samen gaan. In andere gevallen kunnen echter ook synergieën tussen maatregelen optreden zoals de synergie tussen een vermindering van de warmtevraag en de toepassing van warmtepompen. Een andere interessante synergie ontstaat als warmtevraag-gestuurde w/k-koppeling en elektrische warmtepompen worden toegepast in verschillende delen van hetzelfde verzorgingsgebied: de door w/k geproduceerde elektriciteit kent een goede gelijktijdigheid met de door warmtepompen gevraagde elektriciteit.

Integratie tussen de lage-temperatuurwarmtevoorziening en enkele andere energiefuncties is ook zinvol. Een voorbeeld is het gebruik van duurzaam of efficiënt geproduceerde warmte in 'hot-fill' wasmachines of vaatwassers.

Warmteopslag speelt een belangrijke rol om zonnewarmte optimaal te gebruiken, maar verrassenderwijs ook in het sturen van de vraag naar en het aanbod van elektriciteit. Zo kan de vraag van warmtepompen naar elektriciteit desgewenst in tijd verschoven worden als er warmteopslag aanwezig is. Hetzelfde geldt voor het aanbod van elektriciteit uit w/k-systemen, die in combinatie met warmteopslag alleen hoeven te produceren als er elders in het net behoefte aan elektriciteit is. Prijsverschillen tussen dag en nacht of tussen week en weekend voor inkoop en teruglevering van elektriciteit bepalen daarbij de regelstrategie.

INTEGRALE CONCEPTEN

De conclusie van deze beschouwing mag zijn dat er een grote samenhang bestaat tussen de mogelijke maatregelen om tot een duurzame energievoorziening te komen. Een vermindering van de warmtevraag, een duurzaam en efficiënt energieaanbod, energieopslag en het regelsysteem hangen allen met elkaar samen. Sommige maatregelen werken elkaar tegen, terwijl andere een duidelijke synergie vertonen. Het is dan ook nodig om niet van afzonderlijke maatregelen, maar van een integraal concept uit te gaan. Enkele van deze integrale concepten zullen we hierna aanduiden. De concepten hebben met elkaar gemeen dat ze als 'energie-neutraal' kunnen worden aangeduid. Dit houdt in dat duurzame energiebronnen zoals zon en wind worden gebruikt om de energiebehoefte van een gebouw te dekken. We gebruiken hier een brede opvatting van energie-neutraliteit: op jaarbasis wordt lokaal voldoende energie uit duurzame bronnen opgewekt om de jaarlijkse energiebehoefte te dekken. Deze energie kan via energienetten worden uitgewisseld met de rest van de energievoorziening, waarbij afname van en levering aan deze netten op jaarbasis in evenwicht zijn. Een engere vorm van energie-neutraliteit is volledig zelfvoorzienend of autarkie: er vindt geen uitwisseling met energienetten plaats en het lokale duurzame energievoorzieningssysteem moet op ieder moment aan de

totale lokale vraag kunnen voldoen. Energie-neutrale concepten kunnen verschillen in de manier waarop ze energie uitwisselen met energienetten. We onderscheiden hier vier hoofdvarianten, waarbij we ons concentreren op woonwijken in aansluiting op de toekomstbeelden die in par. 2.4.1 beschreven zijn.

De gedachte achter deze concepten is dat het toepassen van PV op het dak op jaarbasis voldoende energie kan opleveren om de totale energievraag van alle gebouwgebonden energiefuncties te dekken (dus inclusief de warmtevraag). Omdat het dakoppervlak beperkt is (in een normaal woningontwerp ca. 30 m² op een laagbouwwooning) vereist dit maximale aandacht voor het vermijden van onnodig energiegebruik, waarbij zowel het gebouwontwerp als de apparatuurkeuze van belang zijn. De hoofdvarianten zijn schematisch aangeduid in tabel 2.2.1.

Tabel 2.2.1

Energie-neutrale concepten in woonwijken: a = afname, l = teruglevering, o = geen uitwisseling.

		uitwisseling met		
		<i>elektriciteitsnet</i>	<i>gasnet</i>	<i>warmtenet</i>
1	traditionele netten	a/l	a	(a)
2	all electric	a/l	o	o
3	all gas	o	a/l	o
4	volledig zelfvoorzienend	o	o	o

1 Traditionele energienetten

In dit concept wordt uitgegaan van een traditionele warmtevoorziening met een hoge resolutie (HR)-ketel voor ruimteverwarming en warm tapwater. Aanvullend wordt een beperkt oppervlak zonnecollectoren gecombineerd met een eveneens beperkte warmteopslagcapaciteit toegepast om de warmtevraag buiten het winterseizoen te dekken.

De energie-neutraliteit wordt in dit concept bereikt doordat de elektriciteitslevering aan het net in de zomer – afkomstig van het PV-systeem – de afname van zowel elektriciteit als (aard)gas uit de betreffende netten in de winter compenseert. Er wordt geen enkele vorm van seizoenopslag van warmte of van elektriciteit toegepast, zodat er vrij veel uitwisseling met het net plaatsvindt met grote verschillen tussen levering in de zomer en afname in de winter.

Een variant is om de warmte niet uit een gasnet, maar uit een grootschalig warmtedistributienet te betrekken, waarbij bijvoorbeeld restwarmte kan worden gebruikt.

2 All electric

Het verschil met het voorgaande concept is dat er alleen energie wordt uitgewisseld met het elektriciteitsnet. Dit vereist een warmtevoorziening op elektriciteit, waarbij uit efficiëntieoverwegingen de voorkeur wordt gegeven aan de toepassing van een elektrische warmtepomp. Belangrijke systeemeisen zijn hierbij

een lage-temperatuurverwarmingssysteem en een goede integratie van de warmtepomp en het zonthermische systeem.

De energie-neutraliteit houdt in dit geval in dat de levering van elektriciteit in de zomer afname van elektriciteit in de winter compenseert, waarbij het beslag op het elektriciteitsnet in de winter groter is dan in het eerste concept, omdat nu ook de warmtepomp moet worden aangedreven.

Een voordeel van dit concept is dat er maar één energienet hoeft te worden aangelegd. Wijktype 1 in par. 2.4.2 is een uitwerking van dit concept.

3 All gas

Het verschil met het eerste concept is dat de energie nu alleen wordt uitgewisseld met een gasnet. Dit vereist lokale elektriciteitsproductie met behulp van het geleverde gas, maar ook teruglevering van energie in de vorm van gas. Dit houdt in dat technieken gebruikt moeten worden die op dit moment nog duidelijk verder van marktintroductie afstaan dan de benodigde technieken in de eerste twee concepten. Dit is vooral het geval als de omzettingen op kleine schaal (op woning- of blokniveau) moeten plaatsvinden. Het ligt hier voor de hand brandstofcellen voor de elektriciteitsproductie en elektrolyse voor de omzetting van elektriciteitsoverschotten in waterstofgas te gebruiken.

De energie-neutraliteit houdt in dit geval in dat de afname van gas in de winter wordt gecompenseerd door levering in de zomer. Een voordeel van het gasnet boven het elektriciteitsnet is dat de verschillen tussen zomer en winter in de centrale energievoorziening beter kunnen worden opgevangen, omdat gas zich makkelijker centraal laat opslaan.

4 Volledig zelfvoorzienend

Als er geen uitwisseling van energie met energienetten plaatsvindt, is er sprake van volledig zelfvoorzienend of autarkie. Opslag van elektriciteitsoverschotten in de zomer in de vorm van waterstof (via elektrolyse) ligt hierbij het meest voor de hand. Dit houdt in dat dit concept ingevuld kan worden zoals de gasnetvariant, maar dan met lokale seizoensopslag van het geproduceerde waterstofgas. Voor korte-termijnopslag van elektriciteit kunnen accu's worden gebruikt. Het waterstofopslagsysteem is in dit concept nog het minst ontwikkeld: atmosferische opslag kost veel ruimte, en opslag onder druk vergt relatief veel hulpenergie. Een voorbeeld van een zelfvoorzienend huis wordt gegeven in fig. 2.2.2.

Alle concepten kunnen gecombineerd worden met een meer uitgebreid zonneverwarmingssysteem, waarbij het collectoroppervlak wordt vergroot en de warmteoverschotten van de zomer tot de volgende winter worden opgeslagen, bijvoorbeeld in een aquifer. Een voordeel hiervan is dat de warmtevraag uit duurzame bronnen volledig en op de meest directe wijze wordt verkregen. In combinatie met de elektriciteitsnetvariant is er bovendien het voordeel dat de

Fig. 2.2.2

In energieopzicht zelfvoorzienend huis, het Autarkisches Haus in Freiburg. Bron: [Beurskens, ECN].



verschillen tussen de elektriciteitslevering in de zomer en de afname van elektriciteit in de winter verminderen, omdat in de winter alleen nog de niet-thermische energiefuncties uit het net hoeven te worden voorzien. Gecombineerd met een autark systeem betekent de toevoeging van thermische seizoenopslag dat met een kleinere waterstofopslag kan worden volstaan.

De eerste drie concepten kunnen worden gecombineerd met dagopslag van elektriciteit. Dit houdt in dat de overschotten uit het PV-systeem voor een beperkte periode kunnen worden opgeslagen. Voordeel is dat beter kan worden ingespeeld op korte-termijnvariaties in de verhoudingen tussen vraag en aanbod in het elektriciteitsnet, die zich ook zullen vertalen in tariefverschillen. Hierbij kan gedacht worden aan variaties tussen dag en nacht, maar ook tussen week en weekend. Een belangrijk voordeel van dagopslag van PV-overschotten is voorts dat de netcapaciteit geen beperking oplevert bij de teruglevering in de zomer. Wat overdag niet kan worden teruggeleverd, wordt in de daaropvolgende nacht het net ingevoerd.

Vele andere varianten zijn nog mogelijk. Zo kan bijvoorbeeld ook biomassa een rol spelen in de energievoorziening, of kunnen andere vormen van duurzaam geproduceerde brandstof zoals methanol in het systeem worden geïntegreerd. Op wijkniveau kunnen ook windturbines worden toegepast.

De eerste twee concepten zijn te realiseren op woningniveau. Op de langere termijn geldt dit wellicht ook voor het derde concept. Voor het overige geldt dat belangrijke onderdelen van energieneutrale concepten zoals lokale elektriciteitsproductie en seizoenopslag van warmte vooralsnog alleen op iets grotere schaal toepasbaar zijn. Dit maakt deze concepten toepasbaar op wijken met gestapelde bouw, waar mogelijkheden voor collectieve arrangementen bestaan. Is de geschetste energie-neutraliteit nu op te vatten als het eindstadium waar-

naar gestreefd dient te worden? Dat zou een misvatting zijn. Daarvoor is de gekozen set van energiefuncties op gebouwniveau te willekeurig. Met hetzelfde recht zouden we ook kunnen eisen dat de energiebehoefte voor het transport van de bewoner ook op het dak moet worden opgewekt, of zelfs de industriële energietoevoer die samenhangt met de in het gebouw geconsumeerde producten. Vanuit nationaal of zelfs mondiaal perspectief is het van belang na te gaan in hoeverre bij het streven naar energie-neutraliteit sprake is van suboptimalisatie. Zo is het suboptimaal om energie op te slaan, terwijl de buurman op hetzelfde moment energie uit het net betreft. Sommige kleinschalige conversiesystemen zijn wellicht suboptimaal, omdat op grotere schaal meer efficiëntie bereikt kan worden. Naast energetische optimalisatie bestaat er uiteraard ook nog een economische optimalisatie, waarbij de vraag gesteld mag worden bij welke combinatie van maatregelen het gebruik van eindige energiebronnen tegen de laagste kosten gereduceerd wordt. De meeste elementen in de geschetste concepten lijken echter op korte of lange termijn wel degelijk tegemoet te komen aan de eisen die aan een toekomstig energievoorzieningssysteem worden gesteld: zo efficiënt mogelijk en met gebruik van zoveel mogelijk duurzame energiebronnen. Een goed systeem van tarieven kan ervoor zorgen dat eventuele suboptimale varianten het niet zullen halen. Een organisatie van de elektriciteitsvoorziening die zodanig is opgezet dat een dergelijk optimaliserend tariefensysteem zich vanuit de marktverhoudingen ontwikkelt maakt dan ook zeker deel uit van de gewenste systeemintegratie.

2.2.2 TOEPASSING VAN GELIJKSTROOM IN EEN WONING

*ing. K.H.T.J. van Otterdijk*⁶

Bij de integratie van duurzame elektriciteitsopwekking met opslagsystemen – die in het algemeen gepaard gaat met een interne uitwisseling van energie door middel van gelijkstroom – ligt een koppeling met een gelijkstroomnet voor de hand. Aangezien veel huishoudelijke apparatuur intern op gelijkstroom werkt, kan de voeding van dergelijke apparatuur met inachtneming van een aantal randvoorwaarden uit een gelijkstroomnet aantrekkelijk zijn.

Met de introductie van een gelijkstroomnet kunnen verliesgevendende conversiestappen mogelijk geëlimineerd worden (zie fig. 2.2.4). Andere voordelen van een gelijkstroomnet zijn de afwezigheid van verliezen door het transport van blindvermogen en de relatief eenvoudige mogelijkheid tot koppeling met andere systemen (bijv. back up-voorzieningen, micro warmte/kracht (w/k)-systemen, brandstofcellen en een gelijkstroomnet op wijkniveau).

⁶ ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
vanotterdijk@ecn.nl

Zaken die bij de toepassing van gelijkstroom in de woning als systeem van belang geacht worden, zijn:

- Het inpassen van dit systeem in de energievoorziening van de wijk onder alle mogelijke bedrijfsomstandigheden van de heersende energievoorziening in de wijk.
- Het toepassen van geavanceerde vermogenselektronica voor het schakelen en of regelen van gelijkstroom en voor het begrenzen van kortsluitvermogen.
- Het bepalen van het optimale spanningsniveau of de spanningsniveaus.
- Het bepalen van de optimale netconfiguratie, de optimale veiligheid, beoordelingscriteria en randvoorwaarden.

Bij ECN [Pellis, 1997] is een studie uitgevoerd naar de haalbaarheid van een laagspanningswoning waarbij fotonvoltaïsche (PV) energie is toegepast. Die haalbaarheid is getoetst aan een aantal criteria waarbij vooraf vastgestelde randvoorwaarden zijn gehanteerd. Verder ging men uit van een concreet aantal aandachtspunten, die van belang zijn bij de toepassing van gelijkstroom in de woning als systeem zoals conversieverliezen, elektriciteitsverbruik in de woning, transport van elektrische energie in de woning, mogelijke netconfiguraties, en technische problemen.

De resultaten en bevindingen van dit onderzoek zoals die in dit hoofdstuk zijn samengevat, geven een beeld van de overwegingen en factoren die een rol spelen bij de toepassing van gelijkstroom in een woning in relatie tot toepassing met PV energie en met behoud van comfortniveau voor de bewoners.

PV-systemen in de woningbouw worden vooral toegepast in combinatie met een aansluiting op het publieke elektriciteitsnet. De door zonnecellen opgewekte gelijkstroom wordt omgevormd naar de vertrouwde wisselstroom. Hierdoor is een koppeling met het elektriciteitsnet mogelijk en kan huishoudelijke apparatuur zonder problemen gebruikt worden. In de gelijkstroom-laagspanningswoning wordt geen wisselstroom, maar gelijkstroom gebruikt voor het transport van de door PV opgewekte energie naar de huishoudelijke apparatuur (zie fig. 2.2.3).

Zonnecellen genereren gelijkstroom en omdat veel huishoudelijke apparatuur intern op gelijkstroom werkt, kan door toepassing van een gelijkstroomnet in huis minimaal één conversiestap voorkomen worden. Dit wordt in fig.2.2.4 verduidelijkt.

Electriciteitsverbruik in de woning

De mate waarin apparatuur geschikt is om met gelijkstroom gevoed te worden hangt samen met de soort energieconversie (tabel 2.2.2). Ook de te verwachten energiebesparing is hiermee nauw verbonden. Het blijkt dat de voeding van huishoudelijke apparatuur met gelijkstroom niet automatisch leidt tot een

Fig. 2.2.3

Schematische weergave van een gelijkstroom-laagspanningswoning.

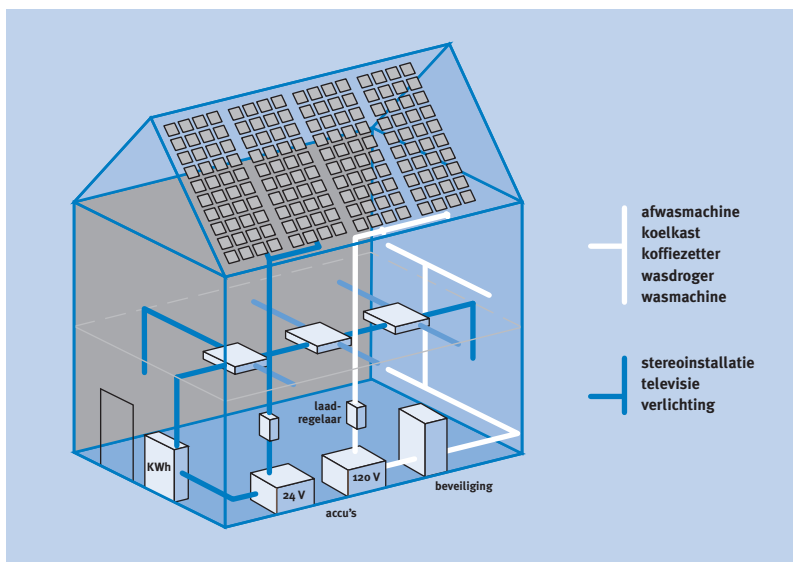
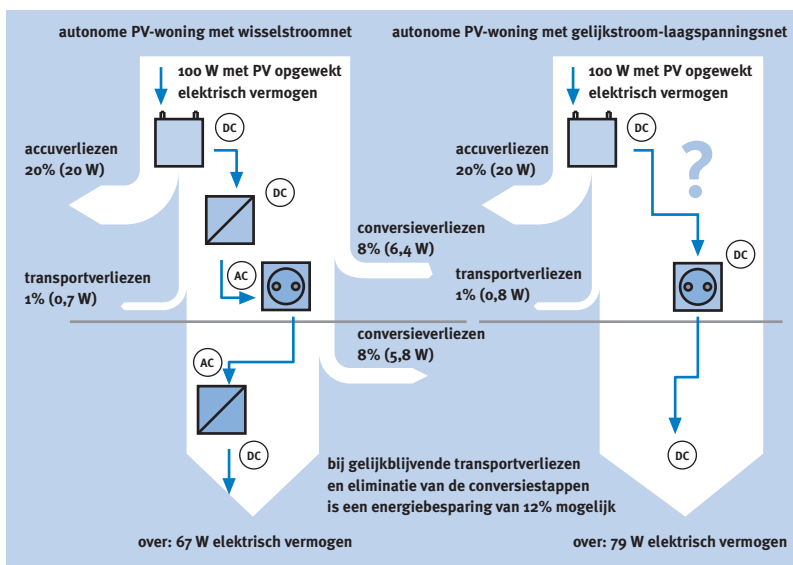


Fig. 2.2.4

Theoretische energiebesparing in een gelijkstroom-laagspanningswoning ten opzichte van een conventionele PV-woning.



reductie van energieverliezen door de eliminatie van conversiestappen. Zo zijn er apparaten die geen interne aanpassing van de spanning nodig hebben zoals koffiezetapparaten, boilers en stofzuigers.

Transport van elektrische energie in de woning

Een gelijkstroom-laagspanningsnet dient op een veilige, goed controleerbare wijze en met een minimum aan verliezen energie te transporteren van het PV- of opslagsysteem naar de verbruikers in huis. Tabel 2.2.3 laat de kenmerken zien van enkele mogelijke netconfiguraties voor de gelijkstroom-laagspanningswoning. De gewenste lage systeemspanning van systeem 1 levert spannings- en vermo-

Soort energieconversie	AC-voeding		DC-voeding	Vermogensvraag (W)	Geschiktheid voor gelijkstroom	Geschiktheid voor lage spanning	Automatische reductie van conversieverliezen
	AC → DC omzetter	DC → AC omzetter	DC → DC omzetter				
Van elektrische energie naar:							
warmte							
(boiler, koffiezetapparaat, gloeilamp)	Nee	Nee	Nee	< 3.500	++	+/-	Nee
beweging							
(wasmachine, ventilator, stofzuiger)	Nee			< 3.500	+/-	+/-	Nee
nieuwe generatie beweging⁷							
(wasmachine, ventilator, stofzuiger)	Ja			< 3.500	++	+/-	Ja
beeld en geluid⁸							
(TV, radio, telefoon)	Ja	Nee		< 500	++	+	Mogelijk
licht							
(TL, spaarlamp)	Nee	Ja	Nee	< 500	+/-	+	Nee
nieuwe generatie licht⁸							
	Ja	Ja	Nee	< 500	+/-	+	Nee

Tabel 2.2.2

Huishoudelijke apparatuur opgesplitst naar de soort energieconversie.

++ = uitstekend;

+ = goed;

+/- = matig.

7 De nieuwe generatie bewegingsomzeters zijn uitgerust met een omzetter die eerst 325 V DC-wisselspanning maakt, die vervolgens weer wordt omgezet in de wisselspanning van de gewenste grootte en frequentie.

8 In moderne verlichtingsapparatuur wordt intern 325 V DC-basisspanning gemaakt, zoals in moderne audio- en videoapparatuur.

gensverliezen op. Geleiders met een grote doorsnede zijn vereist en het vermogen per groep moet omlaag om deze verliezen in de hand te houden. Een ander probleem ontstaat bij het schakelen van gelijkstroom. Door het ontbreken van nuldoorgangen is het onderbreken van gelijkstroom moeilijker dan het onderbreken van wisselstroom. Hiermee zal bij de keuze van schakel- en beveiligingsmateriaal rekening gehouden moeten worden. Wellicht kan een oplossing gevonden worden in het gebruik van vermogenselektronica.

In gelijkstroomsystemen is in stationaire toestand geen spanningsval over zelf-inducties aanwezig. Hierdoor is het begrenzen van kortsluitstromen gecompliceerder dan in wisselstroomsystemen. Bij de beveiliging van het gelijkstroomstelsel moet hierop gelet worden; standaard smeltveiligheden en schakelautomaten voldoen niet meer en er moet vermogenselektronica toegepast worden voor het begrenzen en onderbreken van kortsluitstromen.

De aanraakveiligheid van het gelijkstroom-laagspanningsnet is gegarandeerd zolang de systeemspanning lager is dan 120 V. Deze veiligheid is betrekkelijk gezien de lastige begrenzing van kortsluitstromen en de moeilijke onderbreking van gelijkstroom, waardoor het brandgevaar bij kortsluitingen wordt vergroot.

	Standaard	Gelijkstroom-laagspanningswoning		
	wisselstroomwoning	systeem 1	systeem 2	systeem 3
systemspanning	220 V AC	24 V DC	120 V DC	24 en 120 V DC
maximale stroom	16 A	20 A	20 A	20 A
maximaal vermogen per groep	3.520 W	480 W	2.400 W	480 en 2400 W
draaddoorsneden	2,5 mm ²	6 mm ²	4 mm ²	6 en 4 mm ²
maximaal spanningsverlies bij een maximale lengte van 40 m	5%	20%	7%	20% en 7%
te gebruiken huishoudelijke apparaten	alle apparaten	alleen apparaten met lage vermogensvraag	alle apparaten	alle apparaten

Tabel 2.2.3

Karakteristieken van het standaard wisselstroomstelsel en 3 gelijkstroomstelsels.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

- Een overstap van wisselstroom naar gelijkstroom levert niet automatisch de verwachte besparingen op.
- De grote vraag bij gelijkstroom is welk spanningsniveau gekozen wordt. Bij een hoge systemspanning stelt de beveiliging hoge eisen, bij een lage systemspanning zal het maximaal aan te sluiten vermogen per groep beperkt moeten worden en zijn de verliezen groter.
- Er is een toename van apparaten met een AC-DC-omzetter die intern een hoge DC-spanning maakt, direct afgeleid van de piekwaarde van de netspanning.
- Bij het transport van elektrische energie met gelijkstroom treden problemen op met het huidige schakelmateriaal bij het onderbreken van stromen en bij het begrenzen van kortsluitstromen.

Het nut van een DC-net neemt toe als er afspraken gemaakt kunnen worden over de interne DC-spanning voor huishoudelijke apparaten. Met behulp van vermogenselektronica zijn in ieder geval de schakelproblemen bij gelijkstroom op te lossen⁹.

Aanvullend onderzoek naar de mogelijkheden van gelijkstroomdistributie in de gebouwde omgeving moet zich niet alleen concentreren op het besparen van energie, maar ook op:

- Het onderzoeken van de mogelijkheden voor afspraken over de interne basisspanning van apparaten.
- Het ontwikkelen van schakel- en beveiligingsapparatuur voor gelijkstroom.
- Het toepassen van gelijkstroom in systemen met een kleine vermogensvraag en de voeding van één gebruikersgroep met gelijkstroom.

⁹ De Koreaanse ontwikkelingsfirma SN R&D Co. [SN R&D Co., 1998] heeft reeds DC-netschakelaars als prototype beschikbaar. Hun website is www.SNKorea.Com.

Voor het koppelen van verschillende gelijkstroomssystemen, eventueel op wijkniveau, zie ook par. 6.4.6 in deel 2: Voeding van elektronische apparatuur en stand-by verbruik.

2.3 INTEGRATIE EN OPTIMALISATIE OP WIJKNIVEAU

2.3.1 INLEIDING

Vele nieuwe technologieën zullen in de komende decennia hun intrede doen in de elektriciteitsvoorziening. Dat zijn uiteraard nieuwe zuinige en intelligente apparaten, maar ook nieuwe methoden van elektriciteitsopwekking en wellicht zelfs opslageenheden. De integratie van deze technologieën in het energiesysteem van de wijk vraagt om het optimaal afstemmen van de verschillende functies en componenten. Het karakter van elektriciteit en de toepassing van informatie- en communicatietechnologie maakt het mogelijk de componenten op relatief grote afstanden van elkaar te plaatsen.

We beginnen met een bespreking van integratieaspecten van de elektriciteitsvoorziening in de wijk, waarna de patronen van vraag en aanbod van elektriciteit aan de orde komen.

De toekomstige wijken zullen regelmatig tijdelijke overschotten aan elektriciteit kennen. In par. 2.3.4 maken we een afweging tussen het opslaan of het transporteren van deze overschotten.

2.3.2 SYSTEEMINTEGRATIE OP WIJKNIVEAU

*ir. J. Meeuwsen*¹⁰

Allerlei ontwikkelingen in productie-, distributie- en opslagsystemen kunnen leiden tot veranderingen in het ontwerp, het beheer, de bedrijfsvoering en de beveiliging van elektriciteitsnetten in bestaande en toekomstige wijken. Deze paragraaf gaat nader in op de integratie van deze systemen op wijkniveau. Er wordt in deze paragraaf vooral aandacht besteed aan het stationaire gedrag van de elektriciteitsvoorziening. Dynamische eigenschappen als pieken, ‘dips’ en onderbrekingen worden buiten beschouwing gelaten. Deze eigenschappen worden in par. 2.6.2 (Vermogenstransport) en par. 2.6.5 (Netvervuiling) behandeld.

Onder integratie op wijkniveau wordt hier verstaan de wijze waarop productie-, distributie- en opslagsystemen op elkaar afgestemd zijn teneinde een veilige en betrouwbare elektriciteitsvoorziening te garanderen. Deze samenwerking is pas mogelijk als de volgende twee balansen in evenwicht zijn: de energiebalans en de vermogensbalans. De energiebalans houdt in dat er op de lange termijn voldoende energie beschikbaar is om aan het elektriciteitsverbruik te voldoen. De vermogensbalans houdt in dat op elk moment voldoende vermogen beschikbaar is om aan de momentane vraag naar elektriciteit te voldoen. Voor de vraag naar warmte geldt in principe hetzelfde, we zullen ons hier beperken tot de vraag naar elektriciteit.

¹⁰ TU Delft, Opleiding
Elektrotechniek, Postbus 5031, 2600
GA Delft, j.j.meeuwsen@et.tudelft.nl

Om deze systeemintegratie op wijkniveau verder uit te werken, wordt de wijk hierna behandeld aan de hand van de vraag, het aanbod, het transport en de distributie van elektriciteit.

DE VRAAG NAAR ELEKTRICITEIT

De vraag naar elektriciteit valt in kwalitatieve zin te beschrijven als de som van de regelbare en de niet regelbare gebruikers en apparaten. Regelbaar wil hier zeggen dat de regelsystemen in de wijk gebruikers op afstand kunnen in- of uitschakelen. Het aantal apparaten dat hiervoor geschikt is, is beperkt. Te denken valt aan boilers, koelkasten met koudebuffers, laadapparaten van elektrische auto's, warmtepompen en dergelijke. Ook deze apparaten kunnen niet onbeperkt aanbodgestuurd werken, omdat het vervullen van de functie voor de gebruiker dan in gevaar komt. Zo moet de elektrische auto wel de volgende dag weer opgeladen zijn, en wordt een koude douche niet op prijs gesteld. Er zal dus altijd een maximale tijdsduur of een andere grens aan de aanbodssturing verbonden zijn. Elke woning bezit hiervoor tweerichtingscommunicatie met de energiebeheerder en apparaten die met aanbodssturing werken.

AANBOD VAN ELEKTRICITEIT

Ook het aanbod van elektriciteit is in kwalitatieve zin onder te verdelen in geregeld en ongeregeld aanbod. Het geregelde aanbod kan binnen zekere grenzen inspelen op veranderingen in de gevraagde hoeveelheid elektriciteit. Het bestaande conventionele vermogen valt hier grotendeels onder, maar ook een door (bio)gas aangedreven brandstofcel, een batterij of een warmte/kracht (w/k)-eenheid die vraaggericht werkt al naar gelang de vraag naar elektriciteit. Een fotovoltaïsche (PV)-module is een ongeregelde aanbieder, net als een windturbine of een door warmte gestuurde w/k-eenheid¹¹.

In grote lijnen kan men het systeem waarmee een wijk van elektriciteit wordt voorzien weergeven zoals in fig. 2.3.1.

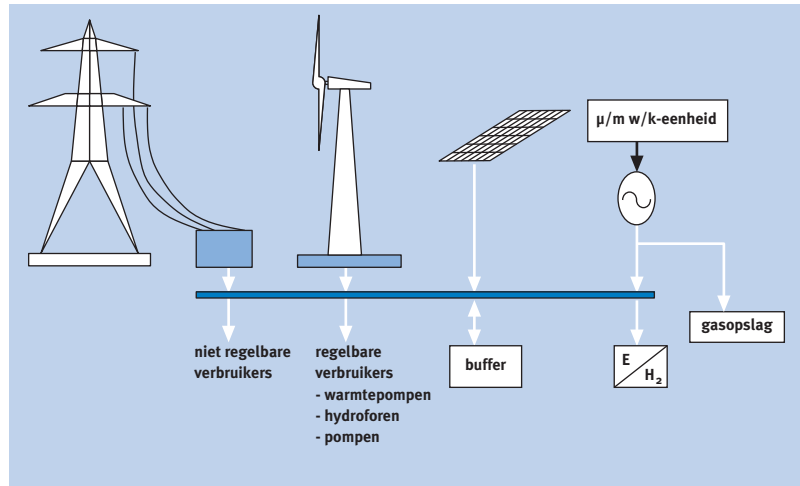
Afhankelijk van de kosten van de productiemiddelen en de kosten van de productie van elektriciteit kan het zinvol zijn om verschillende wijken door middel van (hoogspannings)verbindingen aan elkaar te koppelen. Dit koppelnet verbindt dan twee of meer systemen, die zelf een zekere balans bezitten tussen de productie van elektriciteit enerzijds en de vraag naar elektriciteit anderzijds. De voordelen van koppeling op zo'n niveau zijn:

- Besparing in het reserveproductievermogen.
- Het optimaal inzetten van productiemiddelen.
- Betere opvang van storingen in productiemiddelen (hogere betrouwbaarheid).
- Gebruik van schaalvoordelen (grotere productie-eenheden).

¹¹ Het is wel mogelijk om tijdens de productie door de genoemde eenheden het aanbod te regelen door slechts een deel van het geproduceerde vermogen te gebruiken. Er gaat dan wel energie verloren.

Fig. 2.3.1

Schets van een toekomstig elektriciteitsvoorzieningssysteem in een wijk.



Er wordt aangenomen dat productiemiddelen als zonnecellen, windturbines en micro of mini w/k-eenheden in een bepaalde mate in de wijk aanwezig zullen zijn. Daarnaast is er een koppeling met een net waaraan conventionele productiemiddelen toeleveren.

De *vermogensbalans* tussen de elektriciteitsproductie en de elektriciteitsvraag waaraan voldaan moet worden, luidt:

$$P_{\text{productie}}(t) = P_{\text{belasting}}(t) \text{ op het tijdstip } t$$

Hierin is:

$$P_{\text{productie}}(t) = P_{\text{wt}}(t) + P_{\text{zc}}(t) + P_{\text{wk}}(t) + P_{\text{ce}}(t)$$

$$P_{\text{belasting}}(t) = P_{\text{ew}}(t) + P_{\text{mw}}(t) + P_{\text{kg}}(t) + P_{\text{bg}}(t) + P_{\text{v}}(t)$$

met:

$P_{\text{wt}}(t)$ het momentane vermogen van windturbines

$P_{\text{zc}}(t)$ het momentane vermogen van zonnecellen

$P_{\text{wk}}(t)$ het momentane vermogen van warmte/kracht (w/k)-eenheden

$P_{\text{ce}}(t)$ het momentane vermogen van conventionele eenheden

$P_{\text{ew}}(t)$ het momentane vermogen van eengezinswoningen

$P_{\text{mw}}(t)$ het momentane vermogen van meergezinswoningen

$P_{\text{kg}}(t)$ het momentane vermogen van kantoorgebouwen

$P_{\text{bg}}(t)$ het momentane vermogen van bedrijfsgebouwen

$P_{\text{v}}(t)$ het momentane vermogensverlies

De vermogensbalans moet dus zo in evenwicht worden gehouden dat het productievermogen gelijk is aan het opgenomen vermogen (belasting + verlies).

Wanneer het evenwicht plotseling verandert, bijvoorbeeld omdat er een wolk boven alle PV-cellen in de wijk drijft, dient er snel bijgesteld te worden. Als dit niet gebeurt, zakt de spanning beneden de toegestane waarde. Hiervoor is snel reagerende regelapparatuur nodig, die onmiddellijk vermogen kan toevoeren of afvoeren. Daarvoor dient deze regelaar in verbinding te staan met een buffer of met het elektriciteitsnet buiten de wijk.

De *energiebalans* voor een bepaalde periode T luidt:

$$\int_t^{t+T} P_{\text{productie}}(t) dt = \int_t^{t+T} P_{\text{belasting + verlies}}(t) dt$$

Het ligt voor de hand om voor de periode T een termijn van tenminste een jaar te kiezen. Het aantal productiemiddelen en de benodigde capaciteit ervan is sterk afhankelijk van de gevraagde piekbelasting, de mate van gelijktijdigheid van de belastingpatronen, de aanschaf- en exploitatiekosten van de afzonderlijke productiemiddelen, en de beschikbaarheid van primaire duurzame energie (zon en wind).

Deze factoren zullen in meer of mindere mate bekend dienen te zijn om gerichte uitspraken te kunnen doen over de bouw en de samenstelling van het productiesysteem in zijn geheel.

TRANSPORT- EN DISTRIBUTIENET VOOR ELEKTRICITEIT

Een transport- en distributienet is nodig zodra de productiemiddelen zich op een bepaalde afstand bevinden van de locatie waar de elektriciteit gebruikt wordt. Daarnaast is zo'n infrastructuur vereist zodra de vraag naar elektriciteit op een bepaalde locatie de aldaar aanwezige productiecapaciteit overschrijdt. Een voorbeeld kan dit verduidelijken.

In Amersfoort worden in opdracht van de REMU (Regionale Energie Maatschappij Utrecht) een aantal zogenaamde Energiebalanswoningen gebouwd. Deze woningen zijn zodanig ontworpen dat het energieverbruik en de duurzame energieproductie – over een heel jaar gezien – in evenwicht zijn. De energiebalans is in evenwicht dankzij de toepassing van optimale isolatie, zonnepanelen, warmtepompen, enz.

Vanwege variatie in bewolkingsdichtheden en seizoenswisselingen zijn er echter perioden aan te wijzen waarin de momentane vraag naar elektriciteit de momentane duurzame elektriciteitsproductie overschrijdt. Plaatsing van accu's voor de opslag van te veel geproduceerde elektriciteit blijkt vooralsnog een te dure optie te zijn. Gezien de haalbare energiedichtheden, aanschafkosten en exploitatiekosten van opslagtechnologieën is het te verwachten dat ook in de toekomst zo'n elektrische infrastructuur nodig zal zijn.

De benodigde capaciteit van de transport- en distributie-infrastructuur is sterk afhankelijk van de gevraagde piekbelasting, de mate van gelijktijdigheid van de belastingpatronen en de groei van de belastingvraag in de loop van de tijd. Immers, een infrastructuur wordt niet voor slechts een korte periode aangelegd. In het algemeen kan geconcludeerd worden dat de benodigde transportcapaciteit van de netten nauwelijks zal afnemen ten opzichte van de transportcapaciteit van de huidige netten. Op het niveau van laagspanning kan bij een hoge penetratie van zonnecellen door de optredende gelijktijdigheid van de productie zelfs een zwaarder net nodig zijn.

Tevens is het waarschijnlijk dat de toekomstige netstructuur een tweerichtingsfunctie krijgt. De traditionele distributiefunctie zal dus overgaan in een distributie- en een bufferfunctie. De huidige boomstructuur, waarbij de stromen steeds kleiner worden naarmate de uiteinden van takken meer in zicht komen, kan dan niet langer worden gehandhaafd. De transport- en distributie-infrastructuur krijgt dan een zogenaamde busfunctie. Om een bepaald betrouwbaarheidsniveau van de busfunctie te waarborgen, zal deze hoogstwaarschijnlijk een ringvormige of vermaasde structuur krijgen.

Gezien de diversiteit van de aanwezige opwek- en opslagfaciliteiten is het te verwachten dat allerlei toepassingen uit de vermogenselektronica gebruikt zullen worden om energieconversies te bewerkstelligen. Vanwege de aandacht voor duurzaamheid en uit het oogpunt van milieu zal de elektrische energie optimaal getransporteerd moeten worden, uiteraard rekening houdend met de randvoorwaarden van het systeem. Daarbij moeten naast condensatorbanken en regeltransformatoren vermogenselektronische componenten worden ingezet. De elektronische regeltransformator 'tap changer' is een voorbeeld van zo'n component (zie par. 2.6.2). Een actieve sturing van kwaliteit en energiestromen in het net vereist uiteraard ook de nodige metingen in het systeem.

Daarnaast is het te verwachten dat bepaalde klanten hoge eisen aan de kwaliteit zullen stellen, terwijl andere klanten juist geïnteresseerd zijn in een goedkope basisvoorziening. Moderne elektrotechnische hulpmiddelen kunnen gebruikt worden om diverse kwaliteiten aan te bieden: kwaliteit in de zin van betrouwbaarheid en vorm van de spanning. Een reële mogelijkheid voor de industriële omgeving is een 'vuil basisnet' voor de hoge vermogens. Dit net levert goedkopere elektriciteit met een lagere kwaliteit en betrouwbaarheid of waarbij de leverancier de vraag stuurt. (Daar staat echter wel een behoorlijke investering in dat 'extra' net tegenover.)

Toepassingen met weinig kwaliteitseisen worden dan rechtstreeks op het basisnet aangesloten. Apparaten met hoge kwaliteitseisen worden via een 'tussenschakelapparaat' op dit basisnet aangesloten. Hierbij valt te denken aan zogenaamde Custom Power Devices (CPD's, zie par. 2.6.2). Dergelijke apparaten kunnen de gewenste vorm van spanning leveren. Indien ze tevens van opslagfa-

Fig. 2.3.2

Ringnet op middenspanningsniveau.

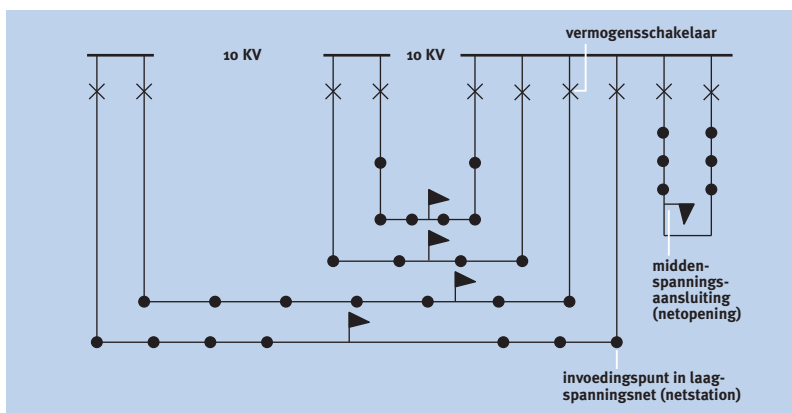
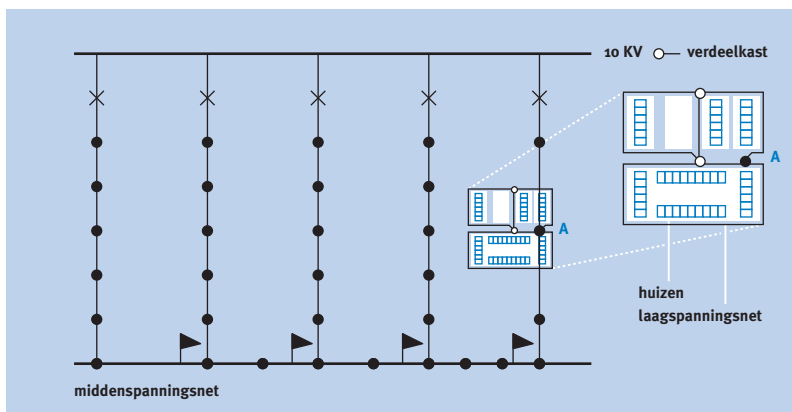


Fig. 2.3.3

Een vermaasd net op midden- en laagspanningsniveau. Bron: [EnergieNed, 1996a].



ciliteiten zijn voorzien, kunnen ze ook onderbrekingen in de elektriciteitsvoorziening ondervangen. Dergelijke apparaten worden ook wel UPS-systemen genoemd. UPS staat daarbij voor Uninterruptable Power Supply. Ook kan men deze klanten een aparte (laagvermogen) aansluiting van een hoge kwaliteit en betrouwbaarheid aanbieden.

Een ander belangrijk gereedschap voor het waarborgen van kwaliteit is de beveiliging van het systeem tegen storingen. Gezien de dynamiek in de nieuwe systemen zullen geavanceerdere beveiligingssysteem worden toegepast. Daarbij valt te denken aan instelwaarden van beveiligingssysteem die afhankelijk zijn van de toestand van het gehele systeem en continu worden aangepast. Dit fenomeen is ook wel bekend onder de naam adaptieve beveiliging.

2.3.3 TIJDSAFHANKELIJKHEID VAN VRAAG EN AANBOD

ir. J.M. Meij

Zoals in par. 2.3.2 reeds genoemd werd, moeten de vermogensbalans en de energiebalans van een systeem in evenwicht blijven. Ook werd daar getoond dat de energiebalans een wiskundige integratie van het momentane vermogen is. Om meer inzicht te krijgen in de momentane gemiddelde vermogensvraag en het momentane gemiddelde aanbod van duurzaam opgewekt vermogen in toekomstige wijken kunnen we gebruikmaken van bekende patronen. Het blijkt mogelijk om voor een aantal bronnen en gebruikersgroepen patronen te definiëren die de relatieve fluctuaties in de gemiddelden van vraag en aanbod beschrijven.

We zullen vooral ingaan op de cycli die van belang zijn voor aanbod en gebruik, in par. 2.4 worden de gevolgen van de cycli verder uitgewerkt voor de vier voorbeeldwijken.

Fig. 2.3.4

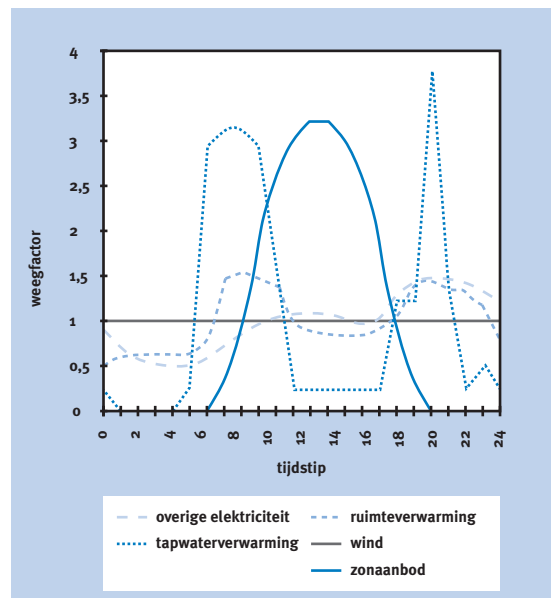
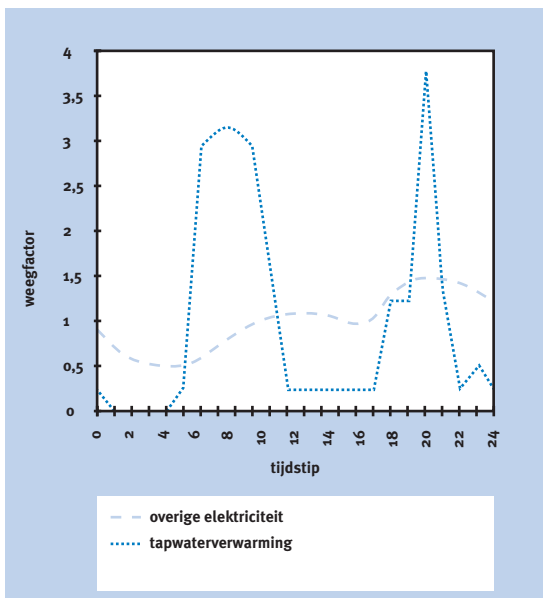
Links de 24 uren patronen voor elektriciteitsgebruik en tapwaterverwarming in 1995 in vergelijking met de situatie rechts waarbij een elektrische wamtepomp voor verwarming en tapwaterverwarming, en daarnaast zonne-energie wordt gebruikt. De cycli voor overig elektrisch gebruik komen uit praktijkmetingen [EnergieNed, 1996b]. De verwarmingscycli zijn afkomstig uit [Peters, 1994].

VERANDERINGEN IN VRAAG- EN AANBODPATTERNEN IN DE WOONOMGEVING

Het vraagpatroon in de woonomgeving wordt bepaald door factoren zoals de apparaten in huis, de mate van isolatie, levensstijl, werkritme en gezinssamenstelling. Hier spelen dag-, week- en seizoenspatronen een rol.

De energievraag in de woonomgeving wordt bepaald door verschillende functies als ruimteverwarming, tapwaterverwarming, koeling en verlichting. Voor een goede afstemming tussen aanbod en vraag moeten allereerst de functies worden ingevuld met verschillende systemen.

De 24 uren cyclus en de jaarcyclus hebben de meeste invloed op de vraag en het



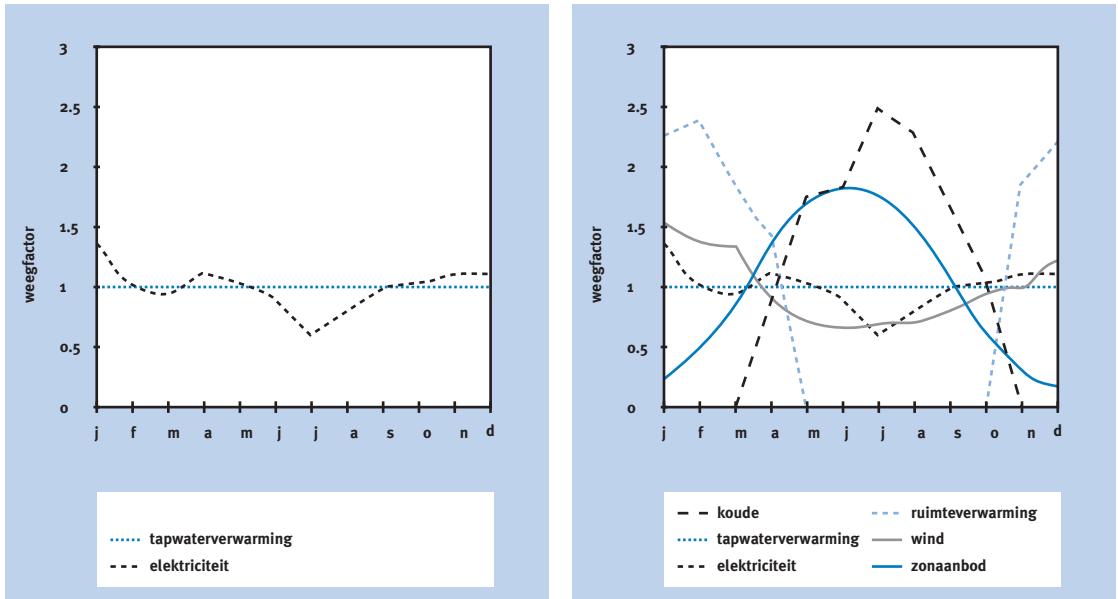


Fig. 2.3-5

Links de jaarpatronen voor elektriciteitsgebruik en tapwaterverwarming in een gemiddeld huishouden in 1995 in vergelijking met de situatie rechts met duurzame energie en de warmtepomp. De cycli voor overig elektrisch verbruik komen uit praktijkmetingen [EnergieNed, 1996b]. De tapwaterverwarmings-, ruimteverwarmings- en koelingscycli uit [Peters, 1994].

aanbod van met wind en zon opgewekte elektriciteit. Hoewel er in het gebruik ook nog een zwak effect van het weekeinde zichtbaar is, valt dat voor onze doeleinden te verwaarlozen.

Het blijkt dat de introductie van de lokale opwekking van duurzame energie en de introductie van de warmtepomp voor verwarming de complexiteit van de situatie aanzienlijk vergroot.

We kunnen een vergelijking maken tussen de huidige gemiddelde vraagpatronen en de toekomstige patronen bij toepassing van lokaal opgewekte duurzame energie. De patronen zijn gebaseerd op een weefactor ten opzichte van het gemiddelde gebruik of de gemiddelde opbrengst.

Fig. 2.3.4 geeft de 24 uren patronen weer. Aangezien airconditioning en warmtepompen nog zeldzaam zijn, hebben we daar alleen te maken met de vraag naar elektriciteit en eventueel met de vraag naar warm tapwater. Deze vraag vormt een relatief klein deel van de gemiddelde elektriciteitsvraag. In de toekomstige situatie zijn de fotovoltaïsche (PV)-opwekking en de warmtepomp opgenomen. De beschouwing van de jaarcyclus geeft een vergelijkbaar beeld. Hier blijkt dat er enige gelijkvormigheid bestaat tussen de curve van windenergie en de curve voor overige elektriciteit (zonder ruimteverwarming).

2.3.4 OPSLAG OF UITWISSELING VAN ENERGIE

ir. J.M. Meij

Vanwege het weinig gelijktijdige gemiddelde gebruik en het gemiddelde aanbod en de onvoorspelbaarheid van het momentane aanbod van zon en wind, ligt het vanuit lokaal perspectief voor de hand om aan opslag te denken. Aangezien in Nederland vrijwel ieder huis een netaansluiting heeft, moet echter ook het uitwisselen van energie naar andere gebruikers in overweging genomen worden. Deze gebruikers kunnen zich op hetzelfde laagspanningsdistributienet bevinden, maar ook op hogere niveaus in distributie- en transportnetten. Aangezien in de komende 20 jaar het momentane aanbod aan lokaal duurzaam opgewekte elektriciteit verhoudingsgewijs een klein aandeel van het momentane gebruik zal bedragen, kan deze elektriciteit in principe elders in het net gebruikt worden. Het transport van elektriciteit door het net kost echter ook energie. De geleiders hebben een ohmse weerstand en ook de transformatoren veroorzaken enig verlies. Tabel 2.3.1 geeft een aantal richtwaarden voor verliezen in het elektriciteitsnet.

Tabel 2.3.1

Richtwaarden voor verliezen in het elektriciteitsnet. LS = laagspanning. MS = middenspanning. TS = tussenspanning. HS = hoogspanning.

	Verliezen		Bron
	gunstig	ongunstig	
inverter DC AC (kleinschalig)	5,0%	8,0%	[Pellis, 1997]
transport in huis	1,0%	1,1%	[Pellis, 1997]
transport LS	0,3%	2,1%	[EnergieNed, 1996]
trafo LS/MS	1,1%	2,6%	[EnergieNed, 1996]
transport MS-distributienet	0,1%	2,7%	[EnergieNed, 1996]
transport MS-transportnet	1,0%	2,0%	[EnergieNed, 1996]
trafo MS/TS	1,1%	1,5%	[EnergieNed, 1996]
transport TS-transportnet	1,0%	2,0%	[EnergieNed, 1996]
trafo TS/HS	1,0%	1,5%	[EnergieNed, 1996]
transport HS-transportnet	1,0%	2,0%	[EnergieNed, 1996]

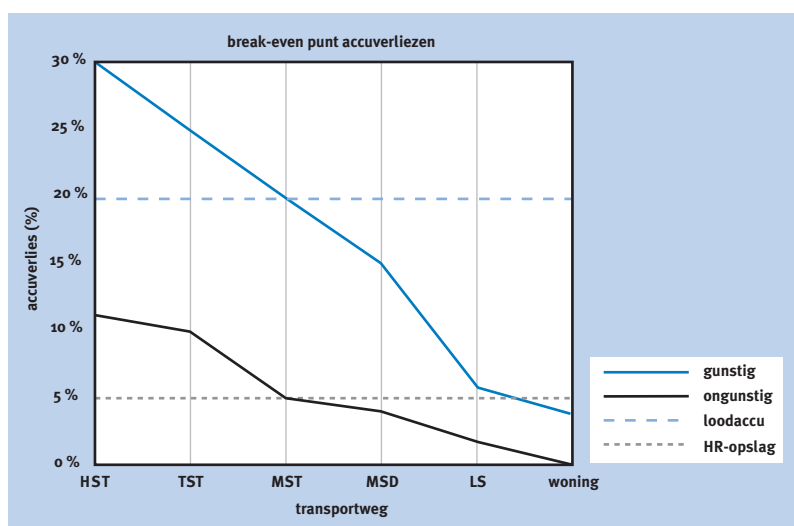
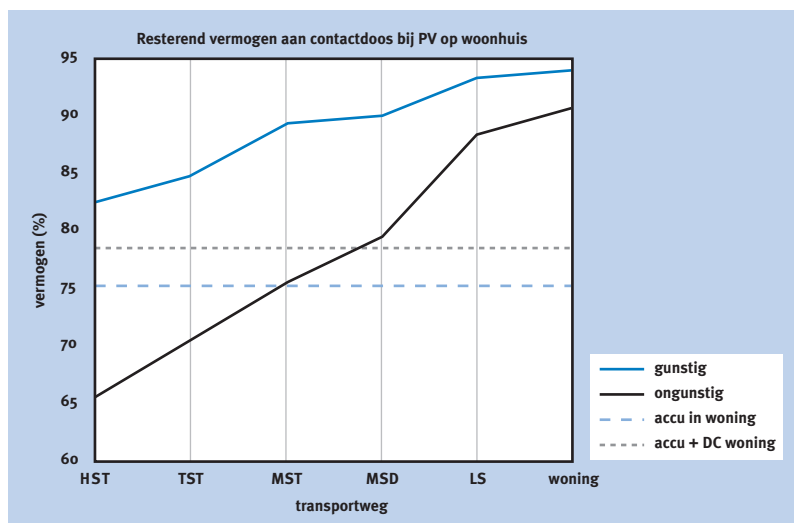
Het opslagsysteem voor elektriciteit dat in de komende decennia het meest in aanmerking komt is een accusysteem, dat vooralsnog is gebaseerd op loodaccu's, maar andere systemen kunnen na 2005 ook een rol gaan spelen. Een belangrijke factor bij de afweging is het systeemrendement. Een loodaccusysteem heeft momenteel een maximaal rendement van 80%, er gaat dus minimaal 20% verloren bij het laad- en ontladproces. Gebaseerd op de bovenstaande gegevens kan een vergelijking gemaakt worden tussen de verliezen in verschillende situaties. Daarbij is het totale verlies uitgerekend van het transport van op een woonhuis opgewekte fotonvoltaïsche (PV) elektriciteit die via verschillende wegen een contactdoos in een ander woonhuis bereikt.

Fig. 2.3.6

Verliezen door transport van fotovoltaïsche (PV) elektriciteit van de ene kleinverbruiker naar de contactdoos van een andere kleinverbruiker langs verschillende niveaus in het elektrische net. Ook de omzettingsverliezen zijn in de berekening betrokken. LS: transport via het laagspanningsnet. MSD: transport via het LS-net, de LS/MS-trafo, het middenspanningsdistributienet, de MS/LS-trafo, en het LS-net. MST: als MSD maar met een extra stuk transport over het MS-transportnet. TST: Als MST maar met twee extra trafostappen en transport over het tussenspanningsnet. HST: als TST maar met twee extra trafostappen en hoogspanningstransport. Afhankelijk van het plaatselijke net kunnen sommige stappen overgeslagen worden, waardoor de verliezen verminderen.

Fig. 2.3.7

Break-even punt accuverliezen in verhouding tot de transportweg. HR = hoog rendement.



Het blijkt dat bij een opslagverlies van 20% zelfs in het meest ongunstige geval het transport via het middenspanningstransportnet nog minder verlies geeft dan het gebruik van het opslagsysteem.

Gezegd moet worden dat deze conclusie erg gevoelig is voor veranderingen in het rendement van de opslagsystemen. Grafiek 2.3.7 toont de verliezen van de verschillende transportmogelijkheden bij verschillende accuverliezen.

Uit het voorgaande kan geconcludeerd worden:

- De kleinste verliezen ontstaan wanneer de energie lokaal gebruikt wordt in huis (minimaal 6% conversie- en transportverlies) of in de wijk (minimaal 7,5% conversie- en transportverlies).

- Zelfs in de netten met het meeste verlies is het transport via het tussenspanningsnet nog gunstiger dan opslag in loodaccu's. In een verliesarm net is ieder transport beter dan opslag in loodaccu's.
- Een radicale verhoging van de laad- en onlaad efficiëntie naar 95% (door de toepassing van andere opslagsystemen) geeft alleen in verliesarme netten tot middenspanningsdistributie een voorkeur voor transport. In netten met veel verlies is opslag dan gunstiger vanaf laagspanningstransport.

SYSTEEMINTEGRATIE EN OPTIMALISATIE

ir. J.J. Kruisman¹², dr. H.J. Veringa¹³

Inleiding

Traditioneel was de planning van de Nederlandse energievoorziening 'top-down' van aard. Zo is er het Elektriciteitsplan (Sep) en het 'Plan van gasafzet' (Gasunie) met elk zijn eigen planningscyclus, niveau van detaillering en toetsingskader. Het schaalniveau voor beide plannen is nationaal met globale, internationale en regionale consequenties.

De veranderde spelregels op de energiemarkt hebben reeds geleid tot een duidelijker scheiding tussen energieaanbieders, transporteurs en distributeurs. Tevens hebben de nieuwe spelregels geleid tot het openbreken van de monopolies. Hierdoor zijn mogelijkheden ontstaan voor nieuwe marktpartijen en veranderingen in de verhouding tussen de aanbieders en de afnemers van energie. De toegenomen flexibiliteit van de energiemarkt vraagt om energiesystemen, die in hoge mate flexibel en aanpasbaar zijn.

In de voorgaande paragrafen zijn de ontwikkelingen die invloed zullen hebben op de energie-infrastructuren van de toekomst aan bod geweest. Het brede scala aan mogelijkheden vraagt om een zorgvuldige afweging en om nieuwe vormen van planning, waarbij ook op lokaal niveau gedacht wordt.

Onderzoek

Zoals door de Verkenningcommissie Energieonderzoek (VCE) wordt geconcludeerd, kan men door systeemaspecten te bestuderen inzicht krijgen in de mogelijkheden, richtingen en doelstellingen voor de ontwikkeling van energieonderzoek op de lange termijn. Er kunnen geen energietechnieken worden aangewezen zonder hun concurrentiepositie ten opzichte van andere technieken en voorzieningsstructuren te bepalen. Om steeds de juiste prioriteiten te blijven stellen, acht de VCE een combinatie van systeemstudies, 'technology assessments' en modelberekeningen geschikt. Daarnaast concludeert de VCE dat de overgang naar een duurzamer energievoorziening belangrijk kan worden bevorderd door een betere samenwerking tussen de bèta- en de gammawetenschappers.

.....
¹² Energie Noord West N.V.,
 Postbus 23451
 1100 DZ Amsterdam-Zuidoost

¹³ ECN,
 Postbus 1
 1755 ZG Petten
 veringa@ecn.nl

Een en ander resulteert in de volgende doelstellingen voor verder onderzoek op het gebied van systeemintegratie.

- Het ontwikkelen van een aanvullend instrumentarium waarmee het ontwerp van een optimale regionale energie-infrastructuur wordt ondersteund en dat een structuur geeft aan het besluitvormingsproces met expliciete toetsing van criteria als duurzaamheid, emissiebeperking en energiebesparing, flexibiliteit, leefbaarheid, acceptatie, economische haalbaarheid, betrouwbaarheid, veiligheid. Het accent ligt op een maximale toepassing van duurzame energie, waarbij ingespeeld wordt op mogelijke toekomstige ontwikkelingen.
- Het toepassen van dit instrumentarium waardoor een beeld ontstaat van technologische en bestuurlijke problemen, die mogelijk door nader onderzoek kunnen worden weggenomen. Op basis van deze ervaring kan de ontwikkeling van energieconversie, opslagsystemen en gebruikssystemen worden bijgestuurd om de inpasbaarheid te vergroten.
- Eveneens zal zichtbaar gemaakt moeten worden op welke termijn en in welke omvang nieuwe systemen, die aangesloten worden op de netwerken beschikbaar zijn, opdat men bij de opzet van een infrastructuur hiermee rekening kan houden.
- Systeemintegratie als onderzoeksonderwerp moet bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe concepten voor energienetwerken en nieuwe productmarktcombinaties die duurzame ontwikkelingen bevorderen en die voor bedrijven aantrekkelijk zijn.
- Vervolgens moet er een platform gecreëerd worden zodat bèta- en gamma-wetenschappers beter gaan samenwerken om de overgang naar een duurzame energievoorziening optimaal te ondersteunen.

Zoals betoogd, is het zaak een nieuw planningsysteem met een ‘bottom-up’ karakter te ontwikkelen dat toegepast kan worden in een iteratief en participatief ‘multi-actor’ besluitvormingsproces. Het bestaande instrumentarium is daar onvoldoende geschikt voor. Het is dus noodzakelijk om een dergelijk nieuw planningsysteem in al zijn verschillende facetten als een geïntegreerd onderzoeksveld aan te pakken.

Systeemintegratie als onderzoeksonderwerp kan daarmee de introductie van nieuwe (duurzame) technologieën faciliteren door gereedschappen te ontwikkelen die inzicht verschaffen in de juiste technologiemix voor (stedelijke) (deel)gebieden, zoals Vinex-locaties, groeilocaties en bestaande bouw wat betreft ontwerp, vernieuwing of aanpassing van systemen en netwerken in een geoptimaliseerde energie-infrastructuur.

2.4 TOEKOMSTBEELDEN VOOR DE VOORBEELDWIJKEN

2.4.1 INLEIDING

ir. P.G.M. Boonekamp¹⁴

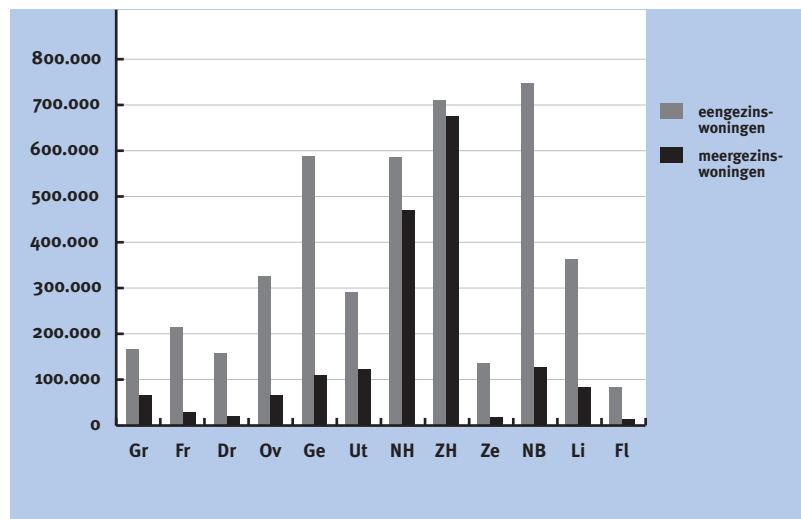
Om de veranderingen in de elektriciteitsvoorziening op lokaal niveau te beschrijven wordt de toekomstige omgeving geschetst waarin de nieuwe technieken hun plaats zullen vinden.

Op de hier veronderstelde termijn tot het jaar 2020 zijn talloze uiteenlopende ontwikkelingen mogelijk in de wijk en in de woning. Omdat de woonwijk voor veel energiesystemen een betere schaalgrootte mogelijk maakt dan een enkel woonhuis, hebben we deze als uitgangspunt genomen. We onderscheiden drie belangrijke kenmerken:

- *Bestaande bouw of nieuw te bouwen wijk.* Een nieuw te bouwen wijk geeft de planologen en architecten de mogelijkheid om vanaf het begin rekening te houden met de toekomstige energievoorziening. In een bestaande wijk is minder mogelijk.
- *Ruimtelijke opzet.* Vooral in Noord- en Zuid-Holland bestaat een groot deel van de bestaande woningen uit meergezinswoningen. De per woning beschikbare hoeveelheid dakoppervlak voor energiewinning is bij deze woningen veel kleiner. Dit betekent dat er meer aandacht moet zijn voor andere oplossingen. Fig. 2.4.1 geeft de hoeveelheden een- en meergezinswoningen per provincie.
- *Sociaal-economische kenmerken en levensstijl.* Een (dubbel) en dus hoger inkomen geeft andere mogelijkheden dan een (enkel) laag inkomen. Afhankelijk hiervan kan de duurzame energievoorziening een zichtbaar statussymbool zijn of juist een onzichtbaar collectief dienstverlenend systeem.

Fig. 2.4.1

De verhouding tussen eengezins- en meergezinswoningen per provincie in 1995. Bron: [DGVH, CBS].



14 ECN Beleidsstudies,
Postbus 1
1755 ZG Petten
boonekamp@ecn.nl

Deze kenmerken staan aan de basis voor de keuze van de wijktypen die als voorbeeld geschetst worden. Omdat het aantal mogelijkheden groot is, hebben we een keuze gemaakt uit vier situaties.

Tabel 2.4.1

Gekozen situaties voor de toekomst-beelden.

	dure woningen		minder dure woningen	
	compact	ruim	compact	ruim
nieuw te bouwen	all electric	groene weelde	autark	
bestaande bouw	toplocatie- appartementen	bungalows oude stijl	synergie	opknapper

Deze situaties leiden tot de volgende vier voorbeeldwijken van de toekomst:

1. All electric: een nieuwe, energie-neutrale wijk zonder aansluiting op het gasnet.
2. Groene weelde: een nieuwe, duurdere wijk met (half) vrijstaande huizen.
3. Synergie: een combinatie tussen oude en nieuwe woningen.
4. Autark: een in energieopzicht zelfvoorzienende wijk.

2.4.2 VOORBEELDWIJKEN VOOR 2020

1. ALL ELECTRIC

dr. W. Gilijamse¹⁵, ir. J.M. Meij

De bewoners van deze wijk zijn gemotiveerde mensen die energie willen besparen en duurzame energie willen toepassen. Zij willen daarvoor eenmalig investeren, maar wensen geen verantwoordelijkheid voor een eigen, onafhankelijke energievoorziening.

De belangrijkste energiekenmerken van deze wijk zijn:

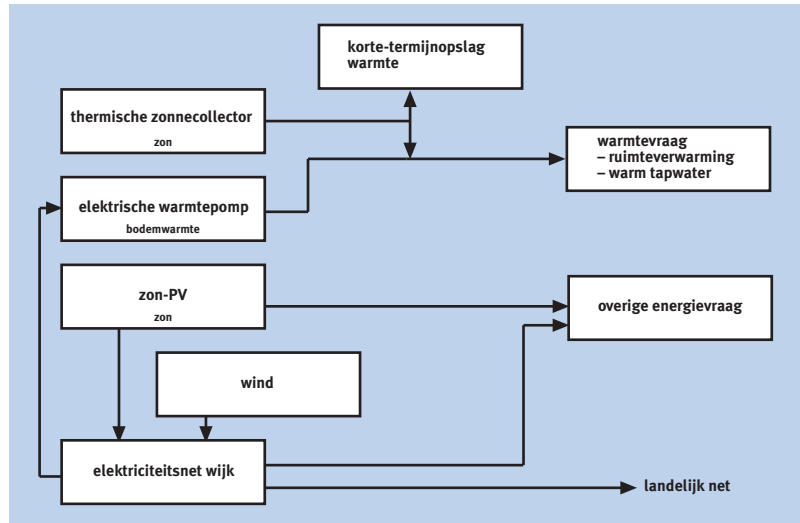
- de productie en het gebruik van energie in de wijk zijn in evenwicht. Daarbij wordt er energie geïmporteerd en geëxporteerd, afhankelijk van de omstandigheden.
- de uitwisseling van energie vindt alleen via het elektriciteitsnet plaats. De wijk en de woningen zijn niet gekoppeld aan het gasnet.

De woningen in de wijk zijn uitgerust met fotovoltaïsche (PV) cellen en thermische zonnecollectoren. Een warmteopslagvat kan overschotten van zonnewarmte voor enkele dagen opslaan. Een elektrische warmtepomp in de woning onttrekt warmte aan de bodem, vooral in de winter als het warmteaanbod uit de collectoren tekort schiet. Om het zon-aandeel in de verwarming te verhogen kan de warmteopslag eventueel worden uitgebreid tot een seizoensopslag die zomerse warmteoverschotten tot in de winter kan opslaan.

.....
¹⁵ ECN,
 Postbus 1
 1755 ZG Petten
 Gilijamse@ecn.nl

Fig. 2.4.2

Schematische weergave van de energiehuishouding in de All electric wijk.



Koken gebeurt op elektriciteit. Airconditioning wordt in het algemeen niet geïnstalleerd. De kamerthermostaat wordt ook energiemeter en geeft de PV-opbrengst, het eigen verbruik en het actuele teruglevertarief aan. Om de opgewekte elektriciteit in te koppelen op het landelijke net, is per huis een PV-converter geïnstalleerd, die met een hoog rendement de DC-spanning van de PV-cellen omzet in 230 V AC. Ook is er een elektriciteitsmeter die de teruggeleverde elektriciteit registreert en de actuele situatie toont op de kamerthermostaat. Als de bewoners dat wensen, kan een voorziening worden geïnstalleerd die een tijdelijk eilandbedrijf mogelijk maakt, wanneer een stroomstoring optreedt. Het elektriciteitsnet in deze wijk is relatief zwaar uitgevoerd om de elektriciteit die via PV is gewonnen op zonnige dagen naar behoren te kunnen afvoeren.

Fig. 2.4.2 geeft een schematische weergave van de energiesystemen in de wijk. Doordat de wijk een lage woningdichtheid heeft, kan bodemwarmte gebruikt worden als warmtebron.

Een overzicht van de energiebalans per woning in de all electric wijk wordt gegeven in tabel 2.4.2.

Opvallend aan deze wijk is de grote hoeveelheid PV (30 m² met een rendement van 15%) per woning, die nodig is om de totale elektriciteitsbehoefte te dekken en dit ondanks een forse besparing op het overig elektriciteitsgebruik (van 3.000 naar 2.000 kWh per jaar). Wel is het zo dat ook de elektriciteit voor de ruimteverwarming met de warmtepomp meegerekend wordt. Ook gaan we uit van een optimale plaatsing van alle PV-cellen ten opzichte van de zon. Dit betekent dat er voor PV- en thermische collectoren een oppervlakte van bijna 35 m² op het zuiden beschikbaar moet zijn. Dat heeft consequenties voor het ontwerp van de woningen. Het totale dakoppervlak van een gemiddeld huis met een puintdak is ongeveer 60 m².

	Techniek	Vermogen		Energie		Opmerking
		kW	kWth	kWh/jr	kWh th/jr	
winning elektriciteit	PV	4,5		4.500		30 m ²
	wind	0		0		
				4.500		
winning warmte	thermische collectoren	2			2.340	4 m ²
	bodemwarmtewisselaar				6.165	
					8.505	
opslag elektriciteit						
opslag warmte	water (kort)					0,5 m ³
	bodem (seizoen)					
gebruik ruimteverwarming	warmtepomp	3		975	3.900	
gebruik warm tapwater	warmtepomp	3		1.050	4.200	
gebruik koeling	passief					
overig elektrisch gebruik				2.000		
				4.025	8.100	

		kWh		kWh th		
energiebalans elektrisch	winning	4.500		energiebalans	winning	8.505
	gebruik	4.025		warmte	gebruik	8.100
	verliezen	270			verliezen	405
	netto	205			netto	0

Tabel 2.4.2

Energiebalans per woning in de all electric wijk. De elektrische verliezen zijn gebaseerd op de aanname dat 30% van de PV-electriciteit via het laag-, midden- en hoogspannings-net de uiteindelijke gebruikers bereikt, met een totaal verlies van 20%. De warmteverliezen zijn gebaseerd op een verlies van 5% ten opzichte van het gebruik.

Fig. 2.4.9 in par. 2.4.2 laat zien dat er veel uitwisseling met het elektriciteitsnet plaatsvindt. In de zomer is er 's middags een overschot aan elektriciteit, de overige tijd is er een tekort.

2. GROENE WEELDE

ir. P.G.M. Boonekamp¹⁶

De bewoners vallen in het hoogste consumptiesegment dat marktonderzoekers onderscheiden. Hoge arbeidsparticipatie en tijdsdruk leiden bij toekomstige tweeverdieners tot een behoefte aan een hoogwaardige woonomgeving: grote (half) vrijstaande koopwoningen met een extra werkkamer in een rustige, veilige en ruim opgezette wijk (< 25 woningen per ha). De bewoners geven veel geld uit aan wonen en nieuwe apparaten. Ondanks het zuiniger worden van de apparaten loopt het elektriciteitsverbruik op van 3 tot 4.000 kWh nu (1998) naar meer dan 5.000 kWh per jaar. Dat komt onder andere door de installatie van airconditioning. Een gasaansluiting is nog rendabel ondanks de scherpe verbruiks-

.....
16 ECN Beleidsstudies,
 Postbus 1
 1755 ZG Petten
 boonekamp@ecn.nl

normen; door de grootte van de woning, het relatief grote aantal gezinsleden en de levensstijl blijft het gasverbruik ongeveer op het huidige niveau (1.500 - 2.000 m³ per jaar). Hoewel de energierekening nauwelijks een probleem vormt, is men wel kien op een gunstig aanbod van een energie(diensten)leverancier, bijvoorbeeld bij regeling van het elektriciteitsverbruik. Deze groep wil echter geen lagere kwaliteit, ook als daardoor de prijs omlaag gaat. Een hoogwaardige telecommunicatiestructuur voor deze regeling is in deze wijk te combineren met allerlei andere toepassingen zoals betaaltelevisie of Internet. De huizen worden standaard opgeleverd met 15m² PV-cellen en een forse zonneboiler.

Men accepteert de (kostbare) eisen die de overheid stelt aan een zuinige en schone energievoorziening, zolang dit maar niet ten koste gaat van het comfort en de betrouwbaarheid en vooral van de kostbare vrije tijd. Men is wel gevoelig voor status door bijvoorbeeld voor een (duidelijk zichtbare) bijzondere energievoorziening te kiezen. Het is denkbaar dat bewoners individuele contracten afsluiten met een energieleverancier over het zoveel mogelijk zelf voorzien in de energiebehoefte via het doen installeren van extra PV-cellen, zonneboilers en micro warmte/kracht (w/k)-koppeling. Bij al deze installaties moet wel gelet worden op de verkoopbaarheid van de woning na (gemiddeld) 10 jaar. Door het hoge gebruik, een gunstig belastingpatroon en een uitgekiend optimaliserings-systeem kan een relatief groot deel van de productie door de bewoners zelf gebruikt worden. De rest wordt afgezet via het tamelijk zwaar uitgevoerde net. Het gebruik uit het net blijft over het algemeen groter dan de eigen winning. Indien moeilijk voldaan kan worden aan de inmiddels geldende eisen van duurzaam gebruik wordt elders opgewekte groene stroom en groen gas ingekocht.

Voor nieuwe energie(diensten)leveranciers is deze groep afnemers zeer interessant vanwege hun groeiende gebruik en hun open opstelling ten opzichte van

Fig. 2.4.3

Ruim opgezette vrijstaande woning, zoals deze in wijktype 2 kan voorkomen.



	Techniek	Vermogen		Energie		Opmerking
		kW	kWth	kWh/jr	kWh th/jr	
winning elektriciteit	PV	2.025		2.025		15 m ²
	wind	0		0		
				2.025		
winning warmte	thermische	2			2.340	4 m ²
	collectoren					
					2.340	
opslag elektriciteit						
opslag warmte	zonneboiler					
gebruik ruimteverwarming	HR-ketel	0		350	3.731	
gebruik warm tapwater	zonneboiler	0		0	3.357	
	HR-ketel					
gebruik koeling	airconditioning			600		
overig elektrisch gebruik				4.550		
				5.500	7.088	
energiebalans elektrisch						
	winning	2.025		energiebalans	winning	2.340
	gebruik	5.500		warmte	gebruik	7.088
	verliezen	41			verliezen	234
	netto	-3.516			netto	-4.982

Tabel 2.4.3
*Energiebalans per woning in de
duurdere nieuwbouwwijk.*

nieuwe ontwikkelingen. Zij zullen ook gebruik maken van energieadviseurs (bijv. van het distributiebeprij) en willen zelf de inrichting van hun energiesysteem bepalen.

Men is in deze wijk niet zo gecharmeerd van collectieve arrangementen zoals seizoensopslag op wijkniveau. Projectontwikkelaars stappen hier tijdens de bouw niet in, omdat ze niet weten of de potentiële kopers dit zullen accepteren. Na oplevering is het zeer moeilijk om zoveel individuele eigenaren op een lijn te krijgen; bovendien moet een financieel en technisch robuust bedrijf erin willen stappen. Tabel 2.4.3 geeft een beeld van de energiebalans van een woning in de wijk.

De PV-cellen en de zonneboiler kunnen in deze wijk niet voorkomen dat het netto elektriciteits- en gasverbruik nog steeds boven het gemiddelde ligt. Hiermee wordt geïllustreerd hoe gevoelig de opbrengst van de duurzame energiewinning is voor een toename in energie-intensieve toepassingen.

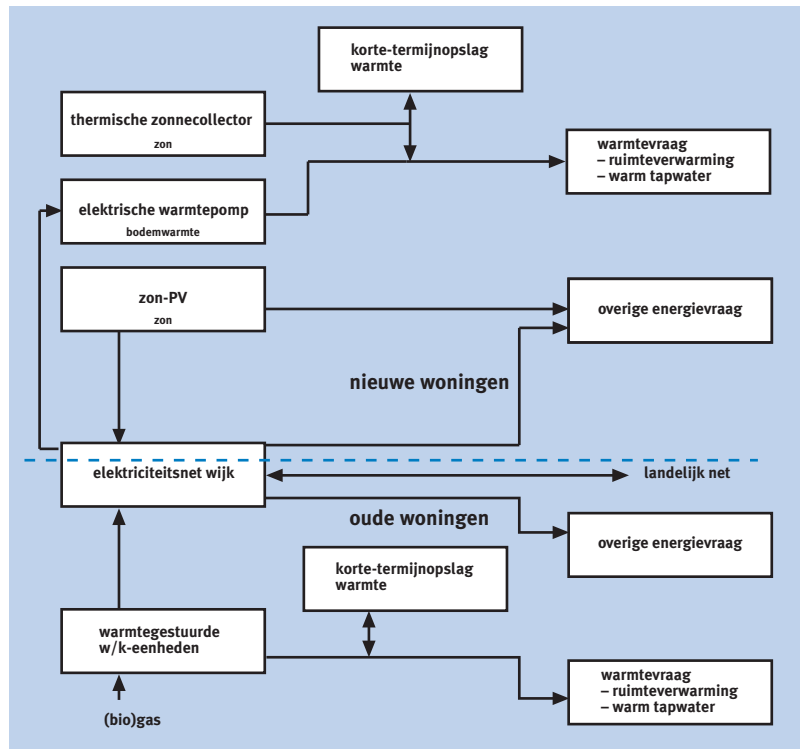
3. SYNERGIE TUSSEN OUDE EN NIEUWE WONINGEN

dr. W. Gilijamse¹⁷, ir. P.G.M. Boonekamp¹⁸, ir. J.M. Meij

Het gebruik van de warmtepomp voor ruimteverwarming vraagt om lage-temperatuurwarmteafgiftesystemen en -opslagsystemen die in bestaande bouw (voorlopig) alleen tegen hoge kosten te realiseren zijn. Een alternatief kan dan gevonden worden in een micro of mini warmte/kracht (w/k)-generator, die als verwarming kan worden gebruikt. Naast warmte wordt ook elektriciteit opgewekt die teruggeleverd wordt aan het net. Als in dezelfde wijk ook nieuwe woningen met warmtepompen aanwezig zijn, is er (gemiddeld) vaak gelijktijdig vraag naar warmte in de bestaande woningen en naar elektriciteit in de woningen met een warmtepomp. Een juiste verhouding tussen warmtepompen en w/k-eenheden zorgt ervoor dat er zo min mogelijk elektriciteit verloren gaat door transport. De oude woningen worden wel aangepast, zodat zij aan de overheids-eisen voor bestaande woningen voldoen. De woningbouwvereniging bepaalt in overleg met de bewoners welke veranderingen in de systemen voor ruimteverwarming en warm tapwater worden aangebracht. Bij deze bestaande bouw gaat het om vooroorlogse etagewoningen of naoorlogse flatwoningen, voorzover deze nog niet gesloopt zijn vanwege technische of sociale gebreken. De bebouwingsdichtheid is in het eerste geval zeer hoog (> 50 woningen per ha), in het tweede geval is er sprake van een gemiddelde

Fig. 2.4.4

De energiestromen bij een optimale combinatie van warmtepompen en w/k-eenheden in nieuwe, respectievelijk oude woningen in een wijk. Als de verhouding tussen warmtepompen en w/k-eenheden goed is, ontstaat er een situatie waarbij de elektriciteit voor de warmtepompen in de wijk zelf opgewekt wordt.



17 ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
Gilijamse@ecn.nl

18 ECN Beleidsstudies
Postbus 1
1755 ZG Petten
boonekamp@ecn.nl

dichtheid (35 woningen per ha). De energetische kwaliteit verbetert dankzij de aanpassingen, maar is nog steeds slechter dan bij nieuwbouw. Het verbruik voor ruimteverwarming is echter relatief laag vanwege de bouwvorm. Het elektriciteitsverbruik daalt tot 2.000 kWh per jaar. In deze bestaande woningen wordt standaard een basis-communicatiestructuur aangelegd.

De nieuwe woningen in de wijk zijn voorzien van een redelijk oppervlak PV-cellen en thermische zonnecollectoren. Het nieuwe deel van de wijk hoeft geen gasaansluiting te hebben, in het oude deel heeft iedere woning een gasaansluiting. Ook kunnen collectieve w/k-eenheden in combinatie met een kleinschalig warmtedistributienet worden gebruikt. Dit is vooral zinvol bij gestapelde bouw, waar bijvoorbeeld per gebouw een w/k-eenheid kan worden geplaatst.

4. AUTARK

ir. H.F.A. Sidler¹⁹, ir. J.M. Meij

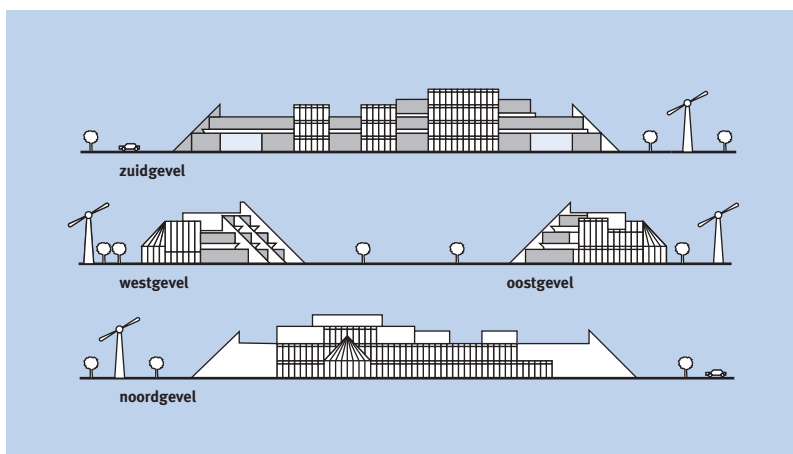
Schattingen geven aan dat bij meer dan 25% fotovoltaïsche (PV) en windenergie het net niet meer als buffer gebruikt kan worden. Verdere uitbreiding van het aandeel duurzame energie vraagt om centrale of decentrale opslag. In dit voorbeeld is ervoor gekozen om de opslag in de wooneenheid te laten plaatsvinden. Het belang van een dergelijke zelfvoorzienende opzet neemt toe naarmate het aandeel ongeregelde duurzame energie in de totale elektriciteitsvoorziening toeneemt.

In deze wijk wordt middelhoog gebouwd tot 4 woonlagen. Iedere woning heeft een dak- of balkontuin van redelijke afmetingen. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden door trapeziumvormige gebouwen.

Door de plaatsing van wooneenheden langs de buitenschil ontstaan binnenruimten, die kunnen worden gebruikt als parkeergarages, crèches, sportruimten, kleine bedrijven, schooltjes, winkels en dergelijke. Zo wordt een combinatie van

Fig. 2.4.5

Een ontwerp voor twaalf woningen met energievoorziening in eilandbedrijf.



19 C.O.R.E. International,
Heuvelenweg 18
7241 HZ Lochem
CORE_international@
compuserve.com

wonen en werken in één gebouw gerealiseerd. Bij de indeling kan onderscheid worden gemaakt tussen openbare ruimten en ruimten die uitsluitend toegankelijk zijn voor de bewoners (semi-openbare ruimten). Door deze opzet worden zaken als gemeenschapszin en sociale controle weer tot leven gewekt. Van groot belang – het concept staat of valt ermee – is een hoog niveau van architectuur en stedenbouw.

Het bijzondere van deze wijk is dat de woonclusters in energieopzicht zelfvoorzienend zijn. De benodigde energie voor de woningen wordt in de wijk zelf geproduceerd. De enige ‘energie’-import is het voedsel dat door de bewoners wordt gekocht en uiteindelijk als zwart water en GFT-afval beschikbaar komt. Een belangrijk element in de elektriciteitsvoorziening is de windturbine, die per huishouden 3.200 kWh per jaar levert. Daarnaast is per huis 5 m² PV-cellen geïnstalleerd. Een mini warmte/kracht (w/k)-eenheid levert elektriciteit als de opbrengst van de windturbine en de PV-cellen onvoldoende is. De mini w/k draait op biogas, dat ontstaan is door vergisting van het rioolwater en het GFT-afval van de wooncluster. De biogasproductie heeft een hoge opbrengst per kg biomassa, omdat de vergisting snel en dicht bij de bron plaatsvindt. Het GFT-afval wordt in de stortplaats verzuurd en daardoor geconserveerd tot de vergisting begint.

Een centrale opslageenheid met accu’s zorgt voor overbrugging van korte perioden (24 uur) zonder zon en wind, en kan daarnaast bij vraagpieken het vermogen van de mini w/k-eenheid aanvullen.

De ruimteverwarming van de woningen vindt plaats met warmte uit 14 m² zonnecollectoren per huis en uit de warmteopbrengst van de mini w/k-eenheid. De warmte kan opgeslagen worden in de centrale hoge-temperatuurbuffer.

Een schematische weergave van de energiesystemen in de wijk wordt hierna gegeven. Opvallend is dat de elektriciteits-, de warmte-, en de waterhuishouding sterk met elkaar verweven zijn.

Wanneer we het elektrische deel van de energievoorziening nader bekijken, dan zien we daar een centrale rol voor een Power Control Unit (PCU) die de windturbine, de mini w/k, de accu’s en het net in de wooneenheid met elkaar verbindt en optimaal op elkaar afstemt. Daarbij dient telkens rekening gehouden te worden met de momentane toestand van de verschillende componenten, bijvoorbeeld het toerental van de generator of de ontladingstoestand van de accu’s. Ook de regeling van de wijknetfrequentie neemt de PCU voor zijn rekening. De PV-modulen kunnen door middel van kleine converters het lokale AC (wisselstroom)-net invoeden.

De woningen hebben geen gasaansluiting. De energievoorzieningssystemen zijn eigendom van en worden beheerd door professionele rechtspersonen, bijvoorbeeld energiedistributiebedrijven. Die leveren in dit beeld geen elektrici-

Fig. 2.4.6

Energiesystemen in de zelfvoorzienende wooneenheid.

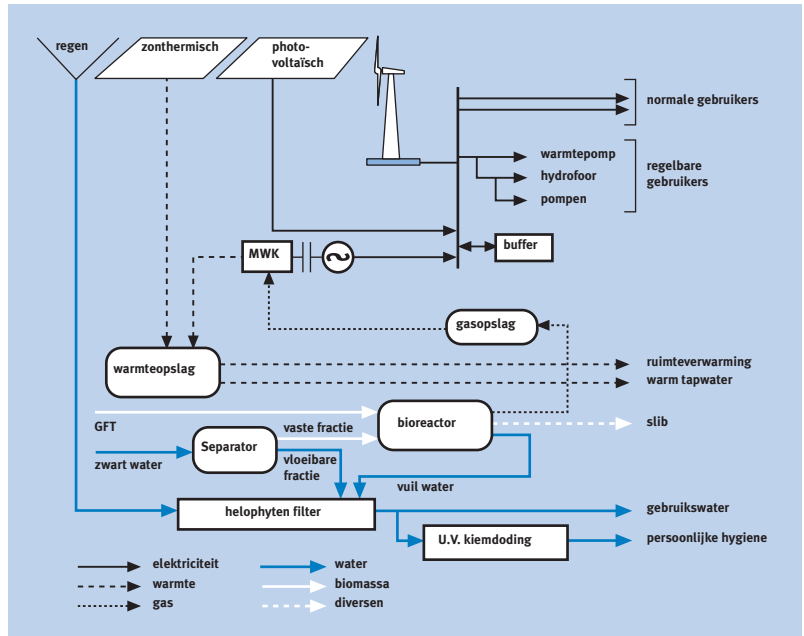
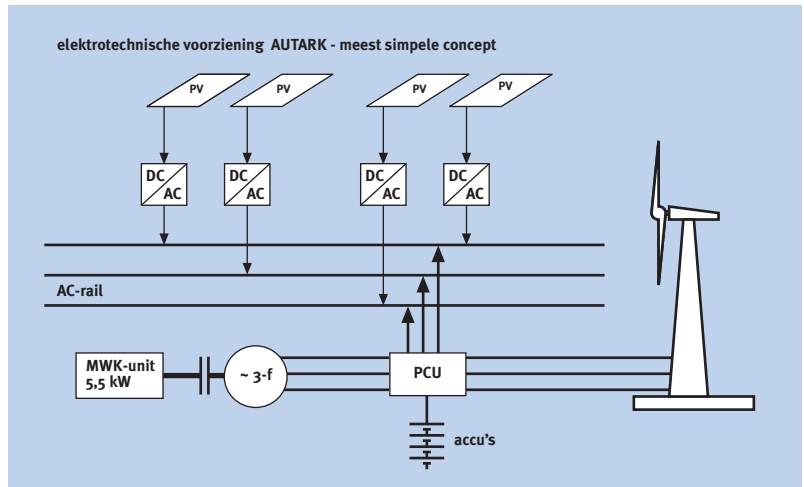


Fig. 2.4.7

Een mogelijke configuratie van het elektrische systeem. De mini w/k, de accu's en de windturbine worden via de Power Control Unit (PCU) aan elkaar en aan de rest van het systeem gekoppeld. De accu's leveren DC, de turbine en de mini w/k wisselstroom, eventueel van een hoge frequentie. De PCU maakt en regelt de wisselspanning.



teit, gas of water, doch de eindproducten: warmte, licht en kracht. De bewoner heeft een meterkast, waarin wordt gemeten hoeveel eenheden warmte en elektriciteit zijn afgenomen en daarvoor wordt dan betaald. De toegevoegde waarde van de energiedistributiebedrijven kan liggen in het leveren van investeringskapitaal of in de aanwezige kennis van systemen en besparingsmogelijkheden. Het autarkische concept gaat uit van een grote betrokkenheid van de bewoners, vooral om het gebruik van energie te reduceren. Wasmachines (en vaatwassers) zijn van het 'hot-fill'-type en maken gebruik van het terugwinnen van warmte. Men kan zich voorstellen dat deze machines ook collectief zijn en dat de energiedistributiebedrijven het beheer voeren. Ruimte- en tapwaterverwarming

	Techniek	Vermogen		Energie		Opmerking
		kW	kWth	kWh/jr	kWh th/jr	
winning elektriciteit	PV	0,3		300		2 m ²
	wind	3,8		2.845		
	w/k op biogas	0,55		298		
				3.444		
winning warmte	thermische collectoren		9		10.530	18 m ²
	w/k op biogas		1,25		678	
				kWh	11.208	
opslag elektriciteit	accusysteem	5		10		
	Power Control Unit					
opslag warmte	water					35 m ³
				kWh/jr		
gebruik ruimteverwarming	w/k, collectoren	3			3.900	
gebruik warm water	w/k, collectoren	3			4.200	
gebruik koeling	passief					
overig elektrisch gebruik				2.950		
				2.950	8.100	

		kWh		kWh th		
energiebalans elektrisch	winning	3.444		energiebalans	winning	11.208
	gebruik	2.950		warmte	gebruik	8.100
	verliezen	482			verliezen	3.082
	netto	12			netto	26

Tabel 2.4.4

Energiebalans per woning in de autarkische wooneenheid. De elektrische verliezen zijn gebaseerd op de aanname dat 70% van de elektriciteit via het opslagsysteem de gebruiker bereikt, met een verlies van 20%. De warmteverliezen zijn gebaseerd op de aanname dat 50% van de warmte via de buffer gebruikt wordt, met een verlies van 45%. De opbrengst van de windturbine is gebaseerd op 750 kWh/jr per kW, dit is lager dan het gemiddelde door de plaatsing dicht bij de bebouwing. De opbrengst van de w/k-eenheid is gebaseerd op de hoeveelheid GFT en zwart water van een gemiddeld gezin bij optimale voorwaarden voor vergisting.

gebeuren door middel van een warmtepomp per woning of per gebouw.

Een grote verandering zal zijn dat energie niet op ieder moment in elke gewenste hoeveelheid beschikbaar is. Wasmachines en dergelijke wachten maximaal enige uren op het beschikbaar komen van duurzame energie. In 'noodgevallen' kan de gebruiker onmiddellijk energie claimen. Dit wordt dan geregistreerd en verrekend.

Koelkasten (met koudebuffer) draaien zo veel mogelijk bij beschikbaarheid van duurzame energie. Door dit soort maatregelen is een elektrische buffer slechts op beperkte schaal en voor korte tijd nodig.

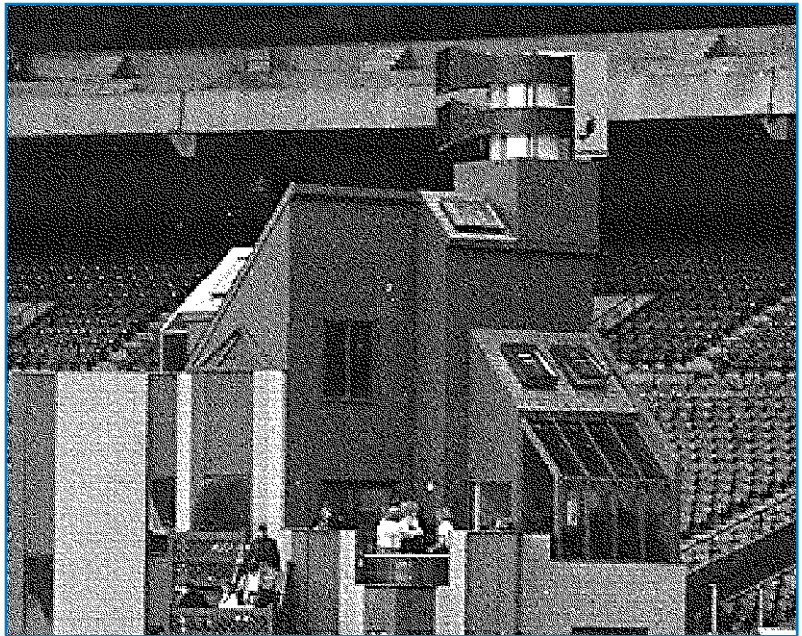
Deze energiebalans geeft alles bij elkaar positieve cijfers die aangeven dat er veel te bereiken valt met duurzame energiewinning in de wijk.

De accu's en de w/k-eenheid moeten tijdelijke tekorten aan zon- en windenergie opvangen. Hoe beter de afstemming tussen winning en gebruik, hoe kleiner de accubank mag zijn. Over het algemeen valt het gemiddelde opbrengstverloop van de opwekking uit wind redelijk samen met de gemiddelde vraag.



Fig. 2.4.8

*Speciale kleine stille en vibratie-
arme windturbines als eerste stap
naar de integratie van wind in de
woonomgeving. Hier een turbine
toegepast in een voorbeeldpaviljoen
op de Canadese Salon d'habitat.
Bron: [Turbowatt Inc., Ste-Thérèse,
Québec, www.turbowatt.qc.ca].*



Dat maakt de combinatie van wind en een woonwijk tot een aantrekkelijke optie. Voor een succesvolle integratie van wind in de woonomgeving zullen de windturbines echter aan hoge eisen op het gebied van geluid, trillingen, vormgeving en plaatsing moeten voldoen. In de markt zijn een aantal ontwikkelingen te signaleren die duiden op een toenemend aanbod in deze richting.

VRAAG- EN AANBODPATRONEN IN DE VOORBEELDWIJKEN

ir. J.M. Meij

We kunnen de eerder beschreven cijfers van de energiebalansen van de voorbeeldwijken koppelen aan de in par. 2.3 gegeven patronen. De beschreven patronen staan niet in de juiste verhouding tot vraag of aanbod van de genoemde functies of bronnen. Ze geven slechts een indicatie van de pieken en dalen in vraag of aanbod. Voor een preciezere onderling gewogen indicatie moet een bepaald woningtype met een bepaalde configuratie voor verwarming en andere functies worden gekozen.

De cijfers voor het jaarverbruik worden gecombineerd met de momentane weegfactoren van de dag- en de jaarcycli. De patronen van deze cycli – de zogenaamde convolutiepatronen – geven de momentane vermogensvraag volgens de volgende formule:

$$P(t)_{\text{momentaan}} = P_{\text{gemiddeld/jaar}} \times \text{Weegfactor}(t)_{\text{(jaarpatroon)}} \times \text{Weegfactor}(t)_{\text{(dagpatroon)}}$$

Er is daarbij geen rekening gehouden met de verschuiving van de zonuren gedurende de verschillende jaargetijden. In plaats daarvan is de gemiddelde tijd van opkomst en ondergang van de zon gehanteerd.

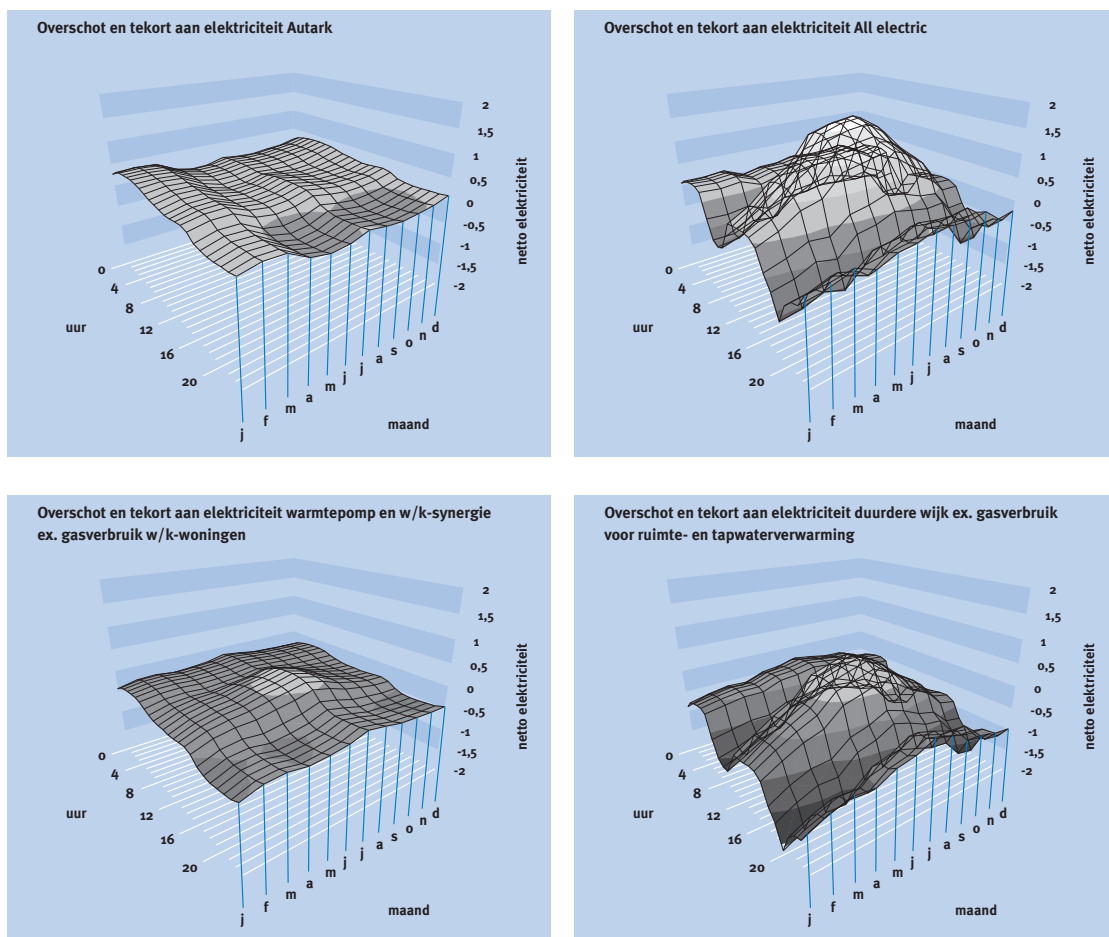
Aan de hand van de gewogen dag- en jaarpatronen kan de optimale mix van duurzame bronnen worden samengesteld. De optimalisatie kan bijvoorbeeld plaatsvinden naar het minimaliseren van de 8 uren opslag of het minimaliseren van seizoensopslag. Aangezien het om gemiddelde waarden gaat, blijft het een globale optimalisatie.

We kunnen nu aan de beschouwing van de energiebalans van de voorbeeldwijken ook een beschouwing van de *gemiddelde* vermogensbalans toevoegen. We moeten ons daarbij vooral voor het duurzaam aanbod realiseren dat het woord gemiddeld hier betekent dat de opbrengst in de gehele wijk op een gegeven moment sterk kan afwijken van de verwachte opbrengst. Tijdelijk reservevermogen moet dus beschikbaar blijven.

Fig. 2.4.9 toont een voorbeeld van de jaar- en 24 uren patronen voor een woning in de voorbeeldwijken uit par. 2.4.

Fig. 2.4.9

Vergelijking van gemiddeld overschot en tekort aan elektriciteit op 24 uren en jaarbasis in de verschillende voorbeeldwijken. Wit betekent een overschot, de grijze tinten een tekort. De wijk 'Synergie' heeft naast de getoonde elektriciteitsvraag ook een gasvraag voor de warmte/kracht (w/k)-eenheden, die niet in deze grafiek is opgenomen. Voor de wijk 'Groene weelde' is hier aangenomen dat de verwarming met een warmtepomp plaatsvindt. In deze wijk zullen echter ook w/k-eenheden en hoog rendement cv-ketels gebruikt worden.



We zien dat de wijk 'Autark' door de toepassing van een relatief groot aandeel lokale windenergie slechts in beperkte mate een beroep hoeft te doen op de opslag. Dit is alleen het geval in de gebieden onder het nulniveau, volgens de simulatie in mei, in de avonduren. De effecten van de elektriciteitsopslag zijn niet meegenomen, de elektriciteitsopbrengst van de w/k-eenheid is gekoppeld aan het patroon voor ruimteverwarming.

De wijk 'All electric' geeft een overschot te zien in de middaguren dat groter wordt in de zomer. De dagelijkse vraagpieken liggen 's morgens en 's avonds; alleen in dit geval moet meer energie aan- en afgevoerd worden.

De wijk 'Synergie' met w/k-koppeling en warmtepompen blijkt een zeer kleine variatie in gebruik te vertonen in verhouding tot de overige wijken (het gasgebruik is buiten beschouwing gelaten), terwijl de dure wijk 'Groene weelde' het grootste deel van het jaar een forse energietoevoer van buiten behoeft met uitzondering van enige piekuren in het midden van de zomer.

Overigens moet wel worden opgemerkt dat de elektriciteitsvraag van eventueel elektrisch vervoer in geen enkel wijctype is meegenomen, noch in de energiebalans, noch in de beschouwing van het gemiddelde vermogen. Hierop wordt in hoofdstuk 4 dieper ingegaan.

CONCLUSIES

De genoemde voorbeelden geven verschillende wegen aan om de opwekking van duurzame elektriciteit in de woonwijk te integreren. De effecten van de verschillende maatregelen lopen uiteen van het bereiken van volledige autarkie via energie-neutraliteit naar een beperking van de toename in het gebruik. In alle voorbeelden is er een bepaalde mate van regeling in het net van de wijk opgenomen. Hiervoor worden vermogenselektronische omzeters gebruikt, waarvan de PCU in voorbeeldwijk 4 de meeste taken te verrichten krijgt. In de all electric wijk is het net zwaarder uitgevoerd om de pieken in de PV-opbrengst te kunnen verwerken. In alle gevallen zal er in toenemende mate worden gecommuniceerd met de gebruiker over de toestand van de energievoorzieningssystemen. Zaken als de actuele kostprijs of de terugleververgoeding van de elektriciteit, de opbrengst van de duurzame systemen, de keuze van het aanbod en het sturen van de vraag worden via een communicatie-infrastructuur naar de gebruikers gebracht. Ook de keuzes van gebruikers worden doorgegeven aan de energiedienstbedrijven. Opslag van elektriciteit wordt alleen toegepast in de autarkische wijk, waar het gebruik van windturbines en de toepassing van w/k op biogas de behoefte aan opslag beperken. Een opzet zoals die in een autarkische wijk zal aan belang toenemen naarmate het aandeel duurzame energie groeit, en daarmee het gebruik van het net als buffer steeds moeilijker wordt. Op de korte termijn kan overwogen worden dit concept te combineren met een (vermogenselektronisch geregelde) netkoppeling en de accu's achterwege te laten.

De betrouwbaarheid wordt zo vergroot, terwijl door de resterende interne buffercapaciteit en de goede afstemming tussen vraag en aanbod het beslag op het openbare net beperkt blijft.

Voor de wijktypen die veel uitwisseling van energie vragen ligt het voor de hand de energieoverschotten in de wijk te leveren aan dichtbijgelegen kantoren en bedrijven. Deze gebouwen hebben een sterke vraagpiek overdag en een piek door het gebruik van airconditioning in de zomer.

De industrie heeft ook de mogelijkheid om door voorraadvorming tijdelijke overschotten van duurzame energie om te zetten in voorraden (groen) product of halffabrikaat.

2.5 OPWEKKING, GEBRUIK EN OPSLAG IN DE WIJK

2.5.1 MOGELIJKHEDEN VOOR LOKALE OPWEKKING

prof.dr. W.C. Sinke²⁰, ir. H.J.M. Beurskens²¹

Duurzame energie is letterlijk overal beschikbaar, direct in de vorm van zonlicht en indirect in de vorm van wind, biomassa, golfenergie en dergelijke. De mogelijkheden van lokale opwekking (conversie) van zonne- en windenergie worden dan ook bepaald door de randvoorwaarden die de plaatselijke omgeving met zich meebrengt en door de beschikbare oppervlakte.

Fotovoltaïsche zonne-energie (PV) is bij uitstek geschikt voor lokale opwekking vanwege het feit dat de conversie zonder geluidsproductie of emissies plaatsvindt. De afwezigheid van bewegende delen en het modulaire karakter maken PV ook de ideale technologie voor integratie in gebouwen of andere constructies. Per m² beschikbaar oppervlak (gevel, dak, grond) wordt in landen zoals Nederland ruwweg 100 kWh per jaar aan elektriciteit geleverd. Een typische woning biedt zo ruimte voor opwekking van 3.000 kWh per jaar of meer (mits juist georiënteerd).

Windturbines worden veelal geplaatst op behoorlijke afstand van woonlocaties in verband met mogelijke geluidhinder, slagschaduwen en andere visuele aspecten. Locaties die grenzen aan bijvoorbeeld industrieterreinen waar het visuele aspect beperkt is, zijn wel geschikt voor de exploitatie van windenergie. Windturbineparken bestaan tegenwoordig uit machines met elk een geïnstalleerd vermogen tussen 0,5 en 1,5 MW en een totaal parkvermogen tot 20 MW. Windrijke locaties die dichtbij zware netten liggen komen een economische exploitatie ten goede. Er is de laatste tijd echter een groeiende belangstelling waarneembaar voor het gebruik van kleine turbines, en PV-systemen voor afgelegen professionele toepassingen zoals telecom, sluizen en parkeerverlichting. In landelijke gebieden met een beperkte natuurwaarde en met een lage bewoningsdichtheid worden ook parken geplaatst. Hier wordt extra aandacht

20 ECN Duurzame Energie,
Postbus 1
1755 ZG Petten
sinke@ecn.nl

21 ECN Duurzame Energie,
Postbus 1
1755 ZG Petten
beurskens@ecn.nl

besteed aan planologische inpassing (aansluiting bij bestaande structuren) en aan geluidhinder. Er dient onderscheid te worden gemaakt tussen windturbines met een variabel en met een vast toerental. Bij de machines met een variabel toerental is het toerental in een bepaald werkgebied evenredig aan de windsnelheid, de veel toegepaste machines met een vast toerental werken op één toerental dat wordt gestuurd door de netfrequentie. De machines met een variabel toerental hebben een grotere energieopbrengst en capaciteitsfactor dan de machines met een vast toerental. Ook kunnen de machines met een variabel toerental wanneer de geluidsproductie storend zou kunnen zijn op een lager toerental draaien. Typische opbrengsten van windturbines op goede locaties in Nederland variëren tussen 700 en 1.000 kWh per m² bestreken rotoroppervlak.

Nu de beste locaties op land steeds meer in gebruik raken, wordt gezocht naar grootschalige toepassing (parken van 100 MW of groter) op zee.

In het geval van biomassa moet het begrip 'lokaal' nog wat meer worden gespecificeerd. De biomassa kan elders worden geproduceerd en lokaal worden geconverteerd, of eventueel lokaal worden geproduceerd en geconverteerd. Wanneer bijvoorbeeld lokaal gebruik wordt gemaakt van de organische fractie in het huishoudelijk afval is er sprake van biomassa-productie elders. Na vergisting kan het hieruit voortgekomen biogas omgezet worden in elektriciteit of warmte. Uiteraard dient de vergistingsinstallatie geen overlast te veroorzaken in de vorm van stank of geluid. In het geval van lokale biomassa-productie is het relatief lage conversie-rendement van zonlicht naar biomassa (< 1%) een sterke beperkende factor.

EFFECTEN VAN DUURZAME LOKALE OPWEKKING

ir. J.M. Meij

De voorbeelden van de wijken in par. 2.4 geven aan dat er veel duurzame energie te winnen valt in de woonomgeving. Op basis van de veronderstelling dat er op dit gebied een maximale inspanning plaatsvindt wordt hierna een schatting gemaakt van de invloed die de veranderingen in de woonomgeving kunnen hebben op de totale hoeveelheid duurzame energie in 2020. Ter vergelijking is de totale hoeveelheid duurzame energie in 2020 overgenomen uit de scenario's uit de Nationale energieverkenningen 1998 [ECN, 1998]. Uiteindelijk zullen we in hoofdstuk 3 de vergelijking completeren met enkele grootschalige opties.

PV

De hoeveelheid PV die tot 2020 geplaatst kan worden, valt uiteen in vier categorieën:

- 1 nieuw te bouwen eengezinswoningen (als wijktypen 1, 2 en 3).
- 2 de invoering op nieuw te bouwen meergezinswoningen (4).
- 3 Aanpassing van eengezinswoningen (3).
- 4 Aanpassing van meergezinswoningen (3).

Tussen 2000 en 2020 zullen naar verwachting 1,35 miljoen nieuwe woningen worden gebouwd. Verondersteld wordt dat deze bouw voor 71% uit eengezins- en voor de resterende 29% uit meergezinswoningen zal bestaan [CBS, 1997]. Het totale woningbestand bedraagt dan naar verwachting 7,5 miljoen woningen.

Aannamen:

- 1 Door maximale inspanningen worden vanaf het jaar 2000 alle nieuwe eengezinswoningen met een fors (15 m²) PV-dak uitgerust met een gemiddelde opbrengst die door afwijkingen van de optimale ligging 80% van het optimum bedraagt.
- 2 Alle nieuwe meergezinswoningen worden met gemiddeld 5 m² PV per woning (gezin) uitgerust.
- 3 Van de bestaande eengezinswoningen ligt 25% op het zuiden en hiervan is 1% van de eigenaren bereid 5 m² PV-panelen te plaatsen.
- 4 Van de bestaande meergezinswoningen is 25% geschikt en hiervan is 5% van de (collectieve) eigenaren bereid per woning 5 m² PV te plaatsen.

Tabel 2.5.1

Opbrengst van PV op woonhuizen in 2020 wanneer alle nieuwe en een gedeelte van de bestaande woningen van PV worden voorzien. De berekening is gebaseerd op een rendement van 10% met een gemiddelde opbrengst die 80% is van de maximale opbrengst in de meest ideale opstelling.

In 2020 is de situatie dan zoals in tabel 2.5.1 is aangegeven. Er is dan totaal 18,2 km² PV geplaatst. Als we uitgaan van f 1000,- per m² PV inclusief inverters en andere bijkomende kosten, dan bedraagt de investering in die 20 jaar 18,2 miljard gulden.

Plaatsing PV		Piekvermogen	Jaarproductie	Oppervlakte PV per woning
100% van de	nieuwe eengezinswoningen	1.156 MWp	1.156 GWh	15 m ²
100% van de	nieuwe meergezinswoningen	157 MW	157 GWh	5 m ²
0,25% van de	bestaande eengezinswoningen	4 MW	4 GWh	5 m ²
1,25% van de	meergezinswoningen	31 MW	31 GWh	5 m ²
	totaal	1.348 MW	1.348 GWh	

BIOMASSA

Het invoeren van maatregelen zoals de vergisting van zwart water en GFT-afval is niet afhankelijk van het type woning en kan op de voor de verwerking meest optimale plaats en schaalgrootte gebeuren. Voor de hoogste opbrengst zou de verwerking dicht bij de woningen moeten geschieden. Als we ervan uitgaan dat het GFT-afval en het zwart water van alle eengezinswoningen op deze wijze vergist kan worden, dan kan met het hieruit vrijgekomen biogas 2.300 GWh elektrische energie opgewekt worden.

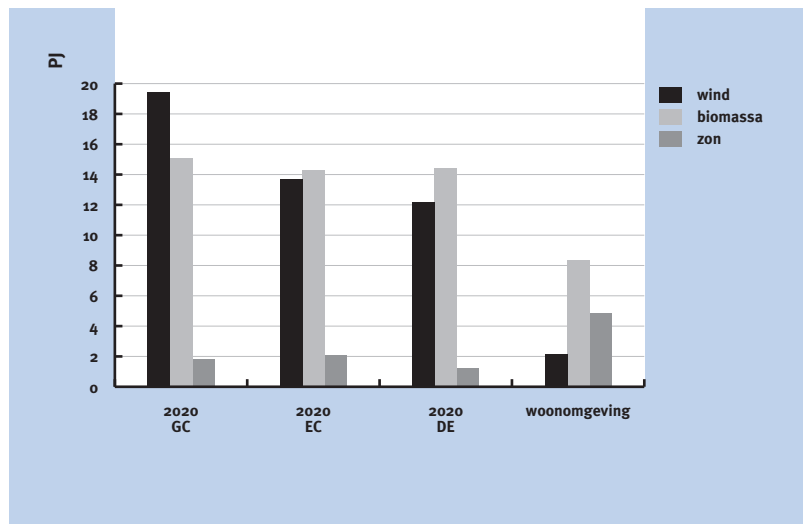
WIND

Afhankelijk van de ontwikkelingen op het gebied van stille windmolens is de verwachting dat de molens in het gunstigste geval aan de rand van de woonwijk geplaatst kunnen worden. Industriedorpen kunnen beter benut worden voor windenergie dan woonwijken. Als we uitgaan van een kleiner type windturbine met een vermogen van 250 kW en een ashoogte van 30 tot 40 m, dan zou het mogelijk moeten zijn om in de industriedorpen en aan de rand van woongebieden per 1.000 woningen één windturbine te plaatsen. Wanneer deze vuistregel gehanteerd wordt voor eengezinswoningen, komen we op een totale productie in 2020 van 588 GWh per jaar. De kosten (à f 4000,- per kW) bedragen ca. 5,3 miljard gulden.

Fig. 2.5.1 toont dat met deze aanpak een behoorlijke hoeveelheid duurzame elektriciteit in of bij de woonomgeving opgewekt kan worden. De hoeveelheid PV komt zo veel hoger uit dan in de scenario's verwacht wordt en ook de lokale bijdrage aan de hoeveelheid windenergie is zichtbaar. De hoeveelheid biomassa-elektriciteit uit GFT-afval en rioolwater blijkt iets meer dan de helft van de totale hoeveelheid biomassa-elektriciteit.

Fig. 2.5.1

Lokaal opgewekte duurzame energie bij 'maximale' inspanningen in vergelijking tot de landelijke verwachtingen volgens de Nationale energieverkenningen 1998 [ECN, 1998]. GC staat voor Global Competition. EC voor European Coordination en DE voor Divided Europe. Voor een uitleg van de verschillende scenario's wordt verwezen naar het bovengenoemd rapport van ECN.



2.5.2 LOKALE MOGELIJKHEDEN VOOR ELEKTRIFICATIE EN EFFICIENTIEVERHOGING

Elektrificeren (Van Dale: *het voorzien van elektrische installaties*) is een term die in veel betekenissen gebruikt wordt. In deze paragraaf zullen we ons beperken tot die toepassingen van elektriciteit die meer efficiëntie mogelijk maken dan bij de oude (eventueel op andere dragers gebaseerde) oplossingen mogelijk was. Daarnaast wordt enige aandacht geschonken aan elektrische toepassingen die de (locale) uitstoot van schadelijke stoffen kunnen verminderen. Hoewel we er hier niet dieper op ingaan, is er ook nog een meer algemeen effect. Op de lange termijn kan gesteld worden dat vervanging van het gebruik van fossiele energiedragers door elektriciteit gunstig kan zijn, omdat de opbrengst van de duurzame bronnen voor een deel direct elektrisch is (wind, fotovoltaïsche panelen), en voor een deel gemakkelijk als elektriciteit aangeleverd kan worden. Met bijvoorbeeld biogas kan in een wijkcentrale elektriciteit gemaakt worden. Dit kan met een turbine of met een brandstofcel waarbij het biogas in een reformer voorbewerkt wordt. De verwachting is dat de kwaliteit van de elektriciteit gemakkelijker gehandhaafd kan worden dan de kwaliteit van het biogas.

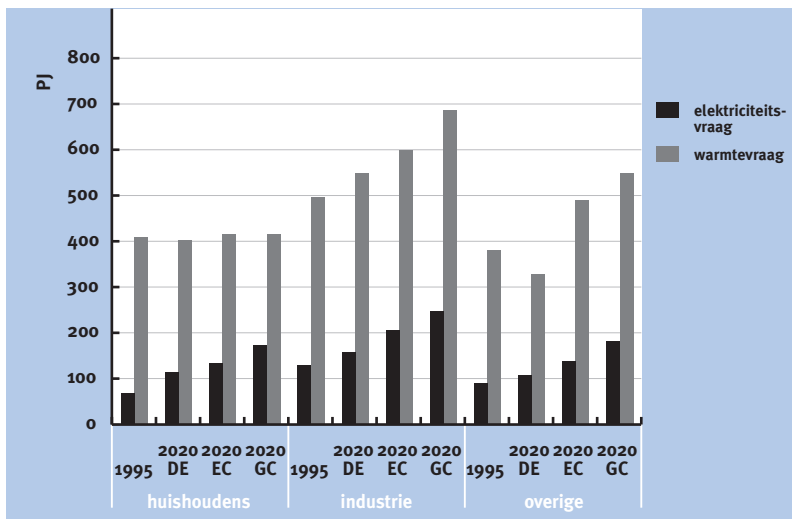
Uit energieoogpunt is de overige toename van elektrische toepassingen niet gunstig, omdat deze leidt tot meer elektriciteitsgebruik. Een deel van de toename zit in de vervanging van spierkracht, een ander deel in nieuwe toepassingen als waterbedden, bubbelbaden, solaria, enz. Dat brengt ons op een probleem dat zich in de toekomst steeds duidelijker zal gaan manifesteren: het steeds zuiniger maken van bestaande functies brengt het energiegebruik niet omlaag als nieuwe toepassingen de daarmee behaalde besparingen weer teniet doen. De trend wijst naar een steeds toenemend niveau van luxe en comfort, waarmee de hard werkende mens zich in zijn vrije tijd wenst te omringen. Tenzij er een technologisch wonder gebeurt, zal het op de lange termijn niet mogelijk zijn om met duurzame bronnen zelfs maar ons huidige (energie)consumptieniveau te handhaven. Misschien is het daarom verstandig om al zeer spoedig naar een stabilisatie van het comfortniveau te streven.

De toename van de vraag kan variëren door bijvoorbeeld de economische groei, overheidsmaatregelen en de kosten van energie.

De ontwikkeling van de energievraag in huishoudens, de industrie en de overige sectoren wordt gegeven in fig. 2.5.2. Opvallend is dat hoewel de elektriciteitsvraag in de huishoudens in alle scenario's van het CPB zal stijgen, de warmtevraag in de huishoudens vrijwel constant zal blijven. Dit is het gevolg van woningisolatie en andere energiebesparingsmaatregelen. Hierbij is uitgegaan van het voldoen aan de warmtevraag met andere middelen dan elektriciteit.

Fig. 2.5.2

De ontwikkeling van de warmte-
vraag en de elektriciteitsvraag in
1995 en 2020 in verschillende scena-
rio's van het CPB. De verschillende
scenario's zijn Divided Europe (DE),
European Coordination (EC) en
Global Competition (GC). Voor een
korte beschrijving van deze scena-
rio's verwijzen we naar par. 3.2.2 of
naar [ECN, 1998].



Opgemerkt dient te worden dat de geschetste scenario's uitgaan van ongewijzigd beleid. Eventuele nieuwe maatregelen zijn niet in de berekeningen meegenomen.

EFFICIËNTIEVERBETERING DOOR ELEKTRIFICATIE VAN VERWARMING

prof.dr.ir. W. D'Haeseleer²²

Het uiteindelijke doel van het gebruik van efficiëntere apparaten is het reduceren van het primaire energiegebruik.

Men kan ervan uitgaan worden dat er heel wat mogelijkheden zijn voor het besparen van primaire energie door de toepassing van meer efficiënte energietechnologieën bij het eindgebruik. Behalve voor het stimuleren van energiebesparing voor een bepaalde toepassing met een bepaalde techniek is het echter ook van belang oog te hebben voor een *substitutie* naar andere technieken met andere energiedragers. De correcte waardemeter voor het beoordelen van dergelijke substituten is het rendement volgens de tweede hoofdwet van de thermodynamica dat meteen bepalend is voor de winst of het verlies van primair brandstofverbruik.

Het meest gehanteerde rendement dat overvloedig wordt gebruikt om de prestaties van een bepaald toestel ('toestel' is hier gebruikt als dagelijkse benaming van een systeem of machine) aan te duiden is het *rendement volgens de eerste hoofdwet*. Dit rendement geeft de verhouding weer tussen de nuttige energie-uitvoer en de benodigde energietoevoer voor een bepaald toestel.

22 KU Leuven, Afdeling Toegepaste
Mechanika en Energieconversie,
Celestijnenlaan 300 A
B-3001 Heverlee
België
william.dhaeseleer@
mech.kuleuven.ac.be

$$\text{Rendement } \epsilon = \frac{E_{\text{uit}} (\text{nuttig effect})}{E_{\text{in}} (\text{gebruik})}$$

Als het rendement groter is dan 1, noemt men deze verhouding COP (Coefficient Of Performance). Het rendement van koelmachines wordt uitgedrukt als COP. Het is tegenwoordig niet ongebruikelijk om toestellen te hebben met rendementen van 90 tot 95%, waaruit geconcludeerd zou kunnen worden dat er weinig ruimte voor verbetering is.

Een betere prestatie-index uit energetisch oogpunt is echter het *rendement uit de tweede hoofdwet*. Voor dit rendement – soms ook *effectiviteit* genoemd – wordt uitgegaan van de uit te voeren taak (een kamer verwarmen, een ruimte koelen, arbeid leveren, enz.) en gaat men op zoek naar het meest efficiënte toestel dat deze taak kan uitvoeren.

Men definieert:

$$\text{Effectiviteit } \epsilon = \frac{\text{nuttig effect (warmte of arbeid) geleverd door een toestel}}{\text{maximaal mogelijk nuttig effect geleverd door om het even welk toestel dat dezelfde energietoevoer heeft als het gegeven toestel (steeds voor het uitvoeren van dezelfde taak)}}$$

Deze uitdrukking kan ook worden herschreven in termen van de opgebruikte exergie, maar dat is voor de verdere discussie niet nodig (een verdere beschouwing van exergie is te vinden in deel 2). In processen met verbranding ontstaat uit brandstof met een relatieve exergie-inhoud van 100% door de onomkeerbaarheid van dit proces een exergieverlies van 30%. Als men erin slaagt een alternatieve technologie toe te passen waarbij de verbrandingsstap kan worden vermeden, dan is de kans groot dat dit uiteindelijk tot een primaire energiebesparing leidt (en meestal een reductie in CO₂-uitstoot).

Een conventionele brander met ketel met een rendement uit de eerste hoofdwet van 80%, die wordt gebruikt om bij een omgevingstemperatuur van 4 °C een ruimte te verwarmen tot 30 °C heeft eigenlijk een effectiviteit van nauwelijks 7%. Een *warmtepomp* daarentegen met een COP van 4 haalt een effectiviteit van 33% voor deze taak. Als men rekening houdt met het omzettingsrendement van de elektriciteitsproductie (voor het voeden van de warmtepomp) en men neemt aan dat dit via een gecombineerde cyclus (STEG) gebeurt met een rendement van 50%, dan hebben we nog een totale effectiviteit van de warmtepomp van 17%. Dat is nog meer dan het dubbele dan bij de ketel. Als voor de elektriciteitsopwekking *brandstofcellen* gebruikt worden, waarbij het exergieverlies van

de verbranding wordt vermeden, dan komt een effectiviteit van 20 tot 25% binnen bereik met de erbij horende globale brandstofbesparingen.

Het blijkt dat de effectiviteit van de meeste gewone toepassingen in de residentiële en commerciële sectoren flink beneden de 10% liggen en dat er dus een groot potentieel voor verbetering van het rendement bestaat. Voor industriële installaties ligt deze effectiviteit meestal een stuk hoger, omstreeks 20 tot 30%.

EFFICIËNTIEVERBETERING IN DE WOONOMGEVING

ir. J.M. Meij

De mogelijkheden voor het verhogen van de efficiëntie op de belangrijkste toepassingsgebieden in de woonomgeving worden hierna kort behandeld. Aan de orde komen warmte en koude, verlichting, audio en video, reiniging en intelligente systemen.

Warmte en koude

De hiervoor aangehaalde elektrische warmtepomp wordt gezien als een zeer belangrijke besparingsmogelijkheid, aangezien deze pomp meer dan 66% van de benodigde warmte aan de omgeving kan onttrekken. De warmtepomp kan helaas niet zomaar de plaats van de cv-ketel in het verwarmingssysteem innemen.

Dit komt omdat de warmtepomp het grootste deel van de te produceren warmte uit de omgeving moet winnen. Hiervoor moet warmte worden uitgewisseld met een warmtebron in de omgeving, bijvoorbeeld via een warmtewisselaar. Omdat een warmtepomp het beste werkt als het verschil tussen de brontemperatuur en de afgiftetemperatuur niet te groot is, ligt het niet altijd voor de hand om uitsluitend omgevingslucht te gebruiken als warmtebron. Andere mogelijkheden zijn oppervlaktewater, bodem met zoninstraling (ondiep) of een buffer dieper in de bodem (eventueel onder het gebouw). De eerste twee zijn buffers die in een dag- of seizoenscyclus door de zon weer aangevuld worden. De diepe buffer moet op een andere wijze aangevuld worden, bijvoorbeeld door er in de zomer warmte naartoe te voeren.

Een tweede probleem is de afgifte van de warmte. Ook hier moet het verschil tussen bron- en afgiftetemperatuur niet te groot worden, en daarom moet ook de afgiftetemperatuur laag worden gehouden. Om hiermee toch een gebouw op de gewenste temperatuur te houden, zijn lage-temperatuurwarmteafgiftesystemen nodig. Momenteel bestaan hiervoor systemen zoals vloer-, wand- of plafondverwarming, heteluchtverwarming of extra grote radiatoren. De toepassing van de warmtepomp zou een enorme impuls krijgen als deze systemen op beide punten verder ontwikkeld worden. Vooral de bestaande bouw zou daarvan enorm profiteren.

De warmtepomp maakt het ook mogelijk om de warmte in de af te voeren ventilatielucht te gebruiken om het tapwater te verwarmen. Verschillende fabrikanten brengen hiervoor reeds systemen in de handel.

De koel- of diepvrieskast die volgens EnergieNed [EnergieNed, 1996] verantwoordelijk is voor 18% van het huishoudelijk elektriciteitsgebruik kan zuiniger door de toepassing van nieuwe typen compressoren en een betere isolatie. Een beperkte koudebuffer in de koelkast vergroot de mogelijkheden voor vraagsturing en koppeling met fotovoltaïsche (PV)-systemen.

Fig. 2.5.3

[links] *Gemiddeld huishoudelijk elektriciteitsgebruik naar toepassingsgebied.*

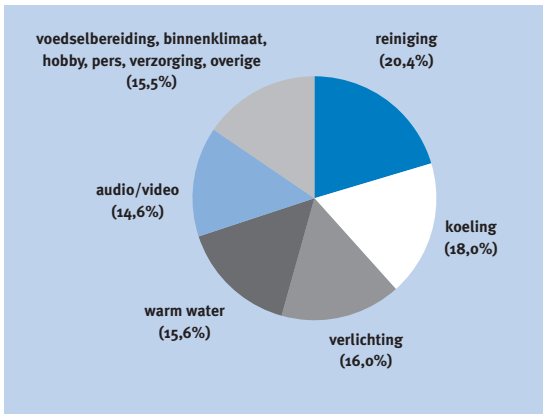


Fig. 2.5.4

[rechts] *Prototype van een FLD-display (Cambridge Display Technology, 1998). Meer informatie over deze technologie is te vinden in deel 2, hoofdstuk 6, Licht.*

Voorbeelden zijn de Stirling-koelkast of koelkasten op basis van akoestische energie, die in deel 2, hoofdstuk 6, (Koude) nader toegelicht worden.

Verlichting

Verlichting is verantwoordelijk voor 16% van het huishoudelijk elektriciteitsgebruik. Halogeenlampen zijn zuiniger dan gloeilampen, spaarlampen zijn zuiniger dan halogeenlampen. De spaarlamp behoeft weinig toelichting. Voor een toekomstverwachting op het gebied van lichtbronnen wordt verwezen naar deel 2, hoofdstuk 6.

Audio en video

Audio en video nemen 14,6% van het gemiddeld huishoudelijk elektriciteitsgebruik voor hun rekening. De Philips eco-apparaten tonen aan dat met enige inspanning nog flinke rendementsverbeteringen te verwezenlijken zijn. Het 'stand-by'-gebruik van veel apparaten blijkt verantwoordelijk voor een groot deel van het totale stroomverbruik. Extreme voorbeelden zijn satellietontvangers en digitale decoders waarbij het stand-by-gebruik vrijwel even hoog is als het gebruik tijdens de bedrijfstijd. Ook hier zijn met enige maatregelen grote verbeteringen mogelijk.

Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar deel 2, par. 6.4, Kracht en voeding voor elektronische apparaten.

In de Syrene-studie [ECN/Novem, 1995] staan platte displays niet als een robuuste of kritieke technologie genoemd, omdat de rol van dergelijke (LCD, Thin Film Transistor (TFT)) displays door de (met de productietechnologie samenhangende) hoge prijs beperkt zal blijven. De ontwikkeling van goedkope, eenvoudig te produceren polymere displays geeft echter zicht op een aanzienlijk groter totaal besparingspotentieel, waardoor deze techniek mogelijk van grote betekenis wordt.

Daarnaast kan in veel gevallen de introductie van halfgeleidervoedingen in plaats van de op de conventionele transformator gebaseerde voedingen een verbetering van het rendement met zich meebrengen. Veel van de transformatoren in de goedkope gelijkstroom‘adapters’ hebben een rendement van minder dan 80%; met een schakelende voeding is 95% haalbaar.

Reiniging

In het huishouden gaat het over wasmachines, drogers, en vaatwasmachines, die gezamenlijk met 20,4% een fors deel van het huishoudelijk gebruik bepalen. Hier valt nog winst te boeken in de toepassing van intelligente machines, die met behulp van sensoren de werking van de machine aanpassen aan de toestand van de te reinigen voorwerpen. Omdat vrijwel al deze machines gebruik maken van weerstandsverwarming, is door het toepassen van ‘hot-fill’, maar vooral door het terugwinnen van warmte nog veel winst te boeken. Ook een warmtepomp-wasdroger wordt wel genoemd.

Intelligente systemen

Niet alleen bij wassen en drogen valt met behulp van intelligente regelingen en sensoren energie te besparen. Overal waar door de omstandigheden of door onachtzaamheid onnodig apparaten ‘aan’ staan, kan sensortechnologie zorgen voor besparing. Van belang is wel dat het eigen verbruik van de sensor laag is, zodat de besparingen niet verloren gaan in het stand-by-gebruik van de sensor. Een veel gebruikte sensor is de passief infrarood sensor, die tuinlampen inschakelt als er een ‘warm’ object in de detectiezone komt. Ook sensoren voor luchtvochtigheid of luchtkwaliteit kunnen op een dergelijke manier gebruikt worden.

MINDER LOKALE SCHADELIJKE UITSTOOT IN DE WOONOMGEVING

Een elektrische grasmaaier in plaats van een grasmaaier met benzinemotor of een elektrische scooter in plaats van de tweetaktscooter brengen duidelijke voordelen zoals minder schadelijke stoffen en minder lawaaioverlast. Hoewel de huidige cv-ketels relatief schoon verbranden, is ook qua uitstoot met een warmtepomp winst te boeken. Het is bij de elektrische opwekkenheid mogelijk meer geavanceerde technieken voor rookgasreiniging toe te passen dan met de cv-ketel. Bovendien werkt iedere verbetering en verduurzaming van de elektriciteitsopwekking door in het eindgebruik.

2.5.3 MOGELIJKHEDEN VOOR LOKALE OPSLAG

De overbrugging van periodieke tekorten in de productie uit duurzame bronnen kan een reden zijn om opslag toe te passen. Daarnaast kan een beperkt lokaal opslagsysteem (door het uitspreiden van aanbodpieken) ervoor zorgen dat de distributienetten beter benut worden, of mogelijk zelfs capaciteitsuitbreiding overbodig maken. Ook het waarborgen van de kwaliteit vraagt om opslag, zij het van kleinere hoeveelheden energie, die zeer snel beschikbaar moet zijn. Het beschikken over betaalbare en betrouwbare opslagtechnieken zou de problematiek van de systeemintegratie en dimensionering in de elektriciteitsvoorziening aanzienlijk kunnen vereenvoudigen. De opgeslagen energie is namelijk (binnen zekere grenzen) op afroep beschikbaar en kan dus worden gebruikt als (snel) geregeld productievermogen.

WARMTE EN KOUDE

Een van de belangrijkste mogelijkheden voor lokale opslag op het gebied van koude en of warmte, is de opslag in de bodem met een warmtepomp. Andere zinvolle opslagmogelijkheden zijn de reeds genoemde koudebuffers in koelkasten en diepvriezers en de opslag van kleine hoeveelheden warmte in huis om warmte terug te winnen uit warm water van douche, bad of (af)wasmachine. Een uitvoerige behandeling hiervan zou echter buiten de doelstelling van dit boek vallen.

BATTERIJSYSTEMEN

Batterijsystemen zijn ook een mogelijkheid om op lokaal niveau energie op te slaan. Hierbij kan gedacht worden aan een kast vol accu's in een woonhuis, maar ook aan voorzieningen op wijkniveau. Om redenen van veiligheid, onderhoud en beheer lijkt de voorkeur uit te gaan naar het laatste.

Batterijsystemen maken gebruik van elektrochemische energieopslag en zijn uitermate geschikt om daarmee modulaire systemen samen te stellen. Er is veel bedrijfservaring op dit gebied. Voor batterijsystemen komt voorlopig vooral

loodaccu-technologie in aanmerking, een bewezen technologie met relatief lage totaalkosten en een hoge bedrijfszekerheid. Wellicht dat vanaf 2005 daarnaast andere systemen zoals nikkelmetaalhydride of zinklucht een rol gaan spelen.

Batterijsystemen vanaf 0,5 MW worden momenteel vooral gebruikt voor piek'shaving' (het wegwerken van pieken) en spanningsstabiliteit. Dit is de omvang die voor een wijk van belang is.

Op straat- of huishuisniveau kan gedacht worden aan kleinere batterijsystemen tot een ondergrens van 1 respectievelijk 10 kWh, die in toenemende mate worden toegepast in combinatie met duurzame opwekking (PV) in de laagspanningsnetten. Een uitdaging hierbij is het ontwikkelen van kleine, milieuvriendelijke betaalbare systemen.

In deze toepassing is het van belang dat het systeem een groot aantal laad- en ontladcycli kan doorlopen en dat het bestand is tegen 'diep' ontladen. Ook het rendement is van belang: de huidige loodaccusystemen hebben een laad- en ontladrendement van 75 tot 80%. In tegenstelling tot batterijsystemen voor mobiele toepassingen is de energiedichtheid per gewichtseenheid hier minder belangrijk dan de energiedichtheid per volume-eenheid.

Samenvattend kan over een batterijsysteem dat werkt op loodaccu's het volgende gezegd worden.

Spanning	Een batterij levert gelijkspanning. Het is een harde spanningsbron ten gevolge van de lage inwendige weerstand. De spanning is afhankelijk van het aantal cellen in serie. Gangbaar zijn 12 en 24 V.
Stroom	Een batterij heeft een hoge kortsluitstroom. Batterijen worden dan ook toegepast als energiebron voor het lassen van staal.
Rendement laden/ontladen	75 - 85% (loodaccu)
Zelfontlading	minder dan 3% per dag
Energiedichtheid per liter	84 Wh/l
Netgedrag	Het netgedrag wordt bepaald door de vermogenslektronica. Voor het genereren van zeer snelle hoge piekstromen worden batterijen soms gecombineerd met (super)condensatoren.
Levensduur	1.000 - 1.500 cycli
Kosten	De kosten inclusief converters bedragen f 500,- tot f 1000,- per kWh.
Bijzonderheden	Voor het laden van batterijsystemen zijn regelaars nodig. Geavanceerde regelaars kunnen de levensduur van deze systemen verlengen. Besturing en beveiliging vormen een belangrijk punt bij het inpassen in het laagspanningsnet. Veiligheidsmaatregelen: ventilatie in verband met vrijkomende dampen en gassen (H ₂), vonken (bij kortsluiting) en lekken (milieu).

REDOXFLOWSYSTEMEN

Bij redoxflowsystemen wordt de elektriciteit niet opgeslagen in platen, maar in de vloeistof (het elektrolyt). De energie-uitwisseling vindt plaats in een accu-cel, waar de vloeistof doorheen gepompt wordt. Deze vloeistof is in 'geladen' vorm zeer lang op te slaan (jaren) zonder noemenswaardig capaciteitsverlies. Uniek is dat het vermogen van het systeem en de energie-inhoud onafhankelijk zijn. De energie-inhoud kan worden vergroot door grotere vloeistofreservoirs toe te passen. Momenteel is de energiedichtheid van dergelijke systemen nog lager dan bij accu's: tussen 20 en 30 Wh per liter. Een proefstelsel met een energie-inhoud van 13 kWh wordt getest in een PV-huis in Thailand [Menictas, 1997]. In 2020 hoopt men dat de energiedichtheid tussen de 100 en 200 Wh per liter uitkomt. Het hoge laad- en ontlaadrendement en de loskoppeling van vermogen en energie-inhoud maken het systeem bij verdere ontwikkeling tot een aantrekkelijke optie voor lokale opslag. Samenvattend kan over een redoxflow-systeem het volgende worden gezegd.

Spanning	Een redoxflowsysteem levert gelijkspanning, en kan geladen worden bij voltages vanaf 2 V.
Stroom	Vergelijkbaar met loodaccu.
Energiedichtheid per liter	20 - 30 Wh/l
Rendement laden/ontladen	85%
Zelfontlading	zeer gering
Netgedrag	Het netgedrag wordt bepaald door de vermogenselektronica.
Kosten	f 300,-/kWh
Bijzonderheden	Zie bij batterijsystemen. Aparte voorzieningen zijn nodig voor het opslaan, aan- en afvoeren van de redoxvloeistof-fen. De cellen hebben nu een levensduur van 5 - 7 jaar.

VLEIOWIELSYSTEMEN

Vliegwielsystemen zijn systemen waarin de energie in de vorm van kinetische energie is opgeslagen. In verhouding tot accu's zijn vliegwielen beter geschikt om grote vermogens op te nemen en af te staan, echter minder geschikt voor het opslaan van grote hoeveelheden energie.

Er bestaan nog diverse materiaalproblemen voor grootschalige toepassingen. Systemen met een omvang van enkele honderden kW bij enkele tientallen kWh zijn echter gebouwd. De toegangstijd is enkele milliseconden. De vermogensdichtheid is echter zeer groot. Bij de opslag met vliegwielsystemen is een omzetter nodig. Vliegwielsystemen zijn uitermate geschikt om kortstondig een groot piekvermogen te leveren. Ze zijn modulair, kunnen 'diep' worden ontladen en hebben een lange levensduur (20 - 30 jaar). Samenvattend kan over vlieg-

Spanning	Een vliegwiel levert een hoogfrequente wisselspanning, waarbij de frequentie varieert met het toerental.
Stroom	Een vliegwiel is een bron met een groot piekvermogen, en kan dus gedurende korte tijd veel stroom leveren. Wel dient de vermogenselektronica daarop afgestemd te zijn.
Netgedrag	Het netgedrag wordt bepaald door de vermogenselektronica, die de hoogfrequente wisselspanning omzet in de gewenste frequentie en spanning.
Rendement laden/ontladen	90 - 95%
Zelfontlading	afhankelijk van lagering
Energiedichtheid per liter	10 - 20 Wh/l
Levensduur	10 miljoen cycli
Kosten	
Bijzonderheden	Draaiend systeem, de lagering en de mechanische eigenschappen van het wiel zijn van groot belang, ook het in stand houden van het vacuüm vraagt aandacht.

wielsystemen het volgende worden gezegd.

Een ontwikkeling als het EMAFER vliegwiel [Thoolen, 1997] dat in 1999 gedemonstreerd wordt in een stadsbus heeft een capaciteit van 5 kWh. Dergelijke vliegwielen zouden gebruikt kunnen worden voor het waarborgen van de kwaliteit van de levering. De kosten zijn echter voor dit doel nog erg hoog.

ANDERE OPSLAGMETHODEN

Opslag in waterbekkens en SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) worden hier niet behandeld, omdat de eerste methode vanwege de benodigde installaties niet in een wijk ingepast kan worden. Ook de tweede methode is vanwege de kosten en de andere eigenschappen beter geschikt voor toepassing in de netten die erboven liggen.

De werkingsprincipes van de hiervoor genoemde systemen (met uitzondering van warmte- en koudeopslag) worden behandeld in hoofdstuk 5 van deel 2.

2.6 HET LOKALE ELEKTRICITEITSNET

2.6.1 REËEL EN BLINDVERMOGEN

dr.ir. G.C. Paap²³

Het vermogen dat onze kWh-meter doet draaien blijkt niet het enige elektrische vermogen dat we gebruiken; er blijkt in veel gevallen nog een ander soort vermogen nodig. In deze bijdrage wordt ingegaan op het ontstaan en de compensatie van dit bijna mysterieuze blindvermogen.

Elektrische energie wordt uit primaire energie gewonnen en vervolgens aan de klant geleverd in de voor die locatie meest geschikte vorm. De klant kan de aangeboden elektrische energie vervolgens in arbeid, licht of warmte omzetten. In de energiestroom – die in feite dient voor de omzetting in arbeid – blijkt echter nog een component aanwezig. Deze component heeft in de tijd een gemiddelde waarde gelijk aan nul, doch kan soms leiden tot een substantieel hogere stroom dan de stroom die alleen voor de te verrichten arbeid nodig is (de *watt- of actieve, reële component*). Deze bijdrage aan de stroom staat bekend als de zogenaamde *wattloze, reactieve of blindcomponent*.

Aan de hand van het volgende voorbeeld wordt aangegeven waarom in elektrische netten naast reëel vermogen ook blindvermogen een noodzakelijke component is.

Stel een belasting in het net, bestaande uit een elektromotor die bijvoorbeeld een compressor aandrijft, verbruikt 4 MW aan *watt of reëel vermogen*. De compressor vraagt dan – afgezien van verliezen – een mechanisch vermogen van 4 MW. Om de elektrische energie om te zetten in mechanische energie is een elektrische motor nodig. In iedere wikkeling (spoel) van de motor moet voor de energieomzetting een magnetisch veld worden opgebouwd. De voortdurende aanpassing van dit magnetisch veld aan de veranderende spanning heeft tot gevolg dat de stroom in de tijd achterloopt bij de spanning. De stroom die nodig is voor de opbouw van dit veld zorgt ervoor dat de totaal opgenomen stroom hoger is dan de stroom die nodig is voor het leveren van de 4 MW. Deze bijdrage aan de stroom wordt de *wattloze, reactieve of blindcomponent* genoemd.

De energie die nodig is om dit veld op te bouwen is herwinbaar, met andere woorden er wordt energie opgeslagen in het magnetisch veld, maar er wordt hiervoor per saldo geen energie verbruikt.

In principe wekken de meeste elektrische componenten in het net, zodra er stroom vloeit magnetische velden op en vragen derhalve blindvermogen. Gelukkig zijn er echter ook componenten die blindvermogen kunnen leveren. Dit zijn componenten die een elektrisch veld opbouwen, zoals condensatoren of synchrone generatoren. Synchrone generatoren kunnen via het magnetische

.....
²³ TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek
Postbus 5031
2600 GA Delft
G.C.Paap@et.tudelft.nl

veld – dat door de met gelijkstroom bekrachtigde rotor wordt opgewekt – blindvermogen leveren. Onbelaste kabels vertonen net als condensatoren een capacatief gedrag en zijn in deze toestand leveranciers van blindvermogen. Door deze componenten zijn we in staat de behoefte aan blindvermogen te dekken.

Zoals een tekort aan reëel vermogen (verstoring van de reële vermogensbalans) aanleiding zal geven tot een daling van de frequentie in het net en daarmee een daling van de toerentallen van de op het net aangesloten motoren en generatoren, zal een tekort aan blindvermogen (verstoring van de blindvermogensbalans) aanleiding zijn tot spanningsdalingen. Ten gevolge van deze spanningsval zal de spanning bij de gebruiker gaan afwijken van de nominale spanning waardoor storingen kunnen optreden.

We kunnen het voorbeeld van de elektromotor verder verduidelijken aan de hand van de opstelling in fig. 2.6.1 waarbij de generator (G) via een lange geleider verbonden is met het aftappunt (A) waar de motor (M) is aangesloten. Bij de motor is een condensator (C) gemonteerd voor compensatie van het blindvermogen.

In fig. 2.6.2 is te zien dat de stroom door de elektromotor (I_{mot}) over een hoek van 40° (ϕ_{mot}) verschoven is ten opzichte van de spanning (U_A). Dit betekent dat de stroom niet in fase is met de spanning. De cosinus van deze verschuivingshoek staat bekend als de *arbeidsfactor* λ . Is deze hoek gelijk aan nul (de arbeidsfactor = 1) dan wordt alleen wattvermogen opgenomen. De stroom is dan in fase met de spanning en dient uitsluitend voor het verrichten van arbeid. Is de arbeidsfactor gelijk aan nul, dan wordt alleen blindvermogen opgenomen. De stroom is dan 90° uit fase met de spanning en er wordt geen arbeid verricht, maar alleen blindvermogen opgenomen.

Fig. 2.6.1

Een opstelling van een elektromotor (M) met blindvermogencompensatie door middel van een condensator (C), gevoed door een generator (G). P staat voor het reële vermogen, Q voor het blindvermogen.

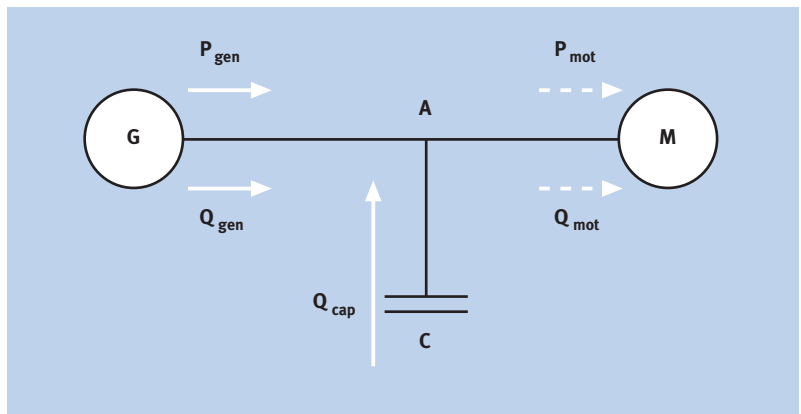


Fig. 2.6.2

Voorbeeld van een faseverschil tussen de spanning U_A en de stroom I_{mot} . De cosinus van deze verschuivingshoek wordt de arbeidsfactor λ genoemd. De in de figuur getoonde verschuiving met 40° geeft een arbeidsfactor van $\cos 40^\circ \approx .$

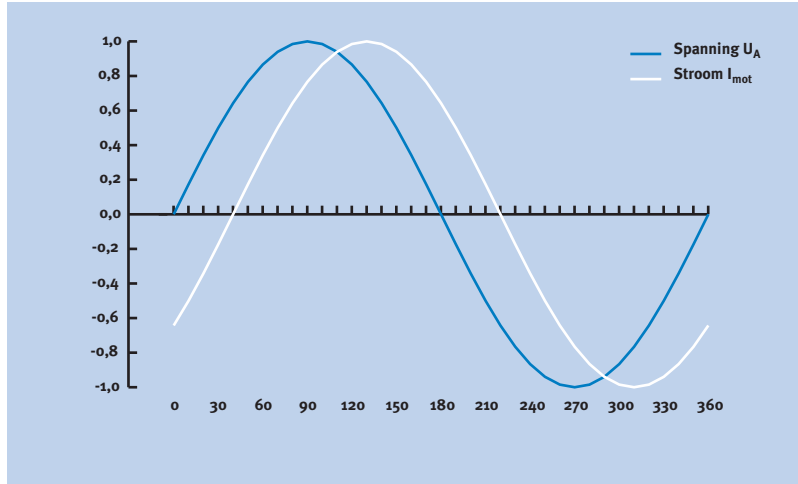
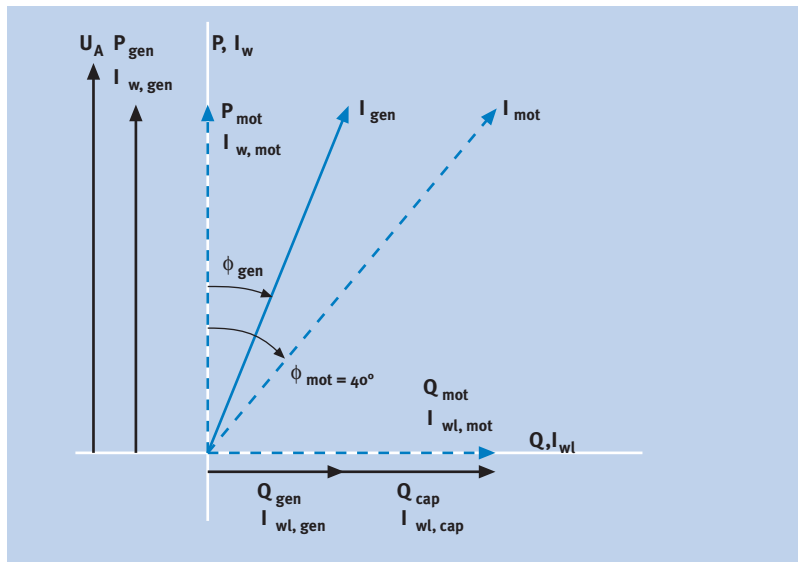


Fig. 2.6.3

Een diagram van de blindcomponenten (Q) en de reële componenten (P) van de stroom en het vermogen voor het voorbeeld van een motor in een elektriciteitsnet met een condensatorbank. De hoek tussen de spanning op aansluitpunt A (U_A) en de stroom door de motor (I_{mot}) geeft het faseverschil aan tussen spanning en stroom.



In fig. 2.6.3 is het aangehaalde voorbeeld op een andere wijze in beeld gebracht. In het diagram staat langs de horizontale as het blindvermogen Q en de blindcomponent van de stromen; langs de verticale as het reële vermogen en de reële component van de stromen.

Motor M neemt op aansluitpunt A waar de spanning U_A is het reële vermogen: $P_{\text{mot}} = U_A \cdot I_{w,\text{mot}}$ en het blindvermogen: $Q_{\text{mot}} = U_A \cdot I_{wl,\text{mot}}$ uit het net op.

De totale motorstroom is gelijk aan:

$$I_{\text{mot}} = \sqrt{I_{w,\text{mot}}^2 + I_{wl,\text{mot}}^2}$$

Generator G levert via een lange verbinding op het knooppunt A het reële vermogen: $P_{\text{gen}} = U_A \cdot I_{w,\text{gen}}$ en het blindvermogen $Q_{\text{gen}} = U_A \cdot I_{wl,\text{gen}}$

De totale generatorstroom is gelijk aan:

$$I_{\text{gen}} = \sqrt{I_{w,\text{gen}}^2 + I_{wl,\text{gen}}^2}$$

De reële vermogensbalans is in orde: $P_{\text{gen}} = P_{\text{mot}}$.

Het verschil tussen de fasehoek van de generatorstroom (ϕ_{gen}) en de fasehoek van de motorstroom (ϕ_{mot}) in fig. 2.6.3 geeft aan dat de generator echter niet voldoende blindvermogen levert. Het tekort aan blindvermogen wordt in dit voorbeeld geleverd door de op het aansluitpunt A aangebrachte condensatorbank. Deze levert alleen blindvermogen:

$$Q_{\text{cap}} = U_A \cdot I_{wl,\text{cap}}$$

De blindcomponent van de motorstroom is in evenwicht met de blindcomponenten van de generatorstroom en de condensatorstroom:

$$I_{wl,\text{mot}} = I_{wl,\text{gen}} + I_{wl,\text{cap}}$$

Met behulp van een juiste dimensionering van de condensator wordt dus de blindvermogensbalans in evenwicht gebracht.

Naast inductieve belastingen zoals de elektromotor uit het voorbeeld kunnen ook de asymmetrische en niet-lineaire belastingen bijdragen aan de verslechtering van de arbeidsfactor.

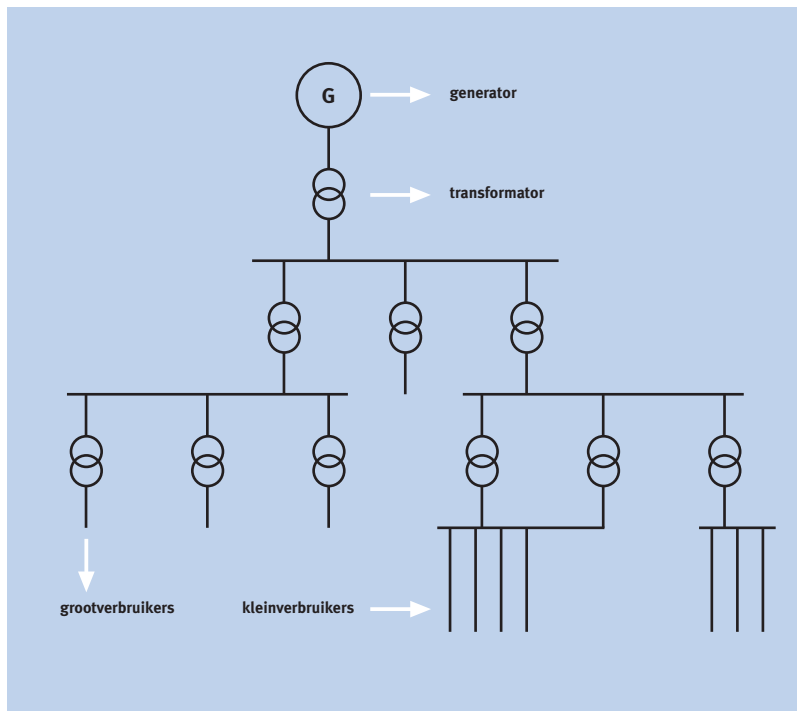
2.6.2 TRANSPORT VAN HET VERMOGEN IN DE WIJK

ir. S.W.H. de Haan²⁵

Het huidige wisselstroomdistributienet is fysisch gezien geschikt om in twee richtingen vermogen te transporteren. De beveiliging en de regeling van het systeem is echter gebaseerd op de veronderstelling dat het vermogen vloeit van grote centrale opwekeenheden naar kleinere decentrale verbruikers. Het huidige net heeft als het ware een boomstructuur waarbij de stromen steeds kleiner worden naar de uiteinden van de takken toe. Tevens heeft het net een hiërarchische structuur voor beheer en beveiliging, waarbij in geval van falen van een beveiliging op het eerstvolgende hogere niveau een tweede beveiliging in werking treedt. De reactietijden nemen daarbij toe, naarmate het niveau hoger wordt.

Fig. 2.6.4

Boomstructuur van het elektriciteitsnet. Naarmate het niveau hoger wordt, nemen de reactietijden van beveiligingsvoorzieningen toe.



Momenteel zijn de aanspreekniveaus voor beveiligingen op een vaste waarde ingesteld. Als de verbruikers van een overstroombeveiliging voorzien zijn, dan geeft de boomstructuur automatisch een grote mate van beveiliging tegen overbelasting.

In de transportnetten zijn de belangrijkste regelcomponenten condensatorbanken en regelschakelaars met transformatoren. In het huidige distributienet wordt niet of nauwelijks geregeld en verspreidt het vermogen zich als het ware langs de weg van de minste weerstand.

²⁵ TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek,
Vakgroep VEEM,
Postbus 5031
2600 GA Delft
S.W.H.deHaan@ITS.TUdelft.NL

In het tweerichtingen-distributienet met decentrale opwekeenheden zal de boomstructuur niet langer gehandhaafd kunnen worden, omdat er in uitlopers of groepen van uitlopers relatief grote stromen kunnen lopen. Dit betekent dat het distributienet een meer vermaasde structuur of een busstructuur zal moeten krijgen. In dit net zal de elektrische energie zo efficiënt mogelijk binnen de fysieke grenzen van het systeem over de verschillende mazen van het net getransporteerd moeten worden. Naast optimaliseren van het transport zal men in zo'n systeem een zekere mate van hiërarchie en 'back-up' in beveiliging willen handhaven. Een oplossing hiervoor is het variabel maken van de aanspreekniveaus van beveiligingen, afhankelijk van verbruiks- en opwekcondities in het net.

TRANSPORT VAN ELEKTRISCH VERMOGEN

Een van de fundamentele eigenschappen van op wisselstroom gebaseerde transportsystemen is het probleem om vermogen langs specifieke paden door een netwerk te geleiden. Omdat de weg die elektriciteit kiest bepaald wordt door de elektrische eigenschappen van alle verbindingen in het netwerk, is het mogelijk dat de stroom een grote omweg kiest bij zijn weg van bron naar belasting.

Bij een transportverbinding wordt de hoeveelheid vermogenstransport over die verbinding voornamelijk bepaald door drie parameters: de spanningen U aan de uiteinden van de verbinding, de impedantie²⁶ L van de verbinding en het faseverschil δ tussen het zendende en ontvangende eind.

$$\text{Te transporteren vermogen } P = \frac{U_1 U_2}{\omega L} \sin \delta$$

In een elektriciteitsvoorzieningsysteem staat ons een scala aan mechanisch bediende apparaten ter beschikking om deze parameters te beïnvloeden, maar deze apparaten zijn over het algemeen te traag om de energiestromen zonder vertraging te kunnen manipuleren. Een voorbeeld hiervan is de 'tap changer' of regeltransformator waarmee de hoogte van de spanning beïnvloed kan worden. Het omschakelproces over meer aftakkingen kan bij dit apparaat tot enkele minuten in beslag nemen, terwijl men veelvuldig omschakelen tracht te voorkomen in verband met slijtage van de schakelcontacten. Met name bij dreigende overbelasting of tijdens zeer korte pieken (transienten) na verstoringen is het echter van belang dat snel de juiste maatregelen kunnen worden genomen om te voorkomen dat door een domino-effect delen van het net uitvallen. Er zijn legio voorbeelden waarbij netuitval optrad ten gevolge van te traag of onjuist handelen.

.....
²⁶ Impedantie is de (frequentie-afhankelijke) weerstand van een systeem bij het voeren van wisselstroom.

De maximale transportcapaciteit van een elektrisch transportnetwerk hangt van een groot aantal factoren af. Factoren die de transportcapaciteit in fysieke zin bepalen zijn:

- de maximale stroom die de componenten kunnen voeren in verband met warmteontwikkeling in deze componenten (geleiders, schakelaars, enz.).
- de maximale spanning die toegepast mag worden in verband met de mogelijkheid van elektrische doorslag (isolatiemateriaal, -dikte).
- de mate waarin stroom en spanning ‘bij elkaar passen’, uitgedrukt in de arbeidsfactor λ , een maat voor de hoeveelheid blindvermogen (zie par. 2.6.1).

Voor de transportcapaciteit van een driefasige verbinding kan geschreven worden:

$$\text{Maximaal transporteerbaar vermogen} \quad P = \sqrt{3U I_{th} \lambda}$$

Hier is U de effectieve waarde van de toelaatbare spanning over de verbinding, I_{th} de effectieve waarde van de toelaatbare stroom en λ de arbeidsfactor.

De invloed van de arbeidsfactor λ op het maximaal te transporteren vermogen is bijzonder groot, dus het beheersen van blindstromen is van groot belang voor het optimaal benutten van de transportcapaciteit.

STUREN VAN STROMEN

Voor het voorkomen van overbelasting is het noodzakelijk te beschikken over een goede communicatiestructuur en over apparaten die snel geregeld kunnen worden.

Op dit laatste punt komt de vermogenselektronica ons te hulp. Elk van de conventionele, mechanisch bediende (dus langzame) ‘power flow controllers’ heeft een vermogenselektronische tegenhanger die binnen enkele milliseconden kan reageren op stuurcommando’s. In aanvulling daarop worden door toepassing van moderne vermogenshalfeleiders zoals thyristoren, GTO’s²⁷ en IGCT’s²⁸ nieuwe soorten regelaars ontwikkeld, die nieuwe taken kunnen vervullen. Deze nieuwe elektronische regelaars, tegenwoordig vaak FACTS²⁹ genoemd, maken het mogelijk om vrijwel momentaan vermogen te ‘routeren’ en onmiddellijk te reageren op statische en dynamische verstoringen van de spanningen in het transportsysteem. Het routeren van het vermogen gebeurt daarbij door aanpassing van een van de eerder genoemde drie parameters: de hoogte van de spanning, de fasehoek of door het aanpassen van de (schijnbare) impedantie van de transmissielijn.

Door het toepassen van FACTS zullen netten op een andere wijze gebruikt gaan worden. Deze wijziging gaat verder dan het alleen maar aanpassen van de

.....
²⁷ Zie deel 2, par. 2.5 Gate Turnoff Transistor.

²⁸ Integrated Gate Controlled Thyristor.

²⁹ Flexible AC Transmission Systems.

grootte van het vermogen in een specifieke verbinding of het ontlasten van een flessehals op een kritische plaats in het netwerk. Het elektriciteitsnet zal als een geïntegreerd dynamisch systeem geregeld moeten worden, waarbij een economisch optimale verdeling van de belasting ingesteld wordt en waarbij beveiligingssystemen gebaseerd worden op technieken, die met mechanische regelars ondenkbaar waren. Om zo'n veranderingsproces te kunnen doorvoeren is het nodig om naast het ontwikkelen van de FACTS zelf, systemen te ontwikkelen, waarmee de veiligheid van het systeem zonder tijdvertraging geëvalueerd kan worden. Hiertoe zal een meetsysteem gerealiseerd moeten worden dat zich over het gehele elektriciteitsnet uitstrekt; in aanvulling daarop is het nodig software te ontwikkelen waarmee zonder tijdvertraging de situatie in een net geanalyseerd kan worden en waarmee binnen enkele milliseconden elektronische regelars en FACTS-apparaten aangestuurd kunnen worden.

CUSTOM POWER

FACTS hebben vooral tot taak vermogensstromen te sturen in hoogspanningsnetten. De laatste jaren is vooral in de VS een ontwikkeling gaande die gericht is op het verbeteren van de spanningskwaliteit in laag- en middenspanningsnetten met behulp van vermogenselektronica. Het gaat daarbij bijvoorbeeld om het handhaven van de energieleverantie en van het juiste spanningsniveau.

Deze ontwikkeling maakt het mogelijk om op verschillende plaatsen te voldoen aan verschillende eisen met betrekking tot spanningskwaliteit. Als de klant dat wil, kan lokaal een betere kwaliteit dan de 'standaard'kwaliteit geleverd worden. De nieuwe technologie maakt het ook mogelijk om in het laag- of middenspanningsnet energieopslagsystemen te plaatsen teneinde de continuïteit van energieleverantie lokaal te waarborgen conform de wensen van de klant.

'Custom Power' is de term die wel gebruikt wordt om deze vorm van energieleverantie (waarbij energie geleverd wordt op klantspecificatie) aan te duiden. In de VS heeft het Electric Power Research Institute (EPRI) een leidende rol genomen in het ontwikkelen van demonstratieprojecten voor Custom Power Devices (CPD's). Het gaat daarbij onder andere om toepassing van dit soort apparaten in relatief zwakke uitlopers van het net.

Alhoewel de omschrijving van de begrippen FACTS en CPD een strikte scheiding aangeeft, is de scheiding in de praktijk minder strikt. Zo kan een SVC (Static VAR Compensator, zie deel 2) opgevat worden als een FACTS-apparaat wanneer het gebruikt wordt om de belasting door blindvermogen op een transportverbinding te reduceren, terwijl hetzelfde apparaat ook als CPD opgevat kan worden als het gebruikt wordt om relatief langzame (0,1 - 1 Hz) variaties in de netspanning (flicker) te reduceren.

FACTS EN CPD'S IN DE WIJK VAN DE TOEKOMST

Bij grootschalige toepassing van decentrale opwekeenheden zal de behoefte aan FACTS en CPD's toenemen.

Tot op heden werden individuele FACTS ingezet om de benutting en de betrouwbaarheid van een specifieke verbinding te verbeteren. Het systeem werd daarbij op basis van lokale meetgrootheden geregeld. Met het beschikbaar komen van nieuwe meettechnieken, snellere communicatiemiddelen en geavanceerde software-hulpmiddelen wordt het mogelijk om zonder vertraging de vermogensstromen in een geheel netwerk te besturen, waarbij snel en adequaat gereageerd kan worden op verstoringen in het net.

Met de huidige centrale opwekeenheden en de huidige netten is het bulktransport tot op zekere hoogte op dag- of uurbasis goed voorspelbaar en kan men de verschillende regelcomponenten al van tevoren in de juiste stand zetten. In Nederland met zijn relatief korte verbindingen en relatief sterke net wordt daarbij vooral gebruik gemaakt van de conventionele elektromechanische regelcomponenten en worden FACTS eigenlijk nauwelijks toegepast.

In de wijk van de toekomst zullen decentrale opwekeenheden zich over het algemeen in de periferie van het net op laag- en middenspanningsniveau bevinden. Bij grootschalige toepassing van decentrale opwekeenheden zullen de centrale opwekeenheden en het transportnet waarschijnlijk relatief licht zijn uitgevoerd met relatief hoge impedanties en een beperkte transportcapaciteit. Verder zal op een groot aantal verschillende plaatsen energie aangeboden of onttrokken worden door opwekeenheden, opslagsystemen of verbruikers. Afhankelijk van de weersomstandigheden (wind, zon) kan de lokale en regionale verdeling van aanbieders of onttrekkers (inclusief opslagsystemen) van energie sterk wisselen. Als gevolg hiervan kan ook de belasting van netdelen sterk wisselen, waarbij afhankelijk van de (weers)omstandigheden bepaalde netdelen slechts een klein deel van de tijd zwaar belast zullen worden. Om niet elk netdeel voor de 'worst case' belasting te hoeven ontwerpen is routing van energie ook in het midden- en laagspanningsnet nodig met behulp van FACTS en CPD's. De ruimtelijke uitgestrektheid van het distributienet en de onvoorspelbaarheid van de distributieproblemen maken het noodzakelijk om te komen tot een systeem met FACTS-apparaten waarbij de regelfuncties vanuit een centraal punt gecoördineerd worden. In min of meer autonome wijken bestaat de transport- en distributieproblematiek in principe ook, echter op een lager niveau. In zo'n wijk zal ook het gebruik van opwekeenheden, back-up systemen en opslagsystemen met behulp van een 'Energie Management Systeem' gecoördineerd moeten worden om de beschikbare middelen optimaal te benutten. De besturing van FACTS op transportniveau en CPD's op distributieniveau zal daarbij afgestemd moeten zijn op momentele configuratie van opwekeenheden en verbruikers.

Een uitgebreid overzicht van de verschillende FACTS en CPD-componenten wordt gegeven in deel 2, in het hoofdstuk 4, Transport en distributie. In deze paragraaf gebruikte literatuur [Stahlkopf, 1997; Ewart, 1990; Bauer, 1997].

2.6.3 ENERGIE-UITWISSELING MET VERMOGENSELEKTRONISCHE OMZETTERS

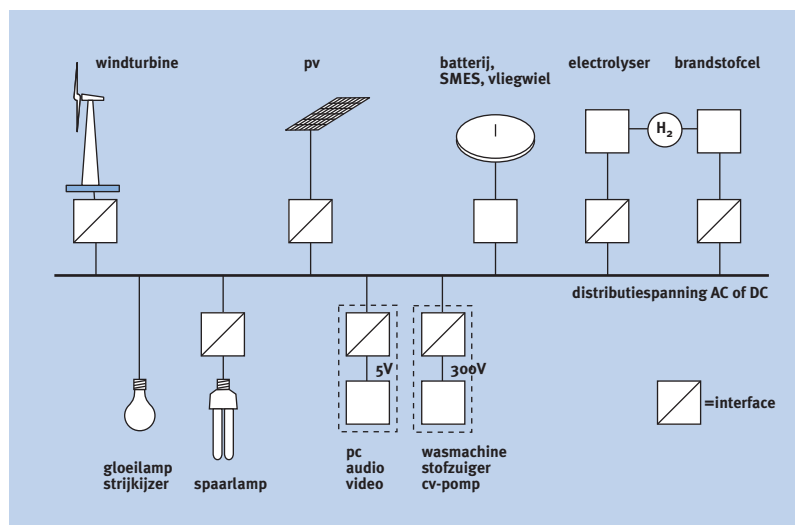
ir. S.W.H. de Haan³⁰

INLEIDING

In de wijk van de toekomst zullen verschillende soorten spanningen (AC of DC) en spanningen op verschillende niveaus voorkomen. Zo wekken bijvoorbeeld de generatoren van moderne windturbines een wisselspanning met variabele frequentie op, terwijl mini warmte/kracht (w/k)-eenheden een wisselspanning met constante frequentie kunnen leveren. Fotovoltaïsche (PV)systemen leveren daarentegen weer gelijkspanning. Ook aan de gebruikerszijde is er behoefte aan verschillende soorten spanningen. In fig. 2.6.5 zijn schematisch verschillende opwekeenheden en verbruikers aangegeven met daarbij eventuele interfaces die de spanning naar de gewenste soort en het gewenste niveau brengen. De interfaces zijn in feite vermogenslektronische omzeters.

Fig. 2.6.5

Schematische weergave van nieuwe opwekeenheden en gebruikers in het elektriciteitsnet met de benodigde interfaces.



GEbruikerszijde

Elektronische apparaten (zoals audio, video, pc's) hebben voldoende aan een lage gelijkspanning (bijv. 5 V), terwijl elektrische apparaten zoals stofzuigers en wasmachines, ovens en strijkijzers doelmatiger werken bij een hogere gelijk- of wisselspanning. Met de huidige 50 Hz/230 V distributiespanning bevinden zich in de apparaten omzeters die de netspanning omzetten naar de gewenste soort en het gewenste niveau. Dat kan door middel van een transformator in

³⁰ TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek,
Vakgroep VEEM,
Postbus 5031
2600 GA Delft
S.W.H.deHaan@ITS.TUdelft.NL

combinatie met een gelijkrichter en een condensator. Een modernere oplossing is de vermogenselektronische omzetter. Bij deze omzetter wordt vaak gebruik gemaakt van een cascade waarbij uit de 50Hz/230 V distributiespanning eerst een gelijkspanning wordt gemaakt (bijv. 325 V of 540 V DC), waarna deze spanning wordt omgezet naar de gewenste soort. Zo gebruikt een cd-speler 5 V gelijkspanning, een moderne wasmachinemotor 200 V wisselspanning (0 - 80 Hz) en een moderne gasontladingslamp 80 kHz wisselspanning. Ook wanneer een andere distributiespanning zal worden gekozen, bijvoorbeeld 325 V of 24 V gelijkspanning, dan zal nog steeds een groot aantal verbruiksapparaten voorzien moeten worden van een interface om het apparaat van de juiste spanning te voorzien.

De technologie voor interfaces in elektrische apparaten is uit het oogpunt van functionaliteit redelijk uitgerijpt (wellicht met uitzondering van de ontbrekende wereldwijde normalisatie van spanning en contactdozen). Uit het oogpunt van vermogensdichtheid, productietechnologie en EMC³¹ kan nog een zeer belangrijke winst worden geboekt, mits de noodzakelijk doorbraken worden gerealiseerd op het gebied van het integraal elektromagnetisch ontwerpen van vermogenselektronische omzetters. Kenmerkend hiervoor is dat in het ontwerpproces gelijktijdig rekening wordt gehouden met EMC-eisen, thermische eisen, eisen voor vermogensdichtheid (afmetingen) en productietechnische eisen. Met name op het gebied van EMC lijkt zo'n doorbraak noodzakelijk om het toenevende aantal storende elektronische apparaten (waaronder schakelende interfaces en draagbare telecom-apparaten) ongestoord te kunnen laten samenwerken. Hiervoor is het nodig fundamenteel onderzoek te doen op het gebied van elektromagnetische modellering en op het gebied van integratietechnieken van vermogenscomponenten.

OPWEKZIJDE

Met betrekking tot de wijze van koppeling aan het net kunnen decentrale opwekeenheden in twee categorieën worden verdeeld. Tot de eerste categorie behoren klassieke w/k-koppelingen (waaronder biomassa-eenheden), die via een synchrone generator direct met het net gekoppeld zijn. Deze opwekeenheden gedragen zich tot op zekere hoogte (wat de kwaliteit van de geleverde spanning betreft) als de grote elektriciteitscentrales die immers ook synchrone generatoren voor de opwekking gebruiken. De tweede categorie zijn decentrale opwekeenheden zoals windturbines, PV-systemen, brandstofcellen, alsmede energieopslagsystemen zoals SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), vliegwielen, batterijeenheden en elektrolyse-eenheden.

Bij deze categorie wordt in principe een spanning opgewekt die niet compatibel is met de netspanning. De incompatibiliteit betreft de soort spanning (AC of DC), het spanningsniveau of de frequentie. Om deze apparaten aan het net te koppelen is een vermogenselektronische schakeling nodig die de spanningen

.....
³¹ Elektromagnetische compatibiliteit.

op elkaar afstemt. Ook hier geldt dat het toepassen van een andere distributiespanning niet kan voorkomen dat interfaces nodig zijn. Wanneer bijvoorbeeld gekozen wordt voor 325 V gelijkspanningsdistributie, kan men hierop niet zonder meer een reeks PV-cellen aansluiten. De spanning waarbij het PV-systeem optimaal functioneert hangt in belangrijke mate af van externe omstandigheden zoals zoninstraling en temperatuur. Een zekere mate van aanpassing van de spanning blijft gewenst om het vermogenspotentieel van de cellen optimaal te benutten. Daarnaast kan spanningsaanpassing nodig zijn, omdat de gekozen DC-distributiespanning voor een bepaalde opwekeenheden onpraktisch hoog of onpraktisch laag is. Anders gezegd: een spanning die geschikt is voor een PV-systeem behoeft niet per se ook geschikt te zijn voor een batterij-systeem of een pc.

De technologie om decentrale opwekeenheden aan het AC-net te koppelen is beschikbaar, maar staat ten dele nog in de kinderschoenen. Tot in de eerste helft van de jaren negentig werden PV-systemen en windturbines nog aan het net gekoppeld met omzeters die gebaseerd waren op thyristortechnologie. Voor vermogens tot ca. 10 MW kan deze technologie anno 1998 als primitief worden beschouwd in verband met de negatieve invloed op de kwaliteit van stroom en spanning en de matige regeleigenschappen.

De vermogenselektronische technologie die momenteel zijn intrede doet is voor een deel geleend uit andere toepassingsgebieden zoals de regelbare aandrijftechniek en is nog verre van optimaal. In nog sterkere mate dan bij verbruiksapparaten geldt hier dat een innoverende ontwikkeling nodig is, waarbij gelijktijdig voldaan wordt aan ontwerpeisen met betrekking tot functionaliteit, EMC, rendement, vermogensdichtheid, kostprijs en duurzaamheid.

DE ROL VAN DUURZAME OPWEKEENHEDEN IN HET NET; REGELASPECTEN; EISEN AAN OPWEKEENHEDEN

Een bijzonder aspect van duurzame opwekeenheden is het gedrag ten opzichte van het net in vergelijking met de centrale thermische opwekeenheden. De centrale thermische opwekeenheden zijn in feite regelbare spanningsbronnen en wekken verschillende vermogenscomponenten op die als volgt onderverdeeld kunnen worden:

- werkzaam of actief vermogen
- grondharmonisch blindvermogen (voor blindvermogen zie par. 2.6.1)
- bovenharmonisch blindvermogen.

In een net zullen vraag en aanbod van de verschillende soorten vermogen op elk moment met elkaar in evenwicht moeten zijn. Momenteel regelen de grote elektriciteitscentrales (gezamenlijk) de hoogte en de frequentie van de netspanning.

Zodra er in een net te weinig actief vermogen wordt opgewekt, zal het toerental van de generatoren als gevolg van de ‘overbelasting’ dalen, wat een frequentiedaling tot gevolg heeft. Als reactie daarop zullen de operators van de centrales meer primaire brandstoffen toevoeren om het toerental en daarmee de vermogensbalans te herstellen. Dit is de zogenaamde frequentievermogensregeling. Wanneer onvoldoende grondharmonisch blindvermogen wordt opgewekt, zal de spanning bij de verbruiker dalen. Als reactie op zo’n spanningsdaling zal de operator de bekrachtiging van de generator en daarmee het geproduceerde blindvermogen opvoeren. Het bovenharmonisch blindvermogen wordt automatisch door de generator geleverd; hiervoor is geen extra regelsysteem nodig.

De duurzame opwekeenheden die via een interface met het net gekoppeld zijn verschillen in een aantal opzichten van de centrale opwekeenheden. De verschillen worden voor een deel bepaald door de aard van de energiebron en voor een belangrijker deel door de eigenschappen van de vermogenselektronische omzetter.

In de eerste plaats zijn de interfaces van de meeste duurzame opwekeenheden als stroombron geprogrammeerd, waarbij de grootte van de stroom automatisch zo wordt ingesteld dat op elk moment het maximaal beschikbare vermogen aan de duurzame opwekeenheden wordt onttrokken (Maximum Power Point Tracking). Door deze wijze van bedrijfsvoering kan de opwekeenheden niet meedoen aan de frequentievermogensregeling, want er is immers niet meer vermogen beschikbaar. Daarvoor zou de duurzame opwekeenheden op deellast moeten worden ingesteld. Het is de vraag of dat een verstandige keuze is.

In de tweede plaats zijn duurzame opwekeenheden als regel niet in staat om zelf grondharmonisch blindvermogen te leveren; een aantal (met name klassieke windturbines) vraagt zelf grondharmonisch blindvermogen. Een uitzondering hierop wordt gevormd door de moderne windturbines. Daarnaast zijn duurzame opwekeenheden zonder uitzondering niet in staat om harmonisch blindvermogen te leveren; een aantal vraagt er zelfs om. Een tekort aan harmonisch blindvermogen uit zich in een sterke harmonische vervorming van de spanning, hetgeen onder andere storing tot gevolg kan hebben.

Om mee te doen in de spanningsregeling in netten zouden duurzame opwekeenheden blindvermogen moeten kunnen opwekken, dat bovendien in grootte geregeld moet kunnen worden.

AUTONOMIE

Naast de geschetste problemen komt een geheel ander probleem aan de orde, wanneer een wijk geheel losgekoppeld wordt van het net. Bij de huidige netgekoppelde decentrale opwekeenheden wordt de frequentie van de opgewekte stroom langs elektronische weg gesynchroniseerd met de frequentie van de netspanning. De decentrale opwekeenheden volgt de frequentie van het net;

de grote centrale opwekeenheden bepalen als een dirigent de netfrequentie. Wanneer er geen netkoppeling meer is, dan zal de frequentie in het autonome net op een andere wijze tot stand moeten komen, waarbij er uiteraard niet uitsluitend dirigenten of volgers kunnen zijn.

HERBEZINNING

Bij grootschalige opwekking met duurzame opwekeenheden is een herbezinning nodig op de taken die deze opwekeenheden in een net hebben. Moeten ze alleen maar zoveel mogelijk actief vermogen opwekken, of moeten ze zich net zo gedragen als de grote centrale opwekeenheden? Als deze laatste vraag ontkennend wordt beantwoord, dan rijst onmiddellijk de vraag hoe de frequentie en de spanningstabiliteit in het net moeten worden gegarandeerd. Maar ook bij een bevestigend antwoord is de vraag hoe dat dan gerealiseerd moet worden. Hieruit kunnen dan specificaties voor de interfaces worden afgeleid en protocollen voor de bedrijfsvoering van decentrale opwekeenheden worden opgesteld. Op dit gebied is nog veel onderzoek nodig waarbij het met name gaat om de relatie tussen systeemgedrag en de specifieke eigenschappen van de interfaces.

2.6.4 KWALITEIT VAN DE LEVERING

ir. J.M. Meij

Een begrip waarover veel verwarring kan bestaan is de kwaliteit van de levering van elektriciteit. Dit komt voort uit de brede interpretatie die mogelijk is van het begrip kwaliteit. Zo wordt betrouwbaarheid soms gezien als een onderdeel van kwaliteit, soms als apart aspect. Daarnaast blijkt er ook in de vele andere aspecten van de leveringskwaliteit een soort begripsverwarring te bestaan. Dit was voor de IEEE aanleiding om in 1995 een richtlijn uit te geven [IEEE, 1995]. Hierin wordt een standaardisatie voorgesteld van de terminologie op het gebied van 'power quality'.

Tabel 2.6.1 geeft een samenvatting van deze richtlijn. De categorieën zijn gebaseerd op veranderingen van de normspanning en op de verschillende tijdsdomeinen waarin de veranderingen plaatsvinden. Er valt een grove onderverdeling te maken in:

- leveringszekerheid
- afwijkingen van de normspanning
- netvervuiling.

Leveringszekerheid heeft te maken met de beschikbaarheid van de gewenste energie. Bij een onderbreking (stroomuitval) vindt er voor bepaalde tijd geen bruikbare (minder dan 10% van de normspanning) levering plaats. De termen die de IEEE onderscheidt naar tijdsduur van de onderbreking zijn aangegeven in onderstaande tabel.

Term	Tijdsduur	Omschrijving	Oorzaken	Gevolgen	Maatregelen
'Interruption' onderbreking	'Momentary' 1/2 cyclus tot 3 seconden 'Short duration' 3 seconden tot 1 minuut	vermindering van het rms- voltage tot 0% naar < 10%	falen van apparatuur en controlefouten	uitvallen apparatuur processen stoppen	aggregaat, UPS, 'static transfer switch'
'Sustained Interruption' aanhoudende onderbreking	Langer dan 1 minuut	vermindering van het rms-vol- tage < 10%	afschakeling systeem door extreem weer, ongelukken	uitvallen apparatuur processen stoppen verlies proces- resultaat	tweezijdig onderstation stand-by-aggre- gaat, UPS, 'static transfer switch'

Tabel 2.6.1

Leveringszekerheid, termen naar tijdsduur van de onderbreking. Rms (root mean square of effectief voltage) staat voor $1/\sqrt{2}$ maal de maximumspanning (in Nederland is de rms-spanning 230 V).

Ook voor een te hoge of te lage spanning (tussen 10 en 90% of tussen 110 en 180%) worden verschillende tijdsduren benoemd.

Term	Tijdsduur	Omschrijving	Oorzaken	Gevolgen	Maatregelen
'Sag' inzakking	'Instantaneous' 1/2 tot 30 cycli	daling van het rms-voltage naar 10 - 90%	plotselinge belastingtoename, systeemfa- len, opstarten elektromotor	PLC-besturingen vallen uit, motoren draaien langzamer, regelbare aandrijvingen stoppen	aggregaat, spanningsregulator, UPS
	'Momentary' 1/2 cyclus tot 3 sec.	van de normale waarde			
'Undervoltage' onderspanning	langer dan 1 minuut	daling van het rms-voltage naar 10 - 90% van de normale waarde	overbelasting van de centrales	motoren draaien langzamer en oververhitten	UPS, stand-by-aggregaat
'Swell' opzwellling	'Instantaneous' 1/2 cyclus tot 30 cycli	stijging van de spanning naar 10 - 80% boven	kortsluiting fase naar aarde, plotselinge verlies van belasting, inschakelen van grote condensatorbank	componenten oververhitten, elektronische componenten beschadigen	aggregaat, spanningsregulator, UPS
	'Momentary' 3 seconden tot 1 minuut	de normale waarde 10 - 40% boven de normale waarde			
'Overvoltage' overspanning	langer dan 1 minuut	stijging van de spanning naar 10 - 20% boven de normale waarde	kortsluiting fase naar aarde, falen van apparatuur	componenten oververhitten, elektronische componenten beschadigen	UPS, stand-by-aggregaat

Tabel 2.6.2

Afwijkingen van de normspanning naar grootte en tijdsduur.

Netvervuiling wordt in het dagelijks taalgebruik het meest geassocieerd met zaken als harmonische stromen, 'flicker' en ruis. Deze komen vrijwel continu voor zonder een bepaalde tijdslimiet. Ook spanningsonbalans is een continue verstoring.

Op de zeer korte termijn worden nog de transiënten onderscheiden: zeer plotselinge veranderingen, in één richting of oscillerend in hoge frequenties.

Transiënten zijn soms hoorbaar als 'tikken' in audioweergave.

Een aantal van de hier genoemde soorten netvervuiling wordt behandeld in de volgende paragraaf, die ook dieper ingaat op de oorzaken en mogelijke tegenmaatregelen.

Term	Tijdsduur	Omschrijving	Oorzaken	Gevolgen	Maatregelen
'Transient' transienten	minder dan een cyclus nanoseconde tot microseconde	plotselinge variatie in spanning in één richting of oscillerend	bliksem, schakelen of opladen van condensatoren, schakelen van netten, ferresonantie onbelastete trafo	schade aan condensatoren, voedingen, apparaatfouten, crashen van besturingen, corruptie van data, verliezen van data	transientenonderdrukker, 'power conditioner'
'Voltage imbalance' spanningsonbalans	continu	verhouding tussen negatieve en positieve component van de stroom verstoord	slecht verdeelde belasting op drie-fasensystemen, problemen met condensatorbanken, onderbreking van één fase	oververhitting van nulgeleiders, oververhitting van motoren	belasting beter verdelen, herstellen van onderbroken fase
'Noise' ruis	continu	ongewenste elektrische signalen (200 kHz)	slechte aarding, vermogensselectronica, regelschakelingen, booglassen, schakelende voedingen, schakelaars en relais	slijtage van voedingen, elektronische componenten, rekenfouten in processoren, apparaatfouten, synchroniteitsverlies, instabiliteit in servomechanismen, corruptie van data, variatie in timingsignalen, foutsignalen in versterkers	filters, isolatietransformatoren, bepaalde typen conditioners
'Harmonic current' harmonische stromen	continu	stromen bij veelvoud van de basisfrequentie (50 Hz)	niet lineaire belastingen zoals gelijkrichters, aandrijvingen met regelbare snelheid, schakelende voedingen	vervorming van de spanning, oververhitting van transformatoren, ballasten en nulgeleiders, fouten in telecommunicatie	filters, 'phase shifting', transformers

2.6.5 NETVERVUILING EN ELEKTROMAGNETISCHE COMPATIBILITEIT (EMC)

ir. S.W.H. de Haan³²

Netvervuiling heeft betrekking op abnormale afwijkingen van de sinusvorm en van de nominale waarde van de spanning.

Tabel 2.6.3 [linkerpagina]

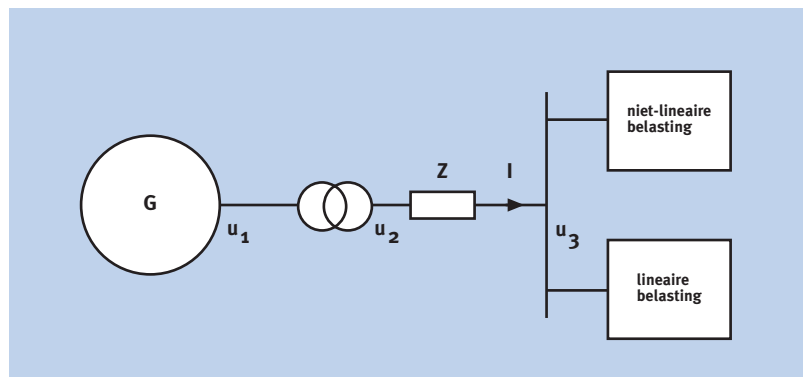
Netvervuiling naar de aard van de vervuiling.

Oorzaken

In principe wordt de netvervuiling veroorzaakt door niet-lineaire of tijdvariabele belastingen in combinatie met de eindige impedantie³³ van het net. In fig. 2.6.6 is een eenvoudig net afgebeeld met transformator en enkele verbruikers, waarbij aangenomen wordt dat de generator een onvervormde sinusvormige spanning levert en waarbij de netimpedantie is voorgesteld door een weerstand en zelfinductie L.

Fig. 2.6.6

Schematische weergave van een elektriciteitsnet met een generator (G) en met lineaire en niet-lineaire belasting waarbij de impedantie van het net wordt voorgesteld door Z. Ten gevolge van een (vervormde) stroom I is de spanning u_3 bij de gebruiker ook vervormd: $u_3 = u_2 - ZI$.



Ten gevolge van deze impedantie zal er een spanningsverschil zijn tussen de spanning bij de transformator u_2 en de spanning bij de verbruiker u_3 . Bij een ohms/inductieve impedantie hangt dit verschil zowel af van i als van di/dt . Omdat de stroom i door allerlei oorzaken voortdurend verandert, zal de spanning u_2 dat ook doen.

Voorbeelden van netverontreiniging en hun oorzaken zijn:

- harmonische vervorming van de spanning ten gevolge van niet-lineaire belastingen. Conventionele vermogens-elektronische apparaten (met name gelijkrichters) onttrekken een sterk vervormde stroom aan het net. Ten gevolge van deze harmonisch vervormde stroom ontstaat harmonische vervormde spanning over Z.
- netdips ten gevolge van spanningsval over de netimpedantie bij het inschakelen van grote belastingen.
- ‘spikes’ ten gevolge van het uitschakelen van belastingen in een inductief net.
- fase- en spannings-sprongen ten gevolge van bijvoorbeeld reconfiguratie van het net.

32 TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek,
Vakgroep VEEM
Postbus 5031
2600 GA Delft
S.W.H.deHaan@ET.TUdelft.NL

33 Impedantie is de (frequentie-afhankelijke) weerstand van een systeem bij het voeren van wisselstroom.

- langzame fluctuaties (orde 1 Hz) van de netspanning (flicker) ten gevolge van niet met het net gesynchroniseerde pulserende verbruikers of opwekeenheden zoals lichtboogovens, respectievelijk windturbines.
- overspanning ten gevolge van het inschakelen van warmte/kracht (w/k)-koppelingen.

Naast de genoemde oorzaken van netverontreiniging zijn er vormen die specifiek samenhangen met grootschalige decentrale opwekking. Een voorbeeld zijn de hinderlijke spanningvariaties (flicker) die kunnen optreden in de buurt van bepaalde typen windturbines ten gevolge van het passeren van de wieken langs de toren of door bepaalde windcondities. Een vergelijkbaar verschijnsel zou kunnen optreden bij wolkenvelden die over PV-systemen trekken.

Gevolgen

De verbruikers als groep zijn de belangrijkste veroorzakers van netverontreiniging; zowel verbruikers als netbeheerders zijn er echter ook slachtoffer van. Verbruikers zien namelijk op hun aansluiting een vervuilde netspanning waardoor apparaten gestoord kunnen worden in hun werking. Voorbeelden hiervan zijn 'ratelend' geluid van audioapparaten, strepen in het TV-beeld, het defect raken van elektronische apparaten ten gevolge van spikes of overspanning, computerstoringen ten gevolge van netdips en flinkerend licht door spanningsvariaties. De beheerders van netten zien dat een deel van de transportcapaciteit van het net verbruikt wordt door harmonischen³⁴ terwijl deze harmonischen ook kunnen leiden tot overbelasting van componenten zoals VAR-compensatoren.

De sterke groei van de toepassing van conventionele vermogenselektronica in de laatste decennia weerspiegelt zich in een sterke toename van de netverontreiniging. Bij grootschalige toepassing van decentrale opwekeenheden zal het gebruik van vermogenselektronica sterk toenemen, onder andere omdat bijna allen opwekeenheden en opslagsystemen via een vermogenselektronische interface met het net gekoppeld zullen worden. Omdat een groot deel van de energie decentraal wordt opgewekt, zal het transportnet relatief zwak zijn met hoge impedanties. Aanwezige stoorstromen veroorzaken over deze relatief hoge impedanties een hoge stoorspanning. Bij zo'n ontwikkeling met een zwakker wordend net en een toenemend aantal potentiële stoorbronnen moet voorkomen worden dat het systeem ontaardt in een grote stoorzender.

TECHNISCHE MAATREGELEN VOOR HET BESTRIJDEN VAN NETVERVUILING

Alhoewel de conventionele vermogenselektronica een van de grote bronnen van netverontreiniging is, biedt de moderne vermogenselektronica juist mogelijkheden om dit probleem aan te pakken. Bij de moderne vermogenselektronica wordt gebruik gemaakt van halfgeleiders die op een hoge frequentie schake-

.....
 34 Harmonischen: stromen of signalen afkomstig van wisselende spanning met een bepaalde frequentie in veelvoud van deze frequentie.

len en waarmee energie aan het net kan worden onttrokken met een vrijwel onvervormde gesynthetiseerde sinus. Onder druk van regelgeving wordt deze technologie al toegepast in talloze apparaten voor klein vermogen, waaronder de elektronische PL-lampen. Voor enkele gulden per apparaat zou deze technologie op dit moment al toegepast kunnen worden in netvoedingen in consumentenelektronica. Ook voor grotere vermogens is deze technologie beschikbaar; ze wordt echter slechts op bescheiden schaal toegepast.

Om de mate van netverontreiniging in de toekomst zoveel mogelijk te beperken, is het gewenst dat alle categorieën vermogenselektronische apparaten aan hoge eisen met betrekking tot de netverontreiniging voldoen. Bij apparaten voor klein vermogen (< 10 kW) zoals consumentenelektronica levert dat in principe geen probleem op. Ondanks deze maatregelen zal er nog enige restverontreiniging blijven bestaan, mede omdat niet bij alle categorieën apparaten aan alle eisen voldaan kan worden. Dit is met name het geval bij apparaten voor groot vermogen zoals vermogenselektronica voor industriële toepassingen en bij FACTS-apparaten zelf.

In verband met de lage netimpedantie zal het noodzakelijk zijn om in het net maatregelen te nemen om de nog aanwezige verontreiniging te verwijderen. Ter verbetering van de netkwaliteit wordt gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuwe categorie vermogenselektronische apparaten. Het gaat hierbij om apparaten die bijvoorbeeld de harmonische vervorming reduceren of die spanningsdips compenseren. Deze apparaten zullen we hier aanduiden met 'Power Quality Conditioners' (PQC's). De grens tussen FACTS en PQC's is niet scherp te trekken, omdat sommige apparaten zoals een Static VAR Compensator (SVC) zowel gebruikt kunnen worden om het vermogen te routeren als om de spanning op een aanvaardbaar peil te houden.

REGELGEVING

Bij fabrikanten is er nauwelijks een economische drijfveer om hun apparaten van hoogwaardige interfaces te voorzien. Het is daarom noodzakelijk om door middel van regelgeving de toepassing van nieuwe interfaces af te dwingen en de ontwikkeling van interfaces te stimuleren.

EMC

EMC kan gedefinieerd worden als het vermogen van apparaten om op de juiste manier te functioneren in elkaars omgeving, dus zonder last van elkaar te hebben.

Incompatibiliteit kan het gevolg zijn van twee oorzaken: er is sprake van een te hoge emissie van elektromagnetische velden door het ene apparaat en of van een te grote gevoeligheid (susceptibiliteit) van het andere apparaat voor deze velden. Deze definitie geeft aan dat de al eerder genoemde storingsaspecten

van netverontreiniging vallen onder het begrip EMC. Bij netverontreiniging denkt men vooral aan afwijkingen van de netspanning die een betrekkelijk laag-frequent karakter hebben (tot enkele kHz). EMC is een veel ruimer begrip en betreft geleiding, straling en overspraak³⁵ van storing tot zeer hoge frequenties (de huidige normen voor o.a. vermogenselektronica gaan tot 1,3 GHz). Door het toenemend gebruik van allerlei geklokte, schakelende en bij hoge frequenties werkende elektronica zoals digitale elektronica, vermogenselektronische voedingen en mobiele telefoons neemt de emissie van storing sterk toe. De moderne vermogenselektronica – waarbij halfgeleiders intern pulsformige stromen met een grote flanksteilheid opwekken – veroorzaakt daarbij een energierijk breedbandig stoorspectrum. Als gevolg van regelgeving is het emissieniveau van bepaalde categorieën nieuw ontwikkelde vermogenselektronische apparaten sterk afgenomen. Hand in hand met deze ontwikkeling is ook bij ontwerpers het inzicht in EMC sterk verbeterd. Dat heeft geleid tot het toepassen van een reeks van vuistregelachtige maatregelen in het ontwerpproces, zoals het structureren van de circuit lay-out, het toepassen van filters, het verbeteren van aarding en afscherming, het reduceren van de flanksteilheden van stromen en spanningen. Ondanks deze maatregelen ligt het storingsniveau van industriële vermogenselektronica nog steeds ver boven de norm.

Bij een bepaalde categorie van apparaten zoals mobiele telefoons zal ondanks alle maatregelen het gezamenlijke emissieniveau waarschijnlijk alleen maar toenemen. Nu al zijn er talloze voorbeelden waarbij mobiele telefoons ongewenst gedrag van apparaten in de omgeving veroorzaken. Om elektromagnetische interferentieproblemen te voorkomen zal de gevoeligheid van apparaten voor dit soort storing verminderd moeten worden. Een gelukkige omstandigheid is dat op grond van het reciprociteitsbeginsel maatregelen die genomen worden om het storingsniveau van een apparaat te verminderen, tevens de gevoeligheid van dat apparaat voor storing verminderen.

ELEKTROMAGNETISCHE EMISSIE

Fundamenteel onderzoek naar de ontwikkeling van methoden voor de beperking van elektromagnetische emissie (EME) staat nog in de kinderschoenen en is nodig om de grenzen op dit gebied te kunnen verleggen. Door een aantal instituten is voorzichtig begonnen met systematisch onderzoek naar methoden om EME al in het ontwerpproces te kunnen kwantificeren [Palis, 1997; Youssef, 1997]. Resultaten van dergelijk onderzoek kunnen leiden tot producten met veel geringere emissie, terwijl de kosten van die producten lager kunnen zijn, omdat onder andere filtercomponenten mogelijk weggelaten kunnen worden.

³⁵ Overspraak: het doordringen van signalen in delen van de schakeling waar deze ongewenst zijn.

2.6.6 INFORMATIETECHNOLOGIE VOOR NIEUWE ENERGIEDIENSTEN

*prof.dr. J.M. Akkermans*³⁶

Energiebedrijven passen al vele jaren op grote schaal informatie- en communicatietechnologie (ICT) toe ten behoeve van de automatisering van elektriciteitsproductie en distributie. Daarnaast is er een ontwikkeling aan de gang – vaak aangeduid als huisautomatisering – waarbij de computer wordt gebruikt voor diverse functies in de gebouwde omgeving, zoals klimaatbeheersing en energiebesparing. Momenteel zijn dit nog duidelijk onderscheiden gebieden, maar dit zal in de nabije toekomst snel veranderen. Een belangrijke reden daarvoor is de opkomst van een nieuwe technologie die bekend staat als Power Line Telecommunications (PLT). PLT maakt het technisch mogelijk allerlei nieuwe energiediensten op de markt te brengen die zijn gebaseerd op telecommunicatie, en wel in de vorm van tweerichtingsverkeer tussen leverancier en klant.

PLT houdt kortweg in dat het laagspanningsnet niet alleen de leverancier is van elektriciteit, maar ook in staat is grootschalig gegevens over te dragen. Dit is een ontwikkeling van de laatste vijf jaar. Waren aanvankelijk de overdrachtsnelheden nogal laag (enkele kilobits per seconde, kbps), eind 1997 zijn de eerste producten gelanceerd die meer dan 1 megabit per seconde (mbps) halen, en de verwachting is dat dit in een aantal jaren zal groeien tot ongeveer 100 mbps. Ter vergelijking: een standaard modemverbinding in een huishouden haalt zo'n 33 kbps, ISDN maximaal 128 kbps. Met PLT wordt in feite Internettechnologie rechtstreeks op het elektriciteitsnet gerealiseerd. Een belangrijke strategische implicatie is dat straks het stopcontact niet alleen het contactpunt is voor elektriciteit, maar ook voor informatie en communicatie. De consequenties van deze ontwikkeling zullen zeer groot zijn, zowel voor de energiebedrijven als voor hun klanten, bedrijven en huishoudens.

Op het ogenblik worden allerlei nieuwe diensten die zijn gebaseerd op PLT internationaal onderzocht. Voorbeelden van zulke diensten zijn:

- Traditionele telecomdiensten, maar dan geleverd via het laagspanningsnet (bijv. power line telefonie, Internet, video).
- Verdere automatisering van de elektriciteitsdistributie, zoals automatische meteruitlezing (evt. met vormen van elektronische betaling), bewaking en regeling van elektrische apparatuur op afstand.
- Met behulp van PLT worden nieuwe en meer verfijnde vormen van tarifiering (zoals 'time-of-use pricing') ook veel eenvoudiger, zodat er meer keuze zal ontstaan in contracten voor elektriciteitsafname. Vaste tarieven zullen steeds meer gaan verdwijnen en de prijsconcurrentie zal toenemen.
- Klantdiensten ter besparing van energie en of verhoging van het comfort, waaronder automatische klimaatbeheersing in gebouwen, het elektronisch

36 A.K.M.C.,
Klareweid 19
1831 BV Koedijk
hansakkermans@compuserve.com

informer en of adviseren van klanten over het energieverbruik (evt. zelfs van afzonderlijke apparaten, bijv. bij abnormaal verbruik), ‘power load management’ (het automatisch voorkomen van grote pieken en dalen in de energieconsumptie, waar een kostenvoordeel voor de klant tegenover staat).

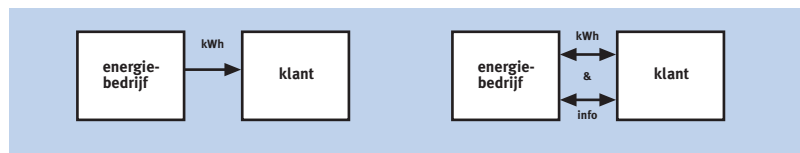
- In de toekomst zal er een vloeiende overgang zijn tussen zulke op PLT gebaseerde diensten van het energiebedrijf en de zogenaamde huisautomatisering. De laatste beoogt binnenshuis een hoger comfort en ook energiebesparing te realiseren via geavanceerde (domotica)-software, slimme sensoren en zelfregelende apparaten (‘the smart home’).

Met PLT kan een huis nog intelligenter worden gemaakt, omdat het dan niet louter op zichzelf staat. Als onderdeel van een lokaal netwerk waarvan naast andere energieverbruikers ook de energieleverancier deel uitmaakt, is een veel meer omvattende systeemintegratie en -optimalisatie mogelijk.

De huidige liberalisering van de energie- en telecomsectoren in Europa is een belangrijke factor in de ontwikkeling en commerciële toepassing van PLT. PLT maakt het technisch mogelijk om tegelijkertijd de genoemde energie- en telecommunicatiediensten aan te bieden, terwijl de liberalisering en de deregulering dat zakelijk mogelijk maken. Dit zal leiden tot een complex convergentieproces van beide tot voor kort gescheiden en nogal monopolistisch ingestelde sectoren. Er komt een grotere ruimte op de markt voor dienstenaanbieders voor zowel nieuwe energiediensten, communicatiediensten als combinaties van beide. Dit leidt tot een heel andere strategische situatie voor de huidige energiebedrijven (zie fig. 2.6.7).

Fig. 2.6.7

Door PLT wordt tweerichtingscommunicatie met de klant mogelijk. Daardoor verandert de strategische positie van het energiebedrijf van toeleverancier (links) naar dienstleverancier (rechts).



De liberalisering van de energiemarkt versterkt deze ontwikkelingen aanzienlijk, en maakt het mogelijk voor andere bedrijven – bijvoorbeeld uit de telecomsector – op deze toekomstige markt te penetreren. De algemene verwachting is dan ook dat de concurrentie sterk zal toenemen onder gelijktijdige vervaging van de oude grenzen tussen de bedrijfssectoren. En deze concurrentie zal zich toespitsen op de plaats waar alle informatie- en communicatielijnen bij elkaar komen in zowel fysieke als zakelijke zin: het individuele bedrijf of huishouden als de eindgebruiker van energie, en gelijktijdig als eindpunt van het telecommunicatienetwerk. Door de koppeling van verschillende lokale toegangstechnologieën (in de telecomwereld wordt vaak gesproken over ‘last mile access’

technologie, waaronder telefoon(koper)kabel, glasvezel, draadloos (satelliet, radio), maar nu ook PLT) worden het huis, het bedrijf en het kantoor een onderdeel van geheel nieuwe netwerkconfiguraties die nu mede de elektriciteitsvoorziening omvatten (zie fig. 2.6.8). Dit wordt verder vereenvoudigd door de toegenomen mogelijkheden om standaard pc's te koppelen (Ethernet, Universal Serial Bus) aan andere apparaten.

Fig. 2.6.8

Huishoudens, kantoren en bedrijven worden onderdeel van een lokaal communicatienetwerk dat als gevolg van PLT ook het energiebedrijf en het elektriciteitsnet omvat. Bron: [EnerSearch AB, Malmö, Zweden].

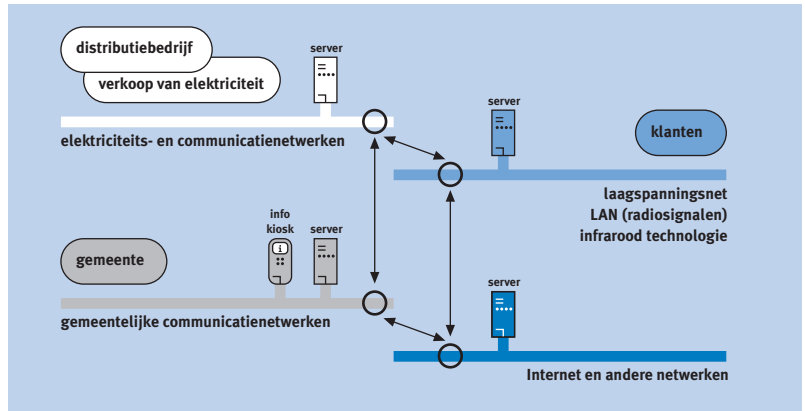


Fig. 2.6.9

Vergelijking van groeipaden van verschillende toegangstechnologieën van belang voor nieuwe energie- en telecommunicatiediensten in huis, bedrijf en kantoor. Bron: [Spectrum Strategy Consultants, London, UK].

De toegangstechnologieën voor telecommunicatie met huishoudens, kantoren en bedrijven zijn deels complementair (omdat ze verschillende karakteristieken en graden van verspreiding en penetratie hebben), en deels ook concurrerend. Fig. 2.6.9 vergelijkt de groeipaden van verschillende toegangstechnologieën. Daaruit blijkt dat een elektriciteitsnet dat met PLT is uitgerust een stevige positie kan gaan innemen in telecomtoepassingen en nieuwe energiediensten.

Toepassing	Koper telefoonnet ¹	Kabel TV-netten ²	Lokaal draadloos net radiosignalen (WLL) ³	Elektriciteitsnet PLT ⁴
> 1 Mbps	moet verder ontwikkeld worden	moet verder ontwikkeld worden	moet verder ontwikkeld worden	compressie nodig?
128 kbps - 1 Mbps	introductie van ADSL ⁵	introductie van kabelmodems	introductie van breedband radio	+
< 128 kbps	-	-	-	+
meer-lijnen telefonie (minimum data)	vereist extra aanleg	vereist extra aanleg	vereist extra aanleg	+
telefonie (minimum data)	+	+	+	+

1 koper 'twisted pair'
3 NORTEL proximity-1 radiosystemen

2 Hybride glasvezel-coax met koperen terminatie voor telecom
4 Gebaseerd op een OFDM implementatie protocol
5 Asymmetrical Digital Subscriber Line

Onderzoek naar nieuwe vormen, toepassingen en producten van informatie- en communicatietechnologie voor de elektriciteitsvoorziening op lokaal niveau is momenteel internationaal in volle gang. Hieraan werken grote toeleveranciers aan de elektriciteitsbranche zoals ABB, Siemens en IBM. Bedrijven zoals Microsoft en Intel zijn bezig met faciliteiten voor 'home networks', waarbij apparaten in huis en huizen onderling worden gekoppeld via Internet-protocollen, en pc-achtige programmeer- en plug-and-play mogelijkheden ook beschikbaar moeten gaan komen voor andere apparaten in huis.

Veel aandacht trok een recente PLT-productaankondiging door NOR.WEB (een joint venture van een Canadese telecommaschappij met een Engels energiedistributiebedrijf). Dit product, de 'Digital Powerline' (DPL), is een apparaat dat verbonden is met de elektriciteitsmeter, en vervolgens kan worden gekoppeld aan een pc via een coaxkabel. Via een standaard Ethernet of universal serial bus (USB) kunnen verschillende informatie-terminals tegelijkertijd worden aangesloten. Ook hier ligt het in de bedoeling de toepassingsmogelijkheden in de toekomst uit te breiden door het gebruik van het Internet-protocol. Het DPL-systeem levert momenteel een communicatiecapaciteit over het (laagspannings)elektriciteitsnet van 1 mbps.

Ook elektriciteitsbedrijven zelf onderzoeken actief nieuwe toepassingen gebaseerd op informatietechnologie. Een voorbeeld is de zogenaamde 'homebots' technologie die is ontwikkeld in een Zweeds-Nederlandse samenwerking. Deze technologie is ontwikkeld om automatisch geheel gedecentraliseerd en op een veel grotere schaal dan tot nu toe 'load management' – het zodanig sturen van de energieconsumptie dat te grote pieken en dalen worden voorkomen – te realiseren. Volgens economische studies kan load management 10 tot 20% aan energie- en kostenbesparingen opleveren, een en ander afhankelijk van de plaatselijke situatie. De homebots technologie is gebaseerd op intelligente 'software agents' die verwant zijn met de slimme programmatuur die op Internet helpt snelle en wereldwijde zoekacties naar gewenste informatie uit te voeren. De homebots software-agents vertegenwoordigen elk een verschillend elektrisch apparaat en communiceren met elkaar via het elektriciteitsnet. Deze communicatie heeft tot doel het energieverbruik voor het totale systeem te optimaliseren door onderlinge onderhandelingen in een veilingachtige procedure, waarbij op een computergestuurde markt energie kan worden ge- en verkocht. Inmiddels zijn met deze aanpak succesvolle technische veldtesten uitgevoerd in een kantooromgeving. De homebots technologie kan zowel worden toegepast in een huis of kantoor, als in een situatie met meer gebouwen tegelijkertijd. Gebruikt wordt dan een netwerkconfiguratie zoals geschetst is in fig. 2.6.8.

Het bovenstaande geeft uiteraard slechts enkele voorbeelden van de vele ontwikkelingen en onderzoeken die thans wereldwijd plaatsvinden. Meer informatie daarover kan men vinden in ^{37 38 39}. Samengevat zijn er de volgende trends in de informatie- en communicatietechnologie voor de elektriciteitsvoorziening op lokaal niveau:

- 1 PLT – telecommunicatie rechtstreeks via het elektriciteitsnet – is een belangrijke opkomende technologie die de basis zal vormen voor allerlei nieuwe energiediensten, vaak gekoppeld aan telecommunicatiediensten.
- 2 Deze technologie is echter nog volop in ontwikkeling, en daarom is het aan te bevelen het onderzoek hiernaar te stimuleren. Dit onderzoek betreft niet alleen aspecten van communicatiesnelheid, betrouwbaarheid en kosten van de technologie zelf, maar met name ook de integratie met zowel energie- als informatietechnologie die toegepast wordt in de gebouwde omgeving. De scheidslijnen tussen huisautomatisering en distributieautomatisering zullen vervagen.
- 3 Van belang is hier te onderkennen dat de invoering van PLT van invloed zal zijn op de totale systeemintegratie in de energievoorziening en -huishouding, omdat het individuele klantgedrag een veel grotere rol zal spelen in de optimalisatie van ons energiesysteem. De huidige Europese liberalisering van de energiemarkt versterkt deze tendens nog.
- 4 Veel aandacht is daarom nodig voor onderzoek naar een klantgericht ontwerp van energiediensten. Meer klantgerichtheid is een recente ontwikkeling in de energie- en nutsbedrijven, terwijl uit marktonderzoek blijkt dat er bij huishoudens weliswaar veel belangstelling is voor energiediensten, maar tevens een grote variatie aan wensen en eisen. Onderzoek naar klanteneisen en naar de verwerking ervan in het ontwerp van nieuwe energiediensten, gebaseerd op informatietechnologie is derhalve een belangrijk veld van studie.

.....
37 Een uitgebreide bespreking van ontwikkelingen en lopend onderzoek op dit terrein is te vinden in een recent adviesrapport voor de Europese Commissie [Akkermans, 1998].

38 Nieuwe vormen van software-technologie voor energietoepassingen zoals de 'homebots' technologie worden uiteengezet in een recent proefschrift [Ygge, 1998].

39 Op het gebied van distributie-automatisering (DA/DSM) en PLT vinden allerlei internationale conferenties plaats. Veel informatie en proceedings zijn o.a. verkrijgbaar bij Penwell Energy and Utility Group, Kaap Hoordreef 30, 3563 AT Utrecht, www.penwell-europe.com

2.7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

2.7.1 CONCLUSIES

ir. J.M. Meij

ALGEMEEN

De nieuwe woonwijken die in de eerste decennia van de 21e eeuw gebouwd worden zullen bestaan uit energiezuinige woningen, voor een groot deel voorzien van mogelijkheden om zelf elektriciteit op te wekken. Oriëntatie van het dakoppervlak tussen zuidoost en zuidwest en lage-temperatuurwarmteafgifte-systemen zijn belangrijke voorwaarden om optimale energieopwekking en besparing mogelijk te maken. Ook mogelijkheden voor warmtewinning en opslag zijn belangrijk. Met een ambitieuze houding is het mogelijk door een optimaal gebruik van de mogelijkheden in de woonomgeving ook op nationaal niveau een hoger aandeel duurzame energie te bereiken. Veel elementen van de beschreven Autarkische wijk en de wijk Synergie (zie par. 2.4.2) kunnen gebruikt worden om die ambitie uit te werken.

Juist bij decentrale duurzaam opgewekte elektriciteit is het verstandig om de opwekking zo dicht mogelijk bij de plaats van gebruik te laten plaatsvinden. Dit pleit in principe voor het zo dicht mogelijk bij de woning of de wijk plaatsen van de opwekeenheden. De aanbodcurve van fotovoltaïsche energie heeft echter zowel in de dagcyclus als in de jaarcyclus een ander verloop dan de vraagcurve van de woonwijk. Het overschot aan elektriciteit moet via het elektriciteitsnet aan kantoren, bedrijven of andere gebruikers in de omgeving worden geleverd. Als dat niet kan, kan opslag in accu's worden overwogen. De toepassing van grote hoeveelheden fotovoltaïsche cellen (PV) is dan ook het meest rendabel op kantoren, bedrijfspanden en andere plaatsen waar overdag en in de zomer (airco) meer activiteit is dan 's nachts en in de winter. Opvallend is dat de gemiddelde aanbodcurve van windenergie redelijk overeenkomt met de vraagcurve van de woonwijk. Het momentane aanbod kan natuurlijk wel sterk variëren. Transport van op laagspanningsniveau opgewekte (PV)-electriciteit naar nabijgelegen gebruikers is meestal efficiënter dan opslag in loodaccu's.

2.7.2 AANBEVELINGEN VOOR ONDERZOEK

REGEL- EN BEVEILIGINGSCOMPONENTEN EN -SYSTEMEN

ir. S.W.H. de Haan⁴⁰

In het tweerichtingen-distributienet met decentrale opwekkers zal de boomstructuur niet langer gehandhaafd kunnen worden, omdat in uitlopers of groepen van uitlopers relatief grote stromen kunnen lopen. Dit betekent dat het dis-

.....
40 TU Delft, Opleiding
Elektrotechniek, Vakgroep VEEM,
Postbus 5031
2600 GA Delft
S.W.H.deHaan@ET.TUdelft.NL

tributienet een meer vermaasde structuur of een busstructuur zal moeten krijgen. In dit net zal de elektrische energie zo optimaal mogelijk binnen de fysieke grenzen van het systeem over de verschillende mazen van het net getransporteerd moeten worden. Onderzocht zal moeten worden welke regelcomponenten (FACTS en CPD's) hierbij toegepast kunnen worden en hoe deze onderling moeten samenwerken om het systeem optimaal te gebruiken. Naast het optimaliseren van het transport zal men in zo'n systeem een zekere mate van hiërarchie en back-up in de beveiliging willen handhaven. Hiervoor is het noodzakelijk de aanspreekniveaus van beveiligingen instelbaar te maken, afhankelijk van verbruiks- en opwekcondities in het net. Voor dat doel zullen geschikte programmeerbare schakelaars ontwikkeld moeten worden, waarbij halfgeleiderschakelaars in verband met hun geringe reactietijd een belangrijke rol zullen spelen. Om tot een bevredigend beveiligingsconcept te komen, zal zowel op het gebied van componenten als van systemen een diepgaand onderzoek nodig zijn.

GELIJKSPANNING (DC) IN DE WONING

ir. J.M. Meij

De vraag of een DC-net in de woonomgeving zinvol is, komt regelmatig naar boven. Op het eerste gezicht zou een DC net – vooral in combinatie met PV-systemen – voordelen kunnen bieden op het gebied van energie-efficiëntie. Een tweede voordeel dat genoemd wordt is de aanraakveiligheid van de lage spanningen (≤ 100 V) die kennelijk impliciet met de keuze voor DC samenhangen. Waarna de conclusie volgt dat de grotere stromen dikkere kabels nodig maken en dat er in de bekabeling grotere verliezen optreden. Ook wordt geconcludeerd dat het schakelen en de beveiliging problematisch zijn bij de toepassing van DC.

Een onderzoek naar de zin van DC-toepassing in de woonomgeving zou zich eerst moeten richten op methoden voor het beveiligen en schakelen van gelijkstroom. De keuze voor lage spanning komt voort uit de wetenschap dat DC moeilijker te beveiligen en af te schakelen is. Deze problemen moeten echter toch opgelost worden, ook in een laagspanningsinstallatie. Als we aannemen dat deze problemen adequaat kunnen worden opgelost ontstaat er ruimte voor het kiezen van een hogere DC-spanning. Net als bij het huidige AC-systeem kan dan overwogen worden een elektronische aanraakbeveiliging toe te passen. Dit lost dan de problemen met de bekabelingsverliezen op.

Als we DC kunnen beveiligen en schakelen is een DC-net in huis dan zinvol? Het antwoord op deze vraag ligt eigenlijk vooral aan de kant van de fabrikanten van elektrische apparaten. Als er een standaard zou kunnen ontstaan voor een bepaalde DC-beginspanning, waarvan alle apparaten hun interne spanning zou-

den afleiden, dan zou een DC-net inderdaad voordelen bieden. De eerste stap in het onderzoek naar de toepassing van DC in de woning dient dus een onderzoek naar de standaardisatiemogelijkheden van DC-niveaus in de apparatuur te zijn, gevolgd door onderzoek naar beveiligingsmethoden. Als die er zijn, kan verder onderzocht worden welke besparingen dit oplevert, bij voorkeur in combinatie met PV. Hiervoor zou een AC- met een DC-huis vergeleken kunnen worden.

DE WARMTEPOMP

De warmtepomp biedt de mogelijkheid om aanzienlijke energiebesparingen te bereiken op het gebied van verwarming. Gezien de vele ontwikkelingen op het gebied van warmtepompen voor koeling (zie deel 2, par 6.3) verdient het aanbeveling te onderzoeken of deze nieuwe koeltechnieken ook geschikt zijn voor toepassing in de warmtepomp voor verwarmingsdoeleinden. Rendement, vermindering van het aantal componenten, geluidsemissie en kostprijs zijn belangrijke aandachtspunten. Een dergelijke warmtepomp biedt commerciële mogelijkheden, niet alleen in Nederland.

LAGE-TEMPERATUURWARMTEAFGIFTESYSTEMEN VOOR NIEUWE EN BESTAANDE GEBOUWEN

De warmteafgiftesystemen vormen een belangrijke beperkende voorwaarde voor het gebruik van warmtepompen in bestaande gebouwen. Het aanleggen van vloerverwarming in een bestaand pand is een kostbare zaak. Hier is behoefte aan innovatie: eenvoudige, goedkoop aan te leggen systemen voor afgifte van lage-temperatuurwarmte. Wat te denken van verwarmingsbehang, of plafondelementen met warmte-uitwisseling? Ook in vloerverwarming is nog verbetering mogelijk: warmtegeleidend tapijt bijvoorbeeld of ondertapijt als warmteafgiftesysteem. Wellicht zijn radiatoren met een geforceerde luchtstroom geschikt om bestaande radiatoren te vervangen.

STANDAARDISATIE VAN BESTURINGSMETHODEN VOOR ELEKTRISCHE APPARATUUR

Voor energiemanagement, sturing van de belasting en automatisering in de woon- en werkomgeving (domotica) is het van belang dat apparaten op een genormaliseerde wijze via de elektriciteitsleiding kunnen worden bestuurd. Pas als hiervoor zo'n standaard bestaat, zullen dergelijke systemen gangbaar worden. Een dergelijke standaardisatie dient op internationaal niveau geregeld te worden en vraagt de betrokkenheid van energiedienstenleveranciers en fabrikanten van elektrische apparatuur.

2.7.3 KANSEN VOOR INDUSTRIE EN DIENSTENSECTOR

De geschetste veranderingen in dit hoofdstuk scheppen nieuwe kansen voor de industrie en de dienstensector.

Allereerst kunnen veel onderzoekstrajecten uit de vorige paragrafen leiden tot concrete producten en systemen die in een behoefte kunnen voorzien.

Er zal daarnaast een markt ontstaan voor nieuwe energiediensten die loopt van het ontwerp, de bouw en de investering in nieuwe lokale energiesystemen naar het onderhoud en het beheer ervan. De opzet van biomassavergistingsinstallaties (bij GFT-punten) is een voorbeeld.

De ontwikkeling van informatieoverdracht via het elektriciteitsnet voor telecommunicatie vindt in concurrentie met bestaande aanbieders (telefoon, tv-kabel) plaats. Het aansturen van elektrische apparaten om in te spelen op wisselende tarieven of het al dan niet beschikbaar zijn van lokale 'groene' stroom zou echter (in ieder geval in huis) bij voorkeur via het elektriciteitsnet moeten lopen. Dit maakt signaaloverdracht in huis zonder extra leidingen mogelijk. Het succes hiervan is wel mede afhankelijk van standaardisatie van de besturingsmethoden voor elektrische apparatuur.

De aanbieders van elektrische apparaten die eveneens van deze standaardisatie afhankelijk zijn, zullen een markt zien ontstaan voor apparaten met besturingsmogelijkheden via de elektrische bedrading.

De vraag naar zeer energiezuinige en intelligente apparaten zal zich naar verwachting parallel met de opkomst van lokale duurzame energie ontwikkelen.

2.7.4 OPINIES OVER HET BELANG EN DE TERMIJN VAN MAATREGELEN

In dit hoofdstuk werden een groot aantal veranderingen en maatregelen genoemd. Door middel van een vragenlijst hebben de studiemedewerkers het relatieve belang aangegeven van de verschillende maatregelen en de termijn of situatie waarop de maatregel relevant wordt. De resultaten worden hierna weergegeven.

GEBRUIKZIJDE

Hier wordt op de korte termijn een grote waarde toegekend aan nieuwe vermogens-elektronische omzeters voor verbetering van de elektromagnetische compatibiliteit en emissies. Als tweede korte-termijnmaatregel worden sensorgestuurde schakelaars genoemd. Apparaten voor sturing van de belasting worden belangrijk geacht vanaf een vijfde deel duurzame opwekking. Bewaking van de kwaliteit van de elektriciteit in huis en Uninterruptable Power Supply (UPS)-noodstroomvoorzieningen in de meterkast gaan een rol spelen bij meer dan de helft ongeregelde opwekking in het systeem.

OPWEKZIJD

Op korte termijn wordt een hoge prioriteit toegekend aan het implementeren van PV-daken. De koppeling van opwekeenheden (PV, windturbines, warmte/kracht) aan het elektriciteitsnet dient zo spoedig mogelijk verbeterd te worden met behulp van integraal ontworpen vermogens-elektronische omzetters. Elektriciteitsopslag wordt als belangrijk gezien, maar men acht dit pas noodzakelijk als een substantieel aandeel (ca. eenderde deel) van de elektriciteit in een (wijk)systeem uit wind of zon komt.

TRANSMISSIE EN DISTRIBUTIE

Hier ligt op de korte termijn een belangrijke uitdaging in het ontwerpen en bouwen van vermogensomzetters met een hoog rendement en weinig elektromagnetische emissies. Integraal ontworpen omzetters ziet men als het middel om deze emissies terug te dringen. Iets minder belangrijk, maar wel op korte termijn relevant is de regeling en compensatie van blindvermogen. Aanpasbare beveiligingsniveaus, nieuwe meettechnieken en software voor bewaking en regeling in het middenspanningsnet vindt men belangrijk vanaf ongeveer en vijfde deel opwekking met PV. Groeit het aandeel ongeregeld vermogen in een systeem naar een derde deel, dan ziet men telecommunicatiemogelijkheden via het elektriciteitsnet voor sturing van de belasting, FACTS⁴¹ en CPD's⁴² verschijnen. Groeit het aandeel nog verder, dan wordt een ringvormig net noodzakelijk.

REFERENTIES

- Akkermans, J.M., D. Healey, H. Ottosson: *Report on the transmission of data over the electricity power lines* (juni 1998), ECN, BU Energie Efficiency, Postbus 1, 1755 ZG Petten, www.ecn.nl
- *Basisonderzoek elektriciteitsverbruik kleinverbruikers*, EnergieNed (1996)
- Bauer, P., S.W.H. de Haan, G.C. Paap, *Electronic tap changer for 10 kV distribution transformer*; European Power Electronics Conference, pp. 3.1010-3.1015 (1997)
- CBS, *Systeem voor de woningvoorraad 1997*, Directoraat-Generaal Volkshuisvesting, met dank aan P. van der Hoek, Ministerie VROM, Primos (1997)
- ECN, *Nationale energieverkenningen 1995-2020*, ECN Beleidsstudies (1998)
- *Elektriciteitsdistributienetten*, EnergieNed (1996a)
- EnergieNed, *Basisonderzoek Aardgasverbruik Kleinverbruikers BAK 1997*, EnergieNed, maart (1998a).
- EnergieNed, *Basisonderzoek Elektriciteitsverbruik Kleinverbruikers BEK 1997*, EnergieNed, juni (1998b).
- Ewart, D.N., R.J. Koessler, J.D. Mountford, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS): scoping study*; EPRI report EL-6943 (1990)

41 Flexible AC Transmission Systems.

42 Custom Power Devices.

- IEEE standard P1159 (Inmiddels wordt er gewerkt aan een nieuwe standaard op dit gebied, P1433.)
- Menictas C., D.R. Hong, M. Kazacos, M. Skyllas-Kazacos, *Status of the Vanadium redox battery development plan*, University of New South Wales, Australia (1998)
- Menictas, C., D.R. Hong, M. Kazacos, M. Skyllas-Kazacos, *Vanadium battery solar demonstration house*, University of New South Wales, Australia (1997)
- Palis, F., R. Mecke, R. Rummel, *Influence of system parameters on EMC behaviour of IGBT inverters*, EPE 97, pp. 2.810-2.813 (1997)
- Pellis, J., e.a., *The DC low voltage house*, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-C (1997-058)
- Peters, S.W.A.M., Otter, R.L., Veen, W. van der, *Evaluatie verwarmingsconcepten voor het project GWL-terrein te Amsterdam*, KEMA (1994)
- Praktijkmetingen van EnergieNed (1996b)
- SN R&D Co. Ltd, *Provisional proposal for DC electric power house* (1998) Seoul, Korea, www.SNKorea.Com
- Stahlkopf, K.E., Mark R. Wilhelm, *Tighter controls for busier systems*, IEEE Spectrum, pp. 48-52 (1997)
- Thoolen, F.J.M., *EMAFER (Electro Mechanical Accumulator For Energy Re-use)*, Abstract for EESAT98, Centre for Construction and Mechatronics, Postbus 12, 5670 Nuenen, 1 december (1997)
- Ybema, J., e.a., *Prospects for energy technologies in the Netherlands*, Vol. 1, Syrene Integratiestudie, ECN-C-95002, in opdracht van Novem (1995)
- Ygge, Y., *Market-oriented programming and its applications to power load management* (1998), EnerSearch AB, Carl Gustafs väg 1, S-205 09 Malmö, Zweden; www.enersearch.se
- Youssef, M., J. Roudet, Y. Marechal, *Electromagnetic radiation from power electronic circuits*, EPE 97, pp. 1.135-1.139 (1997)

1

3

Een nationaal en internationaal perspectief op elektriciteit

3.1 INLEIDING

In hoofdstuk 2 is uitvoerig ingegaan op de veranderingen die kunnen plaatsvinden in de woonwijk. De woonwijken zullen zelf energie produceren, maar volledige zelfvoorziening op energiegebied zal slechts in een klein deel van de wijken gerealiseerd worden. Alleen al van en naar de huishoudens blijft er dus uitwisseling via het transportnet nodig. Daarnaast is er natuurlijk de industriële vraag, de vraag voor elektrisch vervoer en de internationale uitwisseling van elektriciteit. Niet alleen het distributienet, ook het transportnet zal tijdig aangepast moeten worden aan veranderende omstandigheden. Het perspectief van op grote afstand gewonnen elektriciteit, die razendsnel naar de economisch actieve centra wordt vervoerd wordt zichtbaar. Zonne-energie uit Afrika en geothermische energie uit IJsland vallen niet meer onder 'luchtfietserij'. Met de NorNed¹ kabel wordt binnen enige jaren hydro-elektriciteit uit Noorwegen geïmporteerd.

Het startpunt voor het hoofdstuk zijn een aantal uitgangspunten, die door de leden van de werkgroep onderschreven worden. Deze werkgroep had tot taak de veranderingen in de nationale en internationale elektriciteitsvoorziening te schetsen. Vanzelfsprekend gebaseerd op feiten, maar ook op een eigen toekomstvisie die is gebaseerd op deze uitgangspunten en een wens voor de toekomst in 2020 weergeeft. Deze visie wordt vervolgens vergeleken met enkele scenario's in de Nationale energieverkenningen [ECN, 1998] en met de West-Europese 'MATTER'-scenario's [Lako, 1997b; Ybema 1997].

¹ De kabel heeft een capaciteit van 600 MW, een lengte van ca. 575 km en wordt uitgevoerd als hoogspannings-gelijkstroomkabel. Naast invoer uit Noorwegen zullen ook overschotten uit Nederland worden geëxporteerd.

Twee belangrijke uitgangspunten zijn het streven naar duurzaamheid en het inspelen op de liberalisatie van de elektriciteitsmarkt. Daarom wordt een vergelijking met de liberalisatie in andere landen gemaakt. Het potentieel aan duurzame energie in Nederland en op wereldschaal wordt besproken in par. 3.4. De volgende twee paragrafen gaan in op de aanpassing en de verbetering van nationale en internationale koppelnetten. De mogelijkheden voor grootschalige energieopslag komen aan de orde. De bevindingen op het gebied van grootschalige duurzame energie en internationale koppelingen leiden uiteindelijk tot een visie op een mondiaal 'supergrid'. Een paragraaf met conclusies, kansen en een agenda voor onderzoeksprojecten sluit dit hoofdstuk af.

UITGANGSPUNTEN

De volgende uitgangspunten liggen ten grondslag aan de toekomstvisie. Het elektrisch systeem wordt ingericht op het zo efficiënt en economisch mogelijk opwekken, transporteren, distribueren en gebruiken van elektriciteit. Op veel plaatsen wordt op een duurzame manier elektriciteit opgewekt. De hoeveelheid elektriciteit uit duurzame bronnen speelt ook in Nederland een belangrijke rol. Schadelijke emissies in stedelijke gebieden worden zoveel mogelijk beperkt. Schaarre middelen zoals lucht, grond en water worden zo efficiënt mogelijk gebruikt.

Voor een maximaal gebruik van duurzame energie en minimalisatie van het benodigd opslagvermogen wordt de vraag zoveel mogelijk gekoppeld aan en afgestemd op de beschikbaarheid van het duurzame vermogen.

Mogelijkheden voor groot- en kleinschalige opslag van energie worden onderzocht en benut. Daarbij is vooral de optimale combinatie van verschillende opslagmogelijkheden van belang.

Omdat de plannen voor de energie-infrastructuur en aanverwante investeringen gericht zijn op de zeer lange termijn, worden mechanismen geïnstalleerd om regeringen en bedrijfsleven meer te betrekken bij en te committeren tot deze lange-termijnplanning. Ook plannen voor bebouwing horen daarbij. Een voorbeeld is de oriëntatie van dakoppervlak voor energiewinning, dat gunstig moet liggen ten opzichte van de zon. Gebouwen hebben doorgaans een levensduur van 50 tot 100 jaar.

Om de kwaliteit en de leveringszekerheid van de elektriciteitsvoorziening te garanderen, heeft de onafhankelijke netbeheerder niet alleen een administratieve verplichting, maar ook de beschikking over de benodigde technische of juridische middelen.

Ook op internationaal niveau worden duurzame bronnen en interconnecties verder ontwikkeld door middel van samenwerkingsverbanden. De kansen die de liberalisatie biedt, worden benut.

3.2 TOEKOMSTBEELDEN VOOR 2020

3.2.1 HET TOEKOMSTBEELD VAN DE WERKGROEP

ir. G.C. van Uitert², ir. P.T.M. Vaessen³, ir. J.M. Meij

Het toekomstbeeld van de werkgroep is opgesplitst naar de volgende functies: opwekking, transmissie, distributie en gebruik.

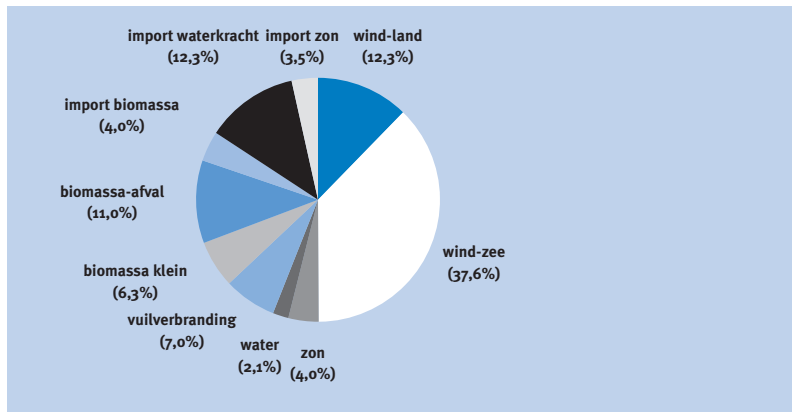
Opwekking

Het uiteindelijke streven voor de zeer lange termijn (100 - 150 jaar) is een vergaande onafhankelijkheid van fossiele bronnen. De resterende fossiele voorraden worden alleen in extreme omstandigheden aangesproken en in beperkte mate gebruikt als grondstof voor kunststoffen. Bij een forse aanzet naar dit streven zien we dat in 2020 naast 5.247 GWh per jaar lokale duurzame opwekking ook grootschalige duurzame windenergiewinning voor een deel op land (2.880 GWh/jr) en voor een deel op zee (12 TWh/jr) zal plaatsvinden.

Leveranciers van duurzaam opgewekte elektriciteit mogen altijd onafhankelijk van de vraag aan het net leveren. De duurzaam geproduceerde elektriciteit bedraagt 22% van het jaarlijkse elektriciteitsgebruik van 143,2 TWh (volgens het EC-scenario uit [ECN, 1998]). De verdeling over de verschillende duurzame bronnen wordt getoond in fig. 3.2.1.

Fig. 3.2.1

Verdeling van duurzame elektriciteitsopwekking over verschillende bronnen volgens het toekomstbeeld van de werkgroep.



² Ministerie van EZ,
Directoraat-generaal Energie,
Directie Electriciteit,
Postbus 20101
2500 EC Den Haag
g.c.vanuitert@minez.nl

³ KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
p.t.vaessen@mta10.kema.nl

Ook in de jaren na 2020 zal het aandeel duurzame windenergiewinning op zee sterk blijven groeien, tenzij de prijs van fotovoltaïsche (PV)-modulen revolutionair lager wordt.

Op een aantal locaties vindt grootschalige energieopslag plaats met een groeiend potentieel in Nederland zelf. Door heffingen komt de prijs van duurzame elektriciteit in de buurt van elektriciteit die met fossiele brandstoffen is opgewekt. Daarnaast wordt veel elektriciteit door gebruikers zelf opgewekt. Door het investeringsrisico wordt het steeds moeilijker om grote productie-eenheden

te realiseren die voor een lange periode een gegarandeerde constante afname nodig hebben.

Beperkingen in het vraagonafhankelijk leveren van warmte of elektriciteit hebben de toepassing van warmte/kracht (w/k)-koppeling geconcentreerd bij industrieën met toegang tot een gelijktijdige warmte- en elektriciteitsvraag. Dit heeft geleid tot vergaande samenwerking op geconcentreerde industrielocaties in Nederland. De bedrijfsprocessen zijn zodanig op elkaar afgestemd dat er behalve CO₂ nagenoeg geen uitstoot meer plaatsvindt ('zero-emission business parks'). Systeemintegratie komt ook aan de orde in hoofdstuk 2 (par. 2.3 en 2.7.3). De brandstofcel wordt commercieel toegepast, net als combinaties van een brandstofcel met een turbine. De huidige nadruk op biomassaverbranding neemt snel af door tekorten aan betaalbare biomassa.

Transmissie

Door de groei van het internationale elektriciteitstransport is een sterk internationaal koppelnet ontstaan. Dit net verbindt de plaatsen met een groot potentieel van elektriciteitsopwekking, mogelijkheden voor energieopslag en nationale of regionale koppelnetten. Afhankelijk van politieke ontwikkelingen, samenwerking tussen naties en de beschikbaarheid van duurzame energie of opslagpotentieel breidt dit net zich verder uit tot in Afrika en Azië. Dit net is uitgevoerd als een gelijkspannings-supernet met een grote capaciteit om dergelijke uitbreidingen mogelijk te maken. Het net wordt gecontroleerd door de afzonderlijke netbeheerders in de aangesloten landen; het eigendom kan in particuliere handen zijn.

Het in 2020 sterk gegroeide aandeel van elektriciteit in de energievoorziening wordt in de dichtbevolkte delen van Nederland grotendeels via ondergrondse leidingen getransporteerd. Voor de hoogste spanningsniveaus worden nog steeds veel bovengrondse lijnen gebruikt, zowel voor de 220 en 380 kV wisselstroom als voor de bipolaire 450 en 600 kV gelijkspanningssystemen. Ook de internationale koppelingen lopen meestal via bovengrondse lijnen met uitzondering van de verbindingen over zee. Het aantal en de capaciteit van deze interconnecties is uitgebreid door de toegenomen uitwisseling van elektriciteit. Het elektrische koppelnet heeft behalve het grootschalige (door)transport ook tot taak de aanvullende stroomvoorziening van de bebouwde gebieden te verzorgen. De stedelijke gebieden met de hoogste dichtheid worden waar nodig gevoed met ondergrondse gelijkstroomkabels, en de eerste praktijkproeven met supergeleidende kabels zijn inmiddels uitgevoerd.

Het hoogspanningsnet is uitgevoerd als een universele bus, waarmee een grote flexibiliteit bereikt is voor het aansluiten van opwek- en gebruikssystemen. Dit is mogelijk door de toepassing van genormeerde vermogenslektronische invertoren, 'black boxen' die een koppeling mogelijk maken naar 50 Hz of naar

gelijkstroom. De grote offshore windparken worden met gelijkstroom ingekoppeld, de kleinschalige eenheden afhankelijk van de lokale netten met wissel- of gelijkstroom. Het toepassen van gelijkstroom wordt aantrekkelijker, omdat de kosten voor de vermogenselektronische omzetter flink gedaald zijn.

Het net is uitgevoerd met een uitgebreid communicatie- en bewakingssysteem dat op de kritieke verbindingen de beveiliging kan aanpassen aan de gebruikscondities van het moment. Het handhaven van de kwaliteit vraagt om speciale maatregelen in de vorm van snel reagerende vermogenselektronische componenten. De stabiliteit en de betrouwbaarheid van het net zijn vergroot door de combinatie van vermogenselektronica en energiebuffers. Hiervoor zijn nieuwe geavanceerde regelstrategieën ontwikkeld.

Distributie

Naarmate de lokale opwekking toeneemt, worden de distributienetten intelligenter en intensiever geregeld. Afhankelijk van de verwachtingen over de aard van de belasting worden bepaalde delen van het bestaande middenspanningsnet in gelijkstroom bedreven. Voor een gedetailleerde beschrijving van de distributie op wijkniveau wordt verwezen naar hoofdstuk 2.

Gebruik

De gemiddelde efficiëntie van consumentenproducten zoals koelkasten en elektronica is sterk toegenomen door de hogere belastingtarieven voor minder zuinige apparaten. Hierdoor, maar ook door een betere isolatie, de introductie van de warmtepomp en de vergaande integratie van systemen neemt de energievraag in de huishoudens licht af, ondanks een toename van het aantal functies dat vervuld wordt. Doordat elektriciteit vaker andere energiedragers zoals gas en benzine gaat vervangen, neemt het huishoudelijke elektriciteitsgebruik toe. Voorbeelden zijn de toenemende penetratie van warmtepompen of elektrische wegvoertuigen die 'thuis' opgeladen worden. Deze penetratie van 15 à 20% geeft een verhoging van de elektriciteitsvraag *via* de huishoudens.

De energie-intensiteit van de industrie neemt af door procesinnovatie, maar de totale energievraag stijgt desondanks. Energiemanagementsystemen worden in de industrie breed toegepast en daarnaast bij een deel van de huishoudens. Het accent ligt op het verplaatsen van de vraag van de vraagpieken naar laagtariefuren of aanbodpieken.

Voor het verbruik in de overige sectoren zijn de cijfers van het 'European Coordination' (EC)-scenario van de Nationale energieverkenningen 1998 aangehouden [ECN, 1998].

3.2.2 VERGELIJKING TOEKOMSTBEELD STT MET SCENARIO'S VAN ECN

ir. J.R. Ybema⁴

Recent zijn drie nieuwe energiewereldscenario's vervaardigd in het kader van de Nationale energieverkenningen [ECN, 1998]. De scenario's richten zich op de tijdsperiode van 1995 tot 2020 en zijn in overleg met onder andere het CPB en het RIVM opgesteld tezamen met de economische verkenningen en de milieuverkenningen voor de lange termijn. De belangrijkste functie van deze verkenningen is het genereren van basisgegevens. Geen van de drie scenario's veronderstelt extra beleid in aanvulling op het huidige beleid. De drie scenario's zijn de scenario's 'Divided Europe' (DE), 'European Coordination' (EC) en 'Global Competition' (GC). Ze verschillen van elkaar in de mate waarin de energiemarkt is geliberaliseerd. Dat gaat het verste in het GC-scenario en minder ver in het DE-scenario. Verder verschillen ze van elkaar in de mate waarin technische ontwikkeling plaatsvindt en in de plaatsen waar die ontwikkeling aanwezig is. Die ontwikkeling is weer het sterkst in het GC-scenario en vooral in die technieken die de markt sterk stimuleert. Ook de economische groei in de drie scenario's loopt uiteen. Deze is ook weer het hoogst in het GC-scenario. Ten slotte zijn er verschillen in de veronderstelde energieprijzen. De energieprijzen zijn het hoogst in het GC-scenario (26 dollar per vat in 2020). Tabel 3.2.1 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van de scenario's.

Tabel 3.2.1

Kenmerken van de CPB-scenario's in de Nationale energieverkenningen [ECN, 1998].

	Divided Europe (DE)-scenario	European Coordination (EC)-scenario	Global Competition (GC)-scenario
marktwerking	beperkt	gereguleerd vrij	opengebrouwen
technische ontwikkeling	traag	sterk	sterk, markt
BNP-groei (% per jaar)	1,5	2,7	3,3
olieprijs in 2020 (dollar per vat)	20	15	26
energieheffingen	kleinverbruik	kleinverbruik, later Europees	kleinverbruik

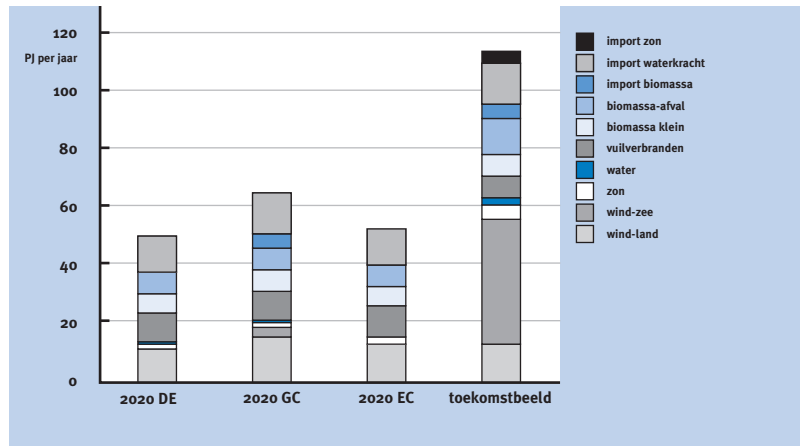
Alle drie de scenario's tonen een groei van het elektriciteitsgebruik; in het DE-scenario en het EC-scenario bedraagt dit respectievelijk 1% en 2% per jaar, in het GC-scenario is het 2,7% per jaar. In de scenario's is vooral een sterke groei bij de huishoudens te verwachten. Deze groei verhoudt zich tot een groei tussen 1985 en 1995 van gemiddeld 3% per jaar. Tussen 1985 en 1995 was de groei het laagst bij de huishoudens (gemiddeld 2% per jaar) en met 4,7% het hoogst bij de overige afnemers (diensten, glastuinbouw).

4 ECN Beleidsstudies,
Postbus 1
1755 ZG Petten
ybema@ecn.nl

De absolute bijdrage van duurzame energiebronnen aan de opwekking van elektriciteit in 2020 is het grootst in het GC-scenario met ruim 18 TWh. Daarentegen is de relatieve bijdrage van duurzame energie in dit scenario het kleinst; 10,3% van de totale elektriciteitsproductie. Het toekomstbeeld van de werkgroep gaat uit van een aandeel duurzame energie van 22% van het totale elektriciteitsgebruik. Omdat de werkgroep uitgaat van het verbruik uit het EC-scenario, komt dit aandeel vooral voort uit het grotere gebruik van elektriciteit uit stromingsbronnen. In het toekomstbeeld wordt deze extra bijdrage vooral gerealiseerd op zee waar grote windturbineparken worden neergezet.

Fig. 3.2.2

Duurzame energie in een vergelijking tussen het EC-, het DE-, en het GC-scenario in 2020 uit [ECN, 1998] en het toekomstbeeld van de werkgroep. De belangrijkste verschillen zijn een grotere bijdrage van wind op zee, meer PV en biomassavergisting in de gebouwde omgeving, meer import van zonne-energie.



De Nationale energieverkenningen zijn minder optimistisch over de toepassing van brandstofcellen in de energievoorziening. Dit heeft met de (energie)prijzen te maken. Zeker bij een geliberaliseerde elektriciteitsmarkt is rentabiliteit belangrijk. Dit remt de invoering van brandstofcellen.

De drie scenario's tonen dus een ander beeld dan het toekomstbeeld van de werkgroep waarin in feite een situatie wordt beschreven waarin een combinatie van de genoemde uitgangspunten met een technische invalshoek als ideaal kan worden gezien. Waar nodig worden extra (beleids)middelen voor het bereiken van de gewenste situatie ingezet.

Een heel belangrijk verschil in uitgangspunt is dat de drie scenario's in hoge mate uitgaan van beslissingen die op grond van economische criteria worden genomen, terwijl deze criteria bij de toekomstbeelden niet als de belangrijkste factor wordt gezien.

De situatie in Nederland wijkt enigszins af van die in het buitenland. In Nederland is het aandeel van elektriciteit in het finaal energiegebruik iets lager dan in veel andere landen. Dit is vooral een gevolg van de aantrekkelijkheid en

ruime beschikbaarheid van aardgas in Nederland. In het buitenland wil zeker de productie van warm tapwater nogal eens op elektriciteit gebaseerd zijn en in sommige landen (Noorwegen, Zweden, Canada) is ook een groot deel van de ruimteverwarming gebaseerd op elektrische weerstandsverwarming. Gezien het feit dat Nederland een uitstekende gasinfrastructuur heeft en omdat gebouwen vooralsnog niet erg geschikt zijn voor (elektrische) warmtepompen (weinig lage-temperatuur cv-systemen, beperkte beschikbaarheid van goedkope warmtebronnen) zal elektriciteit het gebruik van gas in de bestaande bouw niet snel verdringen.

Een vergelijking van de Nederlandse scenario's [ECN, 1998] met de 'MATTER'-scenario's voor West-Europa wijst erop dat het potentieel voor duurzame energie in Nederland relatief klein is. Dit is vooral een gevolg van de geringe beschikbaarheid van ruimte vanwege de hoge bevolkingsdichtheid en het vrijwel ontbreken van een potentieel voor waterkracht. Het aandeel van duurzame energie in de opwekking van elektriciteit is nu al 19% voor geheel West-Europa. Overigens maakt kernenergie ook 33% uit van de totale elektriciteitsproductie van West-Europa. Fig. 3.2.3 geeft een overzicht van de bronnen voor de opwekking van elektriciteit in Europa.

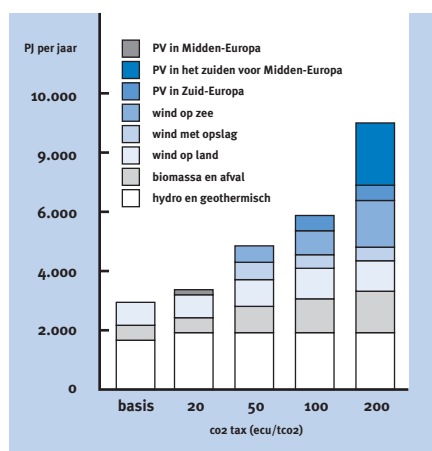
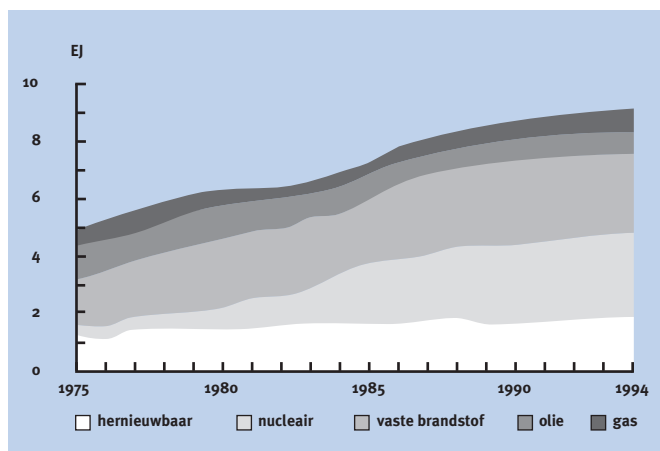
In de 'MATTER'-scenario's is onderzocht hoe de elektriciteitsvoorziening verandert onder invloed van CO₂-beleid in de vorm van heffingen op de emissies van CO₂ [Lako, 1997b; Ybema 1997]. Het blijkt dat onder invloed van dit CO₂-beleid de inzet van elektriciteit toeneemt. Enerzijds wordt er wel iets bespaard op het gebruik van elektriciteit, anderzijds vervangt elektriciteit bijvoorbeeld brandstoffen voor ruimteverwarming, de productie van warm tapwater, droogprocessen en uiteindelijk voor transport. Ook zien we bij toenemende CO₂-heffingen een breder palet van duurzame elektriciteitsopwekking verschijnen. Fig. 3.2.4 toont de toepassing van duurzame elektriciteit als functie van CO₂-heffingen.

Fig. 3.2.3

Bronnen voor elektriciteitsopwekking in Europa. Vanaf 1986 is de opwekking in de voormalige DDR meegerekend.

Fig. 3.2.4

Duurzaam opgewekte elektriciteit bij CO₂-heffingen van verschillende hoogte.



3.3 LIBERALISATIE

3.3.1 LIBERALISATIE EN HANDEL

ir. P. Giesbertz⁵

INLEIDING

De elektriciteitssector bevindt zich op dit moment in een ingrijpend proces van herstructurering en liberalisatie. In 100 jaar *evolutie* heeft de elektriciteitssector zich ontwikkeld tot verticaal geïntegreerde elektriciteitsbedrijven met monopolistische functies. De klassieke doelstelling ‘lage kosten en hoge betrouwbaarheid’, (later aangevuld met ‘binnen maatschappelijke randvoorwaarden’) werd nagestreefd door steeds verdergaande schaalvergroting, vrijwillige samenwerking, centrale planning en optimalisatie op basis van kosten.

De huidige liberalisatie-*revolutie* betekent een ingrijpende verandering van de elektriciteitssector. Vrije marktwerking en concurrentie moeten de efficiëntie van de elektriciteitssector verder verhogen. Een ontvlechting van commerciële en monopolistische functies moet kruissubsidiëring⁶ tegengaan. Ten slotte moeten de resterende monopolistische activiteiten worden gereguleerd om het belang van de klant te bewaken als de vrije markt zijn werking niet kan laten gelden.

Productie, transport en levering worden de hoofdfuncties van de elektriciteitsbedrijven. De productie van elektriciteit wordt volledig marktgestuurd. Het beheer van de transport- en distributienetten blijft een natuurlijk monopolie. De netbeheerders krijgen de taak om het net met de vereiste kwaliteit aan de marktpartijen aan te bieden. Ook de levering van elektriciteit wordt onderhevig aan concurrentie. Vrije klanten kunnen op de markt hun eigen leverancier kiezen. De levering aan gebonden klanten – zolang deze nog bestaan – blijft een monopolie. Nieuwe producenten, handelaren en makelaars verschijnen op de markt.

De ideologische discussie over zin en onzin van marktwerking in de elektriciteitssector is geheel verstomd. De discussie richt zich nu op de wijze waarop, de mate waarin en de snelheid waarmee de liberalisatie moet plaatsvinden. Welk marktmodel wordt gekozen? Moet een verplicht beursmodel, een bilaterale markt of een combinatie van vrijwillige beurs plus bilaterale markt gekozen worden? Hoe wordt de toegang tot het elektriciteitsnet geregeld? Welke klanten mogen zich op de markt begeven? Per direct of stapsgewijs?

Daarnaast richt de aandacht zich op de praktische problemen. Contractuele afspraken tussen de marktpartijen en de netbeheerders moeten ervoor zorgen dat de betrouwbaarheid van het systeem gewaarborgd blijft. Bemetering en verrekening van vrije klanten stelt zware eisen aan de systemen om de benodig-

⁵ KEMA Consulting,
Poppelsdorfer Allee 48
D-53115 Bonn
Bondsrepubliek Duitsland
pgiesbertz@kemaconsulting.de

⁶ Kruissubsidiëring bestaat indien bepaalde groepen afnemers te veel betalen en daarmee andere groepen afnemers ‘subsidiëren’ die te weinig betalen.

de gegevens te kunnen verzamelen en verwerken. De overgang van een centraal planningsstelsel naar een vrije markt betekent ook dat de financiële positie van de elektriciteitsbedrijven met andere ogen wordt bekeken. Er moeten oplossingen worden gevonden voor 'stranded investments' zoals demonstratieprojecten voor kolenvergassing of te dure stadsverwarmingsprojecten.

INTERNATIONALE TREND

Nederland en de EC

In Nederland is na enkele jaren van discussie een nieuwe elektriciteitswet opgesteld die inmiddels in werking is getreden en stapsgewijs van kracht zal worden. Een van de redenen om de bestaande E-wet uit 1989 te wijzigen was de acceptatie van de Europese Richtlijn inzake de interne elektriciteitsmarkt aan het eind van 1996. Deze Richtlijn moet per februari 1999 door de lidstaten zijn omgezet in nationale regelgeving⁷.

Het belangrijkste kenmerk van de Richtlijn is dat de klanten stapsgewijs vrije afnemers worden, waarbij uiteindelijk in 2005 tenminste 30% van de markt moet worden vrijgemaakt. De nieuwe Nederlandse wet gaat daarbij verder, omdat volgens deze wet alle klanten in 2007 vrije afnemers moeten zijn.

Tabel 3.3.1

Tijdschema voor het vrijkomen van elektriciteitsgebruikers [EZ, 1996, 1998].

Gebruikers	Aantal	% van de elektriciteitsvraag (1995)	Jaar
vrije afnemers (grote afnemers)	650	33	1998
middencategorie	54.350	29	2002
klein zakelijk	760.000	13	2007
klein huishoudelijk	5.960.000	25	2007

De wet schrijft ook voor dat netbeheer en productie in separate juridische entiteiten moeten worden ondergebracht, terwijl de Richtlijn slechts administratieve en boekhoudkundige ontvlechting voorschrijft.

Engeland en Wales

De Europese discussie werd in het begin van de jaren negentig sterk beïnvloed door de ervaringen in Engeland en Wales. In 1989 werd daar een nieuwe structuur geïntroduceerd. Het geïntegreerde bedrijf CEBG werd opgesplitst in twee productiebedrijven, een landelijk transportbedrijf en zeven regionale distributiebedrijven. De markt werd georganiseerd door middel van een 'pool', waar men alle productiemiddelen verplicht moet aanbieden. Klanten worden stapsgewijs vrije afnemers, waarbij de laatste stap in het najaar van 1998 gezet is. Ondanks de enorme invloed die de ervaringen in Engeland en Wales hebben gehad op de Europese discussie, is er ook veel kritiek op het Engelse model. De

⁷ Met uitzondering van Ierland, Griekenland en België waar de Richtlijn pas in 2000 in werking treedt.

kritiek richt zich vooral op de pool vanwege zijn verplichte karakter en omdat alleen producenten – en dus geen afnemers – erop kunnen bieden. Daarnaast wordt de sterke ontvlechting tussen productie en distributie bekritiseerd. De productiebedrijven hebben onvoldoende speelruimte om ook internationaal te kunnen groeien, terwijl de distributiebedrijven worden opgekocht door buitenlandse bedrijven.

Scandinavië

Behalve Engeland heeft ook Noorwegen een belangrijke rol gespeeld in de Europese discussie. Het Noorse model bestaat uit een beurs (spotmarkt) voor koop en verkoop waarop zowel producenten als afnemers en handelaars kunnen bieden. Naast de dagelijkse spotmarkt bestaat er een bilaterale markt. De beurs (NordPool) organiseert niet alleen een fysieke spotmarkt, maar ook een financiële markt waarbij de marktpartijen op de langere termijn posities kunnen innemen om risico's op prijsfluctuaties in de spotmarkt af te dekken. Een kritiekpunt is dat de fysieke spotmarkt een 'day-ahead-market' is. De marktpartijen hebben behoefte aan een spotmarkt die met kortere periodes werkt om ook te kunnen inspelen op onvoorziene omstandigheden tijdens de dag ('hour-ahead-market').

Het opmerkelijkste feit is echter dat in 1996 ook Zweden tot de NordPool is toegetreten. Dat betekent dat het gehele Zweedse en Noorse net tot één open markt zijn geïntegreerd. Finland staat op het punt zich bij deze markt aan te sluiten. Deze ervaringen zijn uiteraard van groot belang voor de mogelijke integratie van de West-Europese elektriciteitsmarkt. Voorlopig staan obstakels op het gebied van transporttarieven, toewijzing van transportcapaciteit en reciprociteitsclausules⁸ een dergelijke integratie in West-Europa nog in de weg.

Globalisering

De liberalisatie van de elektriciteitssector is echter geen typisch Europese trend. Vergelijkbare ontwikkelingen zijn te vinden in Noord- en Zuid-Amerika, Australië en Nieuw-Zeeland. Ook in Oost-Europa en Azië worden liberale structuren geïntroduceerd, waarbij vooral de behoefte aan buitenlands kapitaal een belangrijke rol speelt. In China moet elk jaar evenveel elektrisch vermogen worden geïnstalleerd als het hele vermogen van het Nederlandse productiepark. In Hongarije is vrijwel de gehele elektriciteitssector geprivatiseerd waaraan Duitse, Franse, Amerikaanse en Japanse bedrijven hebben deelgenomen. Het is duidelijk dat een aantal bedrijven een internationale strategie ontwikkelt om op de kansen en bedreigingen van deze ontwikkelingen in te spelen. Het Belgische elektriciteitsbedrijf Electrabel schrijft al een aantal jaren in haar jaarverslag dat zij wil groeien tot een van de vijf grootste Europese elektriciteitsbedrijven. Zweedse en Duitse bedrijven nemen belangen in elkaars bedrijven. Het Franse EDF is wereldwijd actief en heeft belangen in elektriciteitsbedrijven in

8 Reciprociteitsclausules geven aan of een grensoverschrijdende stroomlevering wel of juist niet mag plaatsvinden, afhankelijk van de vraag of een vergelijkbare transactie in omgekeerde richting is toegestaan.

alle werelddelen. Amerikaanse elektriciteitsbedrijven nemen aandelen in Europese bedrijven, waaronder zelfs in bedrijven in Duitsland (BEWAG). Het Amerikaanse bedrijf ENRON is de snelste groeier in de elektriciteitssector en heeft handelsvestigingen en onafhankelijke centrales over de hele wereld. Ook bedrijven zoals Shell en Siemens hebben zich gemeld om activiteiten op het gebied van de elektriciteitsproductie te ontwikkelen. Ten slotte hebben ook de investeringsbanken zich gemeld om deel te nemen aan privatiseringen en investeringen in de E-sector.

CONSEQUENTIES OP DE LANGERE TERMIJN

De liberalisatie van de elektriciteitssector is duidelijk geen voorbijgaande trend, gezien de mate waarin en de schaal waarop deze trend plaatsvindt. De elektriciteitsproductie en levering zijn lang voor 2020 reeds geheel geliberaliseerd en onderhevig aan concurrentie. Netbeheer (transport en distributie) is ondergebracht in separate entiteiten die door de overheid zullen worden gereguleerd. Daarnaast zijn handelaars en makelaars actief.

Grootschalige productie

De bestaande elektriciteitsbedrijven zullen verschillende strategieën ontwikkelen om in de nieuwe situatie succesvol te zijn, bijvoorbeeld specialisatie, diversificatie, en internationalisatie. Schaalvergroting en internationalisatie lijken de sleutelwoorden voor de eerstkomende jaren. In dat licht bezien heeft de huidige Nederlandse grootschalige productiesector een moeilijke start. De huidige financiële positie is zwak en het is de vraag of zij de tijd krijgt om een betere positie op te bouwen. Ook op het gebied van internationalisatie hoort de Nederlandse elektriciteitssector allerminst tot de koplopers. De voorspelling dat Nederland in 2020 geen eigen grootschalig productiebedrijf heeft lijkt dan ook niet onredelijk.

Los van de vraag of bovenstaand scenario als gunstig of ongunstig moet worden gekenmerkt, kan men zich ook afvragen of het noodzakelijk is om de strategie van schaalvergroting en internationalisatie te volgen om op de langere termijn succesvol te zijn. Kansen op de langere termijn lijken er te zijn voor nieuwe technologieën (bijv. wind, kleinschalige warmte/kracht (w/k)-koppeling, biomassa, brandstofcel). In eerste instantie is dat een kleinere markt, maar wellicht spelen deze technologieën in 2020 een belangrijke rol.

Levering

Wat de levering van elektriciteit betreft is de situatie minder extreem. Vooral in de levering aan de kleine(re) klanten (detailhandel) gaan de ontwikkelingen minder snel. Dus hebben de Nederlandse bedrijven meer kans om zich aan te passen. Waarschijnlijk vindt verdere schaalvergroting plaats tot bijvoorbeeld drie grote en enkele kleinere leveranciers in Nederland. Naast 'economies of

scale' zullen deze bedrijven ook 'economies of scope' nastreven (elektriciteit, telecom, gas, water). Ook lijken er op korte termijn kansen te liggen in het buitenland. Handel en makelaardij voor elektriciteit is een nieuwe bezigheid in een zich ontwikkelende markt. Dat betekent dat er in de verschillende landen verschillen bestaan in regelgeving en tarieven. Dergelijke verschillen bieden kansen voor handelaren en makelaars.

Hoe de situatie op de langere termijn (2020) eruit zal zien is moeilijker te voorspellen. Elektriciteitshandel zal waarschijnlijk verzorgd worden door een paar grotere bedrijven en een aantal kleinere spelers. Buitenlandse bedrijven zullen op de Nederlandse markt zeker een deel verwerven, maar er zijn zeer goede kansen voor de bestaande Nederlandse bedrijven.

De beurs

De mogelijke introductie van een Nederlandse elektriciteitsbeurs zou ook betekenis kunnen krijgen op de Europese markt. Voordat op een Nederlandse beurs ook buitenlandse partijen elektriciteit kunnen kopen of verkopen, is echter vergaande harmonisatie van de 'technische regulering' van de elektriciteitsmarkt noodzakelijk. Op de langere termijn is het de vraag of een separate stroombeurs blijft bestaan; de handel in stroom en derivaten kan – wellicht goedkoper – ook door bestaande beursbedrijven verzorgd worden.

3.3.2 LIBERALISATIE EN ENERGIEBESPARING, DUURZAAMHEID EN MILIEU

ir. G.H. Bontius⁹

Op het eerste gezicht lijkt de huidige ongerustheid met betrekking tot de negatieve effecten van de liberalisatie van de elektriciteits- en gasvoorziening op de alom ondersteunde maatschappelijke doelstellingen voor milieu, energiebesparing en duurzame energie terecht.

Immers – zo is de redenering – de toekomstige energiebedrijven zullen (door marktwerking gedwongen) meer dan ooit streven naar rendementsverbetering, winstgevendheid en omzetverhoging. Daardoor zullen zij geen aandacht meer hebben voor allerlei maatregelen die in principe het bedrijfsresultaat ('shareholders value') zullen aantasten. Eenvoudig geredeneerd: milieumaatregelen kosten geld, energiebesparing betekent gedeelde omzet en duurzame energie is (te) kostbaar. Een dergelijke (sombere) redenering vraagt om nuancering.

Essentieel in de toekomstige situatie is dat alom uitgegaan wordt van marktwerking. Dat betekent kort gezegd dat genoemde doelstellingen (milieu, besparing en duurzaam) prima gerealiseerd zullen kunnen worden, mits er een markt-vraag ontstaat.

Deze markt en zijn spel van vraag en aanbod zal ontstaan op grond van een

⁹ EnergieNed,
Postbus 9042
6800 DG Arnhem

samengesteld geheel van ontwikkelingen, die nu al aan de orde zijn, zoals maatschappelijke ontwikkelingen, wet- en regelgeving, fiscale maatregelen, subsidiesystemen, internationalisatie, voorlichting, bewustwordingsprocessen en (vooral ook) technologieontwikkelingen.

In het algemeen zullen aldus allerlei partijen in de toekomstige energiemarkt worden aangesproken op en aangespoord tot hun energiegerelateerde activiteiten. Er ontstaat zodoende een enorme vraag naar energiegerelateerde diensten die daarin voorzien. Energiebedrijven – maar deze niet alleen – zullen zich met de nodige creativiteit en innovatie op deze markt richten.

Materieel zal dit inhouden dat er een grote variëteit aan energie(diensten)-leveranciers zal ontstaan die zich zal richten op deze vraag. Zo'n 'markt' is veel complexer en veelzijdiger dan die van de levering van m³ gas, kWh elektriciteit, of GJ warmte.

Die complexiteit bestaat uit een veelzijdig patroon van aanbiedingen, zoals:

- Innovatieve energiebesparingstechnieken die verhandeld worden.
- Het leasen, verkopen, verhuren van installaties, apparatuur, enz.
- Adviezen, technologie, ontwerp, studies.
- De levering van warmte en koude, licht en kracht (i.p.v. GJ, kWh, of m³) als energiedienst.
- Algemeen: diensten die de (daarop aangesproken) energiegebruiker in staat stellen zijn eigen doelstellingen te realiseren.

De verwachting is dat technologische ontwikkelingen daarbij een cruciale rol zullen spelen. In deze studie worden allerlei mogelijkheden daarvan besproken, zoals:

- Het (nog) beter, verfijnder en intelligenter (be)sturen, schakelen, regelen en doseren van energiehoeveelheden.
- Energieconversie, in het bijzonder de omzetting van elektrische energie (frequentie en spanning) ten behoeve van talloze toepassingen.
- Het zodanig 'automatiseren' van het regelen en doseren – mede met behulp van informatietechnologie – dat energiebehoefte en emissies steeds worden geminimaliseerd zonder dat de gebruiker erbij na hoeft te denken.

Hierbij zal sprake zijn van zowel 'market pull' via de 'markt'vraag naar energiebesparing als van 'technology push' van de benodigde apparatuur via de vervaardigende industrie.

3.4 DUURZAAM OPGEWekte ELEKTRICITEIT

ir. J.M. Meij

3.4.1 INLEIDING

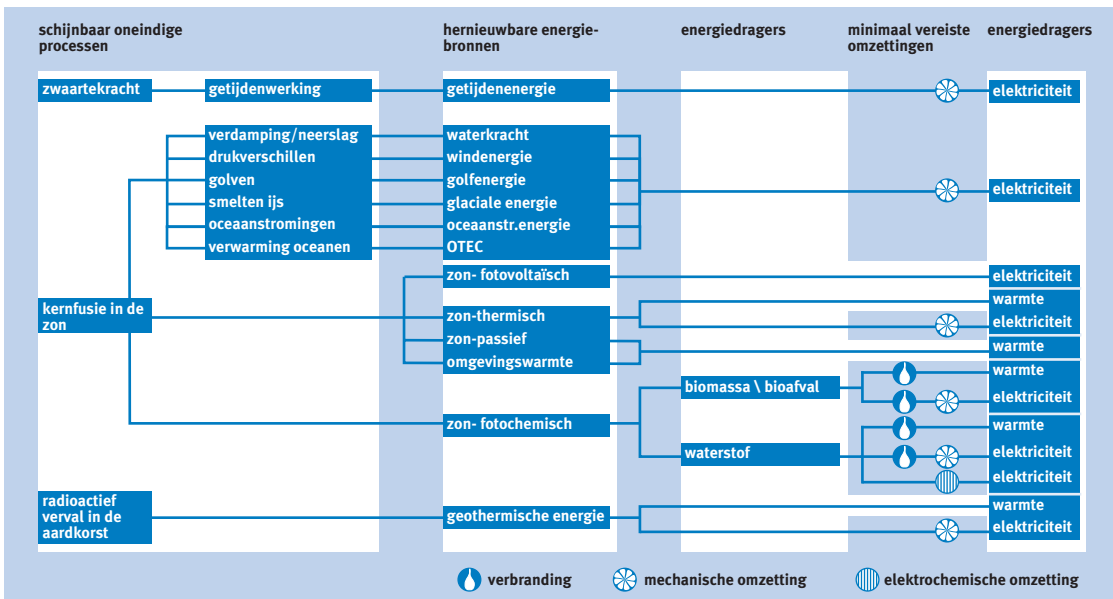
Het streven naar duurzaamheid zal een van de belangrijke invloedsfactoren zijn in de energievoorziening van de komende decennia. Zowel op wereldschaal als op nationaal niveau zal bij een toenemende penetratie van duurzame energie in de energievoorziening de energie-uitwisseling over het elektriciteitsnet intensiever worden.

Er zijn vele manieren denkbaar om energie uit duurzame bronnen te winnen. De meest directe conversie naar elektriciteit is de fotovoltaïsche conversie van zonlicht, maar het merendeel van de conversiemethoden levert via een mechanische tussenstap elektriciteit. In fig. 3.4.1 wordt een overzicht gegeven van de vele mogelijkheden.

We zullen hier vooral ingaan op kwantitatieve aspecten van verschillende mogelijkheden voor de winning van duurzame energie, zowel in Nederland als op wereldschaal.

Fig. 3.4.1

Mogelijkheden voor de winning van duurzame energie, vrij naar [ETSU, 1994].



3.4.2 NATIONAAL POTENTIEEL

Bij het beschouwen van de mogelijkheden voor duurzame elektriciteitsopwekking in Nederland worden als voornaamste bronnen de wind en de zon genoemd. Biomassa kan tevens een bijdrage leveren.

Nederland kent weinig natuurlijk verval, wat de mogelijkheden voor water-

krachtcentrales beperkt tot enige kleine eenheden in de rivieren. Ook de toepassing van aardwarmte is slechts zeer beperkt mogelijk. Met nieuwe technologie wordt het waarschijnlijk mogelijk enige getijdenenergie in bijvoorbeeld de Oosterschelde te winnen. Als vergelijkingsmateriaal is hieronder het Nederlandse elektriciteits- en energieverbruik in 1996 en 2020 opgenomen.

Tabel 3.4.1

De waarden voor 2020 zijn gebaseerd op het European Coordination (EC)-scenario [ECN, 1998]. Het energieverbruik uitgedrukt in TWh geeft slechts een grove benadering van het elektriciteitsgebruik bij totale elektrificatie.

	PJe	TWh
electriciteitsverbruik 1996	306	85
electriciteitsverbruik 2020 (EC-scenario)	515	143
	PJ	TWh
energieverbruik 1996	2.081	579
energieverbruik 2020 (EC-scenario)	3.750	1.043

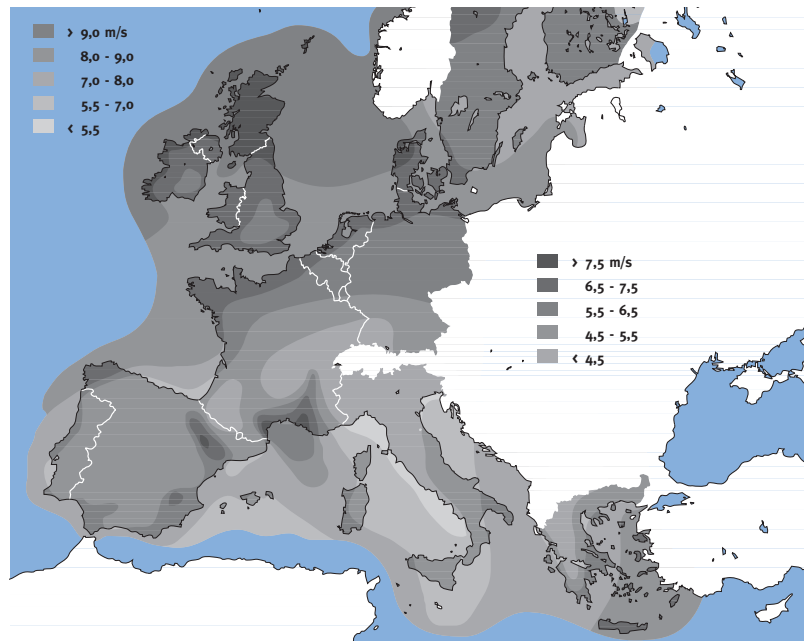
WINDENERGIE

Nederland ligt in een van de gebieden met een redelijk gunstig gemiddeld windaanbod, variërend van 7,5 m per seconde aan de kust tot 5,0 m per seconde in het binnenland¹⁰. Alleen enkele vooraf noordelijke Atlantische kustgebieden hebben een groter gemiddeld aanbod. Op grote delen van de aarde is de gemiddelde snelheid kleiner dan 4,5 m per seconde.

Medio 1998 was in Nederland 340 MW windvermogen geïnstalleerd. Gemiddeld geeft 1 MW windvermogen een opbrengst van 1,44 GWh per jaar¹¹ [Novem, 1996]. Op zeer goede locaties (op zee) kan de opbrengst een factor twee hoger zijn [Novem, 1997]. Dit staat gelijk aan 500 kWh/m² resp. 1.000 kWh/m² rotoroppervlak.

Fig. 3.4.2

Windaanbodkaart EU-landen. Waarden voor 50 m hoogte. Bron: Risø National Laboratory, Denmark.



¹⁰ Op 50 meter hoogte.

¹¹ Natuurkundig gezien is er alleen een relatie tussen de hoeveelheid bestreken rotoroppervlak en de jaarlijkse opbrengst. Een nadere beschouwing op basis van dit rotoroppervlak is binnen het kader van dit boek echter niet mogelijk.

De windrijke provincies hebben afgesproken om voor het jaar 2000 in totaal 1.100 MW te plaatsen [Idema, 1997], terwijl ook een grondeigenaar als de NS mogelijkheden ziet. De turbines op windrijke delen van het NS-areaal zouden tot 750 MW kunnen opwekken [Bakker, 1997a].

Geschat wordt dat als men rekening houdt met de huidige problemen en weerstanden bij plaatsing in Nederland in totaal ca. 2.000 MW geplaatst kan worden. Op het Nederlandse deel van het continentale plat kan maximaal 200 GW geplaatst worden [Bakker, 1997b]. Rekening houdend met de verschillende gemiddelde windsnelheden zou dit corresponderen met een jaarlijkse opbrengst van 2.880 GWh, respectievelijk 670 TWh.

Niet-technische factoren

Windenergie is een techniek die onder gunstige omstandigheden¹² rendabel is. De machines zijn betrouwbaar te noemen en de technologie wordt in Nederland geproduceerd. Er zijn echter een aantal redenen waarom de snelheid van invoering afgeremd wordt. Veel van deze redenen hebben een hoog 'nimby' (not in my back yard) gehalte, en hebben misschien meer met weerstand tegen verandering te maken dan met rationele overwegingen.

Horizonvervuiling

Het plaatsen van een windpark op de Hoge Veluwe zou de natuurbeleving daar flink verstoren. De huidige molens hebben ashoogten van 50 meter en meer en zijn dus over een grote afstand zichtbaar. Er blijven echter nog voldoende plaatsen in Nederland over die niet zo'n duidelijke natuurfunctie hebben en duidelijk gedomineerd worden door menselijk gebruik. Een windpark op een dergelijke locatie zal de omgeving zeker beïnvloeden, maar het is een kwestie van smaak of dit in negatieve of in positieve zin is. De vormgeving van de molen is daarbij een belangrijke factor. Een zorgvuldig ontworpen en afgewerkte kap (gondel) geeft een totaal andere indruk dan een rechthoekig rechtaan plaatstalen kap. Ook het dynamische beeld is een belangrijk onderdeel van deze vormgeving. Driebladige molens geven een rustiger beeld dan tweebladige modellen. Horizonvervuiling moet in het licht van de plaatselijke context beschouwd worden, maar ook in relatie tot de zwaarte van het energie- en CO₂-probleem.

Milieuzorg

De draaiende wieken van windturbines kunnen slachtoffers maken onder vogels die ertegenaan vliegen. Dit is voor natuurbescherming vaak een reden om tegen de plaatsing van windturbines stelling te nemen. Het aantal slachtoffers onder vogels als gevolg van windturbines blijkt gelukkig erg mee te vallen: per 1.000 MW is dit nog geen 1,5% van de vogels die bijvoorbeeld slachtoffer van het verkeer worden. Wellicht kunnen technische maatregelen dit getal nog verlagen.

¹² Bij hoge gemiddelde windsnelheid en in de nabijheid van elektrische infrastructuur.

Geluid en schaduw

Een windturbine maakt geluid door het aandrijfmechanisme in de molen en door de beweging van de bladen door de lucht. Het geluid van de moderne variabel-toerentalmachines is minder dan dat van de vaste-toerentalmachines. Bij een afstand van 150 tot 250 m is bij een kleine turbine bij windsnelheden van 4 tot 6 m per seconde alleen het omgevingsgeluid nog hoorbaar.

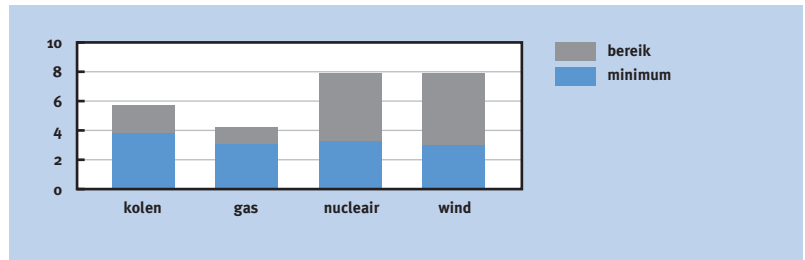
Bij het plaatsen van turbines in de bebouwde omgeving moet rekening gehouden worden met overlast door schaduwwerking van de wieken.

Kostenontwikkeling

De kostprijs van een kWh windenergie op de beste locaties is reeds concurrerend met een kWh uit fossiele dragers. In Nederland is de kostprijs voor de gemiddelde locatie echter nog iets hoger. De voornaamste kosten van een kWh windelektriciteit zitten in de investering in het productiemiddel. Hier valt met technische verbeteringen nog kostenreductie te bereiken door het toepassen van flexibele elementen in de aandrijving van de generator (dit geeft een reductie van de maximale belasting) en door het toepassen van een passieve bladverstelling. Hierdoor kunnen de componenten lichter, en uiteindelijk goedkoper worden. [Beurskens, 1997].

Fig. 3.4.3

Maximale en minimale kosten van kWh windenergie in vergelijking tot de kosten van elektriciteit uit andere bronnen. De kosten voor windenergie zijn vooral afhankelijk van de lokale gemiddelde windsnelheden [Europese Windenergie Vereniging, 1998].



Zie pagina 180 voor figuur 3.4.4

De afname van de kosten per kWh zal minder snel gaan dan in de afgelopen decennia. Toch wordt verwacht dat in 2005 ook de minder goede locaties in Nederland concurrerend worden [Kuik, 1998]. De winning van windenergie op zee is 10 tot 40% duurder dan windenergie op land, omdat hogere kosten moeten worden gemaakt voor de fundering en de elektrische infrastructuur. Het gemiddelde windaanbod op zee is echter hoger. De kosten voor de elektrische infrastructuur kunnen mogelijk omlaag door de winning van windenergie te combineren met de omzetting van aardgas in elektriciteit ('verstroming') op de Noordzee. De gebieden voor beide activiteiten liggen dicht bij elkaar. Fig. 3.4.4 op pagina 180 geeft een beeld van het Nederlands Continentaal Plat en de daar aanwezige gasvoorraden. Onderhoud is voor windparken op zee een belangrijk aandachtspunt. De bereikbaarheid van de turbines kan wellicht worden vergroot door toegang onder water mogelijk te maken waar wind en golven geen invloed hebben.

ZONNE-ENERGIE

Over het algemeen wordt de hoeveelheid directe zonnestraling in Nederland niet voldoende geacht om elektriciteit via thermische zonnecentrales op te wekken. Daarom beperkt de toepassing van zonne-energie zich tot het opwekken van lage-temperatuurwarmte (zonneboilers) en fotovoltaïsche (PV) energie. De energiedichtheid van de maximale zoninstraling is ongeveer 1.000 W per m². Bij een modulerendement van 15% en een optimale plaatsing ten opzichte van de zon levert een vierkante meter PV in Nederland ongeveer 150 kWh per jaar op. Het toepassen van PV-elementen in Nederland zal zich in eerste instantie beperken tot daken en gevels. Vanwege de kostprijs per kWh is het gunstiger om eerst het potentieel op daken optimaal te benutten. Een studie van CE¹³ [Corten, 1995] geeft aan dat het in 2010 met de dan bereikte stand van de techniek mogelijk zal zijn een jaaropbrengst van ca. 95 TWh te realiseren uit het dakoppervlak in Nederland.

Tabel 3.4.2

Potentieel dakoppervlak in Nederland met de stand van de techniek in 2010 [Corten, 1995].

Potentieel in 2010	Platte daken	Gebroken daken	Totaal
oppervlakte (km ²)	118,3	543,77	662,07
piekvermogen (MW)	20.904	96.084	116.988
	productie (TWh/jr)		94.73

Als we ons beperken tot de schuine daken en daarvan alleen de op het zuidwesten tot het zuidoosten georiënteerde daken van PV voorzien, is op deze oppervlakte nog meer dan 8 TWh per jaar (28,8 PJ) op te wekken.

De kosten van opwekking met een netgekoppeld PV-systeem in Nederland bedragen momenteel f 1,- tot f 1,50 per kWh. Via een verhoging van de afzet en verbeteringen in de productieprocessen zal deze prijs naar f 0,30 tot 0,50 kunnen dalen. Echte prijsdoorbraken moeten komen uit de toepassing van nieuwe principes zoals de organische zonnecel (zie deel 2, par 3.2 Statische opwekking). De toepassing van PV-modules is bij het huidige prijsniveau al vaak rendabel op plaatsen op enige afstand van een netaansluiting (bijv. veedrinkbakken, verlichting).

Ondersteunende warmtewinning

Voor energiebesparing met een warmtepomp is in de wintermaanden een voorraad lage-temperatuurwarmte nodig (zie ook par. 2.5.2). Vaak wordt hiervoor 'rest'warmte gebruikt die afkomstig is uit fossiele brandstoffen. In een duurzame opzet moet echter in de zomermaanden warmte worden gewonnen uit zoninstraling. Deze kan in de bodem worden opgeslagen (bijv. in watervoerende lagen). De winning kan plaatsvinden met een grote oppervlakte grond of met zonnecollectoren. Een relatief nieuw idee is het winnen van warmte uit (zwart)

13 Centrum voor Energiebesparing en schone technologie.

wegdek. Een soort vloerverwarmingssysteem levert ongeveer 200 kWh/m²/jr, 1/5 van de opbrengst van een 'echte' zonnecollector. Nederland heeft in totaal ongeveer 1 miljard m² wegdek.

De warmte kan ook gedeeltelijk worden gebruikt om het wegdek ijsvrij te houden [Smits, 1998] of om elektriciteit te genereren (Zie deel 2 par. 5.6). De warmteonttrekking in de zomermaanden kan spoorvorming helpen verminderen.

BIOMASSA

ECN geeft in haar Nationale energieverkenningen [ECN, 1998] aan dat de toepassing van organisch afval (duurzaam) en kunststofafval (niet duurzaam) in 2020 samen ca. 70 PJ fossiele brandstoffen kan uitsparen. Dit komt neer op 28 PJ_e. Intensieve binnenlandse biomassateelt kan ca. 200 PJ primaire energie opleveren, maximaal 80 PJ_e [Lako, 1997a]. De meest interessante optie voor Nederland is wellicht de vergisting van GFT-afval, zwart water en mest.

Schattingen over de vergisting van deze afvalstromen in Duitsland geven een netto theoretische opbrengst van 4,5 TWh elektriciteit per jaar bij 25,1 miljoen ton afval [Bonnet, 1988]. In Nederland leiden voorzichtige schattingen bij de afvalstromen van 1995 tot een opbrengst van 1,36 TWh per jaar. Op lokaal niveau kan bij zorgvuldige aanvoer en verwerking de opbrengst per kg veel hoger liggen.

WINDENERGIE: EEN SNEL GROEIENDE MARKT

*R. de Bruijne*¹⁴

De internationale markt voor windenergie groeit. In 1997 is wereldwijd ca. 1.500 MW nieuw windvermogen geplaatst, waarmee een omzet van ca. 3 miljard gulden was gemoeid. Steeds meer landen stellen 'market incentives' beschikbaar om investeringen in windenergie aantrekkelijk te maken. Organisaties zoals de VN, het WWF, de World Bank en de Asian Development Bank ondersteunen dit proces. Deze ontwikkeling komt voort uit:

- de internationaal steeds breder gedragen politieke keuze om milieubeleid te voeren dat is gericht op klimaatverbetering.
- een groeiende vraag naar elektriciteit.
- mogelijkheden van lokale industriële ontwikkeling.

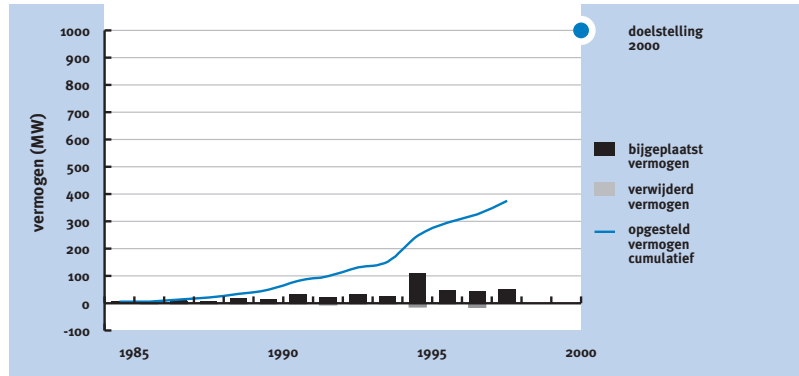
De huidige wereldmarkt bedraagt ongeveer 2,8 miljard gulden. Naar verwachting zal de markt rond de eeuwwisseling zijn toegenomen tot ca. 2.500 MW per jaar (ca. 5 miljard gulden).

In Nederland zijn de ambities relatief groot, maar de bouw van nieuwe projecten blijft achter bij de doelstelling van de overheid (zie fig. 3.4.5). Daarmee loopt Nederland uit de pas in vergelijking met de groei in landen zoals Duitsland, Denemarken en Spanje.

.....
¹⁴ Novem,
Postbus 8242
3503 RE Utrecht
r.de.bruijne@novem.nl

Fig. 3.4-5

Toename van windvermogen in Nederland.



Markt voor nieuwe windparken in Nederland

De maatschappelijke vraag naar windenergie krijgt duidelijker gestalte. Zo pleiten natuur- en milieurorganisaties voor de bouw van 1.500 tot 2.500 MW windvermogen op land, en werken mee aan de plaatsing van windparken op zee.

De energiedistributiebedrijven zijn met de overheid overeengekomen om in 2000 een bijdrage van 3,2 % duurzame energie te realiseren, en verder zijn ze actief als projectontwikkelaars en inkopers van windenergie. Ook grote buitenlandse bedrijven zoals Siemens en Enron zijn inmiddels actief in Nederland. De concurrentie tussen de projectontwikkelaars neemt daardoor toe.

De minister van Economische Zaken heeft met de nieuwe elektriciteitswet de mogelijkheid gekregen om de grote elektriciteitsgebruikers (en evt. distributiebedrijven) te verplichten een minimum aandeel aan duurzame energie af te nemen. Daarmee ontstaat er een markt voor windenergie. Immers, er wordt een vraag gecreëerd, en bovendien helpt de aanwezigheid van een volwassen technologie de industrie om aan die vraag te kunnen voldoen.

De overheid stimuleert dit duidelijke marktperspectief voor windenergie door fiscale voordelen, subsidie en via een lage rente (Groenfondsen). Deze maatregelen in combinatie met de dalende prijzen van windturbines bieden investeerders een aantrekkelijke financiële basis. Energiedistributiebedrijven en particuliere investeerders hebben dan ook voor enkele honderden MW's aan nieuwe projecten in ontwikkeling.

Er is bij de ontwikkeling van nieuwe projecten een trend naar grootschaliger opstellingen en de toepassing van grotere windturbines. De procedures voor de ontwikkeling van een grootschalige locatie als de Afsluitdijk (100 tot 300 MW) zijn in 1998 gestart.

De aanwezigheid van beschikbare locaties

De bestuursovereenkomst tussen de ministeries van Economische Zaken en VROM en de zeven windrijke provincies heeft geresulteerd in ruimte voor 1.100 MW in beleidsplannen van de provincies en van de betrokken gemeenten. In de plannen van de provincies krijgt windenergie meer prioriteit, omdat er nu een

duidelijk marktperspectief is. Veel provincies zien de noodzaak in om ruimte te creëren, zodat energiedistributiebedrijven in staat zijn om hun duurzame energieverplichting te realiseren. Gemeenten zijn nog niet voldoende betrokken bij deze afspraken. Daardoor zijn de provinciale plannen nog niet voldoende opgenomen in de bestemmingsplannen.

Steeds meer gemeenten – ook in het binnenland – verkennen de mogelijkheden van windenergie. Vaak is windenergie daarbij onderdeel van een integrale benadering van duurzame energie. In Nederland moet het windvermogen op land toenemen tot ca. 1.500 MW. Die doelstelling moet in 2007 zijn bereikt. Na de eeuwwisseling wordt ook het traject van windparken op zee gestart.

Windparken op zee binnen bereik

Er bestaat een groot maatschappelijk en bestuurlijk draagvlak voor windparken op zee. De komende jaren zal Novem (in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken) de ontwikkeling van de winning van windenergie op zee voortzetten. Het potentieel is groot en biedt daardoor de mogelijkheid een groot volume duurzame elektriciteit te produceren. Novem werkt momenteel aan de voorbereiding van een Plaatsingsplan. Hierin is de realisatie van een windvermogen van 1.250 MW op zee voorzien. De industrie bereidt zich samen met ECN en de Technische Universiteit Delft voor om de benodigde multi-MW turbines te ontwikkelen (3 tot 5 MW per stuk).

De marktsector heeft belangstelling voor de bouw van het demonstratieproject 'Near shore windpark' [Novem, 1997] en is bereid om samen met de overheid de financiële risico's te nemen voor deze eerste stap in zee (zie fig. 3.4.6).

Ook in het buitenland groeit de belangstelling voor de bouw van windparken op zee. Concrete stappen zetten de landen in Noordwest-Europa (Denemarken, Zweden, Finland, Verenigd Koninkrijk, Nederland, Duitsland). Denemarken en Nederland lopen voorop.

Technologie blijft in ontwikkeling

De internationale industrie speelt in op de markt vraag. Turbines met vermogens tot 1,5 MW voor de toepassing in 'traditionele' windparken en in binnenlandse locaties zijn commercieel leverbaar. De verhouding tussen prijs en prestatie verbetert gestaag.

Er zijn echter nog geen grotere turbines beschikbaar, nodig voor windparken op zee. De technische risico's in combinatie met het nog onduidelijke marktperspectief zijn voor de industrie een (te) groot financieel risico. De industrie stelt zich daarom nog terughoudend op bij het ontwikkelen van multi-MW turbines.

Internationaal is een trend naar schaalvergroting waarneembaar. De marktpositie van Nederlandse windturbinefabrikanten is aan het verbeteren door deze schaalvergroting van hoogwaardige en andere activiteiten. De industrie maakt daarbij intensief gebruik van de uitstekende Nederlandse kennisinfrastructuur.

Fig 3.4.6

Windpark op zee¹⁵.

Illustratie: Adviesbureau
E-Connection, Bunnik.

15 Novem heeft in opdracht van EZ de haalbaarheid van zo'n windpark laten onderzoeken. Deze studie vormt een opstap naar toekomstige grootschalige windparken op zee. Er is uitgegaan van een windpark met een omvang van ca. 100 windturbines van 1 MW en een locatie 8 km uit de kust. De energieopbrengst is ca. 300 GWh per jaar, gelijk aan het elektriciteitsgebruik van 100.000 huishoudens. Er is een investering van 450 miljoen gulden mee gemeoid en de bouw biedt 1.000 mensjaren werk [Novem, 1996]. De studie concludeert dat het project vanuit ruimtelijke ordening, ecologie, techniek, economie, wettelijk kader en bestuurlijk en maatschappelijk draagvlak haalbaar is. Wel zal een overheidsbijdrage van 60 miljoen gulden noodzakelijk zijn om het project rendabel te maken voor investeerders. Uit vijf onderzochte gebieden bleken uiteindelijk de Vlake van de Raan (in de Westerscheldemon) en IJmuiden II (bij Wijk aan Zee) het meest geschikt. Ruimtelijk en ecologisch scoort IJmuiden iets beter dan de Vlake van de Raan; de energieopbrengst zal in IJmuiden zo'n 20% hoger zijn. Van de kustbewoners beoordeelt 87, respectievelijk 93% de windparken als positief. Bij het ontbreken van een 'bestemmingsplan' voor de Noordzee zal de overheid via een zorgvuldige procedure (PKB-MER) de locatie voor het project bepalen. De ministeries van Economische Zaken en VROM zijn hiervoor de initiatiefnemers, en vormen samen met de ministeries van Verkeer en Waterstaat en Landbouw, Natuurbeheer en Visserij het bevoegd gezag. De procedure zal naar schatting 2 jaar duren.



De Technische Universiteit Delft en ECN hebben internationaal een vooraanstaande positie bij het ontwikkelen van betere, goedkopere en grotere windturbines.

CONCLUSIE

ir. J.M. Meij

Wanneer het realiseerbare potentieel en de kostprijs per kWh beschouwd worden, heeft windenergie op korte termijn de voorkeur boven PV. Rekening houdend met de bestaande weerstanden tegen windenergie op land, kan de echte grootschalige opwekking alleen op zee plaatsvinden. De windparken op zee hebben een hoger potentieel, maar ook hogere kosten voor infrastructuur en machines. Installatie en onderhoud zijn belangrijke factoren voor het ontwerp. De kosten van de infrastructuur voor plaatsing op zee kunnen gereduceerd worden door een combinatie met andere projecten zoals internationale (HVDC, High Voltage Direct Current, hoogspannings-gelijkstroom) transportverbindingen en de 'verstroming' van aardgas op zee.

Het gebruik van plaatsen met lagere windsnelheden (3,5 tot 5 m per seconde) kan mogelijk worden door de constructie van goedkopere, grotere machines met een lagere generatorcapaciteit per m² bestreken rotoroppervlak.

Veiligheids- en controleaspecten zullen hier een belangrijke rol spelen.

Het totale geplaatste windvermogen kan bij forse inspanningen in 2020 gegroeid zijn tot 6.000 MW, waarvan 2.000 op land en 4.000 op zee.

In de bebouwde omgeving kan PV-elektriciteit de betrokkenheid bij duurzame opwekking helpen vergroten en op termijn de elektriciteitsopbrengst van windparken aanvullen.

Fig. 3.4-7

Potentieel aan duurzame energie en verwacht elektriciteitsgebruik in 2020 (gebruik volgens het European Coordination (EC)-scenario.

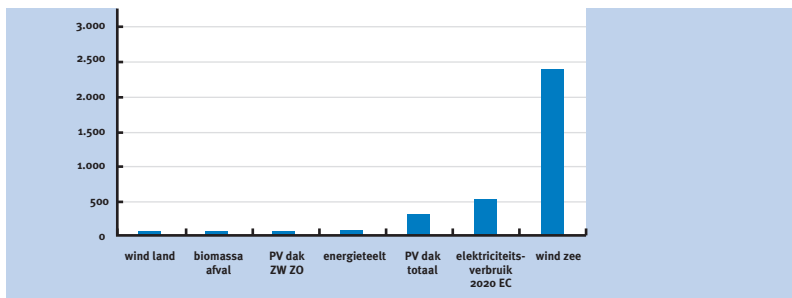


Fig. 3.4.7 geeft een vergelijking tussen het realiseerbare potentieel volgens verschillende hiervoor genoemde bronnen. Gezien de grote kostprijsverschillen tussen PV en de andere technologieën zijn voor PV alleen de minst kostbare plaatsingsmogelijkheden beschouwd (daken). De grootschalige inzet van duurzame elektriciteitsopwekking vraagt om nieuwe elektrische technologie. Het gaat bijvoorbeeld om vermogenselektronische omzeters voor windturbines, compacte HVDC-stations voor de inkoppeling op zee, HVDC-koppelingen en hulpmiddelen voor de handhaving van de kwaliteit van de elektriciteitslevering. Hierover is meer te vinden in de volgende paragrafen en in par. 2.5.3.

3.4.3 MONDIALE BRONNEN

De achtergrond voor de beschouwingen in deze paragraaf is de vraag in hoeverre het mogelijk en zinvol is in een gezamenlijke internationale inspanning duurzame bronnen te ontwikkelen en te ontsluiten ten behoeve van de betrokken naties. De nadruk ligt op het potentieel van de verschillende duurzame energiebronnen en de plaatsen waar op grote schaal opgewekt kan worden. Het transport van de opgewekte energie naar de afnemers komt aan de orde in par. 3.8, waar de combinatie van grootschalige duurzame opwekking met een 'supernet' wordt besproken.

Tabel 3.4.3

Elektriciteits- en energieverbruik op wereldschaal in 1996 en in 2020 volgens het referentiescenario van het World Energy Projection System (WEPS) (1998) en de World Energy system DAtabase (WEDA). Het elektriciteitsverbruik is inclusief distributieverliezen. Het energieverbruik uitgedrukt in TWh geeft slechts een grove benadering van het elektriciteitsverbruik bij totale elektrificatie Naar [IEO, 1998; WEPS, 1998; WEDA, 1998].

	EJe	PWh
electriciteitsverbruik 1996		
WEPS/WEDA 1998	47,3	13,14
electriciteitsverbruik 2020		
WEPS/WEDA 1998 referentiescenario	94,8	26,36
	EJ	PWh
energieverbruik 1996		
WEPS/WEDA 1998	396,8	110,23
energieverbruik 2020		
WEPS 1998 referentiescenario	674,6	187,40

Zon

De zon is de belangrijkste bron van energie met een continue toevoer naar de aarde van 173.000 TW. Hiervan is 0,2 % verantwoordelijk voor de wind, de golven, convectieprocessen en de stroming in de oceanen. 0,02% Wordt opgenomen in fotosyntheseprocessen.

De omzetting van zonlicht in elektriciteit met fotovoltaïsche (PV)-cellen kan plaatsvinden uit direct en uit diffuus zonlicht (zoals bij bewolking). Dit maakt deze omzetting ook geschikt voor de iets noordelijker gelegen streken. Ook de teelt van biomassa kan met direct en diffuus zonlicht plaatsvinden. In streken met veel direct zonlicht kan gebruik gemaakt worden van thermische omzettingprincipes, waarbij het zonlicht voor de benodigde warmte zorgt.

Soms kan de directe winning van zonne-energie met andere duurzame winning worden gecombineerd, bijvoorbeeld door PV-cellen of biomassateelt te combineren met de winning van windenergie.

Over het algemeen is er competitie om de zonbeschenen oppervlakte tussen de teelt van voedsel, veevoer en vezel, de teelt van biomassa en het plaatsen van PV-cellen of thermische zonnecentrales voor energiewinning. PV-cellen zijn als enige technologie geschikt om op (anders ongebruikt) dakoppervlak te worden toegepast.

Op korte en middellange termijn is de elektriciteitsopwekking met thermische centrales de meest economische techniek om elektriciteit direct uit zonlicht te winnen. Onbegroeide en onbewoonde gebieden met een hoge gemiddelde zoninstraling per jaar, zoals de Noordafrikaanse woestijnen, zijn hiervoor zeer geschikt. Fig. 3.4.8 op pagina 177 combineert satellietwaarnemingen van zoninstraling en vegetatie. Duidelijk is te zien dat Noord-Afrika een groot oppervlak heeft zonder vegetatie met een hoge zoninstraling. Opvallend is ook dat er veel gebieden met een hoge gemiddelde zoninstraling op de oceanen te vinden zijn. (In dat licht bezien zijn de Japanse plannen voor drijvende energie-eilanden die golf-, wind- en zonne-energie winnen wellicht realistischer dan op het eerste gezicht lijkt.) Om de totale elektriciteitsbehoefte van de wereld in 1996 te dekken met PV-centrales zou een oppervlakte nodig zijn van ongeveer 87.600 km² oftewel een vierkant van 296 x 296 km. Voor de situatie in 2020 is meer dan het dubbele nodig. De totale energiebehoefte op dat moment zal ongeveer 187 PWh per jaar bedragen, en vraagt een oppervlakte van 1.116 x 1.116 km. Voor zonnethermische centrales zou dit oppervlak nog 10 tot 50% minder kunnen zijn. Voor de keuze van een optimale plaats voor grootschalige winning van zonne-energie zijn landgebruik en gemiddelde zoninstraling niet de enige factoren. De hoeveelheid zoninstraling in de maanden waarin de verzorgingsgebieden een grote elektriciteitsvraag kennen is ook van belang. Daarnaast spelen uiteraard politieke en economische factoren een rol.



Zie pagina 177 voor figuur 3.4.8



Zie pagina 179 voor figuur 3.4.9



Wind

Fig. 3.4.9 geeft een beeld van de gemiddelde windsnelheden op aarde. Per MW windvermogen is een oppervlakte van 0,1 tot 0,2 km² [EUREC, 1996] nodig. Slechts enkele procenten van dit oppervlak wordt daadwerkelijk door de voet van de windturbines in beslag genomen. Gemiddeld levert een MW windvermogen op een goede locatie 2 GWh per jaar. Voor de totale elektriciteitsbehoefte van de wereld zou dus een oppervlakte nodig zijn van ongeveer 1.314.000 km² ofwel een vierkant van 1.146 x 1.146 km. In 2020 zou weer ongeveer het dubbele van die oppervlakte nodig zijn. De totale energieconsumptie in 2020 zou een oppervlakte vragen van 4.324 x 4.324 km.

Hydro-elektriciteit

Door het natuurlijk verval in een waterloop te onderbreken met een stuwdam en in deze dam turbines te plaatsen, kan uit de potentiële energie van de watermassa elektriciteit gewonnen worden. In Europa en de VS is vrijwel het gehele potentieel aan waterkracht inmiddels benut. Elders in de wereld is er echter nog een groot verschil tussen het realiseerbare en het gerealiseerde potentieel. Toch wordt men steeds terughoudender ten aanzien van grootschalige hydro-elektrische projecten, omdat er vaak sociale en milieuproblemen in de weg staan (vaak komen dorpen en biotopen onder water te liggen).

Hydro-elektrische projecten kunnen op een duurzame wijze grote hoeveelheden elektriciteit opwekken. Een voorbeeld is Itaipu, een gezamenlijk Argentijns-Braziliaans project dat een totaal vermogen heeft van 12.600 MW (dit is meer dan 85% van het centrale productievermogen in Nederland). De Three Gorges dam in China zal voor 2010 voltooid zijn en kan een totaal vermogen van 18,12 GW produceren met een jaaropbrengst van 85 TWh per jaar. In Zaire ligt een groot hydro-elektrisch potentieel (Grand Inga, 30.000 MW, 240 TWh/jr) dat echter pas ontwikkeld kan worden als de politieke situatie stabiel is.

Het totale technisch realiseerbare hydro-elektrische potentieel op aarde wordt geschat tussen 14.000 en 19.000 TWh per jaar [Golob, 1993; Johansson 1992; Twidell, 1986]. In 1996 bedroeg de opbrengst van de totale geïnstalleerde capaciteit 2.530 TWh per jaar [Weda, 1998]. In de toekomst kunnen hydro-elektrische centrales een belangrijke rol spelen in combinatie met grote zonne-energiecentrales als aanvullende energiebron 's nachts en als tijdelijke opslag bij overschotten.

Golven

De elektriciteitsopwekking met golfenergie kan op gunstige plaatsen tussen 300 en 500 GWh per jaar per kilometer opbrengen [Twidell, 1986]. Schattingen van het wereldpotentieel komen op 1.300 TWh per jaar, geconcentreerd in 10 tot 20 locaties. Het benutten van golfenergie staat echter nog in de kinderschoenen. Een interessante ontwikkeling is de Archimedes waterschommel, die (onzichtbaar) onder water energie opwekt uit de golven.

Getijden

De schattingen van de totale potentiële opbrengst uit getijdenenergie lopen uiteen van 190 tot 613 TWh per jaar [naar Johansson 1992; Baker, 1991] De winning van getijdenenergie is uiteraard gebonden aan plaatsen waar een getijdenverschil aanwezig is dat door middel van een dam en turbines benut kan worden. Een relatief nieuwe ontwikkeling is het benutten van een waterstroom door vrijstaande turbines, analoog aan de winning van windenergie. Ook een systeem van schoepen in combinatie met een open dam ('fence') wordt onderzocht. Binnen enige jaren zullen de eerste onderwaterturbines geplaatst worden in de Filippijnen en in Engeland [Pearce, 1998].

Biomassa

De schattingen van de huidige consumptie van biomassa geven een gemiddeld aandeel van biomassa in het totale energiegebruik van ca. 14% met een spreiding tussen 3% voor de geïndustrialiseerde landen en 35% in de ontwikkelingslanden [EUREC, 1996]. Een groot deel hiervan wordt gebruikt voor warmte bij de voedselbereiding. Biomassa geeft een mogelijkheid om met geringe investeringen energie te winnen, maar de efficiëntie per oppervlakte-eenheid is erg laag net als de omzettingsefficiëntie van de energie die door de zon wordt aangevoerd (< 1% naar biomassa, 0,2 - 0,3% naar elektriciteit) [Boyle, 1996]. De benodigde oppervlakten voor de totale elektriciteitsconsumptie in 1996 en 2020 lopen voor biomassa op tot 6,6 miljoen km², respectievelijk 13,2 miljoen km² (3.630 x 3.630 km). Voor de totale energieconsumptie van 2020 (via elektriciteit) zou een oppervlakte van 93 miljoen km² aan biomassa-areaal nodig zijn.

OTEC

OTEC staat voor ocean thermal energy conversion. Deze conversiemethode gebruikt het temperatuurverschil tussen ondiepe en diepe (500 tot 1.000 m diep) waterlagen om daarmee via een verdampers en een condensor een turbine aan te drijven. Wereldwijd zijn er enkele proefprojecten opgezet, drijvend of geïnstalleerd aan de kust.

Geothermie

Op sommige plaatsen op aarde zijn grote hoeveelheden geothermische energie aanwezig. In deze gebieden waar meestal nog enige vulkanische activiteit is, kan door middel van boringen naar 1.000 tot 2.000 meter diepte stoom of oververhit water gewonnen worden. Deze stoom kan direct worden benut of via turbines omgezet worden in elektriciteit. De intensiteit van geothermische energie is laag (0,06 W per m²) [Beurskens, 1997]), zodat grote installaties nodig zijn. Een nadeel voor de exploitatie is dat de opbrengst van de boringslocatie langzamerhand achteruitgaat. Dit komt onder andere door omzettingen in de buurt van de zone waar de warmte opgenomen wordt. Hierdoor wordt uiteindelijk

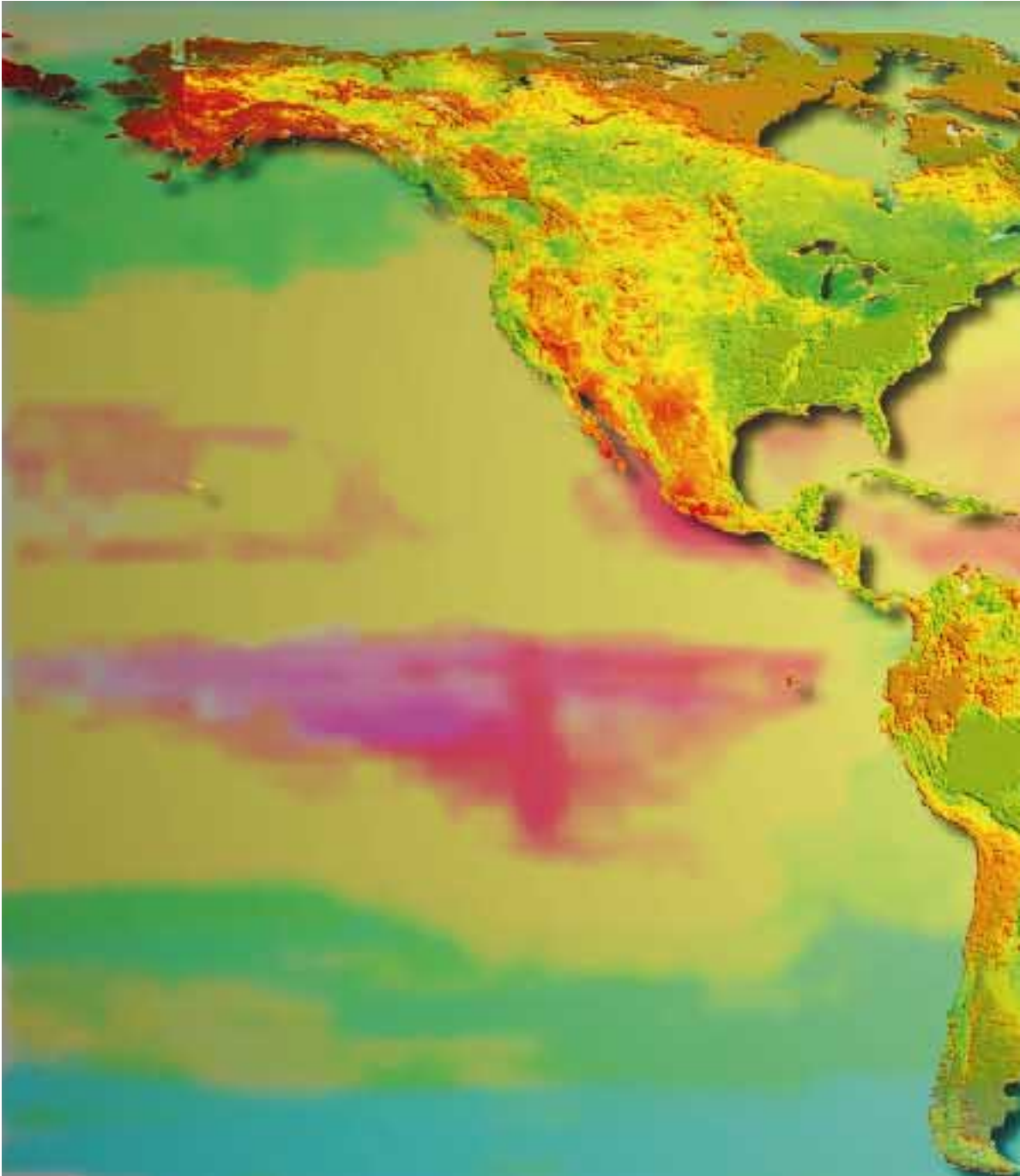
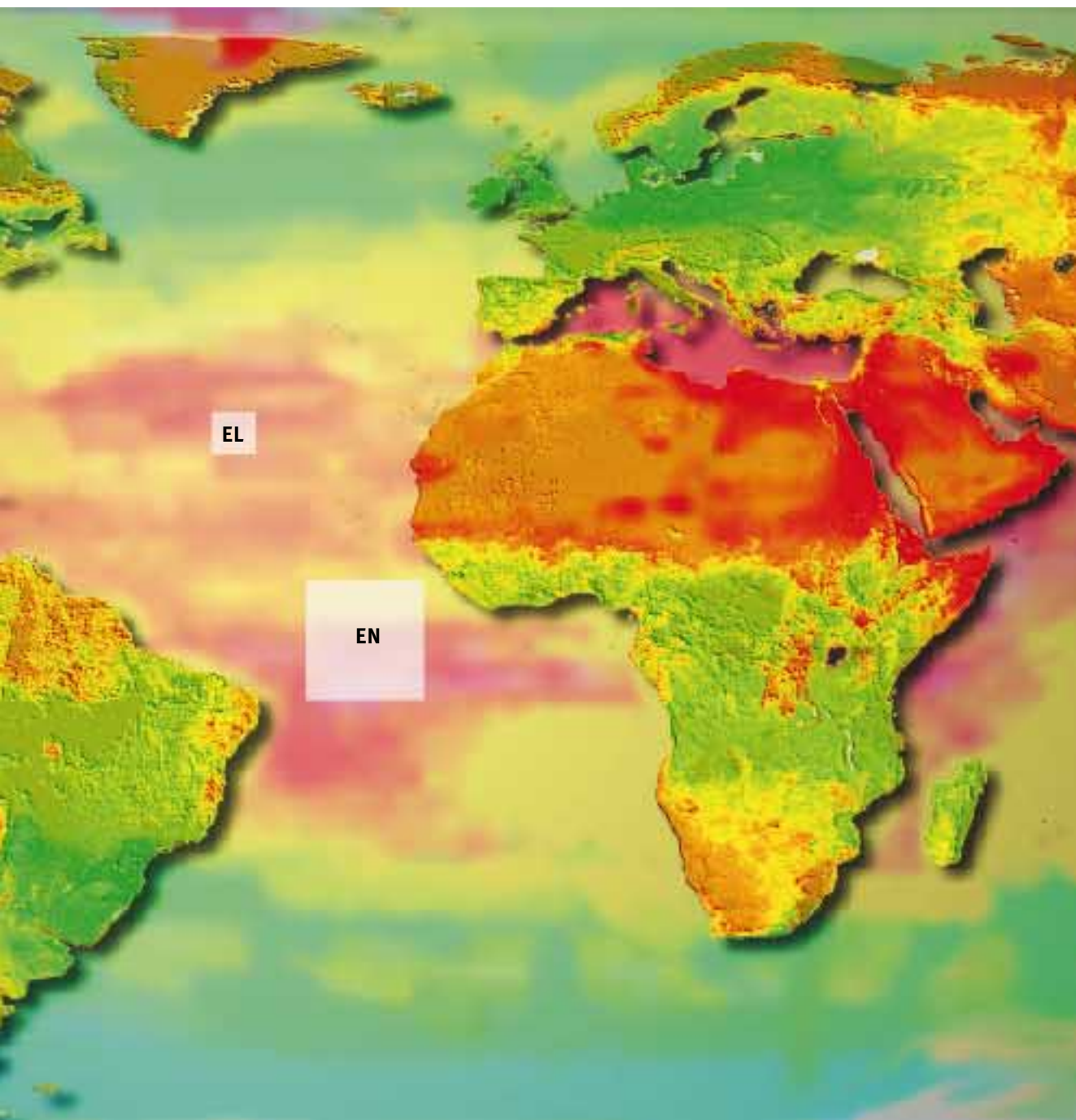


Fig. 3.4.8

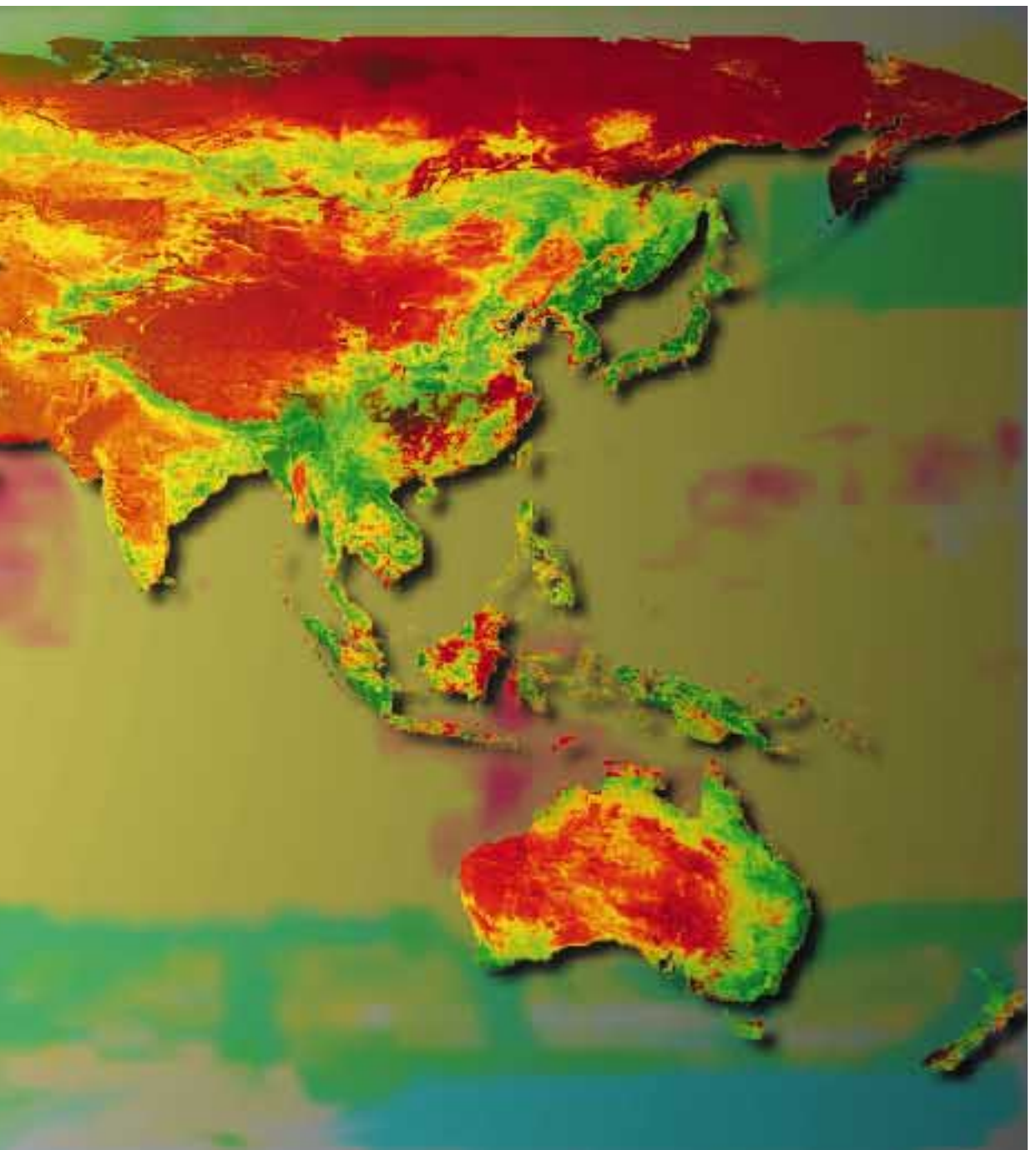
Zoninstraling en vegetatie Naar [CNES, 1998; NASA, 1997].

In de figuur is een indicatie gegeven van de benodigde oppervlakte voor het elektriciteitsgebruik in 2020 (EL) en het energiegebruik van 2020 (EN). De jaarlijkse gemiddelde zoninstraling neemt toe in de volgorde blauw, groen, geel, rood. Gebieden met schaarse vegetatie hebben een bruine kleur.



EL

EN



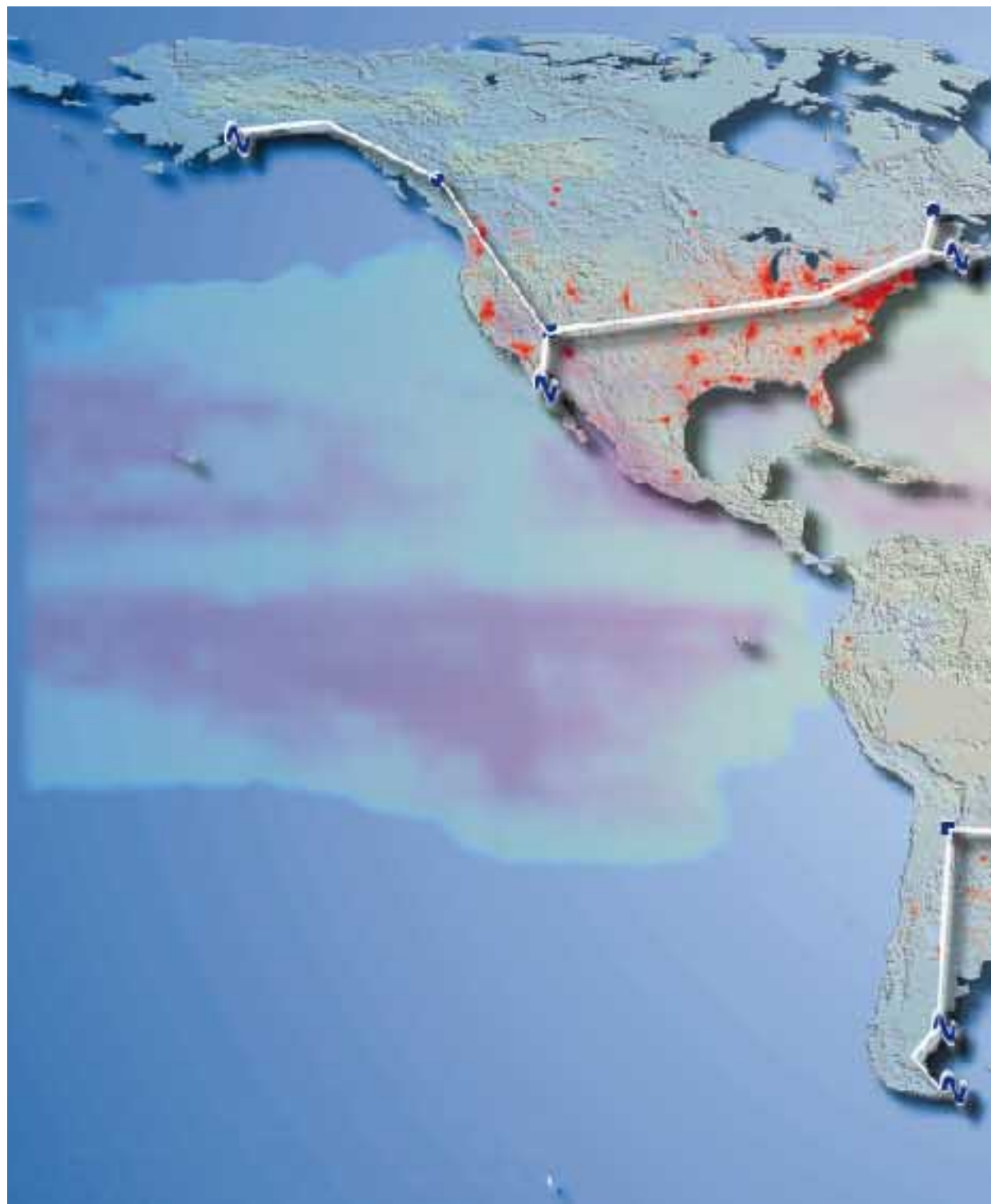






Fig. 3.8.2

Supergrids met de vraagcentra in 2020 en potentiële bronnen voor hydro-elektriciteit, getijdenelektriciteit, zon en wind. De vraagcentra (rood) zijn weergegeven ongeveer naar de verhouding van de in 2020 verwachte vraag.



Fig. 3.4.9

Jaarlijks gemiddeld windaanbod vrij naar [Edmunds, 1985] en de benodigde oppervlakte met windvermogen in 2020 voor de mondiale elektriciteitsconsumptie (EL), en energieconsumptie (EN).

In de figuur is een indicatie gegeven van de benodigde oppervlakte voor het elektriciteitsgebruik in 2020 (EL) en het energiegebruik van 2020 (EN). De oppervlakte tussen de turbines kan ook voor andere doeleinden gebruikt worden.

→ Zie ook de tekst op pagina 175

minder warmte toegevoerd dan er gewonnen wordt. Wereldwijd is ongeveer 3.400 MW geothermisch vermogen geïnstalleerd.

CONCLUSIES

Ook op mondiale schaal belooft de elektriciteitsopwekking met wind en zon de beste perspectieven op lange termijn. Hydro- en getijdenenergie kunnen op een beperkt aantal plaatsen grootschalig worden gewonnen. Fig. 3.4.10 geeft een indruk van de verhoudingen tussen de oppervlakten van biomassa, wind- en zonne-energie die voor de elektriciteitsbehoefte van 2020 nodig zijn. De bijdragen van OTEC en golfenergie zijn sterk afhankelijk van de ontwikkelingen in de technologie.

Wanneer we denken aan grootschalige opwekking van duurzame energie op wereldniveau, dan ligt het voor de hand de verschillende duurzame opwekeenheden en de voornaamste verbruikscentra te verbinden door middel van een elektrisch koppelnet, zoals beschreven in par. 3.6 en 3.8.

Fig. 3.4.10

De benodigde oppervlakten bij verschillende technologieën voor duurzame opwekking voor de elektriciteitsbehoefte van 2020.

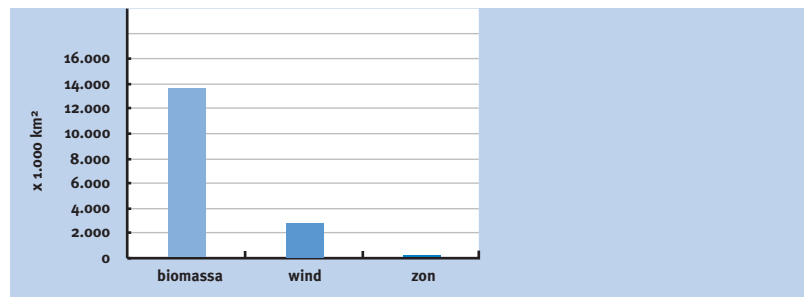


Fig. 3.4.4

Het Nederlands Continentaal Plat met de aanwezige gasvelden en de scheepvaartroutes naar [EZ, 1996; V en W, 1995]

→ Zie ook de tekst op pagina 167



3.4.4 DE PLAATS VAN GROOTSCHALIGE FOTOVOLTAÏSCHE (PV) OPWEKKING

ir. J.R. Ybema¹⁶

VRAAGSTELLING

Uit analyses bleek dat de verhouding tussen baten en kosten van PV-systemen erg gevoelig is voor een variatie in de jaarlijkse opbrengst. Nu is Nederland door klimaat en breedtegraad een land met een nogal beperkte zonninstraling. Het zou mogelijk renderen om PV-systemen voor de Nederlandse energievoorziening niet in Nederland zelf, maar in zuidelijk gelegen locaties met een hogere instraling te plaatsen (zie tabel 3.4.4) en de geproduceerde energie naar Nederland te transporteren.

16 Beleidsstudies,
Postbus 1
1755 ZG Petten
ybema@ecm.nl

Tabel 3.4.4

Gemiddelde jaarlijkse zoninstraling en afstand tot Nederland van vier verschillende locaties.

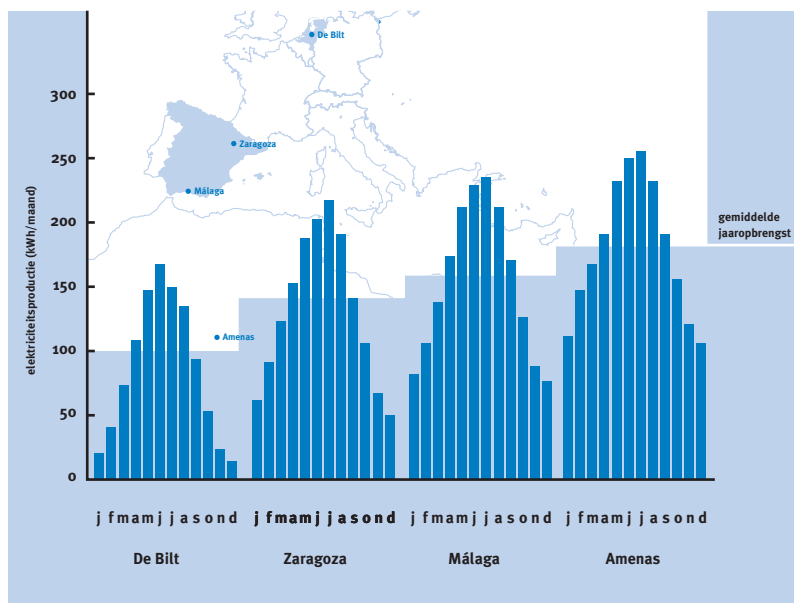
locatie	Zoninstraling (kWh/m ² /jr)	Afstand tot Nederland (km)
Nederland	1.000	0
Noord-Spanje	1.500	1.500
Zuid-Spanje	1.800	2.200
Centraal Algerije	2.100	4.000

De vraag is in hoeverre de toenemende opbrengst en het gunstiger leveringspatroon van zuidelijke locaties opwegen tegen de toenemende transportkosten. Om hierin inzicht te krijgen vergelijkt fig. 3.4.11 PV-systemen in Nederland met twee Spaanse locaties, waarbij de geproduceerde elektriciteit per HVDC¹⁷ (High Voltage Direct Current, hoogspannings-gelijkstroom)-elektriciteitsverbinding wordt getransporteerd.

De hoeveelheid overdag geproduceerde elektriciteit hangt af van het seizoen. De opbrengst op een gemiddelde zomerdag is aanzienlijk hoger dan de opbrengst gedurende een winterdag. De relatieve verschillen tussen de winterdag-opbrengst en de opbrengst op een zomerdag zijn het grootst bij een hoge breedtegraad. Dit is geïllustreerd in fig. 3.4.11, waarin de maandelijkse opbrengst per kWp (kW piek) is weergegeven voor PV-installaties in de Bilt, nabij Zaragoza, de regio Malaga, en voor Amenas (Centraal Algerije). Op een gemiddelde winterdag is de elektriciteitsproductie van een PV-systeem in de Bilt 90% lager dan de productie die op een zomerdag plaatsvindt. In Algerije is de elektriciteitsproductie op een gemiddelde winterdag nog altijd 50% van de productie op een zomerdag.

Fig. 3.4.11

Maandelijkse opbrengst per kWp voor verschillende locaties.



17 Meer over HVDC in par. 3.6.3 en 3.6.4.

MODELLERING

In deze gevoeligheidsanalyse wordt de aantrekkelijkheid van centrale Spaanse PV-systemen voor de elektriciteitsopwekking met die van centrale Nederlandse PV-systemen vergeleken. Van de denkbare PV-systemen kunnen alleen centrale PV-systemen voor de elektriciteitsopwekking in Nederland en in Spanje met elkaar concurreren. Er is gekeken naar op de grond gestationeerde PV-systemen in Noord-Spanje, in Zuid-Spanje en in Nederland. In Noord-Spanje is de jaaropbrengst ruim 50% hoger dan in Nederland, in Zuid-Spanje is de opbrengst 80% hoger.

Het transport gebeurt in deze analyse via HVDC-elektriciteitsverbindingen. Transport van meer dan 2.000 MW door het bestaande koppelnet bovenop het huidige transport wordt niet mogelijk geacht.

Op basis van [Kaske, 1991] zijn in tabel 3.4.5 de kosten geschat voor import van elektriciteit uit Noord-Spanje (nabij Zaragoza) en Zuid-Spanje (regio Malaga en Granada). Er is uitgegaan van systemen zonder elektriciteitsopslag. DC (gelijkstroom) van de PV-systemen wordt eerst omgezet in AC (wisselstroom), zodat het beter op hoge spanning kan worden gebracht. Vervolgens wordt de AC weer omgezet in HVDC (800 kV) en naar Nederland getransporteerd. Daar wordt de DC weer in AC (380 kV) omgezet. De afstand tussen Zaragoza en Utrecht en tussen Malaga en Utrecht bedraagt hemelsbreed respectievelijk 1.275 km en 1.870 km. Voor het schatten van de kosten is gerekend met respectievelijk 1.500 km en 2.200 km.

De kosten voor de rectifier¹⁸ en de inverter¹⁹ zijn gelijk voor Noord- en Zuid-Spanje. De kosten voor de HVDC zijn verschillend. Voor de HVDC-kabel is gerekend met 210 miljoen gulden per 1.000 MW per 1.000 km [Kaske, 1991].

Investeringskosten, onderhoudskosten en verliezen zijn gegeven in tabel 3.4.5.

Tabel 3.4.5

Schatting van kosten en verliezen van HVDC-transport voor in Spanje opgewekte elektriciteit op basis van [Kaske, 1991]

	Investering (gld/kW)	Onderhouds- en managements- kosten (gld/kW/jr)	Verliezen (%)
Zaragoza	625	19	2,9
Malaga	772	23	3,5

Bij een beschikbaarheid van 0,183, respectievelijk 0,213 voor Zaragoza en Malaga, een levensduur voor kabels en converters²⁰ van 50 jaar en een reële rente van 5% bedragen de transportkosten 3,4, respectievelijk 3,6 ct per kWh. Deze waarden komen goed overeen met [Bohlin, 1991] die uitgaat van een net-tobedrag van 0,01 dollar per kWh voor HVDC-transport over een afstand van 1.000 km. [Fu, 1994] komt daarentegen op een iets hogere schatting uit.

18 Omzetter van AC naar DC.

19 Omzetter van DC naar AC.

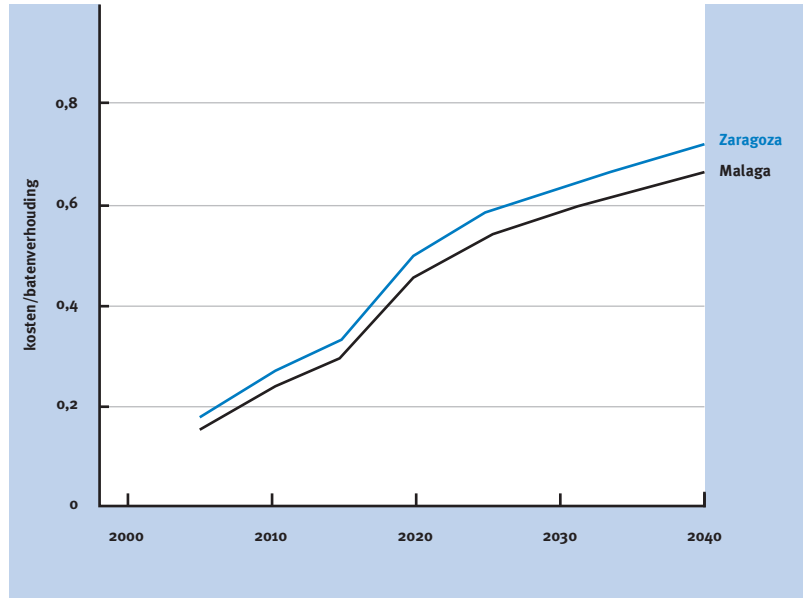
20 Hier gebruikt als verzamelnaam voor omzeters van DC naar AC en vice versa.

RESULTATEN

De ontwikkeling van de verhouding tussen baten en kosten (B/K) in de basisberekeningen voor de Spaanse PV-systemen is gegeven in fig. 3.4.12. Vergelijking van dezelfde verhouding voor Nederlandse PV-systemen leert dat deze ook in de basisberekeningen al hoger zijn. De B/K-verhouding wordt tussen 2.000 en 2.040 steeds groter, maar komt nog niet boven 1. In een basisscenario zonder CO₂-heffingen zijn de Spaanse PV-systemen dus nog niet kosteneffectief.

Fig. 3.4.12

Verhoudingen tussen baten en kosten voor twee Spaanse PV-systemen in de basisberekeningen.



CONCLUSIES

Het is belangrijk om bij de interpretatie van de resultaten de beperkingen en karakteristieken van de gevolgde methode in het achterhoofd te houden. Bij de veronderstelde aannamen omtrent kosten van PV-systemen en zonder rekening te houden met overwegingen zoals betrouwbaarheid van levering, acceptatie van import gelden de volgende conclusies:

- Centrale opwekking van elektriciteit met PV voor de Nederlandse energiehuishouding is kosteneffectiever met systemen die in Spanje op meer zonnige locaties geplaatst zijn dan met systemen in Nederland.
- PV-systemen die aan Nederland elektriciteit leveren zijn aantrekkelijk vanaf een kostenniveau met een marginale CO₂-reductie van ongeveer f 150,- per tCO₂.
- Behalve de lagere kosten voor de productie van een kilowattuur speelt het gunstiger jaarpatroon van Spaanse PV-systemen voor elektriciteitsopwekking ten opzichte van systemen in Nederland een belangrijke rol.
- Op grond van de kosteneffectiviteit voor CO₂-reductie hebben systemen in Zuid-Spanje de voorkeur boven systemen in Noord-Spanje.

3.4.5 TRANSPORT BIJ CENTRALE FOTOVOLTAÏSCHE (PV) OPWEKKING BUITEN NEDERLAND

VRAAGSTELLING

Uit de analyse in par. 3.4.4 bleek dat PV-systemen mogelijk beter ten zuiden van Nederland kunnen worden geplaatst en de elektriciteit beter via HVDC-verbindingen naar Nederland wordt gebracht. In vervolg daarop kunnen enkele nieuwe vragen gesteld worden:

- Moeten PV-systemen nog verder naar het zuiden geplaatst worden?
- Heeft het zin de PV-electriciteit op de plaats van opwekking om te zetten in waterstof en dan naar Nederland te transporteren?
- Heeft het zin opslagsystemen voor elektriciteit te integreren in import-systemen?
- Hoe robuust is de conclusie dat PV-systemen beter ten zuiden van Nederland kunnen worden geplaatst voor aannamen over kosten van PV-systemen en kosten van HVDC-verbindingen?

De eerste drie vragen zijn beantwoord via één gevoeligheidsanalyse met MARKAL. De laatste vraag is beantwoord op basis van spreadsheetberekeningen.

MODELLERING

Van vier locaties zijn vijf verschillende PV-systemen gekarakteriseerd. In totaal gaat het dus om twintig systemen. De locaties zijn Nederland (De Bilt), nabij Zaragoza, de regio Malaga, en Amenas in Centraal Algerije.

De eigenschappen van de vijf verschillende systemen worden hieronder beschreven en samengevat in tabel 3.4.6. De uitgangspunten voor de berekening van kosten en nettorendementen voor PV-systemen staan in tabel 3.4.7. De maandelijkse PV-productie voor de verschillende locaties is gegeven in fig. 3.4.13.

Tabel 3.4.6

Belangrijkste componenten van de beschouwde PV-systemen.

E = elektriciteit.

H₂ = waterstof.

D = dag-nacht.

S = seizoensopslag.

HV = HVDC-verbinding.

P = waterstofpijplijn.

Systeem	A	B	C	D	E
energiedrager	E	E	E	H ₂	E, H ₂
elektriciteitsopslag	–	D	S	–	–
transport	HV	HV	HV	P	HV, P

A. PV-systeem, 100% elektrisch, geen opslag

Hierbij gaat het om een systeem dat bestaat uit PV-modulen, inverters, installatiematerialen, grondkosten en een HVDC-verbinding. Het afleveringspatroon is gelijk aan het productiepatroon. De verliezen in het modulesysteem, de inverter en de HVDC-verbinding zijn meegenomen.

B. PV-systeem, 100% elektrisch, beperkte dag- en nachtopslag

Systeem als A. Door aanwezigheid van batterijen nabij modulen kan ook 's nachts elektriciteit getransporteerd worden en kan het HVDC-vermogen worden beperkt. De opslag is zo gedimensioneerd dat 's nachts altijd een zelfde vermogen elektriciteit wordt getransporteerd ter grootte van 10% van de zomerdagproductie. De verliezen in het module-systeem, de inverter, HVDC en opslag zijn meegenomen.

C. PV-systeem, 100% elektriciteit, seizoenopslag in Noorwegen

PV-systeem als A. Daarnaast een voor een groot deel onderzeese HVDC-verbinding met Noorwegen, waardoor seizoenopslag mogelijk is. Er is sprake van dimensionering, zodat aanbod van elektriciteit aan Nederland overdag in alle seizoenen constant is. 's Nachts is er geen levering aan Nederland. In principe is ervan uitgegaan dat Noorwegen geen extra capaciteit bouwt en in de zomer minder eigen hydro-elektriciteit gebruikt. Men spaart voor de winter, wanneer het aan Nederland wordt geleverd; in Noorwegen worden beperkte kosten gemaakt.

D. PV-systeem, 100% waterstof, beperkte dag- en nachtopslag

PV-systeem als A, echter geen HVDC-verbinding. Het systeem bevat een waterstoffabriek en pijpleidingen voor afvoer, respectievelijk aanvoer van waterstof en water en batterijen. De waterstoffabriek en de batterijcapaciteit zijn zo gedimensioneerd dat 's nachts de waterstoffabriek draait op 10% van het maximaal vermogen (zomerdag). Waterstof wordt met een constant patroon afgeleverd. Verliezen in systeem, waterstoffabriek, batterijen en compressie voor pijpleidingtransport zijn meegerekend. Elektrolyse van water vindt in 2020 plaats met een rendement van 75% [Okken, 1993].

E. PV-systeem, deels waterstof en deels elektriciteit

PV-systeem als A, echter inclusief HVDC-verbinding en daarnaast waterstoffabriek, pijpleidingen en batterijen. Waterstoffabriek is in (bijna) continu bedrijf. Er is sprake van dimensionering van de waterstoffabriek en van batterijen op 10% van de zomerdagproductie. Het teveel aan elektriciteit wordt per HVDC-verbinding als elektriciteit geproduceerd. Verliezen in systeem, waterstoffabriek, batterijen, compressie voor pijpleidingtransport en HVDC-verbinding.

Tabel 3.4.7

Uitgangspunten voor de berekening van kosten en nettorendementen voor PV-systemen.

** inclusief omvormers*

Waterstoffabriek			
investering	625 f /kW	levensduur	20 jaar
onderhoud en management	67,9 f /kW/j	rendement (LHV)	75%
Waterstofpijpleiding			
investering	230 f /kWm	levensduur	50 jaar
onderhoud en management	9 f /kWm/j	verliezen	2% + 1%/1.000 km
Batterijen			
investering	200 f /kWh	levensduur	3 jaar
onderhoud en management	10 f /kWh	rendement (LHV)	85%
HVDC over land			
investering	210 f /kW/m	levensduur	50 jaar
onderhoud en management	10 f /kW/m	verliezen	0,9%/1.000 km
HVDC Noorwegen*			
investering	1.300 f /kW/m	levensduur	50 jaar
onderhoud en management	39 f /kW/m	verliezen	4%
winst Noorwegen	0,02 f /kWh		

Voor het berekenen van de kosten en de nettorendementen van de genoemde PV-systemen is uitgegaan van de schattingen van PV-systemen zoals deze in het eerste deel van deze bijdrage waren uitgewerkt. Schattingen van de kosten en van de nettorendementen voor waterstoffabrieken en pijpleidingen zijn gebaseerd op [Kaske, 1991; Ogden, 1993]. Kosten en rendementen voor batterijen zijn gebaseerd op [Kaske, 1991; Smokers, 1993]. Voor HVDC-kabels is gebruik gemaakt van [Kaske, 1991; Bohlin, 1991; Lazenby, 1992]. De karakterisering van Noorse seizoensopslag is in hoge mate gebaseerd op [Unander, 1993a; Unander, 1993b]. De kosten en overige kenmerken van de componenten van de verschillende systemen zijn weergegeven in tabel 3.4.7.

Opgemerkt wordt dat voor investeringen in Algerije géén Sahara-factor in rekening is gebracht. In andere studies wordt dit wel gedaan om rekening te houden met de beperkte infrastructuur die in dergelijke landen bestaat, het beperkte aanbod van lokale aannemers en het grote aandeel van techniekimporten. [Kaske, 1991] rekent bijvoorbeeld met een extra kostenfactor van 30% bovenop alle investeringen in Algerije. Het is zinvol met een Sahara-factor te rekenen, maar de hoogte van deze factor is zeer arbitrair.

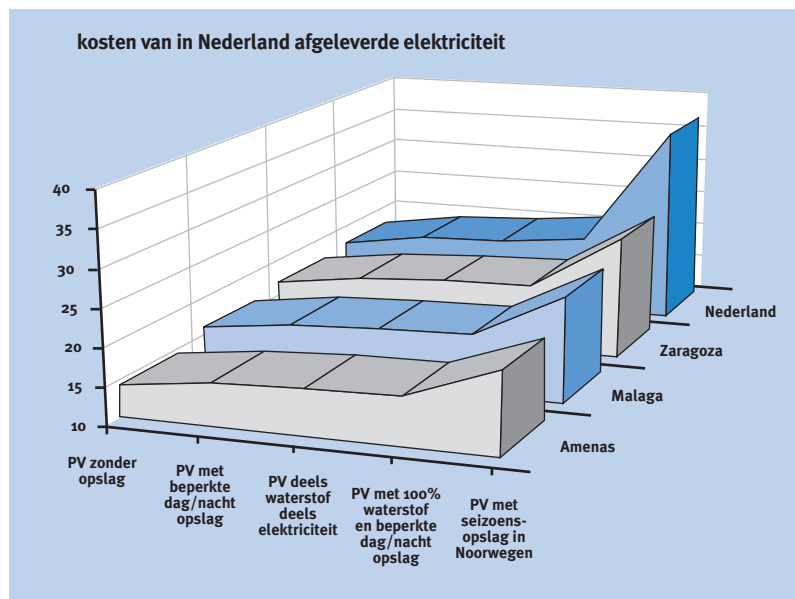
De kosten van conversie en transportonderdelen zijn bij de kosten voor de PV-modulen opgeteld. Verliezen in conversie en transport zijn verrekend in de seizoensafhankelijke beschikbaarheid van de technieken.

In tabel 3.4.7 worden de kosten van de energie die in Nederland wordt afgeleverd gepresenteerd per locatie en per PV-systeem. Uit deze tabel blijkt dat elektriciteit en waterstof die in Algerije zijn geproduceerd bij de gemaakte

veronderstellingen de laagste kosten kent. Productie en levering van 100% waterstof geven de hoogste kosten. Omdat de patronen van leverantiever schillen en de mogelijkheden voor opslag variëren kan nog niet gezegd worden welk systeem het aantrekkelijkst is.

Fig. 3.4.13

Kosten voor productie en aflevering aan het Nederlandse net uit door PV geproduceerde energiedragers (ct/kWh). Waterstof en elektriciteit zijn in een aantal gevallen bij elkaar opgeteld.



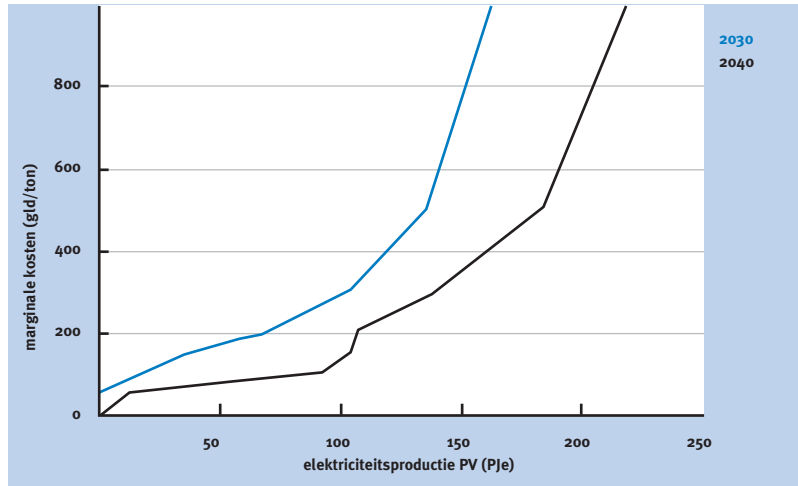
RESULTATEN

Het MARKAL-model kiest in alle gevallen voor het installeren van PV-systemen in Algerije, aangezien deze locatie ondanks de hoge transportkosten het meest kosteneffectief is. Op de andere locaties worden geen PV-systemen geplaatst. Dit is in lijn met de berekende productiekosten (zie tabel 3.4.7).

MARKAL houdt zowel rekening met de mogelijke concurrentie als met de mogelijke synergie tussen verschillende technologieën. Met toenemende CO₂-heffingen gaan PV-systemen andere fossielgestookte centrales vervangen. Allereerst worden kolengestookte centrales vervangen, gevolgd door industriële warmte/kracht (w/k) en geavanceerde gasgestookte centrales. Aangezien de CO₂-emissie per kWh van kolencentrales het hoogst is, zijn de eerste gigawatts PV die geïnstalleerd worden effectiever in het vermijden van CO₂-emissies dan de later geplaatste eenheden. De afnemende effectiviteit van de kosten van additionele PV-systemen bij CO₂-reductie – zoals berekend met MARKAL – is treffend geïllustreerd in fig. 3.4.14. Het is duidelijk dat niet gesproken kan worden van 'de' marginale kosten, alsof er maar één marginaal kostenniveau zou zijn. Deze afnemende effectiviteit van de kosten van PV-systemen voor CO₂-reductie wordt ook sterk beïnvloed door het intermitterende karakter van de elektriciteitsproductie met PV-systemen. De als eerste geplaatste PV-capaciteit wordt

Fig. 3.4.14

Marginale kosten voor reductie van CO₂-emissies bij toenemende elektriciteitsproductie met PV-systemen.



hoger gewaardeerd dan de later geplaatste systemen, omdat de onregelmatige en niet stuurbare elektriciteitsproductie steeds moeilijker in het totale systeem ingepast kan worden. De eerste PV-systemen reduceren niet alleen de inzet van fossiele brandstoffen in conventionele centrales, maar kunnen ook de fossiele centrales zelf vervangen, hetgeen de marginale kosten sterk drukt. Voor de later geplaatste PV-systemen blijft een back up van fossiele centrales nodig om aan het vraagpatroon en de gewenste betrouwbaarheid van levering te voldoen. De latere PV-eenheden besparen derhalve alleen op de inzet van fossiele brandstoffen.

Opvallend is dat de kosten sterk beginnen op te lopen vanaf 100 PJe. Kennelijk zijn PV-systemen steeds lastiger in het net in te passen als ze boven een aandeel van 25% in de elektriciteitsopwekking uitkomen.

EXTRA BEREKENINGEN

Bij de vergelijking van locaties voor PV-systemen voor elektriciteitsproductie in Nederland vindt er een afweging plaats tussen enerzijds de grotere opbrengst in zuidelijker regio's en anderzijds de kosten voor het transport naar Nederland. Uit de berekeningen blijkt dat de invoer van geïmporteerde PV energie goedkoper is dan het opwekken van energie met PV in Nederland. Aangezien de kosten voor PV- en HVDC-transport of waterstofpijpleidingen onzeker zijn, is het de moeite waard om te bekijken of dit de uitkomsten beïnvloedt. Daarnaast nemen de marginale extra opbrengsten van elektriciteit af als de locatie voor het PV-systeem de evenaar nadert. Ergens moet een kostenoptimale locatie voor PV-systemen liggen.

Met eenvoudige berekeningen is geanalyseerd of deze conclusie blijft staan bij andere aannamen voor investeringskosten van PV-systemen en bij andere aannamen voor kosten van HVDC-verbindingen.

Voor verschillende aannamen omtrent de investeringskosten van PV-systemen zijn de kosten per kWh berekend om PV-elektriciteit in Nederland te brengen. De kosten per kWh zijn weergegeven voor verschillende zuidelijke locaties waarvan de afstand tot Nederland is bepaald. De kosten per kWh zijn eenvoudig berekend door de kosten van PV- en HVDC-transport te delen door de nettoproductie van elektriciteit met dit PV-systeem. Er is daarbij rekening gehouden met verliezen die tijdens het transport optreden.

Uit fig. 3.4.15 kan worden opgemaakt dat als wordt aangenomen dat de kosten voor PV-systemen f 4000,- per kWp bedragen, deze systemen het beste 6.000 km ten zuiden van Nederland kunnen worden geplaatst. Dan zijn de kosten per kWh immers het laagst (19 ct per kWh). Als wordt uitgegaan van f 3000,- per kWp dan kunnen de systemen het best op 5.000 km van Nederland geplaatst worden. Bij f 2110,- per kWp (dit is de schatting die in de analyses nr. 2 t/m nr. 6 is gebruikt) is een locatie op 4.000 km van Nederland optimaal.

Fig. 3.4.15

Kosten elektriciteitsproductie uit PV-systemen als functie van de afstand tot Nederland bij verschillende investeringskostenniveaus voor PV-systemen.

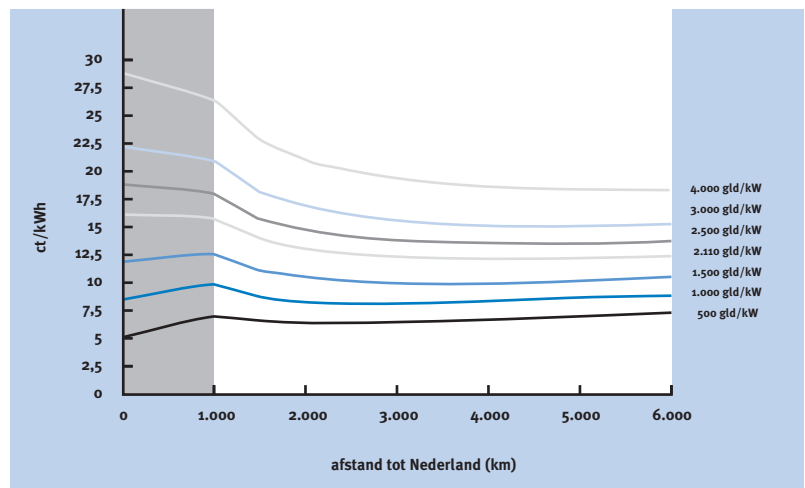
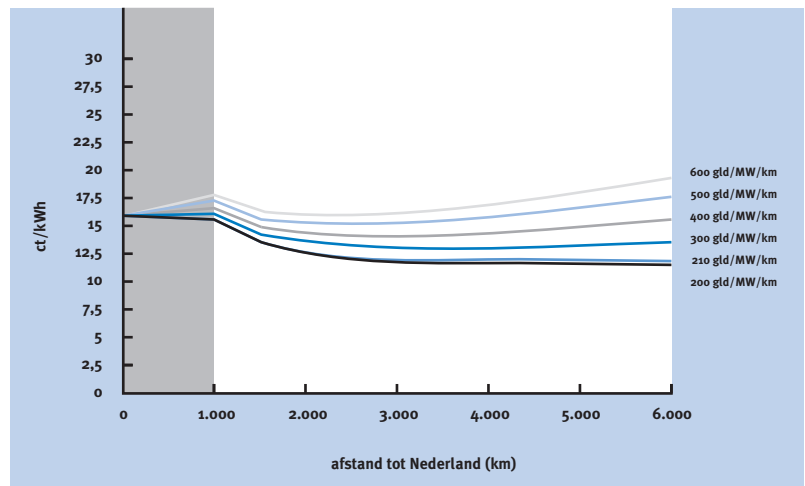


Fig. 3.4.16

Kosten van elektriciteit uit PV-systemen als functie van de (zuidelijke) afstand tot Nederland bij verschillende investeringskostenniveaus voor HVDC-verbindingen.



Bij f 1000,- per kWp kunnen twee optima geconstateerd worden. Zowel in Nederland als op 3.000 km van Nederland geplaatste PV-systemen geven elektriciteit voor 8,2 ct per kWh. Bij f 500,- per kWp is elektriciteit uit PV-systemen in Nederland duidelijk het goedkoopst.

De kosten van de HVDC-verbinding op termijn zijn ook onzeker. Voor een situatie in 2030 zijn kostenberekeningen gedaan met verschillende kostenniveaus voor de HVDC-verbinding. Deze zijn gevarieerd tussen f 200,- en f 600,- per MW/km. In fig. 3.4.16 zijn de kosten van elektriciteit uit PV aangegeven als functie van de afstand tot Nederland. Bij lage kosten (f 200,- voor de HVDC-verbinding) is de optimale locatie van PV-systemen 4.000 km ten zuiden van Nederland. Bij de aanname dat de kosten van de HVDC-verbinding hoger zijn, komt de locatie met de laagste kWh-prijs van PV dicht bij Nederland. Bij het hoogste kostenniveau voor HVDC is een locatie 2.000 km ten zuiden van Nederland optimaal.

CONCLUSIES

Op basis van de berekeningen worden hier de volgende conclusies getrokken over PV-systemen tot het jaar 2030.

- Op basis van kosten en zonder rekening te houden met de betrouwbaarheid van de levering van elektriciteit is het aantrekkelijk om PV-systemen te plaatsen in Noord-Afrika voor elektriciteitsgebruik in Nederland bij investeringskosten die hoger zijn dan f 1000,- à f 1500,- per kW.
- De energie die met PV-systemen in zuidelijke gebieden wordt opgewekt, kan het beste in de vorm van elektriciteit naar Nederland getransporteerd worden. Import van waterstof uit PV-systemen is pas aantrekkelijk bij hoge CO₂-heffingen.
- Bij een elektriciteitsvoorziening waarin centrale PV-systemen een groot aandeel hebben, zijn opslagsystemen van groot belang. Seizoensopslag op basis van waterkrachtreservoirs in het buitenland is voor een dergelijk elektriciteitspark aantrekkelijker dan dag- en nachtopslag met batterijen.

Als PV-systemen voor waterstofproductie worden gebruikt, is een afstand van 2.500 à 5.000 km ten zuiden van Nederland het meest aantrekkelijk, ongeacht de onzekerheden over de kosten van PV-systemen en waterstofpijpleidingen.

3.5 HET NATIONALE TRANSPORTNET

3.5.1 OPBOUW VAN HET NEDERLANDSE HOOGSPANNINGSNET

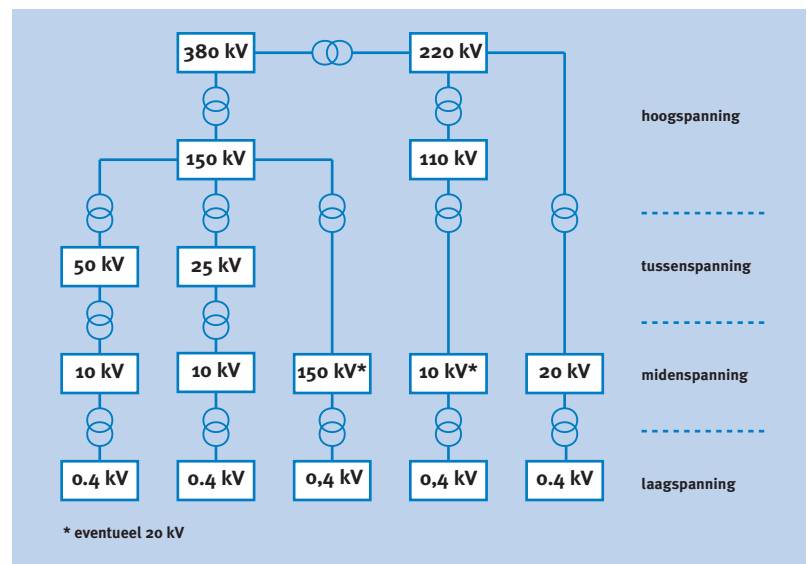
prof.ir. W.L. Kling²¹

Een elektriciteitsnet is nodig om de elektrische energie van de plaats van opwekking naar de plaats van gebruik te brengen. Een gebruikelijke onderverdeling in het elektriciteitsnet is die tussen het transport- en het distributienet. Het transportnet heeft de hoogste spanningsniveaus en zorgt voor het verbinden van de belangrijkste centrales met de centra van de belasting, waar via transformatorstations de distributienetten worden gevoed. Het distributienet zorgt voor het verdelen van de elektrische energie over de aangesloten gebruikers.

In fig. 3.5.1 zijn de spanningsniveaus en de bijbehorende transformatiestappen gegeven die in Nederland worden toegepast.

Fig. 3.5.1

Spanningsniveaus in het Nederlandse transport- en distributienet.



Het 220- en 380 kV-net wordt vaak 'het koppelnet' genoemd, waarmee wordt aangeduid dat dit net de onderliggende netten koppelt tot één geheel. In fig. 3.5.2 zijn geografisch de hoogste spanningsniveaus weergegeven.

Het 380- en 220 kV-net hebben beide een ringvormige basisstructuur, dat wil zeggen dat de elektrische circuits bij het gaan van station naar station een gesloten lus vormen; de 380 kV-ring strekt zich uit over het westen, zuiden en midden van het land; de 220 kV-ring is te vinden in het noordoosten.

Op die ringstructuur zijn verder nog enkele uitlopers aangesloten, en de verbindingen met het buitenland. Via de 380- en 220 kV-transformatorstations (koppelstations) worden zogenaamde deelnetten gevoed.

21 Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
klingWL@sep.nl

Fig. 3.5.2

Geografische weergave van de hoogste spanningsniveaus en de hoeveelheid aanwezige netlengte per spanningsniveau.



3.5.2 DOEL VAN KOPPELING OP HOOGSPANNINGSNIVEAU

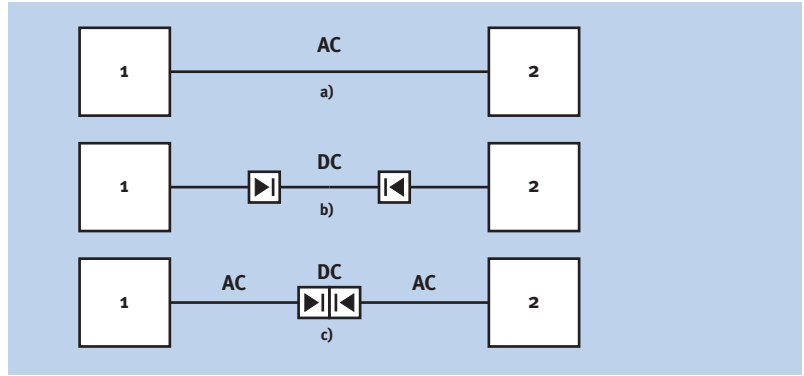
De functie van het koppelen van elektrische netten ligt in het verlengde van de transportfunctie van het elektriciteitsnet. Koppelverbindingen in hun zuiverste vorm verbinden transportnetten of beter gezegd systemen, die in zichzelf een zekere balans bezitten tussen de productie van elektriciteit en de belasting. Het transport via deze verbindingen zal geen voorkeursrichting kennen; die is afhankelijk van de situatie van productie en belasting, die van moment tot moment kan verschillen. Zo definieert en analyseert men in theoretische studies meestal de koppel functie.

Koppeling van systemen kan op directe wijze of op indirecte wijze geschieden. Fig. 3.5.3 laat de technische opties daarvoor zien. Allereerst de directe synchrone koppeling, waarbij er sprake zal zijn van parallelbedrijf van de betrokken AC (wisselstroom)-netten. Vervolgens de situatie met een DC (gelijkstroom)-koppeling, waarbij de twee netten elkaar niet direct beïnvloeden. Onderscheid is te maken in de echte DC-verbindingen en de zogenaamde ‘back to back’-installaties. Koppeling van netten levert zowel economische als technische voordelen op.

Fig. 3-5-3

Technische opties voor het koppelen van systemen

- a Directe synchrone koppeling.
- b DC-koppeling.
- c 'Back to back' DC-koppeling. De back to back DC-koppeling wordt onder andere gebruikt om twee aanliggende systemen te koppelen zonder dat ze met elkaar gesynchroniseerd hoeven te zijn.



De technische voordelen komen doorgaans tot uitdrukking in een verhoging van de betrouwbaarheid en de kwaliteit van de geleverde spanning en stroom. Dit zijn aspecten die overigens indirect ook vertaald kunnen worden in kostenbesparingen. De directe voordelen van koppeling zijn terug te vinden in een besparing op investeringen en op bedrijfskosten.

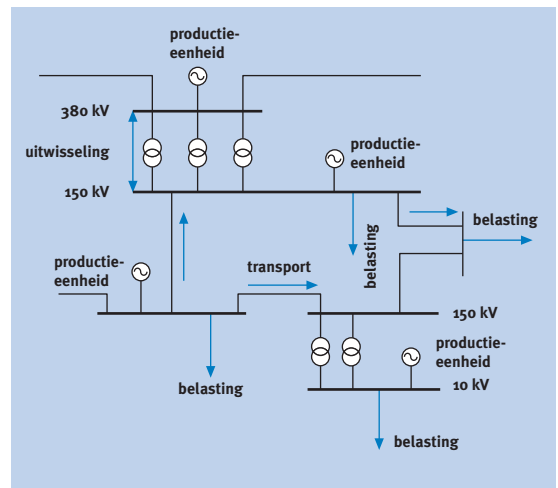
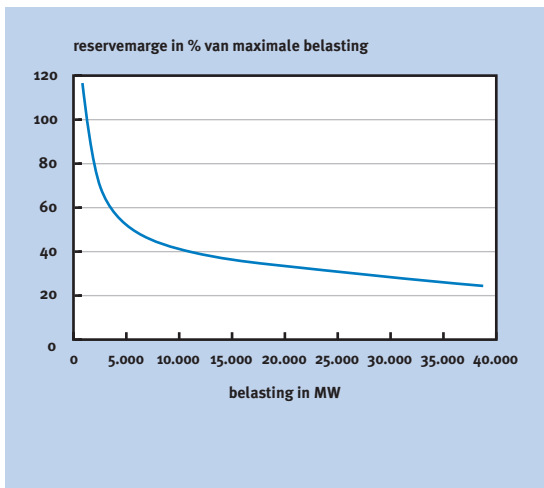
Naarmate het gekoppelde systeem groter wordt, zal de diversiteit in de vraag en in de beschikbaarheid van vermogen uit de opwekinstallaties toenemen. Dit leidt tot lagere benodigde reserves en tot minder regelacties bij gelijkblijvende betrouwbaarheidseisen. Verder kan de inzet van productie-eenheden worden geoptimaliseerd. Fig. 3-5.4 toont de afname van de benodigde hoeveelheid reservevermogen bij een steeds groter gekoppeld net. Duidelijk is dat de voordelen van koppeling voor het reservevermogen van grote systemen beperkt zijn.

Fig. 3-5-4

[links] Reservevermogen als percentage van de maximale belasting in relatie tot de systeemomvang. Het Nederlandse systeem heeft in de huidige situatie zonder koppeling met het buitenland ca. 40% reservevermogen nodig.

Fig. 3-5-5

[rechts] Deelnet met vermogensuitwisseling via de transformatoren met het 380 kV-net.



3.5.3 BEPERKINGEN VAN HET HUIDIGE KOPPELNET

Het huidige koppelnet is ontworpen om de functie van koppeling en de functie van hoofdtransport te vervullen. Aan de structuur en de capaciteit van het net worden dan ook bepaalde eisen gesteld in de vorm van criteria voor een adequaat ontwerp.

Die criteria kunnen worden onderverdeeld in drie categorieën:

- Garanties voor het gebruik van reservevermogen.
- Mogelijkheden voor transporten op basis van de geplande (economische) inzet van productie-eenheden.
- Waarborgen voor de continuïteit van de voorziening.

Dit betekent onder andere dat:

- Bij alle belastingtoestanden en bij een net dat volledig in bedrijf is de geplande inzet van de productiemiddelen mogelijk moet zijn, terwijl de uitval van een willekeurig element in het systeem opgevangen moet kunnen worden met andere bedrijfsmiddelen (er moet een enkelvoudige storingsreserve aanwezig zijn).
- Bij het voor onderhoud niet beschikbaar zijn van een willekeurig circuit, transformator of andere eenheid bij de in de onderhoudsperiode optredende belastingen de voor deze omstandigheden geplande inzet van de productiemiddelen mogelijk moet zijn. Ook tijdens deze onderhoudsperiode moet de uitval van een willekeurig element in het systeem opgevangen kunnen worden met andere bedrijfsmiddelen.

Er moet dus altijd een eenheid kunnen uitvallen zonder dat dit ernstige gevolgen heeft voor de levering van elektriciteit.

Het Nederlandse koppelnet bezit voldoende capaciteit om de transporten die op dit moment voor de nabije toekomst worden voorzien te kunnen faciliteren. Hiermee is ook meteen de beperking genoemd: namelijk dat niet alles met dezelfde betrouwbaarheidseisen mogelijk is. Indien zich grote verschuivingen in de belasting en of de productie zouden voordoen, ontstaan er problemen. Dat geldt niet alleen voor de hoeveelheid afgenomen of geproduceerde elektriciteit, maar ook voor de plaats van de productie of de afname (bijv. door import en export).

Het productievermogen in Nederland is nu nog deels op het hoogste spanningsniveau aangesloten (vooral de grote eenheden) en voor de rest op de deelnetten. In fig. 3.5.5 is als voorbeeld een deelnet getekend met vermogensuitwisseling via de transformatoren met het 380 kV-net; in dit deelnet is productie dicht bij het 380 kV- en 150 kV-koppelpunt aanwezig, plus productie verder weg in het 150 kV-deelnet.

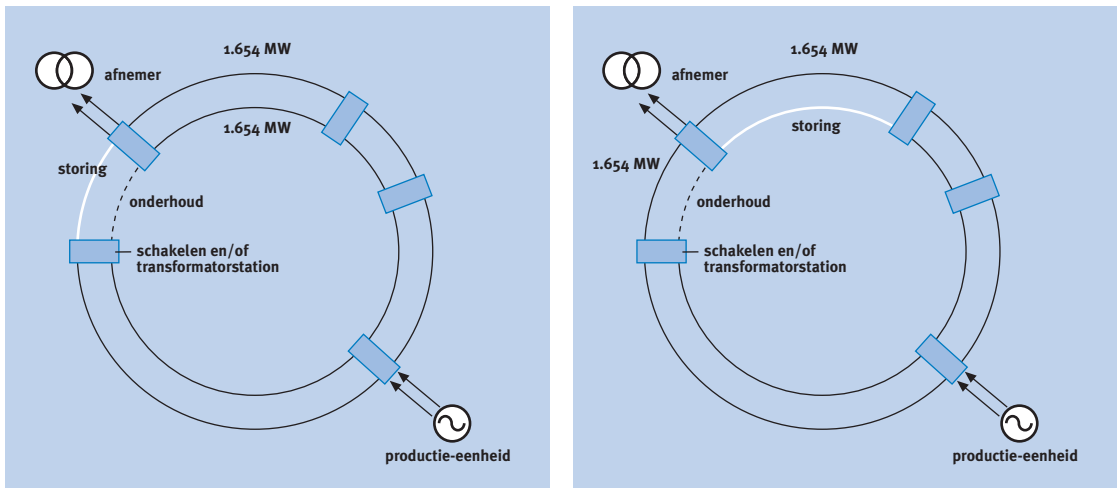


Fig. 3.5.6
*Ringnet bij een storing tijdens
 onderhoudswerkzaamheden.*

Als het productievermogen uit de deelnetten zou verdwijnen vanwege alternatieven in grootschalige centrales op verder weg gelegen locaties, zal allereerst de omvang van het transformatorvermogen in de deelnetten moeten toenemen. Vervolgens zullen er meer van dergelijke invoedingspunten geplaatst moeten worden, omdat anders de afvoer in de deelnetten voor problemen gaat zorgen. De verhoogde transporten in het koppelnet kunnen op zichzelf ook problemen geven, die een hogere transportcapaciteit nodig kunnen maken. Op de koppelverbindingen naar het buitenland wordt dit actueel wanneer de import van elektriciteit groter wordt dan 3.000 tot 4.000 MW.

Het 380 kV-ringnet is opgebouwd uit twee circuits van 1.645 MW, die onder normale omstandigheden niet meer dan 50% belast worden. Een ringnet heeft het voordeel dat bij het onderbreken van een circuit nog steeds het volle vermogen via een omweg naar de gebruiker getransporteerd kan worden. In theorie kan dus wanneer een circuit tussen twee stations in onderhoud is, met behoud van de eenvoudige storingsreserve een net toelaatbaar vermogen van 3.290 MW geleverd worden. Dit geldt alleen wanneer productie en afname zich in de ring symmetrisch ten opzichte van elkaar bevinden. Als dat niet het geval is, dan is een storing op het andere circuit meestal bepalend voor het maximale transport en is de toelaatbare belasting lager, ongeveer 2.000 MW.

3.6 TRANSPORT VAN ELEKTRICITEIT OVER DE LANDSGRENZEN HEEN

3.6.1 OPBOUW VAN HET EUROPESE NET

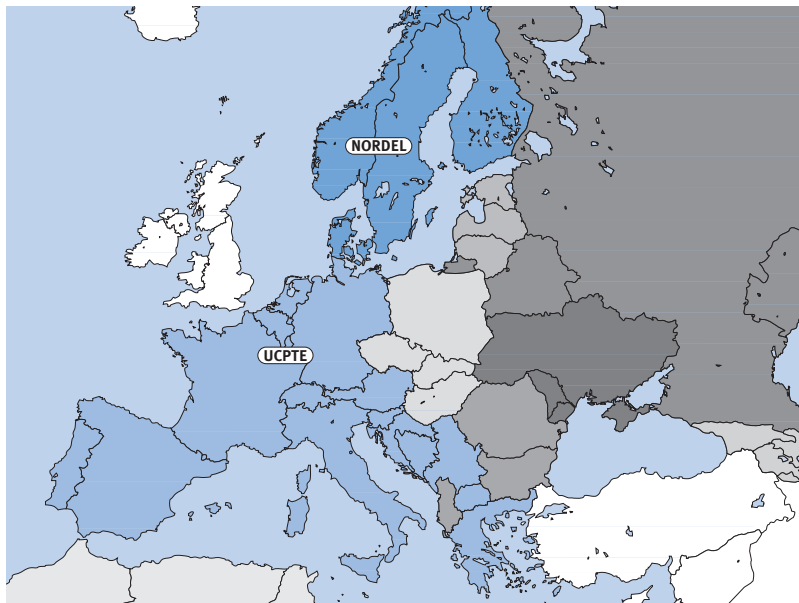
prof.ir. W.L. Kling²²

Nederland is via een net van 380 kV gekoppeld met de ons omringende landen. Daarmee is het onderdeel van het samenwerkingsverband van de UCPTÉ (Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité). Op dit moment zijn formeel 13 landen lid van de UCPTÉ en zijn er meer dan 100 grensoverschrijdende 220 en 380 kV-lijnen. In principe zijn alle partners direct (synchroon) met elkaar gekoppeld.

Niet-synchrone koppelingen zijn er met het Scandinavische 'NORDEL'-net en met het Engelse 'National Grid' door middel van onderzeese gelijkspanningsverbindingen. Tot voor kort was het Oost-Europese net door middel van zogenaamde DC (gelijkstroom) 'back to back'-installaties met het UCPTÉ-net gekoppeld. In dit laatste is een verandering gekomen, want vier landen uit Midden-Europa zijn synchroon aangesloten op het UCPTÉ-net. Vermoedelijk zullen binnen enkele jaren ook andere Oost-Europese landen dit voorbeeld volgen.

Fig. 3.6.1

De bij de UCPTÉ aangesloten landen
[UCPTÉ, 1998a].



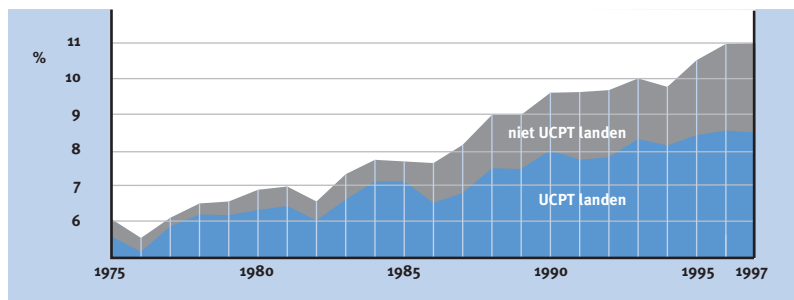
De UCPTÉ-landen hebben gezamenlijk een maximale belasting van ongeveer 250 GW. Het totale opgestelde productievermogen is ongeveer 400 GW, opgebouwd uit 200 GW thermisch vermogen, 100 GW kernvermogen en 100 GW waterkrachtvermogen. Met de nieuwe landen erbij liggen de cijfers hoger. De drijfveren voor internationale koppeling zijn niet anders dan die eerder aan de orde waren bij de koppeling op regionale, en later nationale schaal:

22 Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
klingWL@sep.nl

- Onderlinge ondersteuning in geval van storingen. Het idee is dat een partner in moeilijkheden erop mag rekenen dat (alle) anderen in actie zullen komen om te helpen zolang dat nodig is.
 - Samenwerking en handel tussen bedrijven over de gebieds- of landsgrenzen heen.
- In fig. 3.6.2 worden de energie-uitwisselingen getoond die in 1997 tussen de verschillende landen in de UCPT E en met de aangrenzende landen buiten de UCPT E plaatsvonden.

Fig. 3.6.2

Groei van het aandeel uitgewisselde elektriciteit ten opzichte van het verbruik tussen UCPT E-landen en naar niet-UCPT E-landen.



Bij internationale koppeling behouden de partners over het algemeen een grote mate van zelfstandigheid. UCPT E kent bijvoorbeeld geen centrale bedrijfsvoering of besturing met de aangrenzende landen buiten de UCPT E.

Vermogenstransporten en spanningsniveaus worden door de partners zelf bewaakt. Zorgvuldig worden de afwijkingen in de vooraf geprogrammeerde onderlinge uitwisselingen in de gaten gehouden en correcties uitgevoerd.

In Laufenburg (Zwitserland) wordt de waarde van de frequentie in het UCPT E-gebied bewaakt. Het blijkt dat de afwijking in de frequentie in het systeem zelden groter is dan 50 mHz en in 90% van de tijd niet groter is dan 30 mHz.

Er zijn enkele ontwikkelingen aan de gang die van invloed zullen zijn op de inrichting en het functioneren van het gekoppelde systeem.

De eerste ontwikkeling die genoemd kan worden is de groei in het gebruik van het gekoppelde netwerk, vooral voor economische energie-uitwisselingen. Daarbij zijn steeds vaker verder van elkaar gelegen landen of partijen betrokken. Deze transporten zorgen voor een hogere belasting van het net en een grotere kans op problemen.

Een tweede ontwikkeling is de groeiende omvang van het gekoppelde netwerk. Eerder is de uitbreiding met Midden- en Oost-Europa genoemd. Ook voor Noord-Afrika en het Midden-Oosten bestaan er plannen en concrete projecten. Voor de landen die in de periferie van het gebied liggen is het altijd interessant om het samenwerkingsverband uit te breiden. Voor de andere partners is er meestal nog maar weinig extra voordeel te behalen, want zonder aanpassingen zal het interne netwerk beperkingen opleggen aan de transporten die over en weer mogelijk zijn.

Fig. 3.6.3

In 1997 gerealiseerde energie-uitwisselingen (in GWh) tussen de verschillende landen in de UCPTe en met de aangrenzende landen buiten de UCPTe [UCPTe, 1998b].



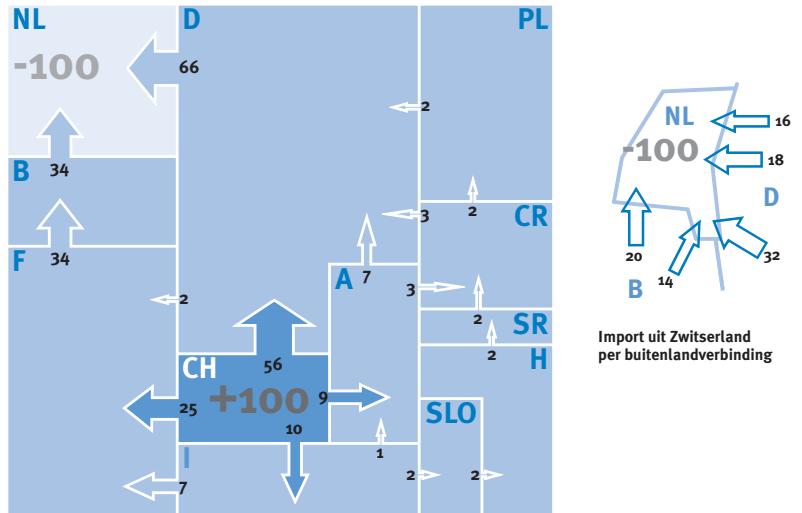
Een derde ontwikkeling is de liberalisatie van de elektriciteitsvoorziening in Europa. De netten zijn nu vaak nog organisatorisch verbonden met de groot-schalige producenten, die de koppelingen met buursystemen gebruiken voor eigen optimalisaties. De bedoeling van nieuwe wetgeving is om de netten ook op internationale schaal toegankelijk te maken voor alle partijen, die transacties willen aangaan. Dat maakt de coördinatie moeilijker en een strakkere hantering van de regels en procedures noodzakelijk.

3.6.2 HET BENUTTEN VAN INTERNATIONALE KOPPELINGEN

In een synchroon gekoppeld systeem zoals dat in West-Europa aanwezig is, bepalen de zwakste schakels de uitwisselingsmogelijkheden van de koppelverbindingen. Het gaat dan om de aanwezige transportcapaciteiten, de afstanden waarover de transporten moeten plaatsvinden, de mogelijkheden voor spanningsondersteuning en de locaties waar de extra opwekking gerealiseerd wordt. Nederland importeert op dit moment geregeld zo'n 1.500 tot 2.000 MW. Aangezien we weten dat de som van de transportcapaciteit van alle grensoverschrijdende verbindingen veel hoger is, zou de conclusie kunnen zijn dat er nog meer te importeren zou zijn. De stroomverdeling in het net is echter zodanig dat het grootste deel van de import binnenkomt via Maasbracht. Daar komt ook een aanzienlijk deel van de Belgische import langs. Dit heeft te maken met het feit dat de voornaamste exporteurs in het midden van West-Europa te vinden zijn (zie fig. 3.6.3). Dus in de praktijk is de verbinding van Maasbracht naar Duitsland vrijwel altijd de beperkende factor voor grotere importen.

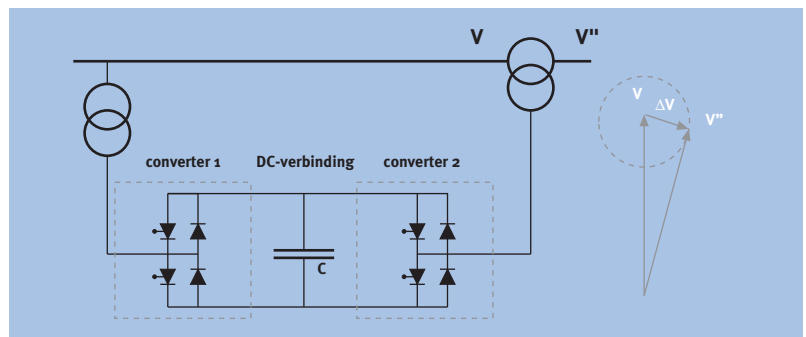
Fig. 3.6.4 laat zien hoe de transporten verlopen bij een uitwisselingscontract met Zwitserland. Veel landen zijn betrokken bij zo'n transactie. De netbeheerders aan beide zijden van de grens hebben de belangrijke taak om de transporten van moment tot moment te bewaken en eventueel te zoeken naar mogelijkheden om de transporten naar koppelingen te sturen die minder zwaar belast zijn.

Fig. 3.6.4
Verloop transporten bij een uitwisselingscontract met Zwitserland.



Een bekende techniek om vermogens te sturen is door middel van dwarsregeltransformatoren in serie met verbindingen in het net. Een voorbeeld hiervan is de dwarsregelaar te Gronau, die ervoor zorgt dat Nederland zijn bij VEW gecontracteerde vermogen inderdaad direct over de verbinding Hengelo-Gronau binnenkrijgt. In ontwikkeling is een regelaar op basis van vermogens-elektronische componenten. Recent is in de VS bij American Electric Power een eerste regelaar op basis van het UPFC (Unified Power Flow Controller)-principe in bedrijf genomen. Het principe van zo'n regelaar is in fig. 3.6.5 gegeven. Met een UPFC is zowel de grootte van de spanning als de fasehoek te beïnvloeden, wat een betere sturing van de vermogens mogelijk maakt.

Fig. 3.6.5
Het principe van de eerste regelaar op basis van het UPFC (Unified Power Flow Controller)-principe.



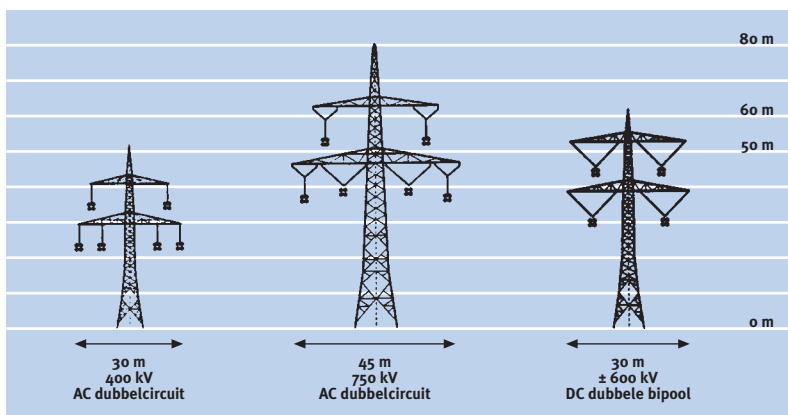
3.6.3 TECHNISCHE OPTIES VOOR TRANSPORT OVER GROTERE AFSTAND

Voor transport over grotere afstand kan gebruik gemaakt worden van de verbindingen in de synchroon gekoppelde (buur)netten, maar al snel zal blijken dat de transportcapaciteiten daarvoor doorgaans niet toereikend zijn. In eerste instantie kan men dan denken aan versterking van het 380 kV-net of als dat niet goed mogelijk is aan de introductie van een hoger spanningsniveau in de vorm van een soort supernet. Men denkt dan aan spanningsniveaus van 750, 1.000 of 1.200 kV.

Omdat in het verleden in Oost-Europa een 750 kV-lijn is gebouwd, is het denkbaar dat deze trend daar doorzet. Wellicht zal deze verbinding ook naar West-Europa gaan lopen. In fig. 3.6.6 is te zien wat een hoger spanningsniveau betekent voor het mastbeeld. Ook de oplossing met DC is getekend. De transportcapaciteit van de 750 kV-lijn is twee maal hoger dan die van de 380 kV-lijn; de DC-lijn heeft dezelfde capaciteit als de 750 kV-lijn, maar kan gebouwd worden in dezelfde tracé-breedte als de 380 kV-lijn.

Fig. 3.6.6

De verhouding tussen het spanningsniveau en het mastbeeld.



Voor een AC (wisselstroom)-koppeling zijn de lijnkosten dominant ten opzichte van de stationskosten. Bij DC zijn de stationskosten (converters) hoger dan bij AC, maar de kosten van een bovengrondse DC-lijn zijn lager dan die van een AC-lijn. Er is dus een break-even point, waarbij de totale kosten aan elkaar gelijk worden. Bij de huidige kostenverhoudingen is de afstand waarboven DC voordeliger wordt ongeveer 500 km, bij (land)kabelverbindingen is dat ongeveer 30 km.

Een voorbeeld hiervan is de 1.500 km lange multi-terminalverbinding in Canada en de VS die 2.200 MW aan waterkrachtvermogen naar het zuiden transporteert en aflevert in vier converterstations.

Een ander voorbeeld is de HVDC (High Voltage Direct Current)-verbinding tussen Rusland en Duitsland, waarin ongeveer vijf converterstations naar de betrokken partners (Rusland, Wit-Rusland, Polen en twee bedrijven in

Duitsland) zijn opgenomen. De haalbaarheid van deze laatste verbinding wordt momenteel onderzocht. De route is ongeveer 1.800 km en de verwezenlijking wordt geschat op 10 jaar. De kosten zullen ongeveer 2 miljard DM bedragen. Met zo'n verbinding zijn grote vermogens van het Oosten naar het Westen en eventueel in omgekeerde richting te transporteren.

Een derde voorbeeld is het Sep-project met Noorwegen. Het is de bedoeling om vanaf 2001 een HVDC-koppeling in bedrijf te hebben die Nederland met Noorwegen verbindt.

De Noorse en Nederlandse productiesystemen zijn verschillend van aard. De elektriciteitsproductie in Noorwegen is volledig gebaseerd op waterkracht. Er wordt water opgevangen in grote reservoirs en gebruikt op het moment dat elektriciteit gevraagd wordt. In de meeste jaren is er een overschot aan energie. Er is in ruime mate capaciteit aanwezig om elektriciteit op te wekken. In droge jaren bestaat het risico van gebrek aan brandstof, namelijk voldoende opgeslagen water.

De meeste West-Europese landen daarentegen moeten de elektriciteit overwegend met thermische eenheden opwekken. Er zijn nauwelijks opslagmogelijkheden. De totale capaciteit van deze productiemiddelen moet toereikend zijn om aan de maximale vraag te voldoen. In de nachtelijke uren en in de weekeinden is de vraag lager. De thermische eenheden zouden dan wel kunnen produceren als daaraan behoefte is.

Het combineren van de eigenschappen van beide systemen is dus interessant en leidt tot minder en een beter gebruik van de productiemiddelen. In Nederland kan men afzien van het bouwen van nieuw vermogen, omdat via de koppeling altijd geleverd kan worden; in Noorwegen kan men afzien van het bouwen van extra spaarbekkens, omdat die tijdig kunnen worden aangevuld uit Nederland als daaraan behoefte is. De totale kosten van de verbinding met een transportcapaciteit van 600 MW zijn bijna een miljard gulden, omdat de afstand meer dan 500 km is. Om dat terug te verdienen, moet het zeker zijn dat de verbinding ook in de praktijk goed wordt benut.

3.6.4 NAAR GROOTSCHALIGE GEKOPPELDE ELEKTRICITEITSSYSTEMEN

*prof.dr. D. Povh*²³

INLEIDING

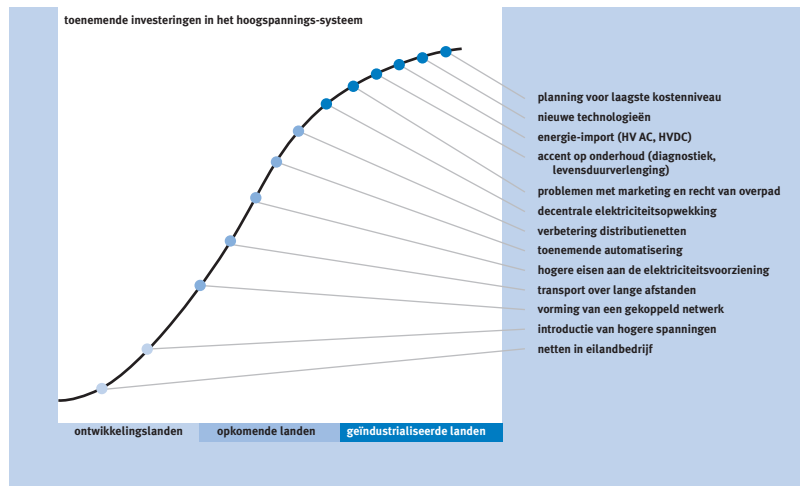
De drijvende kracht achter de ontwikkeling van elektriciteitsvoorzieningssystemen is de groeiende vraag naar elektriciteit. In de sterk geïndustrialiseerde landen in Europa, Noord-Amerika en in Japan kunnen we een geringe groei of zelfs een stagnatie van de vraag verwachten. Deze geringe procentuele groei is echter gebaseerd op het huidige hoge niveau van gebruik.

.....
23 Siemens AG,
P.O. Box 3220
D-91050 Erlangen
Germany
dusan.povh@erlso4.siemens.de

In het Verre Oosten en in gedeelten van Zuid-Amerika zal de huidige sterke groei naar verwachting aanhouden. In deze regio's zal de grootste energievraag ontstaan in de toekomst. Deze verwachte snelle toename van de vraag naar energie zal leiden tot een evenredig snelle verdere ontwikkeling van elektriciteits-systemen.

Fig. 3.6.7 toont de ontwikkeling van elektrische systemen die is weergegeven door middel van de elektriciteitsconsumptie per inwoner per jaar, uitgezet tegen de tijd. Karakteristiek voor deze ontwikkeling is dat het gebruik op een laag niveau begint (bijv. in ontwikkelingslanden), daarna geleidelijk stijgt en vervolgens steil omhoog gaat in de recent in ontwikkeling komende landen als gevolg van de opbouw van de industrie en de toenemende levensstandaard. In de meest geïndustrialiseerde landen waar de consumptie nog maar weinig toeneemt, is het verzadigingspunt vrijwel bereikt. De curve toont verschillende fasen in de levenscyclus van het systeem.

Fig. 3.6.7
Energieconsumptie per inwoner.



Wanneer er elektriciteitssystemen worden opgebouwd in zich ontwikkelende landen zal de consumptie per inwoner eerst langzaam toenemen. Als eerste stap worden lokale netwerken aangelegd om individuele steden en dorpen van stroom te voorzien. Bij verdere toename van de energievraag zijn hogere spanningsniveaus nodig. In de nieuw geïndustrialiseerde landen met hun sterk toenemende vraag worden niet alleen thermische centrales gebruikt, maar zal men ook het aanwezige hydro-elektrische potentieel benutten. Een deel van de opwekking kan echter plaatsvinden op grote afstand van de zich ontwikkelende centra. Op dat moment worden investeringen in het hoogspanningsnet noodzakelijk om dit geschikt te maken voor hogere spanningsniveaus en eventueel voor HVDC (High Voltage DC, hoogspanningsgelijkstroom)-transmissie. Een volgende stap in de ontwikkeling van het elektriciteitsnet is de combinatie

van subsystemen tot onderling verbonden netwerken met als doel een grotere efficiëntie, minder benodigd reservevermogen en een grotere betrouwbaarheid. Dergelijke koppelingen worden uitgebreid over de landsgrenzen heen, afhankelijk van de technische en economische voorwaarden met HVAC (High Voltage AC, hoogspanningswisselstroom) of HVDC. Op deze wijze is het mogelijk voor het ene systeem de meer economische opwekeenheden in het andere systeem te benutten. Naarmate de economie van een land zich verder ontwikkelt, nemen ook de eisen aan de kwaliteit van de levering toe. Automatisering maakt een grotere betrouwbaarheid en een geoptimaliseerd netwerkbedrijf mogelijk. In reeds geïndustrialiseerde landen met ver ontwikkelde systemen en een minimale toename van de vraag worden we geconfronteerd met andere problemen. Het is hier bijna onmogelijk geworden om nieuwe routes voor bovengrondse lijnen en kabels te vinden. Waar de stroomdichtheid hoog is, moeten de distributienetten verbeterd worden. Het aandeel decentrale opwekking neemt niet alleen om politieke, maar ook om economische gronden toe. In de geïndustrialiseerde landen zullen de nieuw ontwikkelde technologieën het eerst toegepast worden om problemen op te lossen, maar ook om kosten te besparen. Omdat het in dergelijke landen zelden mogelijk is om grote centrales te bouwen op geschikte locaties dichtbij de gebruikscentra wordt goedkopere energie geïmporteerd, vaak over grote afstand en gewoonlijk via HVDC.

Samenvattend zijn de volgende trends waarneembaar:

- Toename in de grootte van gekoppelde systemen.
- Toename van vermogensuitwisseling tussen gekoppelde systemen.
- Transport van grote ‘vermogensblokken’ over grote afstanden (hydro- en zonne-energie).
- Decentrale elektriciteitsopwekking.

Wanneer we deze verschillende en zelfs conflicterende trends in elektriciteitsystemen in ogenschouw nemen, kunnen we in ieder geval aannemen dat het aantal koppelingen tussen systemen zal toenemen. Het voornaamste doel zal het gebruik van meer economische opwekking buiten de landsgrenzen zijn. Eveneens om economische redenen zullen grote hoeveelheden (bulk)elektriciteit door middel van HVDC uit de hydro- elektrische centrales naar de verbruikscentra getransporteerd worden.

Ook is er echter een sterke trend in de richting van decentrale opwekking met inkoppelpunten in het subtransmissie- en het distributienetwerk, en de bijkomende belastingverlichting van het hoogspanningsnet. Deze tendens komt voort uit de decentralisatie van politieke structuren en uit de technische vooruitgang in de vorm van nieuwe en meer economische centrales.

VOORDELEN VAN KOPPELINGEN TUSSEN ELEKTRICITEITSSYSTEMEN

Als voornaamste voordelen van koppelingen tussen elektriciteitssystemen kunnen we noemen:

- De mogelijkheid om grotere en meer economische opwekeenheden te gebruiken.
- Een vermindering van het benodigde reservevermogen in het systeem.
- Het gebruik van de meest gunstige energiebronnen.
- De flexibiliteit om nieuwe opwekeenheden op gunstige locaties te bouwen.
- Een toename van de betrouwbaarheid in het systeem
- Het terugbrengen van verliezen door geoptimaliseerd netbeheer.

In de laatste decennia na de ontwikkeling van meer economische centrales met grote thermische eenheden en grote nucleaire eenheden heeft de verbinding tussen de systemen het gebruik van deze opwekeenheden mogelijk gemaakt zonder het risico van de bedrijfsvoering. Bij een systeemuitval konden de omringende systemen het tekort aan elektriciteit opvangen totdat de eigen reservecentrales konden worden geactiveerd. Een ander belangrijk voordeel van koppeling is dat men de meest gunstige energiebron kan gebruiken, gebaseerd op afspraken tussen de partners van de gekoppelde systemen. De flexibiliteit om centrales op betere locaties te plaatsen en een toename van de totale betrouwbaarheid van de gekoppelde systemen zijn twee andere voordelen.

MOGELIJKHEDEN VOOR KOPPELING VAN ELEKTRICITEITSSYSTEMEN

Fig. 3.6.8 toont de belangrijkste alternatieven voor het onderling koppelen van systemen.

AC-koppeling

De meest gebruikte koppeling tussen systemen is de AC-koppeling. Deze koppelingswijze stelt echter een aantal technische voorwaarden:

- Het afstemmen van primaire en secundaire frequentieregelingen.
- Een gebalanceerde energiesituatie inclusief in- en export van energie.
- Het voldoen aan de gemeenschappelijke principes van betrouwbaarheid.
- Voldoende sterke AC-verbindingen tussen de systemen.
- Afstemming van beveiligingsconcepten.
- Afstemming van regelingen van spanning en reactief vermogen.
- Acceptatie van een gemeenschappelijke organisatievorm.

De belangrijkste en tegelijkertijd meest kostbare voorwaarde is de afstemming van de primaire en secundaire frequentieregelingen van de systemen die verbonden zullen worden. Vaak moeten hiervoor nieuwe frequentieregelaars worden geïnstalleerd in de opwekeenheden. Er is ook afstemming nodig over de beschermingsconcepten en over het voltage en de regeling van het reactieve vermogen.

Dit is noodzakelijk om veelvuldige ontkoppeling van de netten te voorkomen. In Europa is sinds decennia het grote UCPT E-systeem in bedrijf met uitstekende resultaten. Er bestaan plannen om Roemenië en Bulgarije binnen enige jaren in het systeem op te nemen, wanneer zij aan de technische voorwaarden voldoen. De verwachtingen voor verdere AC-koppelingen naar andere grote systemen in Oost-Europa in de komende decennia zijn niet hooggestemd. De reden hiervoor is dat deze landen grote investeringen moeten doen om de toestand van het elektriciteitssysteem te verbeteren. Ook zullen de voordelen van de onderlinge koppelingen tussen de systemen afnemen met de verdere uitbreiding van het UCPT E-systeem tot een extreem groot systeem, zoals getoond wordt in fig. 3.6.9. De oorzaken hiervoor liggen in de mogelijke technische problemen die voorkomen in zeer grote systemen, zoals 'load flow' problemen en of oscillaties tussen gebieden. Het vermijden van dergelijke problemen vraagt om additionele maatregelen zoals FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Fig. 3.6.8

AC, HVDC en hybride interconnecties.

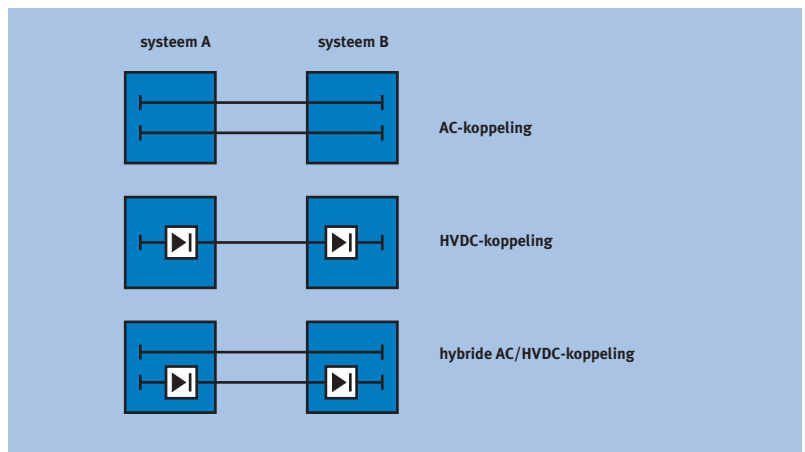
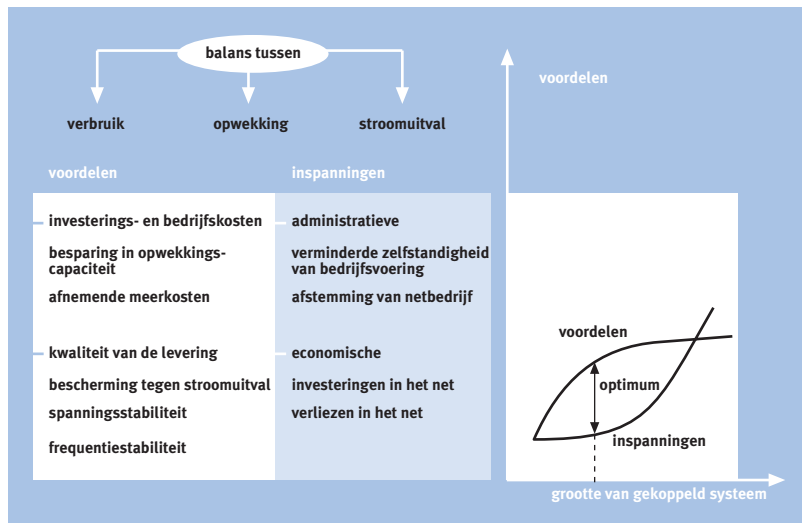


Fig. 3.6.9

Voor- en nadelen van koppeling bij toenemende systeemgrootte.



De economische voordelen van koppelingen op een dergelijke schaal zijn ook geringer, omdat bij stroomuitval ondersteuning uit verafgelegen centrales technisch niet mogelijk is. In dergelijke gevallen kan een HVDC-koppeling bijdragen aan de economische voordelen van de verbinding zonder dat het gehele te koppelen systeem aangepast moet worden.

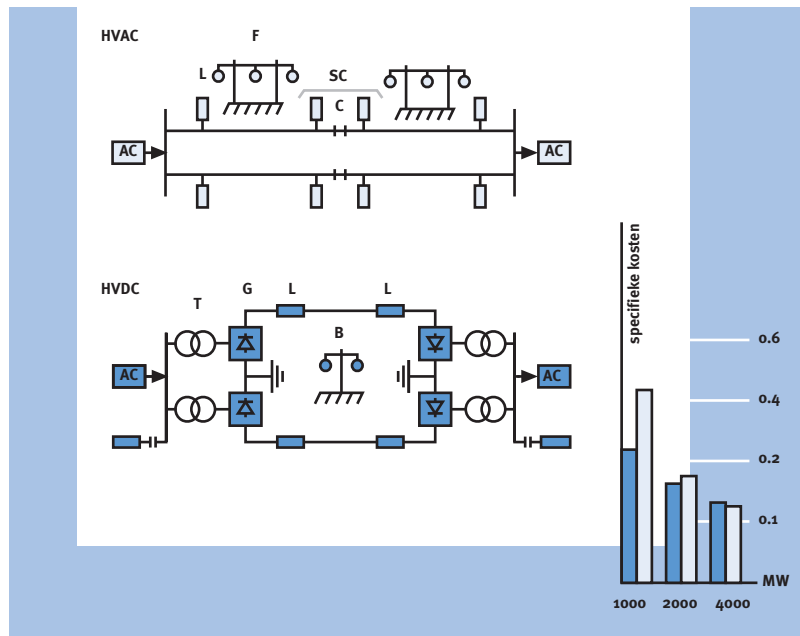
HVDC-koppeling

Zoals hiervoor reeds is vermeld, kan een HVDC-koppeling technische en economische voordelen bieden wanneer een AC-koppeling problemen geeft. Voor lange-afstandstransporten kent HVDC lagere kosten dan AC-transport, zoals een voorbeeld voor 1.000 km transportafstand in fig. 3.6.10 toont.

Economische en technische voordelen gelden ook voor HVDC in onderzeese kabelverbindingen over afstanden van meer dan 50 km. Een groot aantal van dergelijke kabelverbindingen tussen de Scandinavische landen en UCPT-systemen zijn reeds in bedrijf of verkeren in de planningsfase.

Fig. 3.6.10

Een vergelijking in opbouw en specifieke kosten tussen HVAC en HVDC. De HVAC-verbinding bestaat uit een laadstroomcompensatiespoel (L), een drie-fasenhoogspanningslijn (F), een seriecompensatie-eenheid (SC), bestaande uit spoelen (L) en een condensator (C). De laadstroomcompensatie compenseert voor de capaciteit van de kabel. De HVDC-verbinding bestaat uit een transformator (T), gelijkrichters (G), seriespoelen (L) en de DC-hoogspanningsbipool (B). De seriespoelen moeten de stroom constant houden.

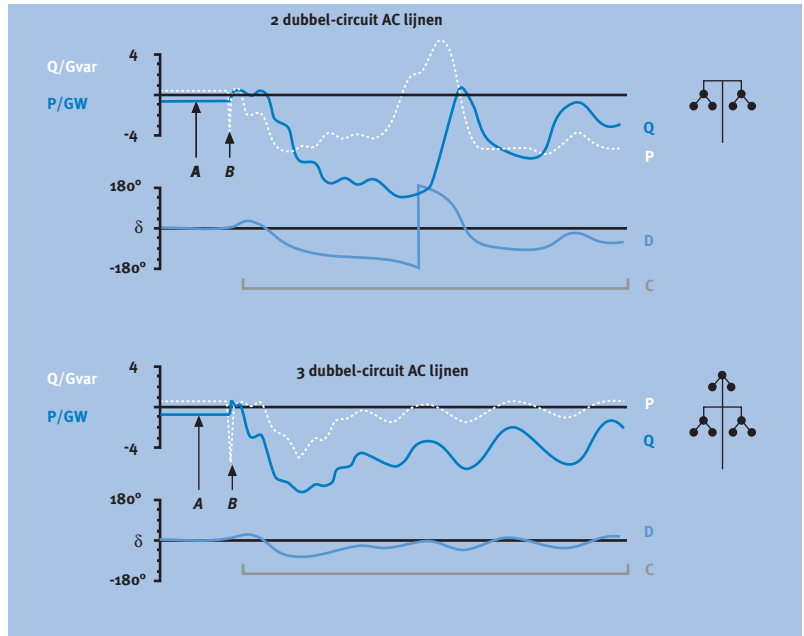


Hybride koppeling

Als een AC-koppeling zwak, of de transportafstand tussen de systemen groot is, kan de koppeling tussen de netwerken instabiel worden. Fig. 3.6.11 toont een voorbeeld van een koppeling tussen twee grote systemen. In het geval dat deze slechts gekoppeld worden door twee dubbelcircuit AC-lijnen, wordt het transport instabiel bij een fout in een van de systemen dicht bij de koppeling. Als een tweede dubbelcircuit AC-lijn wordt aangelegd, blijven de gekoppelde systemen stabiel, maar sterke oscillaties zullen nog steeds blijven optreden.

Fig. 3.6.11

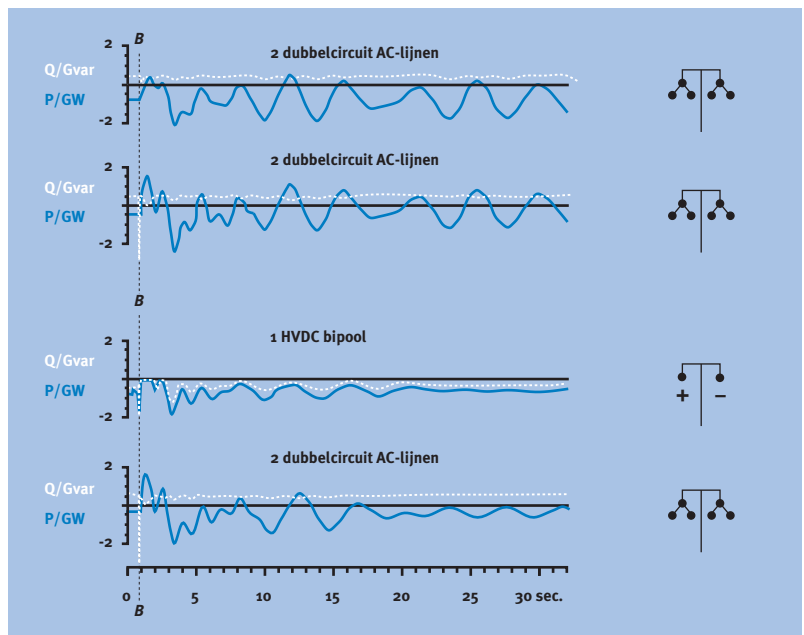
Een vergelijking tussen twee en drie dubbelcircuit AC-lijnen. Het vermogen P (in GW) en het blindvermogen Q (in Gvar) worden beschreven in de tijd. Tevens wordt het faseverschil tussen het reële en het blindvermogen aangegeven. A = normaal bedrijf. B = kortsluiting. C = herstelperiode. Het tweevoudige systeem vertoont grote schommelingen in vermogen, blindvermogen en fase. Zo is bij D vermogen en blindvermogen volledig in tegenfase, de lijn wordt wel zwaar belast, maar er vindt maar weinig transport van reëel vermogen plaats. De verbeterde demping bij het drievoudige systeem is duidelijk zichtbaar; het systeem 'schiet niet meer door', maar de schommelingen in reëel vermogen blijven nog lang aanhouden.



In dergelijke gevallen zal een hybride AC/DC-koppeling technische voordelen bieden. Het HVDC-deel kan oscillaties dempen door de snelle regel mogelijkheden en kan de stabiliteitsgrens aanzienlijk verhogen (fig. 3.6.12). Een zwakke AC-koppeling is dan mogelijk om vermogen uit te wisselen tussen de aanliggende gebieden van gekoppelde systemen die ondersteund worden door de HVDC-regeling.

Fig. 3.6.12

De uitbreiding met een HVDC-dipool heeft een verbetering van het dempende vermogen tot gevolg. Het systeem is veel eerder in de oude toestand na een verstoring. Na 30 seconden is het DC/AC-systeem bijna stabiel, terwijl het AC/AC-systeem nog enige minuten zal slingeren. B = moment van kortsluiting.

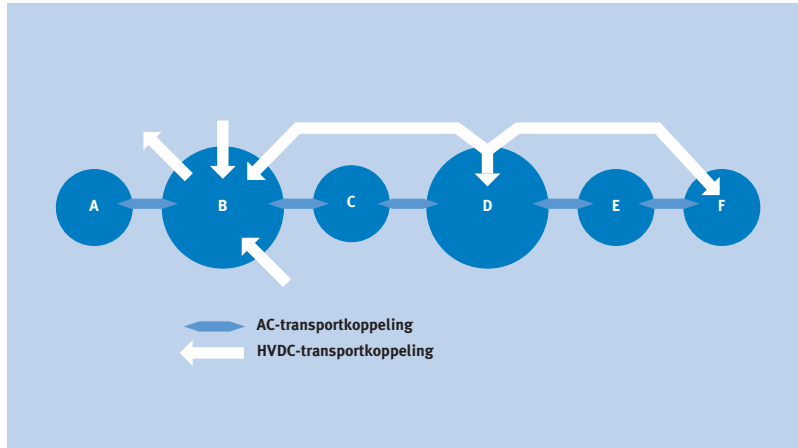


KOPPELINGEN OP WERELDSCHAAL

Uit fig. 3.6.9 blijkt dat een pure AC-koppeling geen voordelen biedt bij zeer grote koppelingen voor een mondiaal net. Een HVDC-koppeling of een hybride AC/DC-koppeling kan echter economisch voordelig zijn voor dergelijke grote koppelingen, zoals fig. 3.6.11 laat zien. Het idee achter een hybride koppeling is om vermogen tussen aangrenzende landen over een AC-koppeling te transporteren en het HVDC-deel te gebruiken voor het transport van grote 'blokken' vermogen over grote afstanden. Daarnaast kan de HVDC door een snelle regeling ook de betrouwbaarheid van het gehele net ondersteunen.

Fig. 3.6.13

HVDC voor bulktransport over grote afstanden en AC voor het transport tussen naburige landen of systemen.



In par. 3.8 wordt verder ingegaan op het toekomstige mondiale systeem. Binnen de lokale systemen zouden AC- of hybride AC- en DC-koppelingen bestaan; de diverse lokale systemen zouden gescheiden worden door grote HVDC-transportkoppelingen.

3.6.5 STABILITEIT VAN ELEKTRICITEITSVOORZIENINGSSYSTEMEN

*dr.ir. G.C. Paap*²⁴

Een ruime definitie van de stabiliteit van een elektriciteitsvoorzieningssysteem is het vermogen van zo'n systeem om onder normale bedrijfstoestanden in evenwicht te blijven en na een verstoring weer in een acceptabele evenwichtstoestand te komen. Onder een elektriciteitsvoorzieningssysteem verstaan we het volledige elektriciteitsnet inclusief opwekking, transport, distributie en gebruikers. Instabiliteit kan op vele manieren optreden, afhankelijk van de configuratie van het systeem en van de bedrijfstoestand.

Van oudsher is de stabiliteit van zo'n systeem verbonden met het behoud van synchronisme (het gelijklopen) van de generatoren die in het systeem in bedrijf zijn. Dit aspect van stabiliteit wordt gekenmerkt door de dynamica van de rotorhoeken van de generatoren in relatie met de geleverde vermogens.

Instabiliteit kan ook optreden zonder verlies van synchronisme. Een systeem waarbij een last met veel inductiemotoren via een lange verbinding gevoed wordt, kan instabiel worden als gevolg van een ineensstorting van de spanning. In dit geval is niet het behoud van synchronisme het probleem, maar de regeling van de spanning.

De zorg bij de beoordeling van de stabiliteit is het gedrag van het systeem tijdens en na een verstoring. Deze verstoring kan groot of klein zijn. Kleine verstoringen in de vorm van belastingvariaties treden continu op en het systeem past zichzelf aan de veranderende omstandigheden aan. Het systeem moet echter ook in staat zijn vele ernstige verstoringen, zoals kortsluitingen, verlies van een grote opwekeenheid of verlies van een belangrijke verbinding op een bevredigende wijze het hoofd te bieden. Een kortsluiting in een kritische component van het systeem en het afschakelen daarvan zal slingeren in de vermogensstromen en de generator-rotorhoeken, en spanningen in het net ten gevolge hebben. De spanningsslindingen zullen zowel de spanningsregelingen van de generatoren als die van het transmissiesysteem doen aanspreken. Uitval van een eenheid of van een grote belasting leidt tot frequentieafwijkingen. De vermogensslindingen hebben hun invloed op de frequentievermogensregelingen van de generator. Verder zullen ook de veranderingen in spanning en frequentie hun invloed hebben op de lasten met hun regelingen en daarmee op de prestaties van het systeem.

In elke situatie zijn echter de acties van slechts een beperkt aantal regelingen van cruciaal belang. Daarom is het van belang het werkelijke probleem te onderkennen en zich te beperken tot de factoren die van invloed zijn op het onderhavige specifieke stabiliteitsprobleem. Hiertoe wordt het begrip stabiliteit onderverdeeld in verschillende categorieën.

.....
²⁴ TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek,
Postbus 5031
2600 GA Delft
G.C.Paap@et.tudelft.nl

ROTORHOEKSTABILITEIT

Rotorhoekstabiliteit is het vermogen om gekoppelde synchrone machines in een elektriciteitsvoorzieningssysteem in synchronisme te laten blijven. Dit omvat de studie naar de elektromagnetische oscillaties die optreden in zo'n systeem. Een belangrijke factor in dit probleem is de wijze waarop het door de generatoren geleverde vermogen varieert wanneer de rotor slingert.

Bij een verstoring kan het elektromagnetische koppel van een synchrone machine ontbonden worden in twee componenten:

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega$$

waarbij de eerste term aan de rechterkant evenredig is met de verandering van de rotorhoek en wordt aangeduid als het synchroniserende koppel. De tweede term is evenredig met de snelheidsafwijking en wordt het dempend koppel genoemd. De stabiliteit hangt af van de aanwezigheid van beide termen. Onvoldoende synchroniserend koppel zal een a-periodieke toename van de rotorhoek tot gevolg hebben, terwijl onvoldoende dempend koppel leidt tot oscillaties met toenemende amplitude.

Om inzicht te krijgen in deze stabiliteitsproblemen is het gebruikelijk om twee categorieën te onderscheiden.

- 1 De rotorhoekstabiliteit bij kleine verstoringen die het vermogen van het systeem aangeeft om synchronisme te handhaven bij kleine verstoringen die continu optreden als gevolg van variaties in belastingen en opwekking. In de huidige systemen is het stabiliteitsprobleem met betrekking tot kleine verstoringen voornamelijk een probleem van onvoldoende demping van oscillaties, waarbij de volgende typen van oscillaties worden onderscheiden.
 - Lokale modes die verbonden zijn met het slingeren van eenheden in een centrale ten opzichte van de rest van het systeem. De term lokaal wordt gebruikt, omdat de oscillaties zijn beperkt tot een centrale of tot een klein deel van het systeem.
 - Interlokale modes, verbonden met het slingeren van vele eenheden in een deel van het systeem ten opzichte van eenheden in andere delen. Zij worden veroorzaakt door twee of meer groepen sterk gekoppelde eenheden, verbonden via zwakke koppelingen.
 - Control modes, verbonden met opwekeenheden en andere regelaars. Slecht afgestelde spanningsregelaars, turbineregelingen, HVDC (High Voltage Direct Current)-converters en Static VAR Compensators (SVC's) zijn meestal de oorzaak van deze vorm van instabiliteit.

- Torsie modes zijn verbonden met de roterende turbine-generatormassa. Instabiliteit kan worden veroorzaakt door interactie met spanningsregelaars, toerenregelingen, HVDC-regelingen en lijnen gecompenseerd met seriecapaciteiten.
- 2 Transiente stabiliteit die het vermogen van het systeem aangeeft om synchronisme te handhaven bij een ernstige transiente verstoring. Het resultaat van een dergelijke verstoring zijn grote slingeringen in de rotorhoeken van de generatoren. De stabiliteit hangt af van de bedrijfstoestand voor de verstoring en de ernst van de verstoring. Normaal zal het systeem na het opheffen van de verstoring in een andere stationaire toestand komen. Belangrijk voor het bepalen van de stabiliteit gekoppeld met deze soort verstoringen is het gedrag van het systeem gedurende de zogenaamde ‘first swing’ van de rotorhoeken. Wordt van een van de generatoren de relatieve rotorhoek te groot als gevolg van een onvoldoende synchroniserend koppel, dan zal deze machine uit de pas vallen.

SPANNINGSSTABILITEIT EN SPANNINGSINEENSTORTING

Spanningsstabiliteit is het vermogen van het systeem om onder normale omstandigheden en na een verstoring een acceptabel spanningsniveau in het netwerk te handhaven.

Instabiliteit treedt op wanneer na een verstoring een toename van de belasting of een verandering in het systeem aanleiding geven tot een toenemende en oncontroleerbare daling van de spanning. De belangrijkste factor die tot instabiliteit kan leiden is een tekort aan blindvermogen (zie ook par. 2.6.1) in het systeem. Het criterium voor stabiliteit is dat in een bepaalde situatie een injectie van blindvermogen op een bepaald punt in het systeem leidt tot een toename van de spanning op dit punt. Met andere woorden: een systeem is spanningsstabiel wanneer de V-Q gevoeligheid positief is voor elke bus in het systeem. Ook voor de spanningsstabiliteit is het nuttig een onderscheid te maken tussen de spanningsstabiliteit bij grote en bij kleine verstoringen.

- 1 Spanningsstabiliteit bij grote verstoringen omvat het vermogen van het systeem om de netspanning na grote verstoringen, zoals verlies van opwekvermogen en andere middelen onder controle te houden. Dit vermogen wordt bepaald door de eigenschappen van de belastingen, regelingen en beveiligingen. Het tijdsvenster loopt van enkele seconden tot tientallen minuten om de interacties van bijvoorbeeld ULTC's²⁵ en veldregelingen met begrenzingen te volgen.
- 2 Spanningsstabiliteit bij kleine verstoringen omvat het vermogen van het systeem om de netspanning bij kleine verstoringen, zoals veranderingen in de belasting onder controle te houden. ‘Load flow’-berekeningen kunnen worden gebruikt om de stabiliteitsmarges vast te stellen en om na te gaan welke factoren van invloed zijn op de stabiliteit.

.....
 25 ‘Under Load Tap Changers’ zijn regeltransformatoren die onder belasting kunnen schakelen naar een ander aftakking om de spanning bij te regelen.

MIDDELLANGE- EN LANGE-TERMIJNSTABILITEIT

Lange-termijnstabiliteit is een relatief nieuw onderzoeksgebied. Zij omvat effecten op de stabiliteit op lange termijn, bijvoorbeeld langzame verschijnselen zoals regelacties van turbines. In het algemeen omvatten deze stabiliteitsproblemen onjuiste reacties van systeemmiddelen, een slechte coördinatie van regelingen en beveiligingen, en onvoldoende reserve van vermogen en blindvermogen.

FACTOREN DIE EEN ROL SPELEN BIJ STABILITEIT

Zoals hiervoor is aangegeven, wordt de stabiliteit van elektriciteitsvoorzieningssystemen bepaald door een groot aantal factoren. Voor de analyse van de stabiliteit, de bepaling van de factoren die daarbij een essentiële rol spelen, en het ontwerpen van methoden die de stabiliteit verbeteren, is het nuttig stabiliteitsproblemen in verschillende categorieën onder te brengen. De opsplitsing in categorieën is gebaseerd op de volgende overwegingen:

- Het fysische karakter van de uiteindelijke instabiliteit.
- De grootte van de verstoring.
- De middelen, processen en het tijdvenster dat bekeken moet worden om de stabiliteit te bepalen.
- De meest geschikte rekenmethode.

In tabel 3.6.1 is het stabiliteitsprobleem, verdeeld in de diverse categorieën weergegeven. Het moge duidelijk zijn dat er tussen de verschillende blokken overlap is, zoals bij de blokken middellange termijn, lange termijn en spanningsstabiliteit. Met de juiste keuze van modellen voor de systeemcomponenten vormen de stabiliteitsberekeningen voor de middellange en de lange termijn een ideaal gereedschap voor de dynamische analyse van de spanningsstabiliteit. Evenzo treedt overlap op bij transiente, middellange- en lange-termijnstabiliteit. De drie categorieën maken allemaal gebruik van overeenkomstige analysetechnieken.

Sinds de jaren zestig is er veel aandacht besteed aan de transiente stabiliteit. Er zijn simulatieprogramma's en verbeterde modellen voor de synchrone machine, bekrachtigingssystemen en belastingen ontwikkeld. Daarenboven zijn significante verbeteringen bereikt in het transiente gedrag door snelle afschakelmogelijkheden, snelle bekrachtigingsregelaars, seriecaciteiten, enz.

De huidige trends in planning en bedrijfsvoering van elektriciteitsvoorzieningssystemen hebben geresulteerd in het vaker voorkomen van stabiliteitsproblemen. Economische en bestuurlijke randvoorwaarden zorgen voor minder redundantie in het systeem en het systeem wordt dichterbij zijn stabiliteitsgrenzen bedreven. Het gekoppeld bedrijf wordt verder geïntensiveerd en daarbij wordt gebruik gemaakt van HVDC-verbindingen. Verder wordt er meer

gebruik gemaakt van spanningsondersteunende middelen, zoals shuntcapaciteiten en SVC's. Ook het gedrag van belastingen is aan verandering onderhevig. Deze trends hebben bijgedragen aan significante veranderingen in het transient gedrag van moderne elektriciteitsvoorzieningssystemen. De modes van instabiliteit worden toenemend complex en vergen een uitgebreide beschouwing van de verschillende stabiliteitsaspecten. Spanningsstabiliteit en laagfrequente interlokale oscillaties vormen een toenemend probleem.

Als we kijken naar de toekomst waarin mogelijk naast grotere bulktransporten van energie over grotere afstanden (bijv. via HVDC-verbindingen) veel ongecontroleerde lokale opwekking zal plaatsvinden, dan mag het duidelijk zijn dat voor deze situatie veel scenario's bekeken moeten worden in het licht van de hiervoor geschetste stabiliteitscategorieën en criteria. Een eenduidig antwoord op de vraag of een elektriciteitsvoorzieningssysteem in die situatie nog wel stabiel te houden is, is niet te geven. Veel zal afhangen van de controlefuncties die in het systeem aanwezig zijn, zoals vermogensstabilizers, spanningsondersteuning en stroombeïnvloeding (FACTS, Flexible AC Transmission Systems) om ongewenste slingeringen tegen te gaan.

Tabel 3.6.1

Stabiliteit van elektriciteitsvoorzieningssystemen [Kundur, 1994].

Stabiliteit van elektriciteitsvoorzieningssystemen

Rotorhoekstabiliteit				Spanningsstabiliteit	
<ul style="list-style-type: none"> – vermogen om synchronisme te handhaven – vermogensbalans 				<ul style="list-style-type: none"> – vermogen om acceptabel spanningsprofiel te handhaven – reactieve vermogensbalans 	
Stabiliteit bij kleine verstoringen	Transiente stabiliteit	Middellange-termijnstabiliteit	Lange-termijnstabiliteit	Spanningsstabiliteit bij grote verstoringen	Spanningsstabiliteit bij kleine verstoringen
	<ul style="list-style-type: none"> – grote verstoringen – a-periodieke drift tijdens eerste slingingering – tijdvenster 10 seconden 	<ul style="list-style-type: none"> – grote spannings- en frequentieafwijkingen – snelle en langzame verschijnselen – tijdvenster tot enkele minuten 	<ul style="list-style-type: none"> – uniforme systeemfrequentie – langzame verschijnselen – tijdvenster tientallen minuten 	<ul style="list-style-type: none"> – grote verstoringen – schakelverschijnselen – dynamica van ULTC en belastingen – coördinatie van regelingen en beveiligingen 	<ul style="list-style-type: none"> – stationaire P/Q-V-relaties – stabiliteitsmarge, Q-reserve
Niet-oscillatorische instabiliteit	Oscillatorische instabiliteit				
<ul style="list-style-type: none"> – onvoldoende synchroniserend koppel 	<ul style="list-style-type: none"> – onvoldoende dempend koppel – instabiele regeling 				
	Lokale modes	Interlokale modes	Controle modes	Torsie modes	

3.7 GROOTSCHALIGE OPSLAG VAN ELEKTRICITEIT

*ir. P.T.M. Vaessen*²⁶

In een vrije markt kan het tijdelijk opslaan van grote hoeveelheden elektrische energie interessante economische voordelen voor handelsbedrijven bieden door slim in- en verkoopbeleid. Netwerkbedrijven kunnen de bestaande elektrische netwerken beter benutten. Het overbruggen van tijden van verminderde beschikbaarheid van (grootschalige) duurzame bronnen behoort ook tot de mogelijkheden.

Door de verschuiving in de opwekking naar meer en verschillende soorten van decentrale elektriciteitsproductie en (milieu)regelgeving zal toepassing van energieopslagsystemen aantrekkelijker worden. Bij grootschalige inzet van wind- en zonne-energie boven een bepaald opwekaandeel is energieopslag vanwege de continuïteit van de elektriciteitslevering een noodzaak. Het vaststellen van het maximaal inpasbare aandeel duurzame opwekking (PV), de juiste mix tussen opslagvormen, de capaciteit van de systemen en de toegangstijd hiervan is een belangrijke (nog onbeantwoorde) onderzoeksvraag. De vraag speelt zowel op centraal als op decentraal niveau en betreft ook de locatie van de opslagmiddelen in het transmissie- en distributienet.

In hoofdstuk 2 is ingegaan op verschillende vormen van energieopslag op huis- en wijkniveau. Voor opslag van energie in grote hoeveelheden zijn de volgende systemen bruikbaar:

- Pompaccumulatiesystemen (PAC) waarbij de potentiële energie van water, opgeslagen in stuwmeren, wordt gebruikt. De grootste systemen hebben een maximale omvang van 1.500 MW en zijn in staat 6 tot 8 uur onafgebroken elektriciteit te leveren. Er wordt gebruik gemaakt van klassieke beproefde technologie. De investeringskosten van een dergelijke installatie liggen in de orde van f 2500,- per kW. Door internationale koppelingen worden dergelijke systemen in de nabije toekomst ook voor Nederland toegankelijk. Momenteel wordt een 600 MW-verbinding via een gelijkstroomkabel met Noorwegen aangelegd (NorNed project). Typische toepassingen voor deze verbinding zijn pieklastlevering, opslag van elektriciteitsproductieoverschotten en reserveproductievermogen bij plotselinge uitval van een centrale. Voor kleinere capaciteitsbehoeften zoals 250 MW gedurende 4 uur in industriegebieden kunnen ondergrondse of bovengrondse drukluchtssystemen gebruikt worden. De investeringsniveaus hiervoor liggen in de orde van f 4000,- per kW.

.....
²⁶ KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
ptm.vaessen@mta10.kema.nl



Fig. 3.7.1

Generatoren in een hydro-elektrische centrale. Behalve de natuurlijke aanvoer van water door neerslag kan ook water met behulp van elektriciteit omhoog in het bekken gepompt worden. Zo fungeert het bekken als energieopslagmiddel. Bron: United States Department of the interior, Bureau of Reclamation - Lower Colorado region.

- Batterijsystemen maken gebruik van elektrochemische energieopslag. Alleen de loodaccutechnologie is volwassen en wordt zeer veel gebruikt, onder andere in de auto-industrie. Door de modulaire opbouw kunnen hiermee (in principe) grote systemen worden samengesteld. De grootste batterijsystemen in bedrijf hebben een omvang van 20 MW en een opslagcapaciteit van 20 MWh en worden vooral toegepast voor het leveren van vermogen als ‘draaiende reserve’ of ‘piekcentrale’. Het investeringsniveau voor een groot batterijsysteem is circa f 1000,- per kW. Kleinere systemen in de range vanaf 0,5 MW worden vooral gebruikt voor ‘peak shaving’ (het wegwerken van pieken) en spanningsstabiliteit. Batterijsystemen zijn snel met toegangstijden in het millisecondenbereik en kunnen overal gemakkelijk geplaatst worden in het transmissie- en distributienet. Naast de loodaccutechnologie, die een ‘negatief’ imago heeft ondanks de bereikte hoge mate van recycleerbaarheid (> 90%) zullen op termijn nikkelmetaalhydride (vanaf 2005) en redoxflowsystemen (na 2015) ingang vinden. Nikkelmetaalhydride systemen hebben een hogere energiedichtheid en zijn minder milieubelastend. Bij redoxflowsystemen wordt in tegenstelling tot klassieke batterijsystemen de elektrische energie opgeslagen in de vloeistof (elektrolyt) in plaats van in de platen. Het grote voordeel hiervan is dat de energie verpompbaar wordt en langdurig is op te slaan in tanks. Kleinere batterijsystemen tot een ondergrens van 1 tot 10 kWh zullen in toenemende mate worden toegepast in combinatie met duurzame opwekking in de laagspanningsnetten (zie hoofdstuk 2).

- Vliegwielen en Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) zullen door de zeer snelle toegangstijd van het vermogen en de grote verhouding tussen piekvermogen en (geringe) energie-inhoud vooral worden toegepast om de spanningskwaliteit en -stabiliteit te verbeteren of om in industriële omgevingen kortstondig lokaal piekvermogen te absorberen of te leveren. Naar verwachting zullen grotere systemen met een omvang van 10 MW, 50 kWh na 2010 beschikbaar komen. Het doel van de ontwikkeling van groot-schalige SMES-systemen is een investeringsniveau van ca. f 2000,- per kW. Een overzicht wordt gegeven in tabel 3.7.1.

Tabel 3.7.1

Grootschalige opslagsystemen met een indicatie van realiseerbare vermogens en investeringen per kW.

Opslagsysteem	Orde van grootte van het realiseerbare vermogen (kW)	Investering/kW
PAC	1.500	2.500
drukluft	250	4.000
batterij	20	1.000
vliegwiel	10	
SMES	10	2.000 (doel)

Meer informatie over de genoemde systemen is te vinden in deel 2, hoofdstuk 5, Opslagmiddelen.

3.8 GROOTSCHALIGE PROJECTEN IN OPWEKKING EN INTERCONNECTIE

ir. J.M. Meij

Een idee dat sterk tot de verbeelding spreekt is een mondiaal elektriciteitsnet, een 'supergrid' dat de voornaamste regionale netwerken met elkaar en met belangrijke centrale bronnen van (bij voorkeur duurzame) elektriciteit verbindt. Naarmate de technologie voortschrijdt zijn er steeds meer deskundigen die het enorme potentieel van een dergelijk supergrid onderschrijven. De Amerikaanse organisatie GENI²⁷ is een bekend voorvechter van dit idee. Hoe utopisch is nu deze gedachte?

In ieder geval dient een integrale beschouwing van de locaties en het dynamische gedrag van potentiële bronnen en afnemers aan de basis te staan van het ontwerp van het supergrid.

Het valt te verwachten dat in verschillende deelprojecten in ieder geval een gedeeltelijk supergrid zal ontstaan. De technologie is beschikbaar. De problemen liggen vooral op politiek en in mindere mate op economisch gebied.

Verschillende bronnen geven voordelen van interconnecties en de ontwikkeling van grote duurzame energieprojecten. Naast de in eerdere paragrafen genoemde voordelen kunnen we noemen:

- De aanwezigheid van een interconnectie maakt de ontwikkeling van additionele energiecentrales in de nabijheid van het pad van de interconnectie veel goedkoper, omdat de infrastructuurkosten beperkt zijn.
- De betrokken landen kunnen voordelen hebben van de aanleg van grote projecten voor de winning en de transmissie van duurzame energie. De export van duurzame energie is geen aantasting van de rijkdommen van een land, maar vormt eerder een blijvende bron van inkomsten en een drijfveer voor ontwikkeling. De grote Europese markt voor elektriciteit maakt een project zoals Grand Inga economisch haalbaar, en scheidt daarmee ook een bron van goedkope energie voor de Afrikaanse landen. Over het algemeen zal bij de constructie van de installaties veel lokale arbeid ingeschakeld worden, wat ten goede zal komen aan de lokale economieën [Paris, 1992].
- De Noord-Afrikaanse landen kunnen door de thermische zonnecentrales duurzame elektriciteit exporteren en daarmee blijvende inkomsten genereren uit anders ongebruikt woestijnland. Wellicht dat hier ook aanknopingspunten gevonden kunnen worden om de verwoestijning tegen te gaan.

Zoals gezegd, het supergrid staat niet op zichzelf, maar moet gezien worden als een verbinding tussen grootschalige (duurzame) bronnen en regionale netten.

We kunnen diverse voorbeelden van projecten en plannen voor (zeer) grootschalige opwekking van elektriciteit geven:

- Hydro-elektrische centrales: Grand Inga (in ontwikkeling), Itaipu (bestaand), Three Gorges (in ontwikkeling).

.....
27 [Http://www.geni.org/](http://www.geni.org/)

- Terrestrial solar power plants: grote oppervlakten in onbewoonde gebieden waar met zonthermische centrales elektriciteit opgewekt wordt. PV is relatief kostbaar en in deze omgeving is er voldoende direct zonlicht beschikbaar voor de goedkopere thermische opwekking. Een studie van het DLR [Klimke, 1997] noemt als potentiële locaties voor dergelijke centrales de VS (Nevada), Argentinië (Cordilleras), Algerije (Sahara), Namibië (Kalahari-woestijn), Saudi-Arabië (Ar-Rub'al Hali), China (Kunlunshan), Australië (West-Australië).
- Grootschalige windparken kunnen op veel plaatsen met een hoog gemiddeld windaanbod ontwikkeld worden, mede afhankelijk van de infrastructuur. Hier zijn naast woestijnen in kustgebieden ook ondiepe zeeën interessant.

Daarnaast zijn er reeds veel bestaande internationale koppelnetten en verbanden. Genoemd werden reeds de UCPT, CENTREL, CIS en NORDEL. Ook voor interconnecties tussen verschillende verbanden bestaan reeds plannen:

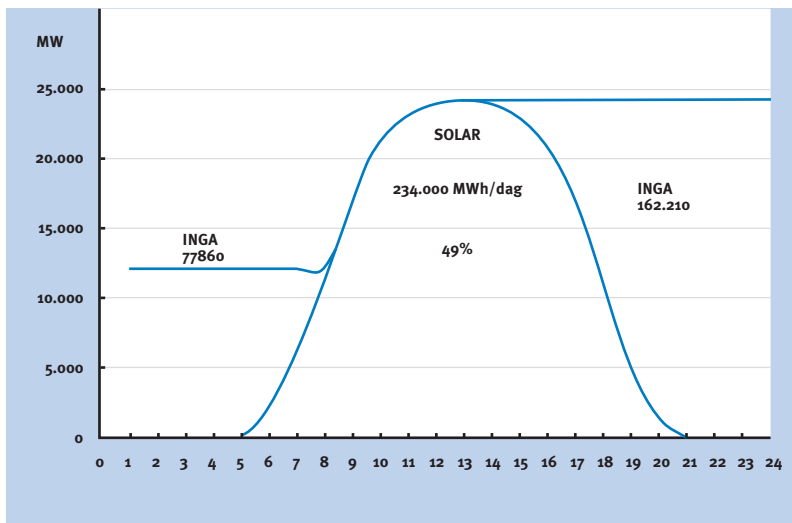
- In Europa tussen UCPT en NORDEL, de Baltic ring (BALTREL) tussen de UCPT en de Baltische staten.
- In Oost-Azië bestaan er plannen voor een Rusland-Japan interconnectie (3.000 km, 10 GW), een Rusland-China-Zuid Korea interconnectie (1.800 km, 3 GW), en een Oost-Siberië-China interconnectie (2.200 km, 3 GW) [Belyaev, 1998].
- In Afrika en in het Midden-Oosten leven plannen voor de 'Mediterranean Power pool' (3 GW) [Dostrovsky, 1996] en het Noord-Afrikaanse supergrid (4 - 20 GW in 2010, resp. 2030) [Fouad Taher, 1998].

Gezien de aanwezige duurzame bronnen lijkt Afrika een belangrijke rol te kunnen spelen in de mondiale energievoorziening. De met zonnecentrales opgewekte elektriciteit in het noordelijke deel van Afrika en Saudi-Arabië heeft een spreiding met een maximum tijdsverschil van drie uur, wat onvoldoende is om 24 uur lang elektriciteit te leveren. In combinatie met de Grand Inga kan echter een groot deel van de Afrikaanse en Europese elektriciteitsbehoefte op een duurzame wijze gedekt worden. Fig. 3.8.1 geeft een rekenvoorbeeld van deze combinatie. Studies tonen aan dat de elektriciteit van de Grand Inga tegen concurrerende prijzen in Europa te leveren is. Dit kan mogelijk een belangrijke eerste drijfveer vormen voor een dergelijk project.

In Oost-Azië ligt de totstandkoming van een supergrid voor de hand voor de levering van elektriciteit uit de bestaande overcapaciteit in de conventionele en hydro-elektrische centrales in Oost-Rusland en Oost-Siberië. Levering kan plaatsvinden naar China, Zuid-Korea en Japan. Op termijn zou dit grid deel kunnen uitmaken van het mondiale grid en met hydro-elektrische (Z. Yakutia, Angara-Yenisei, Boguchansk, Bratsk) centrales en te ontwikkelen getijdencen-

Fig. 3.8.1

Gesimuleerde elektriciteitslevering van Afrika naar Europa met vier zonnecentrales in combinatie met de Grand Inga. Er wordt uitgegaan van vier zonnecentrales van 29,2 km² per stuk die een uur van elkaar verwijderd zijn [Dostrovsky, 1996].



trales in het Russische verre oosten (Tugursk en Penzhinsk) duurzame energie kunnen leveren [Belyaev, 1998].

Noord-Amerika, Zuid-Amerika en Australië zullen zich waarschijnlijk pas in een laat stadium bij het mondiale supergrid aansluiten vanwege de enorme transmissieafstanden overzee (De kosten voor High Voltage DC (HVDC)-zeekabels liggen nog een factor 10 hoger dan de kosten voor lijnen op land). Wel zou er in een eerder stadium een interconnectie kunnen ontstaan tussen Noord- en Zuid-Amerika.

Fig. 3.8.2 toont een aantal supergrids, de voornaamste gebruikscentra en de voornaamste plaatsen van duurzaam potentieel.



Zie pagina 178 voor een kleurenweergave van figuur 3.8.2.



3.9 CONCLUSIES

De voorgaande paragrafen leiden tot een aantal conclusies ten aanzien van de nationale en mondiale elektriciteitsvoorziening.

LIBERALISATIE

De elektriciteitsproductie en -levering zijn in 2020 geheel geliberaliseerd en onderhevig aan concurrentie. Het beheer van transport en distributie is losgekoppeld van de productie en ondergebracht in aparte partijen die door de overheid worden gereguleerd. Daarnaast zijn handelaars en makelaars actief. Schaalvergroting en internationalisatie lijken de sleutelwoorden voor de productiesector in de eerstkomende jaren. De verwachting is dat er in 2020 naast vele regionale bedrijven een klein aantal mondiale spelers zullen zijn. Kansen op de langere termijn lijken het benutten van nieuwe technologieën zoals wind, kleinschalige warmte/kracht (w/k)-koppeling, biomassa en hoog-rendements-opwekking te zijn. Distributiebedrijven zullen zich vooral gaan onderscheiden door het aanbieden van nieuwe energiediensten, adviezen en dergelijke.

LIBERALISATIE EN INVESTERINGEN

Een gevreesde negatieve consequentie van de liberalisatie van de elektriciteitssector is een verminderde aandacht voor onderzoek en ontwikkeling, en voor investeringen in duurzame energie en efficiëntieverhoging. Een recent rapport van de Amerikaanse milieuorganisaties EWG [EWG, 1998] toont dat elektriciteitsbedrijven in de VS de laatste vijf jaar 45% minder hebben geïnvesteerd in efficiëntieverhoging. Er bestaat dus wel degelijk grond voor deze angst. Ook in Nederland zal na de liberalisatie in eerste instantie een rationalisatie van de activiteiten plaatsvinden, aangevuld met minder inspanningen voor onderzoek en ontwikkeling en maatregelen voor efficiëntieverhoging. Wie echter op de lange termijn mee zal willen blijven doen, zal moeten blijven investeren in nieuwe ontwikkelingen. De verwachting is dan ook dat deze teruggang van tijdelijke aard zal zijn. Ook de vraag naar nieuwe diensten kan daarbij van belang zijn. Met inspanningen op het gebied van milieu en duurzaamheid ligt het iets moeilijker. Behalve de meerwaarde van groene stroom voor een beperkte groep consumenten levert een verdere inspanning in duurzaamheid niet direct financieel voordeel op. Grotere inspanningen zijn dan ook sterk afhankelijk van milieudoelstellingen en regulering door overheden.

WINNING VAN DUURZAME ELEKTRICITEIT IN NEDERLAND

Onlangs het vrijwel ontbreken van hydro-elektrische bronnen heeft Nederland voldoende mogelijkheden voor het opwekken van grote hoeveelheden duurzame energie. De voornaamste mogelijkheden voor grootschalige opwekking liggen in de winning van wind- en van zonne-energie. Het Nederlands Continentaal Plat

biedt daarbij plaats voor zeer grootschalige windparken, in het uiterste geval tot meer dan de totale energieconsumptie van 1996. Op de gunstig gelegen daken in Nederland is plaats voor PV-modulen tot ca. 10% van de elektriciteitsconsumptie in 1996. De plaatsing van kleine hoeveelheden PV op daken is van groot belang voor de betrokkenheid van de energieconsument. Puur economisch gezien blijkt het (bij het huidige prijsniveau van PV) voordeliger te investeren in zonnecentrales in Zuid-Europa of Noord-Afrika en in de koppelnetten. Biomassa zal een rol spelen onder andere door de benutting van organische afvalstromen.

WINNING VAN DUURZAME ELEKTRICITEIT OP WERELDSCHAAL

Ook op mondiaal niveau blijken zon en wind de beste groeimogelijkheden te bieden. Het totale potentieel is in beide gevallen afhankelijk van de beschikbare oppervlakte en kan een veelvoud bedragen van de totale wereldenergieconsumptie. De maximale bijdrage van hydro-elektriciteit is 50 tot 70% van het elektriciteitsgebruik in 2020, maar zal om sociale en ecologische redenen waarschijnlijk beperkt blijven tot 3 à 4 PWh, ofwel 10 tot 15% van het elektriciteitsgebruik in 2020. Getijdenenergie is locatiegebonden en zal maximaal 0,7 tot 2,2% van het elektriciteitsgebruik in 2020 kunnen leveren. De geschatte potentiële bijdrage van golfslagenergie is ca. 5%, maar deze technologie moet eerst verder ontwikkeld worden.

NATIONALE KOPPELNETTEN

Door liberalisatie en door grote inspanningen in de toepassing van grootschalig opgewekte duurzame energie is het waarschijnlijk dat uit de winningslocaties op zee of in het buitenland grotere transporten dan tot nu toe zullen plaatsvinden. Niet alleen voor binnenlands gebruik, maar ook voor transport naar buurlanden. Het koppelnet wordt steeds meer een transportnet.

Als de internationale transporten per internationale verbinding toenemen tot meer dan 2 GW, zal tenminste in de verbindingen tussen de 380 kV- ring en de buitenlandse netten een grotere capaciteit geïnstalleerd moeten worden. Als dit niet gebeurt, treden er niet direct capaciteitsproblemen op, maar dan komt de reservecapaciteit in het systeem (voor uitval en onderhoud) wel in het gedrang. Dit betekent dat de betrouwbaarheid en de leveringszekerheid achteruitgaan. In het 380 kV-ringnet geldt hetzelfde vanaf 3,3 GW. De vergrote aanvoer uit een centraal punt maakt een uitbreiding van het transformatorvermogen in de deelnetten noodzakelijk, gevolgd door een uitbreiding van het aantal inkooppunten in deze netten.

INTERNATIONALE KOPPELNETTEN

Twee ontwikkelingen zullen bepalend zijn voor de uitbreiding van de internationale koppelnetten. Ten eerste de automatische expansie van het net, doordat de aangesloten landen aan de rand van het gekoppelde gebied er voordeel bij

hebben als ze ook buiten het gebied energie met hun buurlanden kunnen uitwisselen. Ten tweede is dat de toename van grootschalige duurzame opwekking op daarvoor gunstige locaties. In het eerste geval zal de toenemende grootte van het net maatregelen voor stabilisatie nodig maken. In het tweede geval zal een nieuw HVDC (High Voltage DC)-supernet moeten ontstaan met een zeer grote capaciteit dat de verschillende verzorgingsgebieden met de bron verbindt. In de onderliggende netten zal ook de capaciteit van een aantal verbindingen uitgebreid moeten worden. In beide gevallen zullen bij toenemende transporten Unified Power Flow Controllers (UPFC's²⁸) moeten worden gebruikt om het vermogen te verdelen over de verbindingen. Als beide ontwikkelingen gelijktijdig plaatsvinden, kan de HVDC-verbinding gebruikt worden om de AC (wisselstroom)-verbindingen stabiel te maken. Voorwaarde is wel dat bij de HVDC-converterstations gedurende enige minuten snel opvraagbaar vermogen beschikbaar is. Dit dient bij de converterstations opgeslagen te zijn (zie deel 2 hoofdstuk 5).

Ook de zich ontwikkelende landen zullen van het gebruik van lokale netten opschuiven in de richting van internationale koppelingen. Door de aanleg van een supernet naar de vraagcentra wordt het mogelijk dat een aantal van deze landen exporteurs van duurzame energie worden. Supernetten tussen Afrika en Europa en Rusland en Azië kunnen interessante voordelen bieden. Sociale en economische stabiliteit is echter een voorwaarde voor het slagen van dergelijke projecten. Zowel de nationale als de internationale verbindingen worden beter haalbaar als de ontsluiting van fossiel opgewekt vermogen wordt gecombineerd met de ontsluiting van duurzaam vermogen.

STABILITEIT VAN HET ELEKTRICITEITVOORZIENINGSSYSTEEM

De toekomstige situatie van bulktransporten over grote afstanden gecombineerd met veel ongeregelde lokale opwekking geeft veel onzekerheid over de stabiliteit van het elektriciteitsvoorzieningssysteem. Zeker is dat in toenemende mate vermogensstabilisatie, spanningsondersteuning en stroombeïnvloeding zal moeten plaatsvinden. Hiervoor zullen verschillende soorten Flexible AC Transmission Systems (FACTS²⁹) worden ingezet.

OPSLAG

Ook bij een grootschalige toepassing van wind- en zonne-energie boven een bepaald opwekaandeel is energieopslag noodzakelijk vanwege de continuïteit van de elektriciteitslevering. Naast het verder benutten van hydro-elektrische centrales voor dit doel komen ook andere opslagmiddelen (elk met hun eigen voor- en nadelen) in aanmerking. Zo kan het voor de stabiliteit zo belangrijke snel beschikbare vermogen opgeslagen worden in SMES, vliegwielen, condensatorbanken of accu's.

.....
²⁸ Zie par. 3.6.4. en deel 2, par. 4.2.2.

²⁹ Zie par. 3.6.4. en deel 2, par. 4.2.2.

KANSEN VOOR INDUSTRIE EN DIENSTEN

In Nederland is geen krachtige mondiaal opererende 'high tech' elektrotechnische industrie of dienstverlening aanwezig. De kansen voor industrie en diensten zijn dan ook beperkt tot niches. Toch zijn op grond van de informatie in dit hoofdstuk enige kansen te noemen:

- De advisering van partijen die toegang willen krijgen tot de liberale markt en de regionale elektriciteitshandel met het (versterkte) koppelnet.
- Diensten op het gebied van ontwerp, planning, realisatie en bedrijfsvoering van elektriciteitsnetten op basis van de in Nederland aanwezige expertise in dit veld.
- Op de lange termijn zijn de bedrijven die investeren in grootschalige transportinfrastructuur en opwekking van duurzame energie verzekerd van een plaats in de markt.
- In Nederland lijken de beste kansen voor technologieontwikkeling te liggen op het gebied van duurzame technologieën, zoals wind en PV. Ook micro en mini w/k is wellicht een kansrijk gebied.
- Het schoon, kleinschalig en met een hoog rendement verstromen van de marginale (offshore) gasvelden zou een Nederlandse specialiteit kunnen worden.
- Het ontwikkelen en maken van Medium Voltage DC (MVDC)-kabels. Nederland kent een sterke verkabeling en een kabelindustrie. In het verlengde daarvan ligt het ontwikkelen van het concept van een MVDC-bus met 'klikbare' convertoren.
- Onderzoek en ontwikkeling van nieuwe elektromagnetische technologie die raakvlakken heeft met specifieke Nederlandse kennisgebieden, bijvoorbeeld in combinatie met water, voor vaste, drijvende en onderwaterconstructies. Ook de baggerervaring kan daarbij een rol spelen (bijv. voor efficiënte methoden voor het leggen van zeekabels?).

AANBEVELINGEN VOOR ONDERZOEK

TOEPASSINGEN VAN DC IN TRANSPORT EN DISTRIBUTIE

De vermogens die moeten worden getransporteerd worden groter en het elektriciteitsgebruik per oppervlakte-eenheid (vooral in de steden) neemt toe. De oorzaak is een toenemend aantal functies dat met elektriciteit vervuld wordt, waarbij elektrisch vervoer een belangrijke factor kan zijn (zie par. 4.4.2). Voor een verhoging van de capaciteit van het net kan overwogen worden om meer DC (gelijkstroom) te gebruiken bij het transporteren en distribueren van elektriciteit. Dit kan bij dezelfde maximale spanning een grotere transportcapaciteit opleveren. Bij de opmerkingen in hoofdstuk 2 over de toepassing van DC in de

woning werden reeds een aantal problemen bij de toepassing van DC genoemd, zoals de beveiliging en het schakelen. De indicaties zijn dat deze problemen met moderne vermogenselektronica op te lossen zijn. De volgende vraag wordt dan waar de toepassing van DC de grootste voordelen zal opleveren. Nieuwe onderzoeksgebieden zijn vooral de midden- en laagspanningsnetten.

Interessante vraagstukken zijn dan:

- Kan met DC (gedeeltelijk) van bestaande kabels en lijnen gebruik gemaakt worden? (Kunststof kabels zijn tot nu toe niet geschikt voor DC-toepassingen).
- Welke isolatiematerialen zijn geschikt voor DC?
- Welke netstations en onderstations zijn nodig?
- In hoeverre moet met het aanleggen van kabels rekening gehouden worden met een eventuele omschakeling naar DC?

REGEL- EN BEVEILIGINGSTECHNIEK VOOR DC-NETTEN

*dr.ir. B. Gravendeel*³⁰

Het huidige AC-net kent een hiërarchische structuur in beheer en beveiliging. De gebruikte beveiligingscomponenten hebben een reactietijd die vele 50 Hz cycli (à 20 ms) lang kan zijn.

Voor DC-systemen ontstaan nieuwe mogelijkheden om een net te beveiligen en te beheren. Een DC-net zou als een 'vermogensbus' gezien kunnen worden, waarbij gebruikers onder bepaalde beheers- en afschakelvoorwaarden op de bus mogen aansluiten.

Het beheer van een dergelijk systeem biedt veel mogelijkheden. Dit impliceert dat er ook veel geregeld moet worden in dit systeem. Uiteindelijk moet het gaan om een zo economisch mogelijk transport en distributie van elektrische energie.

Ten behoeve van de reactiesnelheid in zo'n systeem moeten de voordelen van vermogenselektronische omzetterten ten volle benut worden. Een van deze voordelen is het beperken van kortsluitstromen. Een moderne vermogensomzetter meet in ongeveer 20 μ s dat er iets mis is en kan daarop binnen de volgende 10 μ s reageren. De stroomopbouw is in deze 30 μ s dermate gering dat de mechanische uitvoering van de stroomvoerende onderdelen van de stations veel lichter kan zijn dan bij een AC-net met een vergelijkbare transportcapaciteit.

Er zou onderzoek moeten plaatsvinden om te komen tot een ontwerp van een kosteneffectief beheers- en beveiligingssysteem.

Een belangrijk aspect van het transport- en distributienet is het begrip restlevensduur. Restlevensduur is de levensduur van een component met een gedefinieerde mate van waarschijnlijkheid voordat de component faalt.

Wanneer een kabelverbinding na zijn geprojecteerde levensduur van bijvoorbeeld 30 jaar nog een restlevensduur heeft van 10 jaar (met voldoende betrouwbaarheid), geeft dit een uitstel van een dure vervanging. Vooral wanneer deze kabelverbinding door het centrum van een stad loopt kunnen de kosten hoog zijn. Voor het huidige AC-net wordt veel onderzoek gedaan (o.a. bij KEMA en de TU Delft) naar de bepaling van de restlevensduur. Er worden metingen uitgevoerd, theorieën opgesteld en deelproeven gedaan om de schatting van de restlevensduur zo nauwkeurig mogelijk te maken.

Voor DC-systemen is de restlevensduur uiteraard net zo belangrijk als voor AC-systemen. Over de invloed van DC-belasting van elektrische componenten op de restlevensduur is veel minder bekend dan over AC-belasting. Zelfs de parameters waarnaar men moet kijken om een goede levensduurschatting van DC-belasting te maken, zijn nog niet goed gedefinieerd. Alleen uit de toepassing van HVDC zijn praktijkgegevens op het punt van levensduur beschikbaar.

In een DC-systeem bevinden zich behalve componenten die met DC belast worden (HVDC-kabels) ook componenten, zoals isolatiematerialen in omzetteren en filters die met gepulste DC belast worden. Een levensduurschatting voor dit soort belasting is nog niet te maken. Ook een definitie van de parameters die van belang zijn is nog niet eenduidig. Nader onderzoek op dit punt is dan ook zeer gewenst.

REFERENTIES

- Baker, C., *Tidal power*, Energy Policy, **19**(8), pp. 792-798 (1991)
- Bakker, C., e.a., *Windenergie offshore: watt anders – een haalbaarheidsstudie naar 10.000 MW offshore windenergie in de Noordzee*, Adviesbureau E-Connection (1997b)
- Bakker, C., e.a., *Windturbines langs spoorwegen*, in: Smits, I.J., L.A.G. Arkesteijn, *Nederlandse Spoorwegen en windenergie, een verkenning naar de mogelijkheden*, Adviesbureau E-Connection, Delft (1997a)
- Belyaev, L.S., e.a., *Ways of creating international connections in East Asia and environmental implications*, IEEE Power Engineering Review, August (1998)
- Beurskens, H.J.M., W.C. Sinke, *Renewable energy technologies: status and expectations*, ECN (1997)
- Bohlin, S., e.a., *Electrical transmission*, Proceedings of World Clean Energy Conference, Geneva, 4-7 November (1991)

³¹ HMA Power Systems,
Postbus 3007
2980 DA Ridderkerk
B.Gravendeel@hma.nl

- Bonnet, D., e.a., *Nutzung regenerativer Energie*, Thomas Bonn, Gräfelting, Technischer Verlag Resch, Köln, Verlag TÜV Rheinland (1988)
- Boyle, G., *Renewable energy for a sustainable future*, Oxford University Press (1996)
- CNES, *Vegetation 11-20 May 1998* (1998)
- Corten, F.G.P., G.C. Bergsma, *Het potentieel van PV op daken en gevels in Nederland*, Centrum voor Energiebesparing en schone technologie (CE) (1995)
- Dostrovsky, I., *Integration of solar energy in multinational networks*, Lecture on Sun Day Symposium From Basic Research to Industry, Weizmann Institute of Science (1996)
- ECN, *Nationale energieverkenningen 1995-2020*, ECN Beleidsstudies (1998)
- Edmunds, J., *Global energy*, Oxford University Press (1985)
- EUREC, *The future for renewable energy*, James & James, London (1996)
- Europese Windenergie Vereniging, *Strategy papers: wind energy, the facts*, Europese Windenergie Vereniging (1998)
- EZ, *Beleidsnotitie stroomlijnen*, Ministerie van Economische Zaken (1996)
- EZ, *Elektriciteitswet*, Ministerie van Economische Zaken (1998)
- EZ, *Olie en gas in Nederland 1996*, Ministerie van Economische Zaken (1997)
- Fouad Taher, *North African Super-Grid, potentials and environmental implications*, IEEE Power Engineering Review, August (1998)
- Fu, Y., A. Verkooijen (eds.), *Technische kentallen met betrekking tot de infrastructuur van de elektriciteitsvoorziening*, KEMA, Arnhem (1994)
- Golob, R., *The almanac of renewable energy*, Henry Holt and Company (1993)
- Idema, L.R., P.C.W. Voet, *Grootschalige windenergie*, Nederlandse Duurzame Energie Conferentie (1997)
- IEO, *International energy outlook 1998*, Energy Information Administration, USA (1998)
- Johansson ref. naar Moira en Poole, *Hydropower and its constraints*
- Johansson, T.B., e.a., *Renewable energy*, Island Press, Washington D.C. (1992)
- Kaske, G., e.a., *Comparison between high-voltage direct-current transmission and hydrogen transport*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. **16**, No. 2, pp. 105-114 (1991)
- Klimke, M., *New concepts for terrestrial and orbital solar power plants for future European power supply*, Space Power Systems'97 Conference, Montreal, Canada, August (1997)
- Kuik, G.A.M. van, *Wind verdient beter*, intreerede, Technische Universiteit Delft (1998)
- Kundur, P., *Power systems stability and control*, McGraw-Hill, New York (1994)
- Lako, P., D.J. Gielen, *European biomass scenarios and the need for import of biomass*, ECN-R-97-009 (1997a)

- Lako, P., Ybema J.R., *CO₂ abatement in Western European power generation*, ECN-C-97-053 (1997b)
- Lazenby, J., e.a., *International cooperation and the development of Africa's hydro resources*, Proceedings of World Energy Council, 15th congress, Madrid, pp. 20-25, September (1992)
- NASA, *Surface Solar Energy (SSE) data set 1.0*, Langley Research Center (1997)
- Novem, *Haalbaarheidsstudie demonstratieproject near shore windpark*, Novem (1997)
- Novem, *Wind werkt - De toepassing van windenergie in Nederland*, Novem (1996)
- Ogden, J.M., J. Nitsch, Solar hydrogen, in: Johansson, T.B., e.a., *Renewable energy – sources for fuels and electricity*, Island Press, Washington D.C. (1993)
- Okken, P.A., *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. **18**, pp. 319-323 (1993)
- Paris, L., *Grand Inga case*, IEEE Power Engineering Review, June (1992)
- Pearce, F., *Catching the tide*, New Scientist, 20 June (1998)
- Smits, F., *Asfalt als zonnecollector*, Energietechniek, september (1998)
- Smokers, R., *Persoonlijke mededelingen*, 3 december (1993)
- Twidell, J., *Renewable energy resources* (1986)
- UCPTÉ, Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité, www.UCPTÉ.org (1998a)
- UCPTÉ, *memo 1997*, Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité (1998b)
- Unander, F., I.F.E. Kjeller, *Persoonlijke mededelingen*, Noorwegen, 16 December (1993b)
- Unander, F., I.F.E. Kjeller, *Persoonlijke mededelingen*, Noorwegen, 6 December (1993a)
- V en W, *Scheepvaartverkeer Noordzee*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, DGSM (1995), <http://www.minvenw.nl/dgsm/mainmap.htm>
- Vreuls, H.J.J., *Novem energiegids*, Novem (1998)
- WEDA, (*World Energy system DAtabase*), Energy Information Administration, USA Access Database (1998)
- WEPS, (*World Energy Projection System*), Energy Information Administration, USA (1998), Excel spreadsheets te downloaden van <http://www.eia.doe.gov>
- Ybema, J.R., e.a., *Scenarios for Western Europe on long term abatement of CO₂ emissions*, ECN-C-97-051 (1997)

1

4 Elektriciteit in vervoer

4.1 INLEIDING

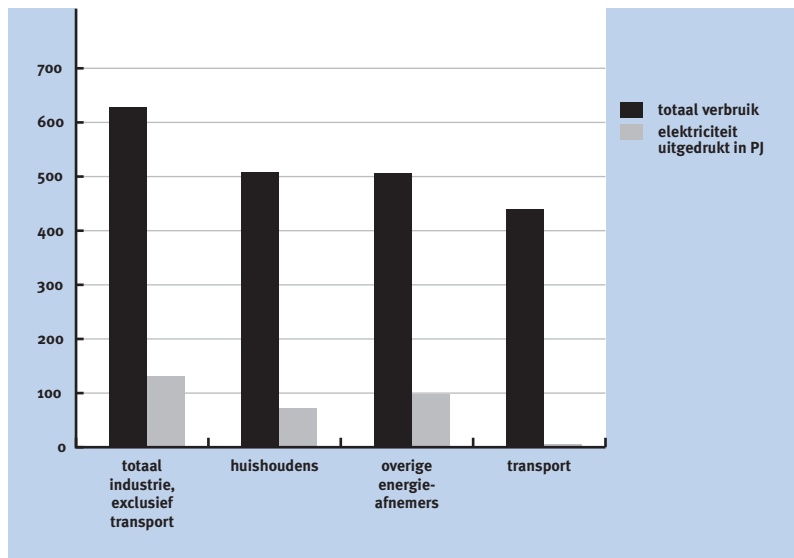
ir. J.M. Meij

Bekende elektrische voertuigen zoals trein, tram en trolleybus maken gebruik van speciale elektrische infrastructuur voor de energietoevoer. Ten opzichte van voertuigen met een verbrandingsmotor hebben deze voertuigen het voordeel dat ze betrouwbaarder zijn en langer meegaan. Zij zijn niet alleen stiller, maar kennen ook lagere emissies doordat de stroomopwekking in Nederland een efficiënter en schoner proces is dan de verbranding in het voertuig. Het nadeel van trein, tram en trolleybus is dat zij permanent gebonden zijn aan de stroomvoorziening. Daarom wordt steeds betere technologie ontwikkeld om vervoermiddelen voor beperkte of onbeperkte tijd onafhankelijk te maken van de elektrische infrastructuur. Deze onafhankelijkheid is gebaseerd op elektriciteitsopslag of op elektriciteitsproductie aan boord van het voertuig. De (batterij-elektrische) voertuigen met opslag kennen dezelfde voordelen als de trein en tram. Voor de (hybride) voertuigen met opwekking aan boord zijn de specifieke voordelen afhankelijk van de configuratie. Zowel de batterij-elektrische als de hybride voertuigen onderscheiden zich ook van conventionele voertuigen door de mogelijkheid remenergie terug te winnen. Dit onderscheid zou op de lange termijn de balans wel eens in hun voordeel kunnen laten doorslaan.

Fig. 4.1.1 toont dat het aandeel van het personen- en goederenvervoer in het energiegebruik significant is (21%), maar dat nog slechts een klein deel ervan met elektriciteit gerealiseerd wordt (1,3%).

Fig. 4.1.1

Energieverbruik in de transportsector in vergelijking met industrie en huishoudens 1996. Bron: CBS, *De Nederlandse energiehuishouding* [CBS, 1997; CBS, 1998]. De grafiek laat alleen het gebruik voor energetische doeleinden zien, gebruik als grondstof is buiten beschouwing gelaten.



Hier valt dus met elektrificatie nog veel te winnen voor het milieu, het energiegebruik en de economie (Een gemiddelde rendementsverbetering van 20% [Janse, 1997] zou voor het verbruik van 1996 een besparing van 88 PJ opleveren). Daarom wordt in dit hoofdstuk op basis van een aantal uitgangspunten een toekomstbeeld geschetst waarin vele vormen van elektrisch vervoer een plaats hebben.

Vervolgens worden meer kwantitatieve uitspraken gedaan aan de hand van scenario's uit de Sep-studie 'Verkeer en vervoer in de 21e eeuw' [Gerwen, 1998]. Hierin wordt onder andere aangegeven wat de penetratiegraad van verschillende aandrijfconcepten zal zijn voor de verschillende scenario's. Ook het gevolgde proces en de relaties tussen verkeers- en vervoerssystemen, voertuigen en aandrijfsystemen wordt besproken. De verkeers- en vervoersconcepten en elektrische voertuigsystemen komen in par. 4.3 aan de orde. In de twee 'duurzame' scenario's van de Sep-studie wordt een substantieel deel van het personen- en goederenvervoer verzorgd door hybride en batterij-elektrische voertuigen. De gevolgen van de beschreven toename in elektrisch vervoer voor de elektrische infrastructuur worden toegelicht in par. 4.4.

Par. 4.5 gaat dieper in op de verschillende technologieën die voor vervoersdoeleinden belangrijk zijn. Net als in de vorige hoofdstukken wordt voor achtergrondinformatie over deze technologieën verwezen naar deel 2.

Het hoofdstuk wordt besloten met conclusies, kansen en een agenda voor onderzoeksprojecten.

UITGANGSPUNTEN

Efficiënter gebruik van energie, minder uitstoot van schadelijke stoffen en minder lawaai zullen de vervoersmogelijkheden van de toekomst bepalen.

Daarnaast is het van belang dat de energie die nodig is voor het vervoer ook gewonnen kan worden uit duurzame energiebronnen, zodat ook de vervoersector kan bijdragen aan de doelstellingen voor duurzame energie in 2020.

Door elektriciteit als energiedrager te gebruiken, is het mogelijk een hogere efficiëntie en een lagere uitstoot van schadelijke stoffen te bereiken. Bij lagere rijsnelheden (zoals in de bebouwde omgeving) kunnen ook de geluidsemissies aanmerkelijk worden verminderd.

Voor het huidige vervoer geldt congestie als een van de grootste vraagstukken. Introductie van elektrische aandrijving als vervanging voor de huidige technologieën biedt hier geen oplossing. Oplossingen voor het congestieprobleem vallen buiten het kader van deze studie. We volstaan met de stelling dat elektrisch vervoer goede mogelijkheden biedt voor het toepassen van nieuwe vervoersconcepten en systemen waarin verkeers- en voertuiggeleiding een rol spelen. Dat komt enerzijds door de grote betrouwbaarheid, anderzijds door de goede regelbaarheid en besturingsmogelijkheden.

De deskundigen die hebben bijgedragen aan dit hoofdstuk zijn ervan uitgegaan dat de behoefte aan mobiliteit niet zal afnemen in de komende decennia. Wel zal de vervulling van de behoefte schoner en zuiniger moeten worden, en de gebruikte vervoermiddelen beter afgestemd op de eigenlijke vervoerbehoefte. Technologie kan daarbij een belangrijke rol spelen.

Fig. 4.1.2

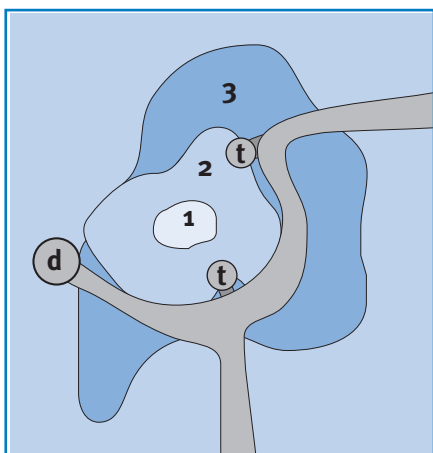
[links] *Principeschema van de toepassing van zones en corridors in een stad.*

1. Stadscentrum, wooncentrum.
2. Stadsperiferie en randgemeenten.
3. Randstedelijke gebieden.
4. Corridor.
- t. Transferpunt.
- d. Distributiecentrum.

Fig. 4.1.3

[rechts] *'Halve breedte' of 'man wide' voertuig biedt voordelen voor gewicht, verbruik en congestie.*

Bron: Brink Dynamics, 's-Gravendeel.



4.2 TOEKOMSTBEELD EN SCENARIO'S

INLEIDING

De beschrijving van een realistisch toekomstbeeld op het gebied van vervoer is zonder uitgebreide studie en simulatie niet mogelijk. Het samenspel van factoren en partijen is bijzonder complex, en overstijgt het kader van deze STT-studie.

Toch hebben de auteurs geprobeerd een beeld te schetsen van een situatie in het jaar 2020 die goede mogelijkheden biedt voor de elektrificatie van vervoer. Elektrificatie van het vervoer maakt verhoging van efficiëntie en vermindering van uitstoot van schadelijke stoffen mogelijk. Dit kan grotendeels worden gerealiseerd met technische middelen.

Het verbeteren van de bereikbaarheid en de mobiliteit vraagt behalve technische middelen ook om planologische, logistieke en beleidsmaatregelen.

Daarom zullen we ook de veranderingen op deze gebieden schetsen in ons toekomstbeeld. De technische middelen en de maatregelen moeten in hun onderlinge samenhang worden gezien; zij kunnen niet zonder elkaar.

4.2.1 GUNSTIGE VOORWAARDEN VOOR ELEKTRIFICATIE VAN VERVOER

dr. S.B. van der Molen¹, ir. J.M. Meij

NIEUWE PLANOLOGISCHE ZONES EN NIEUWE VERVOERMIDDELEN

Om het gebruik van vervoermiddelen optimaal af te stemmen op de vervoersbehoefte en de omgeving waarin vervoer plaatsvindt, wordt het vervoerssysteem georganiseerd volgens het idee van de zone en de corridor. Een gestroomlijnd hoofdcorridornet voor water, rail, weg en luchtvervoer verbindt de grote bevolkings- en activiteitencentra.

Het vervoersgebied is onderverdeeld in zones, die elk hun eigen eisen stellen aan snelheid, emissies en veiligheid. Op de knooppunten van corridors en zones worden transfer- en distributiecentra ingericht.

De volgende zones worden onderscheiden:

Stadscentrum en wooncentrum

Verplaatsingen in dit centrum kenmerken zich door een zeer korte afstand van minder dan 5 km. Leefbaarheid is hier het voornaamste criterium. Voertuigen rijden langzaam, er gelden strenge eisen voor emissie en geluidsproductie.

Naast tram, metro en light rail is er is een trend naar kleinschalig, geautomatiseerd, elektrisch openbaar vervoer. Taxi's zijn batterij-elektrisch of worden door een brandstofcel aangedreven, met uitzondering van enige verbrandingsmotorhybriden voor vervoer naar bestemmingen buiten de centra.

Verbrandingsmotorhybride of brandstofcelbussen nemen de plaats in van de

.....
¹ ECN,
Brandstoffen, Conversie & Milieu,
Postbus 1
1755 ZG Petten
vandermolten@ecn.nl



Zie pagina 230 voor figuur 4.1.3

huidige dieselbussen. Bewoners worden bevoordeeld als zij met smalle lichte ‘halve breedte’ (brandstofcel) hybride of elektrische voertuigen rijden, bijvoorbeeld met een goedkope parkeerplaats (fig. 4.1.3 op pagina 230).

Goederenvervoer vindt plaats met hybride voertuigen of elektrisch (ondergronds). Het gebruik van rolschaatsen, fietsen en elektrische tweewielers wordt bevorderd door goede voorzieningen zoals leensystemen, tweebaansfietspaden, gratis stalling en voldoende servicecentra. Het gebruik van brommers en snorfietsen met een verbrandingsmotor wordt ontmoedigd.

Stadsperiferie en randgemeenten met woonwijken en activiteitencentra

Verplaatsingen in de stadsperiferie en randgemeenten liggen tussen de 5 en 15 km. Door woon- en werkverkeer zijn er veel verplaatsingen naar en van de stadscentra en de randstedelijke gebieden. De tweede auto wordt er steeds vaker vervangen door een elektrisch ‘halve breedte’ voertuig voor de korte afstand. De eerste auto blijft vooral een gezinsauto, maar veel van deze auto’s zijn hybriden. Iedere wijk heeft vanaf een centraal opstappunt een snelverbinding naar de dichtstbijzijnde transfercentra. Goede tweewieler- en fietspaden lopen naar de winkelcentra en het opstappunt. Winkels en andere voorzieningen dichtbij woningen en bedrijven worden gestimuleerd via de bestemmingsplannen.

Randstedelijke gebieden

Deze gebieden kenmerken zich door verplaatsingen tussen 10 en 40 km. Hier bevinden zich kantoren, bedrijfsterrains, nieuwe uitgaanscentra, transfer- en distributiecentra. De gebruikte vervoermiddelen zijn de som van de keuze voor vervoermiddelen in de twee eerdergenoemde zones. Hier vindt men de aansluiting met de corridors en komen de goederenvervoermiddelen voor de korte en de lange afstand samen. In deze gebieden is er een trend naar kleinschalig automatisch openbaar vervoer in combinatie met tram, metro en light rail.

Fig. 4.2.1

Nieuwe fietspaden voor de planologische verbetering van de bereikbaarheid per tweewieler. Uit: [Mobilopolis, de actieve fietsstad, Projectbureau IVVS [IVVS, 1997].



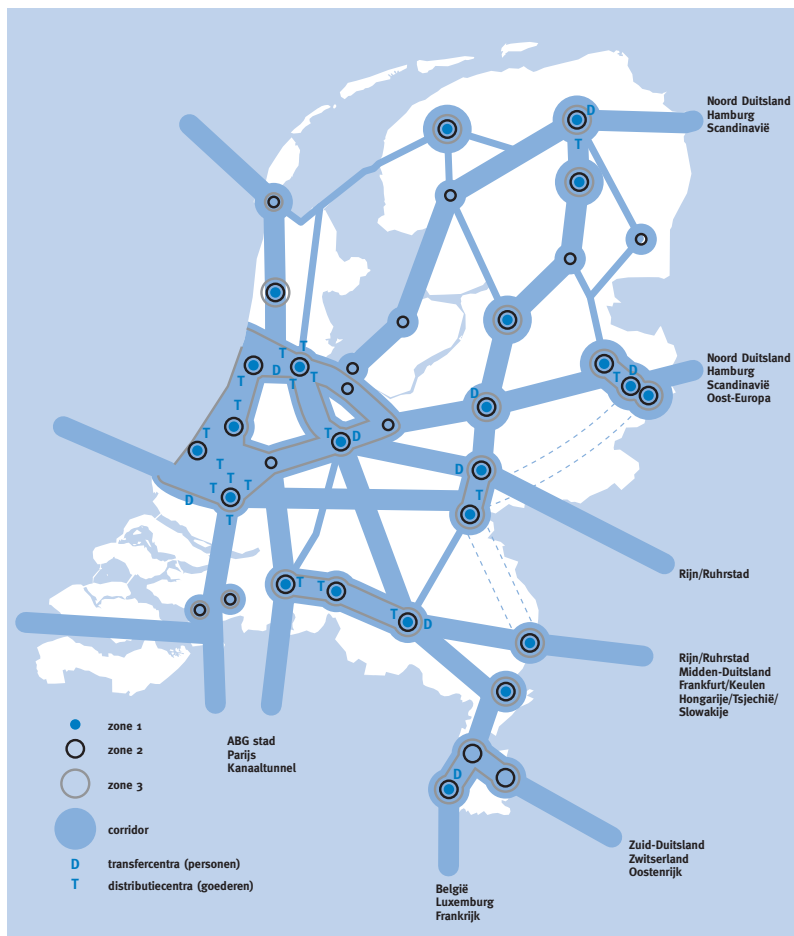
Fig. 4.2.2

Zones en corridors in Nederland.

Zone 1: stads- en wooncentra.

Zone 2: stadspeniferie en randgemeenten.

Zone 3: randstedelijke gebieden.



Corridors

De corridors vormen de verbindingen tussen de bevolkings- en activiteitencentra en overbruggen afstanden tussen de 30 en de 300 km. De wegen in de corridors zijn het domein van de vrachtwagens met verbrandingsmotor (VM), hybride en VM-personenauto's en een groeiend aantal hybride 'halve breedte' voertuigen. Ook vindt men hier veel huur- en bedrijfsauto's die naar behoefte worden ingezet. Trein, light rail en binnenvaart spelen daarnaast een grote rol.

Railvervoer wordt efficiënter door het terugleveren van remenergie en door optimalisatie van regelsystemen, binnenvaart door het toepassen van nieuwe vormen van aandrijving. Fig. 4.2.2 geeft een overzicht van de zonering voor Nederland.

Hoge-snelheidsvaartuigen blijven een optie voor verbindingen over het kanaal naar Engeland. Voor de lange afstand blijft de luchtvaart een grote rol spelen. Zuinige grond-effectvliegtuigen krijgen een kans als luchthavens overwegend op of nabij zee worden aangelegd, luchtschepen spelen een beperkte, maar toenemende rol.

4.2.2 ELEKTRISCH VERVOER IN DE SCENARIO'S VAN SEP

ir. R.J.F. van Gerwen², ir. W.G.F. van den Wittenboer³, ir. P. Toussaint⁴

Om ons toekomstbeeld te relateren aan kwantitatieve verwachtingen voor verkeer- en vervoersystemen maken we gebruik van de studie 'Verkeer en vervoer in de 21e eeuw'. Deze studie die is uitgevoerd in opdracht van de Samenwerkende elektriciteitsproduktiebedrijven (Sep) had als doel het verkrijgen van inzicht in toekomstige ontwikkelingen in verkeer en vervoer, en de rol die elektrisch vervoer daarin kan gaan spelen. De tijdshorizon van de studie is het jaar 2050. Het project omvatte vijf deelprojecten die door verschillende instituten zijn uitgevoerd [TNO, 1997a; TNO, 1997b; UT, 1997; ECN, 1997; KEMA en CE, 1997].

De resultaten van deze vijf deelstudies zijn tot een consistent beeld samengevoegd in een synthese-rapport [Gerwen, 1998]. De basis van de studie vormen vier scenario's die voortkomen uit variatie van twee ontwerpdimensies, namelijk veel of weinig maatschappelijk draagvlak voor duurzaamheid, en veel of weinig economische groei (fig. 4.2.3).

Fig. 4.2.3

De vier scenario's in de studie 'Verkeer en vervoer in de 21e eeuw' [Gerwen, 1998].



Het scenario *Onbegrensde Groei* (OG) wordt gekenmerkt door een hoge economische dynamiek die gepaard gaat met veel economische groei en een snelle technologische ontwikkeling. Er wordt weinig nadruk gelegd op duurzaamheid in de samenleving. Individualiteit en de vrije-marktfilosofie staan voorop. Dominante mensbeelden zijn de egocentrische burger en de 'workaholic'. Het scenario *Duurzame Groei* (DG) heeft dezelfde economische kenmerken als het OG-scenario, maar daarnaast wordt veel nadruk gelegd op duurzaamheid in de samenleving. Het individu en de vrije-marktfilosofie staan naast duurzaamheid centraal. Aan duurzaamheid wordt een algemeen geaccepteerd prijskaartje gehangen in de vorm van een CO₂-budget. Dominante mensbeelden in dit scenario zijn de morele burger en de dienstenconsument. Het scenario *Pas op de Plaats* (POP) wordt gekenmerkt door weinig economische

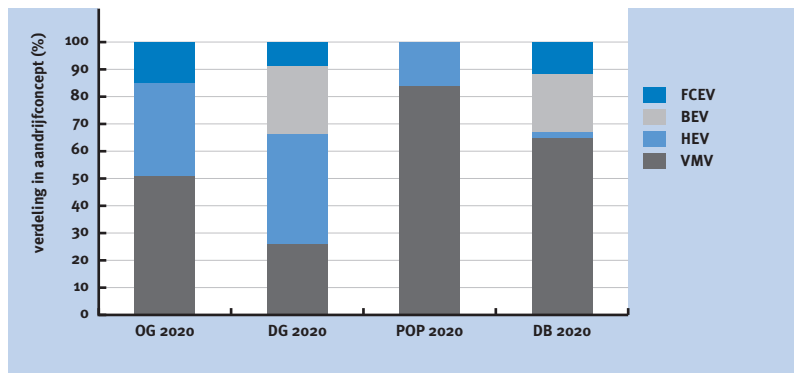
2 KEMA, afd. KST,
Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
R.J.F.vanGerwen@kema.nl

3 EnergieNed,
Postbus 9042
6800 GD Arnhem

4 Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
ToussaintP@sep.nl

Fig. 4.2.4

Elektrificatie van individueel personenvervoer volgens de vier scenario's van Sep in het jaar 2020. VMV: voertuig met interne verbrandingsmotor, HEV: hybride-elektrisch voertuig, BEV: batterij-elektrisch voertuig, FCEV: brandstofcel-elektrisch voertuig [Korver, 1997].



dynamiek die gepaard gaat met weinig economische groei en een langzame technologische ontwikkeling. Er wordt weinig nadruk gelegd op duurzaamheid in de samenleving; alle aandacht gaat uit naar herstel van de economie. De calculerende burger is dominant in dit scenario.

Het scenario *Duurzame Balans* (DB) wordt gekenmerkt door een lage economische dynamiek die gepaard gaat met weinig economische groei en een langzame technologische ontwikkeling. Er ligt veel nadruk op duurzaamheid in de samenleving. Het collectieve welzijn staat voorop. Kenmerkend mensbeeld is de sociale burger.

De vier scenario's hebben ieder een eigen verkeers- en vervoerssysteem. Sommige robuuste ontwikkelingen komen in alle vier scenario's terug; sommige ontwikkelingen zijn typisch voor een of twee scenario's. Elektrificatie van vervoer komt voor in alle scenario's. Fig. 4.2.4 geeft als indicatie een overzicht van de verdeling over aandrijfconcepten voor individueel personenvervoer in het jaar 2020.

We zien dat in alle gevallen elektrisch vervoer een significante rol gaat spelen. In het DG-scenario zelfs met een totaal aandeel van 75% van het individueel personenvervoer. Hiervan is 40% hybride-elektrisch, 25% batterij-elektrisch en 9% brandstofcel-elektrisch. Ook in het OG-scenario speelt elektrisch vervoer een belangrijke rol; totaal 49%, waarvan 34% hybride-elektrisch en de rest brandstofcel-elektrisch.

Het DB-scenario valt op door een relatief groot deel batterij-elektrisch vervoer (21%) en een zeer klein deel hybride-elektrisch (2%) vervoer.

Hybride-elektrisch vervoer komt in alle scenario's voor. Batterij-elektrisch vervoer komt alleen voor in de DG- en DB-scenario's. Het veroverd daar een eigen plaats naast hybride-elektrisch vervoer.

Omdat in deze twee scenario's de meeste elektrische aandrijfconcepten worden toegepast, zijn deze scenario's gekozen voor het bepalen van concepten voor aandrijving, voertuigen en vervoer die voor elektrificatie van vervoer van belang zijn.

4.3 INVLOEDEN OP ELEKTRIFICATIE VAN VERVOER

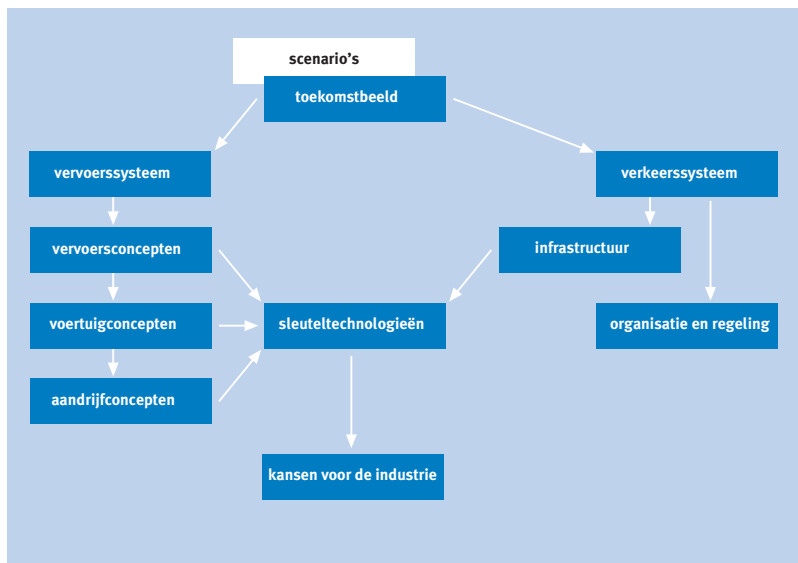
4.3.1 VAN TOEKOMSTBEELD NAAR TECHNOLOGIE

ir. R.J.F. van Gerwen⁵, ir. W.G.F. van den Wittenboer⁶, ir. P. Toussaint⁷,
ir. A. Brouwer⁸

Uitgangspunten op het gebied van milieu en duurzaamheid gaven in par. 4.2 aanleiding tot een toekomstbeeld met een verkeers- en vervoerssysteem waarin elektrificatie een belangrijke rol speelt. In dit toekomstbeeld zijn verkeers- en vervoerssystemen en voertuig- en aandrijfconcepten opgenomen die in de DB- en DG-scenario's bevorderend werken op de elektrificatie van vervoer. Aan de hand daarvan kunnen sleuteltechnologieën (zie par. 4.5) geïdentificeerd worden waaruit uiteindelijk kansen voor de industrie volgen (zie par. 4.6). Fig. 4.3.1 geeft het gehele proces weer.

Fig. 4.3.1

Het proces van toekomstbeeld naar elektrificatie van vervoer.



5 KEMA, afd. KST,
Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
R.J.F.vanGerwen@kema.nl

6 EnergieNed,
Postbus 9042
6800 GD Arnhem

7 Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
ToussaintP@sep.nl

8 Novem Verkeer en Vervoer,
Postbus 8242
3503 RE Utrecht
a.brouwer@novem.nl

Het verkeers- en vervoerssysteem zijn in fig. 4.3.1 gescheiden.

Het verkeerssysteem omvat de interactie tussen voertuigen onderling en tussen voertuigen en de infrastructuur. Het verkeerssysteem heeft dus betrekking op een proces dat afgewikkeld wordt op of in een infrastructuur. Het proces moet gestuurd of geregeld worden en de infrastructuur moet gebouwd en onderhouden worden, en heeft daarvoor een beheerder nodig. Deze beheerder zorgt voor de infrastructuur (wegen) en de verkeersregeling (verkeersregels, wegsignalering, verkeerslichten, toeritdosering en dergelijke).

Het vervoerssysteem heeft betrekking op het verplaatsen van mensen en goederen. Onder vervoersconcepten wordt verstaan de verplaatsingen door de

logistieke organisatie van een of meer voertuigconcepten. Het gaat hier om voertuigen die in de regel dezelfde (vervoer)functie hebben. Geregelde trein- en busdiensten, maar ook autodeelsystemen⁹ zijn voorbeelden van vervoersconcepten. Ook de logistieke organisatie van bijvoorbeeld een landelijke supermarktketen of een koeriersdienst kan gezien worden als een vervoersconcept. Voertuigen of voertuigconcepten zijn de fysieke middelen waarmee het verplaatsen wordt uitgevoerd. Voor de hand liggende voorbeelden zijn de personenauto, de vrachtauto, de trein en dergelijke.

Het aandrijfconcept bepaalt de wijze waarop een voertuig wordt voortbewogen. Hiertoe wordt de hele keten van externe energiebron, motor, transmissie tot en met aangedreven as gerekend. Het conventionele aandrijfconcept bestaat uit een brandstoftank voor (vloeibare) motorbrandstof, een inwendige verbrandingsmotor, een versnellingsbak en een aangedreven as.

Het onderscheid tussen verkeers- en vervoerssysteem is allereerst zinvol, omdat de benodigde technologieën en mogelijkheden voor innovatie en elektrificatie sterk kunnen verschillen. Ten tweede is er sprake van verschillende belangen. Het belang van een verkeerssysteem is primair een collectief belang: het zo snel, efficiënt, veilig en milieuvriendelijk mogelijk doen verlopen van het geheel van vervoersactiviteiten. Dit gaat gepaard met lange termijnstrategieën en (hoge) investeringen voor verkeersinfrastructuren. Het belang van het vervoer is vooral een individueel belang (van een persoon of een organisatie): het zo snel, goedkoop, comfortabel en dergelijke mogelijk verplaatsen van mensen en goederen. Technologische vernieuwingen voor verkeerssystemen zullen daarom een ander karakter hebben dan die voor vervoerssystemen. Ten derde past de scheiding in een verkeers- en een vervoerssysteem in de huidige trend die ook plaatsvindt in het spoorvervoer en in de distributie van elektriciteit. Hier wordt het beheer van de infrastructuur en de regeling van het vervoer of het transportproces gescheiden van het vervoeren van mensen en het opwekken en leveren van elektriciteit.

Een ander onderscheid is de indeling in individueel personenvervoer (verplaatsingen van een of enige personen met een eigen, al dan niet gemotoriseerd vervoermiddel), collectief personenvervoer (professioneel georganiseerde verplaatsingen van meer personen, die voor iedereen toegankelijk zijn), goederenvervoer (verplaatsingen van goederen door een organisatie).

Hier is onderscheid zinvol, omdat met name bij individueel personenvervoer in de keuze voor een vervoersconcept, voertuigconcept of aandrijfconcept niet-rationele overwegingen zoals status en comfort een rol kunnen spelen. Bij professionele vervoerders wordt veel meer een zakelijke keuze gemaakt op basis van kosten en opbrengsten. Beide zullen ten aanzien van elektrificatie van voertuigen op andere gronden een keuze maken.

⁹ Verschillende individuen delen een of meer auto's en de auto komt op afroep ter beschikking.

4.3.2 DE INVLOED VAN CONCEPTEN VOOR VERKEER EN VERVOER

ir. R.J.F. van Gerwen¹⁰ ir. W.G.F. van den Wittenboer¹¹ ir. P. Toussaint¹²,
ir. A. Brouwer¹³

Voor deze studie is van belang welke verkeers- en vervoersconcepten uit de scenario's *Duurzame Balans* en *Duurzame Groei* in 2020 [Korver, 1997] specifiek een relatie hebben met elektrische voertuigen, en vooral of zij bevorderend of zelfs essentieel zijn voor de invoering van elektrische voertuigen.

Vervoersconcepten

Autodeelsystemen zullen hoogstwaarschijnlijk de invoering van elektrische voertuigen bevorderen. Dat kan als volgt worden beredeneerd. Een van de nadelen van elektrische voertuigen nu, en vooral van batterij-elektrische voertuigen, is de lagere actieradius ten opzichte van de huidige auto's. De huidige 'all purpose' wagen is geschikt voor alle afstanden, mede door de beschikbaarheid van een groot netwerk van brandstofvoorzieningen. Een autodeelsysteem bevordert het gebruik van specifieke voertuigen voor specifieke verplaatsingen. In de scenario's *Duurzame Groei* en *Duurzame Balans* wordt gebruik gemaakt van deelauto's (lange afstand, resp. 'all purpose'). Hierdoor wordt de aanschaf van een eigen (batterij-elektrische) auto voor kortere ritten aantrekkelijk.

De vraag is welke sleuteltechnologieën nodig zijn voor autodeelsystemen. Deze zullen voornamelijk liggen in de logistiek van het systeem (verdeling van de auto's over de leenplaatsen, het aantal en de verdeling van leenplaatsen, thuis toegankelijke informatiesystemen over beschikbare auto's op nabije leenplaatsen, geautomatiseerde reservering van leenauto's via huiscomputer, automatische afrekening en dergelijke) en in betrouwbare en vandalismebestendige systemen om leenauto's over te dragen en weer in te leveren.

Milieuvriendelijk stadsverkeer, individueel openbaar vervoer¹⁴ en stadsdistributiecentra vragen bij uitstek om kleine, schone, elektrische voertuigen. In die zin zijn ook deze vervoersconcepten bevorderend voor de elektrificatie van vervoer. Sleuteltechnologieën in dit kader zijn (behalve die met betrekking tot de logistiek van het systeem, zie autodeelsystemen):

- veilig en vandalismebestendig laden van elektrische voertuigen
- snellaadsystemen (zie par 4.5.5)
- conditiebewaking voor elektrische aandrijfsystemen (zie par 4.5.4)
- wisselsystemen voor batterijen.

.....
^{10, 11, 12, 13} Zie par 4.3.1.

¹⁴ Bij individueel openbaar vervoer staan kleine voertuigen ter beschikking van iedereen. De voertuigen kunnen voor korte tijd gehuurd worden. Een voorbeeld is het Tulipsysteem van Peugeot.

Op de korte termijn is ook een rol weggelegd voor hybride aandrijfsystemen in het openbaar vervoer.

Elektrisch spoorvervoer van personen en goederen zal in par. 4.4.3 worden behandeld.

Verkeersconcepten

Ook zonerings (bijvoorbeeld het afsluiten van binnensteden voor bepaalde soorten voertuigen) vraagt om kleine, schone, elektrische voertuigen.

Het is te verwachten dat externe snelheidsbeïnvloeding en automatische voertuiggeleiding eenvoudiger zijn toe te passen in elektrische voertuigen en dat de verwachte noodzakelijkheid van dergelijke systemen de vraag naar elektrische voertuigen zal stimuleren.

Bij de overige vervoers- en verkeerssystemen is het onduidelijk of zij een directe relatie hebben met elektrificatie van vervoer.

4.3.3 DE BELANGRIJKSTE VOERTUIGCONCEPTEN BIJ ELEKTRIFICATIE VAN VERVOER

dr.ir. D. Schmal¹⁵, ir. J.M. Meij

Het zal weinig verbazing wekken dat er een grote hoeveelheid technische mogelijkheden voor toekomstige aandrijfsystemen bedacht kan worden. In het kader van de studie 'Verkeer en Vervoer in de 21e eeuw', deelproject 2 [Smokers, 1997b] is onderzocht welke energie- en aandrijfsystemen in principe technisch mogelijk en zinvol zijn in de eerste helft van de volgende eeuw. Dit heeft geresulteerd in een lijst van 51 verschillende concepten (incl. niet-elektrische). Van deze lijst aandrijfconcepten worden de meeste reeds nu onderzocht, beproefd of toegepast. Op basis hiervan komen we tot de voertuigconcepten die een belangrijke rol zullen spelen in de komende decennia.

ENERGIEVOORZIENING VAN ELEKTRISCH AANGEDREVEN VOERTUIGEN

Uitgaande van de resultaten van deze TNO-studie zijn in de eerste helft van de volgende eeuw in grote lijnen de volgende vier (reeds nu bekende) soorten elektrische aandrijving te onderscheiden:

- Directe elektrische aandrijving met externe elektrische energievoorziening, dat wil zeggen zonder tussenopslag. Dit gebeurt in het algemeen via een sleepcontact of eventueel zonder mechanisch contact (bijv. inductief).
- Batterij-elektrische aandrijving, dat wil zeggen aandrijving waarbij elektrische energie opgeslagen in een batterij (of een ander opslagmedium) wordt gebruikt. De batterij wordt na gebruik elektrisch opgeladen (uit het net).
- Hybride-elektrische aandrijving, dat wil zeggen aandrijving waarbij een generatorset aan boord van het vervoermiddel zorgt voor opwekking van elektrische energie. Deze energie gaat direct naar een elektromotor en/of wordt opgeslagen in een batterij aan boord (of een ander opslagmedium). Ook kan in aanvulling op de elektromotor de met een verbrandingsmotor opgewekte mechanische energie (gedeeltelijk) direct gebruikt worden voor

.....
15 TNO-MEP,
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn
d.schmal@mep.tno.nl

aandrijving. De generatorset kan bestaan uit een inwendige verbrandingsmotor met daaraan gekoppeld een generator. Ook een brandstofcelsysteem kan als generatorset fungeren.

- Directe elektrische aandrijving met opwekking van elektrische energie in het vervoermiddel, zonder tussenopslag. Een voorbeeld hiervan is een brandstofcelsysteem aan boord van het vervoermiddel dat zorgt voor het vereiste elektrische vermogen, zonder dat hierbij een batterij geplaatst is.

Hierna worden de vier soorten elektrische aandrijving beschreven met een aanduiding van de mogelijke tussenvormen.

Fig. 4-3-2

Rendement van aandrijfsystemen bij verschillende primaire brandstoffen, Naar [Riley, 1997] en [Brogan, 1992]. DEV= Direct Elektrisch (aangedreven) Voertuig. BEV= Batterij-Elektrisch Voertuig. HEV= Hybride-Elektrisch Voertuig. FC= Brandstofcelvoertuig. VM= VerbrandingsMotor. De waterstofproductie vindt plaats uit aardgas. De opgenomen hybriden zijn VM-hybriden, het rendement van deze systemen is afgeleid van de VM-systemen en is 25% hoger gerekend dan dat van een VM-systeem. Het rendement van een direct elektrisch aangedreven voertuig is ca. 15% hoger gerekend dan het rendement van een BEV-voertuig.

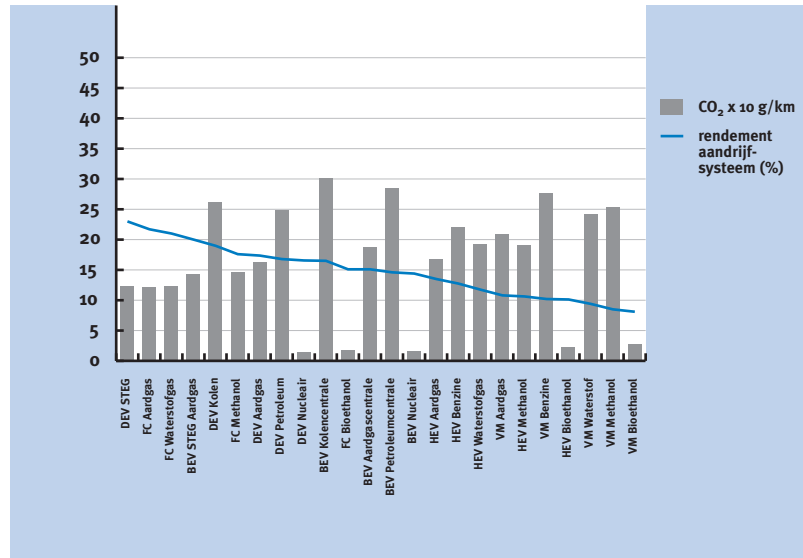
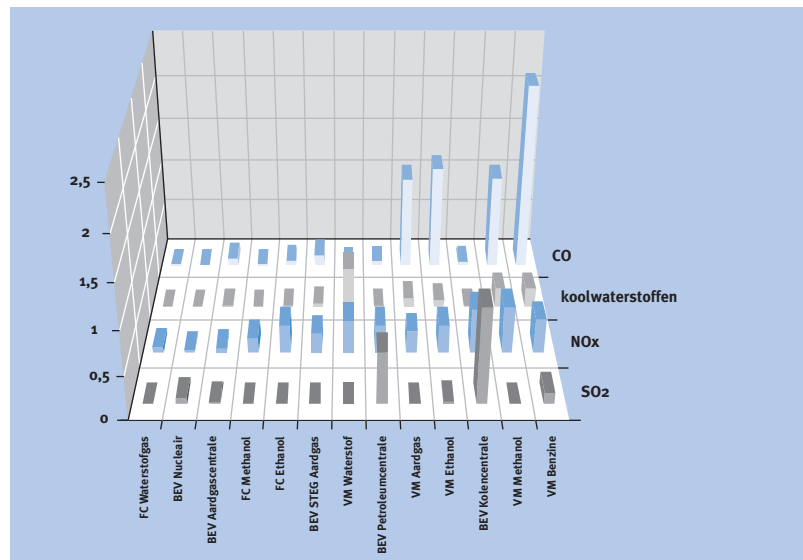


Fig. 4-3-3

Emissies in g/km voor een middelgrote auto. De CO-waarden gerekend over de gehele levenscyclus van het product, de andere waarden aan de uitlaatpijp van de conversieprocessen. Naar [Riley, 1997] en [Brogan, 1992].



Directe elektrische aandrijving met externe elektrische energievoorziening

Hierbij wordt de elektrische energie toegevoerd via een in of langs de vervoer-route aangebrachte kabel, draad, rail en dergelijke waarop gelijk- of wisselspanning is aangebracht. De overdracht van de elektrische energie vindt in het algemeen via een sleepcontact plaats. Bekende voorbeelden hiervan zijn tram, trein, metro en trolleybus. In plaats van een mechanisch sleepcontact is ook overbrenging van de elektrische energie zonder mechanisch contact mogelijk. Een voorbeeld hiervan is de lineaire inductiemotor. In het algemeen ontbreekt bij directe elektrische aandrijving een batterij of een ander opslagmedium voor elektrische energie (bijv. condensator of vliegwiel), wat betekent dat alle fluctuaties of pieken in het te leveren vermogen door de externe aansluiting geleverd moeten worden. De toevoerleidingen moeten dus gedimensioneerd zijn op vermogenspieken in het aandrijfsysteem.

Een belangrijke beperking van dit systeem is dat er kabels, draden en dergelijke langs de vervoerroute nodig zijn. In de praktijk zal dit systeem vooral voor collectief vervoer bruikbaar zijn.

In principe is bij directe elektrische aandrijving regeneratief remmen mogelijk. Hierbij fungeert de elektromotor tijdens het remmen als generator (dynamo), waarbij een deel van de bewegingsenergie weer omgezet wordt in elektrische energie en wordt teruggeleverd aan de kabel. In nieuwere treinen en trams wordt dit steeds meer toegepast (zie ook par. 4.4.3).

Een combinatie met een batterij-elektrisch vervoermiddel is denkbaar, waarbij op bepaalde routes elektrische energie via een kabel wordt aangeleverd (bijv. inductief), terwijl buiten deze routes de batterij voor de energievoorziening zorgt. Tijdens het rijden 'via de kabel' kan de batterij ook nog opgeladen worden. In dit geval is het ook denkbaar dat individueel vervoer (bijv. de personen-auto) op deze wijze plaatsvindt.

Batterij-elektrische aandrijving

Bij batterij-elektrische aandrijving wordt de door de elektromotor(en) gevraagde elektrische energie voor de aandrijving geleverd door een batterij. In de meeste gevallen betreft het een elektrisch oplaadbare batterij (accu). Andere mogelijkheden van elektrische energieopslag zijn de mechanisch oplaadbare batterij (vervanging van elektroden als de batterij leeg is, zoals bij de zink-lucht-batterij), de condensator en het vliegwiel. Ook batterij-wisselsystemen zijn mogelijk.

In het geval van batterij-elektrische aandrijving is vooral de specifieke energie (aantal kWh/kg) van belang voor het bereiken van voldoende actieradius. Het bij een bepaalde actieradius leverbare vermogen dat nodig is voor het accelereren is dan meestal automatisch voldoende.

Vanwege de eisen aan de actieradius komen eigenlijk alleen oplaadbare batterijen in aanmerking voor dit aandrijfconcept. Condensatoren en vliegwielen

Fig. 4-3-4
Verschillende aandrijfconcepten.

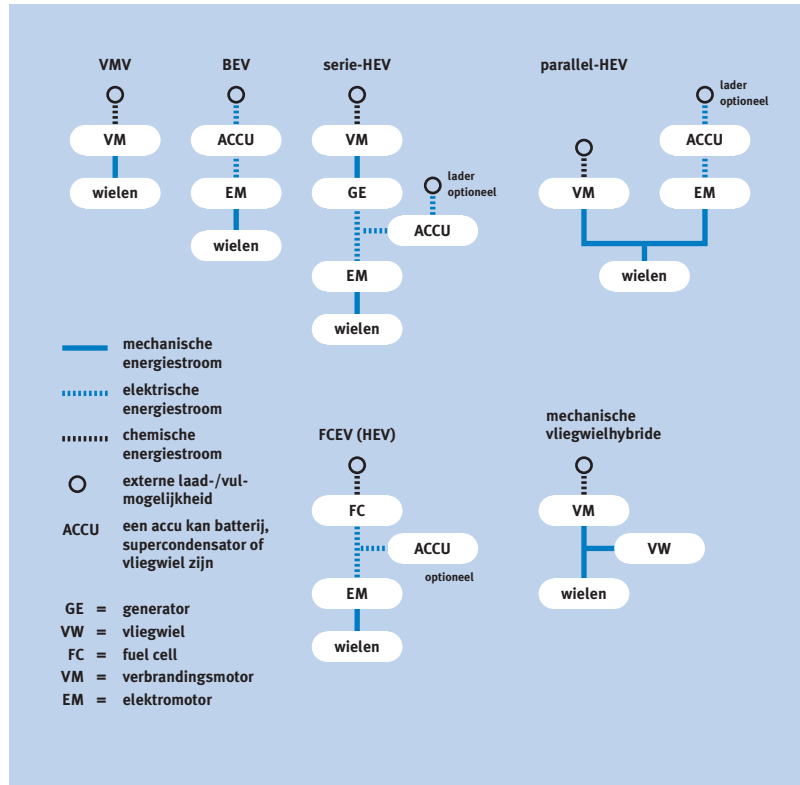
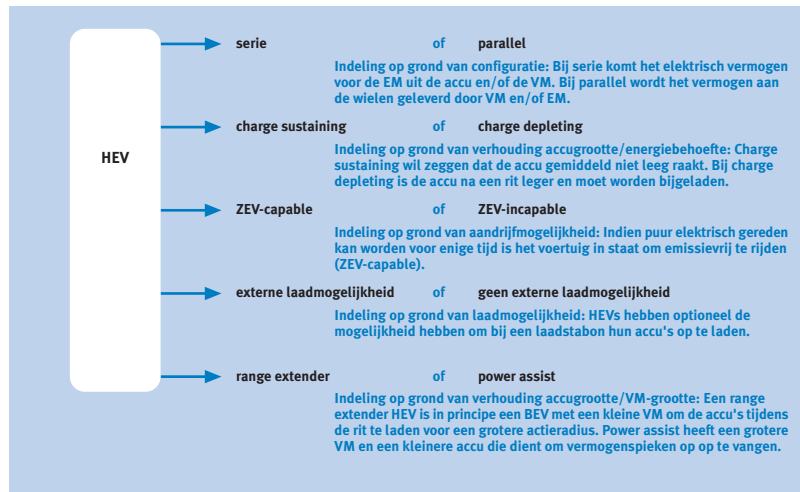
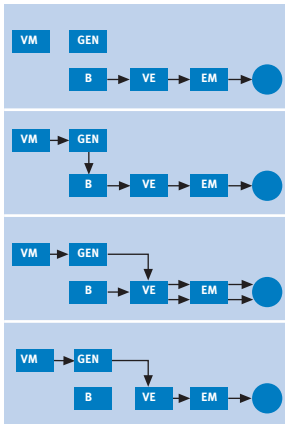


Fig. 4-3-5
Onderverdelingen voor hybride voertuigen.



hebben een veel te lage specifieke energie.

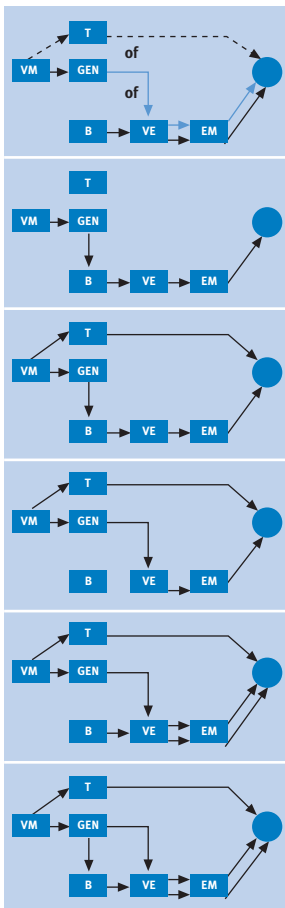
Bij de meeste aandrijfsystemen van dit type is regeneratief remmen mogelijk, waarbij de bij het remmen opgewekte elektrische energie wordt opgeslagen in de accu (evt. met hulp van een condensator, zie 4.5.6, Supercondensatoren)



Verschillende werkingstoestanden van serie-hybride voertuigen.

Hybride-elektrische aandrijving

Bij hybride aandrijving bevindt zich een generator aan boord van het vervoermiddel, waarmee de elektrische energie wordt opgewekt. Dit kan een inwendige verbrandingsmotor zijn die direct gekoppeld is aan een generator (een generatorset), een brandstofcelsysteem, enz. De generator heeft in het algemeen een zodanig vermogen dat deze het gemiddelde energieverbruik (vermogen) kan leveren. De energieopslag aan boord zorgt voor het leveren van vermogenspieken die hoger zijn dan het gemiddelde (bijv. bij accelereren of rijden bij hoge snelheden) en kan bovendien de energie opslaan die vrijkomt bij het remmen. Binnen de definitie van hybride-elektrische aandrijving is een groot aantal uitvoeringen bekend. Een indeling van de diverse soorten is te vinden in fig.4.3.4. In fig. 4.3.5 worden de soorten hybride voertuigen weergegeven.



Verschillende werkingstoestanden van parallel-hybride voertuigen.

Een vaak gebruikte indeling is het onderscheid in serie-hybride en parallel-hybride aandrijving. Deze indeling is aan het vervagen, omdat concrete aandrijfsystemen vaak eigenschappen van beide vertonen. Gezien het doel van deze STT-studie is het voldoende om het onderscheid tot twee soorten te beperken. De belangrijkste kenmerken zijn in het geval van een voertuig:

Serie-hybride: In een serie-hybride voertuig worden de wielen altijd (en uitsluitend) aangedreven door de elektromotor. De generator kan elektrische energie direct aan de motor leveren en of aan de energieopslag. Regeneratief remmen is altijd mogelijk. Omdat de generator (motor- en generatorcombinatie, brandstofcel e.d.) elektrisch is ontkoppeld van de wielen kan deze worden bedreven in een optimaal werkpunt (d.w.z. lage emissies in combinatie met hoog rendement).

Parallel-hybride: Hierbij staan de elektromotor en een andere, meestal conventionele aandrijving parallel geschakeld. De wielen worden aangedreven door een van beide of beide motoren. Evenals bij serie-hybride is er energieopslag (accu, enz.) aan boord.

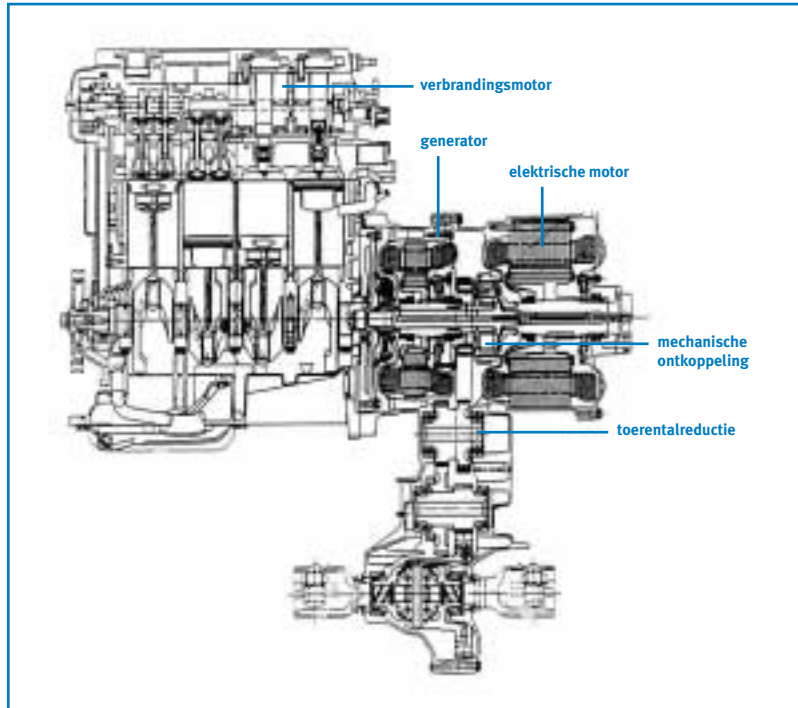
Vaak is bij parallel-hybride aandrijving de verbrandingsmotor mechanisch verbonden met de wielen waardoor deze wisselend belast wordt. Dit is minder gunstig voor emissies en rendement, doch geeft meer vrijheden in het gebruik. Om ook hier een grotere mate van ontkoppeling tussen verbrandingsmotor en wielen te bereiken, gebruiken personenautofabrikanten soms mechanische ontkoppelmethode. Hierdoor komen de efficiëntie en de emissies dicht bij de waarden van de serie-hybride te liggen.

Directe elektrische aandrijving met elektrische energieopwekking aan boord

Hierbij wordt zonder tussenopslag (bijv. in een accu) de opgewekte elektrische energie direct afgegeven aan de elektromotor voor de aandrijving. Voorbeelden hiervan zijn een brandstofcelsysteem en dieselelektrische aandrijving van treinen en schepen. De consequentie van de afwezigheid van energieopslag (afgezien van veelal een kleine accu voor de 'opstart') is dat de generator dynamisch

Fig. 4.3.6

De mechanisch ontkoppelde parallel-hybride aandrijving van de Toyota Prius. Naast de elektrische vermogensregeling bezit de Prius ook een mechanische vermogensregeling.



belast wordt en – zonder wezenlijke vertraging – het door de elektromotor gevraagde vermogen moet leveren. Bij dieselelektrische aandrijving en brandstofcellen op waterstof is dit geen probleem. Bij een brandstofcelsysteem waarbij een andere brandstof wordt gebruikt dan waterstof (wat betekent dat de brandstof aan boord moet worden omgezet in waterstof) is de snelheid van de processor (reformer) mede bepalend voor de vermogensafgifte naar de motor.

DE BELANGRIJKSTE VOERTUIGCONCEPTEN

De vier scenario's in par. 4.2.2 uit de Sep-studie 'Verkeer en Vervoer in de 21e eeuw' zijn in combinatie met de geïnventariseerde aandrijfconcepten gebruikt om de meest waarschijnlijke vervoersconcepten te kiezen voor de komende tientallen jaren [Gerwen, 1998]. Dit betekent niet dat er geen andere vervoersconcepten in deze scenario's voorkomen. Voorzover dit wel het geval is, gaat het vooral om toepassingen met een relatief beperkte markt en daardoor dus met relatief weinig invloed op emissies en energiegebruik. De volgende voertuigconcepten zullen in 2020 het straatbeeld bepalen.

Wegvoertuigen

Naast de conventionele aandrijving met inwendige verbrandingsmotor zien we elektrische voertuigen verschijnen:

- Batterij-elektrische aandrijving (22% in het scenario *Duurzame Balans*, 25% in het scenario *Duurzame Groei*).

- Serie-hybride aandrijving met inwendige verbrandingsmotor (in alle scenario's: 40% in het scenario *Duurzame Groei*, 2% in het scenario *Duurzame Balans*).
- Brandstofcel-elektrische aandrijving (evt. met een kleine vermogensbatterij).

Tweewielers zijn niet geselecteerd in de Sep-studie. Omdat in het bijzonder de elektrificatie van bromfietsen een gunstige invloed zal hebben op emissies en omdat elektrische tweewielers het autogebruik voor de korte afstanden kunnen beperken, kunnen zij een grote rol spelen. Daarom willen we benadrukken dat batterij-elektrische aandrijving zeer geschikt is voor toepassing in een tweewieler. Parallel-hybride aandrijvingen bieden volgens de Sep-studie geen wezenlijke voordelen en zijn dus niet geselecteerd. In de Sep-studie is uitgegaan van parallel-hybride aandrijvingen die in VM-modus of in BEV-modus rijden. De emissies en het brandstofverbruik in VM-modus liggen hoger dan bij de conventionele VM-voertuigen en veel hoger dan bij de serie-HEV. In de BEV-modus ligt het verbruik door het hogere gewicht hoger dan bij een BEV. Voor de mechanisch ontkoppelde parallel-hybride aandrijvingen ligt de situatie echter anders: deze bieden voorlopig voldoende voordelen en zullen de komende tijd een rol spelen, maar uiteindelijk steeds meer terrein verliezen aan de serie-HEV. Aandrijving met lineaire elektromotoren wordt door de bij de Sep-studie geraadpleegde bronnen voor wegvoertuigen niet als een serieuze optie gezien.

Railvoertuigen

Voor railvoertuigen verwacht men dat vooral de huidige systemen zullen worden toegepast:

- elektrisch met bovenleiding of zijleiding (trein, tram, metro)
- diesel-elektrisch.

Magnetische zweeftreinen zijn niet geselecteerd, omdat verwacht wordt dat deze in de komende 20 jaar geen significant aandeel in het vervoerssysteem zullen innemen. Dit vanwege de reeds aanwezige ontwikkelingen voor de hogesnelheidstrein, waarmee de zweeftrein zal moeten concurreren. De grootste kans maakt het concept bij nieuw aan te leggen verbindingen met een hoge vervoersdichtheid. Recente concepten met permanente magneten zouden de magnetische zweeftrein goedkoper kunnen maken.

Binnenvaartschepen

In de Sep-studie is alleen uitgegaan van aandrijving door middel van een verbrandingsmotor die is gestookt met diesel of stookolie. Alhoewel in de Sep-studie elektrische aandrijving voor binnenvaartschepen niet is geselecteerd, zijn er geen principiële verschillen ten opzichte van de in de studie gekozen voertuigconcepten.

4.3.4 ELEKTRISCHE AANDRIJVING IN DE SCHEEPVAART

ALL ELECTRIC SHIP

*dr.ir. U. Nienhuis, mba*¹⁶

De mogelijkheden voor verdere elektrificatie van schepen worden in Nederland onderzocht en uitgewerkt in het 'All Electric Ship' (AES)-project. Dit project is een samenwerking van een aantal Nederlandse bedrijven en de Koninklijke Marine, gesteund door de Nederlandse overheid en geleid door het Nederlands Instituut voor Maritiem Onderzoek. In het project wordt onderzocht welke ontwikkelingen daarvoor nodig zijn en welke kansen Nederlandse bedrijven op dit gebied hebben. In verreweg het grootste aantal schepen vindt het leeuwendeel van energietransport nog mechanisch plaats, namelijk van de (diesel)motor via een tandwielkast en de assen naar de schroef.

Het AES heeft als primaire energiebron een generator (diesel of turbine) of een brandstofcel. Alle andere systemen in het schip zijn elektrisch aangedreven. De voordelen hiervan komen onder andere tot uiting in de flexibiliteit en de modulariteit van het systeem. De generator en de andere onderdelen kunnen op de meest gunstige plaats in het schip gemonteerd worden. De uitdaging ligt in het uitontwikkelen van een dergelijk systeem, zodat steeds meer schepen voorzien worden van verregaand geëlektrificeerde installaties en het Nederlandse bedrijfsleven zich daar optimaal kan laten gelden. Dat vereist dus ook een krachtige ontwikkeling van de daarvoor benodigde vermogens-elektronische regelingen en besturingen.

Een belangrijk aspect voor de verdere ontwikkeling van het AES is de elektromagnetische vermogenstechniek. Vermogensafnemers aan boord zoals scheepsschroeven, pompen, hijskranen, lieren, airconditioning, hotelapparatuur en dergelijke hebben alle hun eigen belastingskarakteristiek en moeten adequaat gevoed worden. Dit vereist niet alleen het aanbieden van de juiste spanning, stroom en frequentie, maar ook een precieze regeling ervan om overgangen tussen verschillende situaties te beheersen (bijv. bij het versnellen van het schip). Een dergelijk systeem moet ook het vermogensbeheer omvatten, zodat te allen tijde vraag en aanbod van vermogen op elkaar afgestemd worden. Het systeem moet relatief ongevoelig zijn voor tijdelijke uitval van apparaten (bijv. als gevolg van onderhoud), en gebruik kunnen maken van tussenopslag van energie, bijvoorbeeld door middel van batterijen.

Dit alles vereist frequentieomzettingen, elektrisch energietransport en -distributie en schakeltechniek, en de systeemintegratie-gereedschappen om een dergelijk systeem te kunnen ontwerpen, bouwen en te laten opereren.

Het doel is om een test- en demonstratieplatform, een 'varend laboratorium' te bouwen. Het energiesysteem van het AES functioneert in eilandbedrijf met vermogens tussen 1 en 100 MW en kent een complexe en sterk variabele bedrijfsvoering en is als zodanig zeer geschikt als testplatform en voor demonstratie en

.....
¹⁶ Projectbureau All Electric Ship,
Zeestraat 100
2518 AD Den Haag
nim@pi.net

toepassing van nieuwe ontwikkelingen op het gebied van elektromagnetische vermogenstechniek.

Na de voorstudie van het AES-project wordt een plan van aanpak gepresenteerd voor het ontwikkeltraject. Het ligt in de lijn der verwachting dat direct daarna begonnen zal worden met de tweede fase van het project. In die fase zullen het schip en de benodigde elektromagnetische vermogenstechniek in samenhang ontwikkeld worden en worden alle voorbereidingen getroffen voor de spoedige realisatie van het varende laboratorium, een middelgroot schip dat geld moet opleveren en toch beschikbaar is voor het ontwikkelen, testen en beheren van elektromagnetische vermogenstechniek en andere AES-technologie.

De elektrische aandrijving van AES schepen nodigt uit tot het onderzoeken van nieuwe voortstuwingsmethoden zoals de asloze schroef die in deel 2 van dit boek wordt besproken.

TEGEN DE WIND IN

ir. J.M. Meij

Fig. 4.3.7

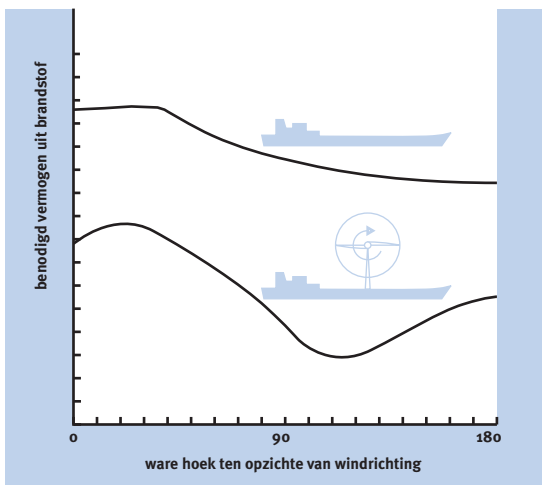
Benodigd vermogen uit generator of verbrandingsmotor bij verschillende windrichtingen voor een conventioneel en een (mechanisch gekoppeld) windturbine-schip [Wellicome, 1975; Clayton, 1985].

Fig. 4.3.8

John Buckley stak in 1870 met deze aangepaste reddingssloep tegen de overheersende wind in de Atlantische oceaan over. Bron: Illustrated London News, June 1870 [Sinclair, 1995].

Met de toenemende belangstelling voor de toepassing van elektrische aandrijving in schepen lijkt het voor de zeevaart interessant om de mogelijkheden voor de plaatsing van windturbines op het schip te onderzoeken. Een schip kan tegen de wind in varen met een eenvoudige mechanische verbinding tussen de turbinebladen en de schroef [Wellicome, 1975; Sinclair, 1995].

Dit leidt tot de veronderstelling dat een elektrisch aangedreven schip aanzienlijke energiebesparingen kan bereiken door aangepaste turbines op het schip te plaatsen (zie fig. 4.3.7). De elektriciteit zorgt voor een probleemloze koppeling naar de aandrijving, iets wat bij conventionele schepen moeilijk te realiseren is. Bovendien kan als het schip voor anker ligt windenergie worden opgeslagen in batterijen.



4.3.5 ELEKTRISCHE VOORTSTUWING IN DE LUCHTVAART

ir. J.M. Meij

Er zijn prille ontwikkelingen die erop wijzen dat elektrificatie een rol kan gaan spelen in de luchtvaart. De krachtoverbrenging voor het bewegen van de vleugelvlakken was vroeger mechanisch of hydraulisch, maar gebeurt nu elektrisch met behulp van servomotoren. Deze zogenaamde 'fly by wire', de elektrische besturingssystemen waarmee alle moderne toestellen zijn uitgerust, wordt op dit moment al weer aangevuld met 'fly by light', waarbij voor het signaaltransport glasvezel de rol van koperdraad overneemt. Het gaat hierbij vanzelfsprekend om relatief geringe krachten en vermogens. Hoe zit het met het grote vermogen benodigd voor de voortstuwing van het vliegtuig zelf? Kan een vliegtuig met behulp van elektriciteit worden voortbewogen?

Ja, dat kan. In augustus 1998 maakte de NASA Pathfinder Plus, een onbemand vliegtuig aangedreven door acht propeller-elektromotoren, een recordvlucht tot 80.000 voet (24 km). Een enorme prestatie in vergelijking met de Solar Challenger, die ruim zeventien jaar eerder op 7 juli 1981 de afstand tussen Engeland en Frankrijk overbrugde. De benodigde energie was afkomstig van zonnecellen die het gehele vleugeloppervlak bedekten en ternauwernood voldoende energie aan het waterige Engelse zonnetje konden onttrekken. Ook de vleugels van de Pathfinder zijn geheel bedekt met zonnecellen, maar binnenkort kunnen vliegtuigen zoals de Pathfinder maanden achtereen in de lucht blijven en bijvoorbeeld als een satelliet boven een bepaalde plek op aarde blijven cirkelen. Daarbij is een dergelijk vliegtuig veel dichterbij dan een geostationaire satelliet op 40.000 km afstand. Dit maakt dat er veel minder zendvermogen nodig is voor zaken zoals communicatie en dat reparaties veel eenvoudiger uit te voeren zijn.

Fig. 4-3-9

Pathfinder plus maakt een onbemande vlucht op zonne-energie. De Centurion, de geplande opvolger van de Pathfinder moet een nuttige last van 150 kg op een hoogte van 30 km brengen. Bron: NASA.



Fig. 4.3.10

L.T.A.S.-concept van een met PV-cellen aangedreven luchtschip.

Naast recreatief personentransport denken de ontwikkelaars ook aan vrachttransporten en de vervanging van satellieten. De snelheid kan tot 50 km/u bedragen.

Bron: [L.T.A.S., 1998].



Gedurende de periode met daglicht is er in de Pathfinder zoveel vermogen beschikbaar (7,2 kW) dat de overtollige energie – opgeslagen in accu's – het toestel vijf uur achtereen door de nacht loodst. Voor een continu vlucht is dus nog iets meer reserve nodig, die in een volgende generatie zal worden toegevoegd.

De energiedichtheid van elektrische opslagmedia is vele malen lager dan van kerosine, de voornaamste luchtvaartbrandstof. Alvorens de prestaties van de huidige aandrijfsystemen op dat punt zouden kunnen worden geëvenaard, is er nog een zeer lange weg te gaan. Wellicht dat op de middellange termijn hybride of elektrische aandrijving toegepast kan worden in een nieuwe generatie luchtschepen. Deze bezitten reeds een groot oppervlak en hebben alleen energie nodig voor de horizontale beweging. De Amerikaanse L.T.A.S. toont een aantal concepten van luchtschepen met actieve hoogteregeling, gevoed door zonne-energie. Een project met Stanford University stelt twee persoonsmodellen voor het onderzoek van het bladerdek in de regenwouden voor.

Een van de succesfactoren van elektrisch vervoer over de weg is de mogelijkheid om remenergie terug te winnen. Bij vliegtuigen ontbreekt die mogelijkheid, al is een elektrische katapult voor het accelereren en decelereren van vliegtuigen denkbaar. De Amerikaanse Navy heeft een van haar vliegkampschepen met een elektrische katapult uitgerust. Dat systeem voldoet goed. Voor het (helpen) lanceren van ruimteschepen onderzoekt NASA momenteel een magneettreinprincipe op basis van permanente magneten.

In deel 2 wordt een systeem uiteengezet voor het doorzenden van zonne-energie vanuit ruimtestations. Het is denkbaar dat zulke energie bijvoorbeeld als

bundels microgolfstraling of geconcentreerd licht door vliegtuigen zou worden opgevangen. De energietoevoer tijdens de vlucht maakt besparingen mogelijk, mede doordat het vliegtuig minder brandstof met zich mee moet torsen. Elektrische motoren met een toerental van meer dan 100.000 t/min zijn inmiddels beschikbaar.

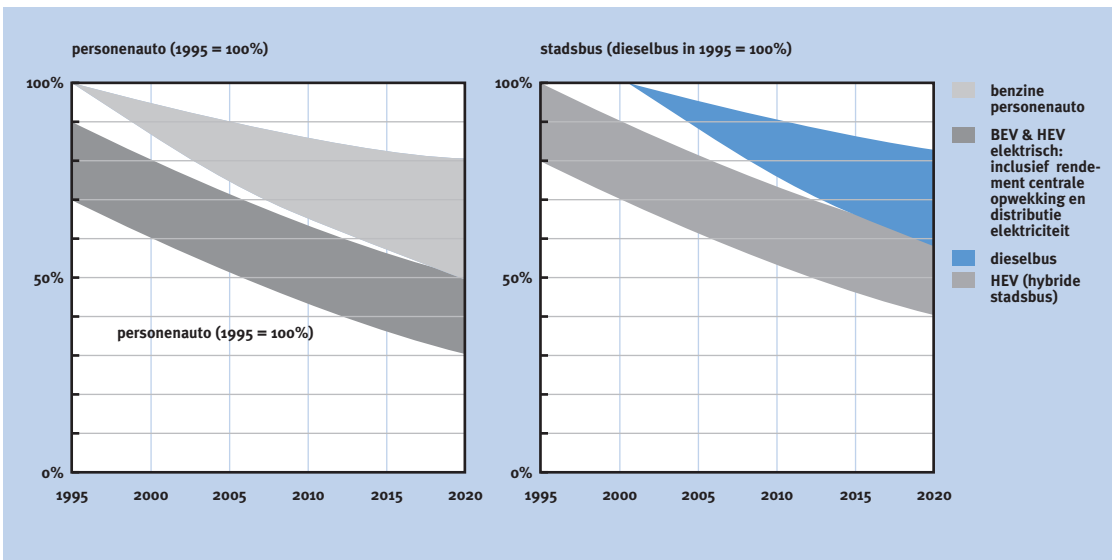
Vanzelfsprekend geldt bij uitstek voor verkeersvliegtuigen de wet van de remmende voorsprong. Bovendien is kerosine zo goedkoop – want er wordt geen belasting over geheven – dat tegen die economische kracht geen enkele elektrische techniek is opgewassen. Los daarvan is de elektrische techniek voorlopig niet in staat de prestaties van de huidige systemen te evenaren. Jammer, want juist de luchtvaart draagt belangrijk bij aan de vervuiling van de hogere luchtlagen en tast zo de vitale ozonlaag aan. Voor verkeersvliegtuigen is daarom een geheel andere route, namelijk die van de alternatieve brandstoffen wellicht de aangewezen weg. Er zijn al vliegtuigen die op waterstof vliegen. De Russische rakettechnologie kan bogen op een jarenlange en succesvolle praktijk met bijzonder krachtige waterstofmotoren. Ook andere brandstoffen zijn mogelijk, zoals het mengsel van ethanol en waterstofperoxide waarvan de US Navy onlangs melding maakte [ENN, 1998a].

CONCLUSIE

Direct elektrisch aangedreven voertuigen, brandstofcellen en batterij-aangedreven voertuigen scoren beter op rendement dan VM-hybriden en verbrandingsmotorconcepten. Fig. 4.3.11 geeft een vergelijking van het energiegebruik tussen BEV-, HEV- en VM-voertuigen.

Fig. 4.3.11

Energiegebruik van een BEV-, HEV- of VM-voertuig per kilometer ten opzichte van het gebruik van een personenauto in 1995. Bron: TNO-WT en CE [Janse, 1997].



Bij een verhoging van het rendement van de verbrandingsmotor zullen de brandstofcel en de directe elektrische aandrijving concurrentie krijgen van de VM-hybriden (die immers profiteren van het hogere rendement van de verbrandingsmotor), gevolgd door de batterij-elektrische voertuigen en de verbrandingsmotor.

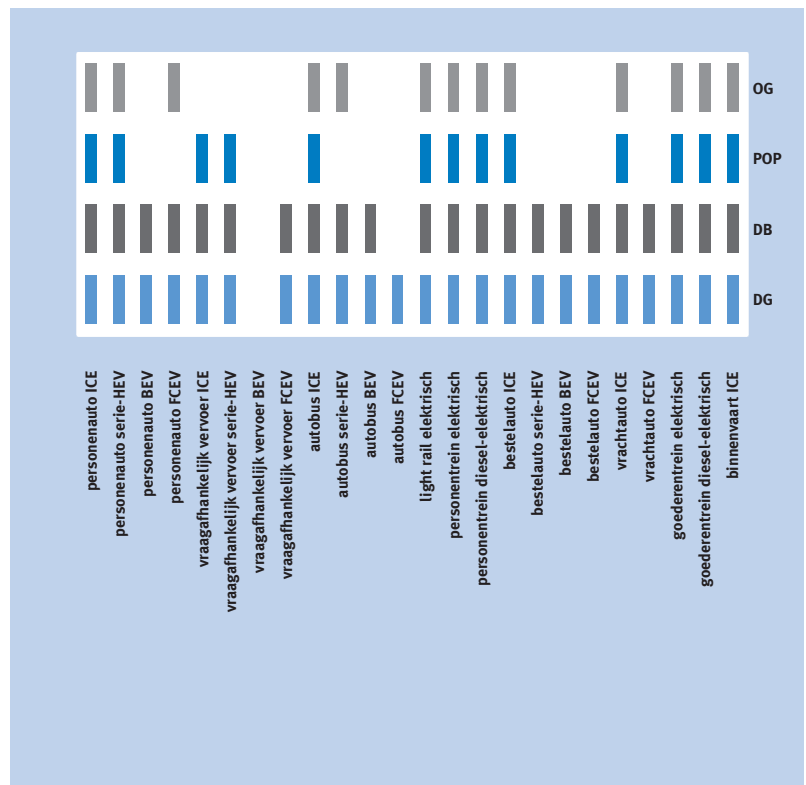
In grote lijnen is wat emissies betreft de voorkeursvolgorde brandstofcel, batterij-elektrisch, hybride, verbrandingsmotor. De (batterij)-elektrische auto met opwekking in een kolencentrale is een uitzondering in negatieve zin voor de emissies van CO₂, SO₂ en NO_x.

In fig. 4.3.12 staan de in de scenario's toegepaste combinaties van voertuig- en aandrijfconcepten.

Dit betekent dat alle belangrijke technologieën voor de DB- en DG-voertuigconcepten gezien kunnen worden als sleuteltechnologieën voor de elektrificatie van vervoer. Het merendeel van deze technologieën zal in par. 4.5 verder behandeld worden.

Fig. 4.3.12

Aanwezigheid van combinaties van voertuig- en aandrijfconcepten per scenario. OG: Ongeremde Groei, POP: Pas Op de Plaats, DB: Duurzame Balans, DG: Duurzame Groei.



4.4 CONSEQUENTIES VOOR DE ELEKTRISCHE INFRASTRUCTUUR

ir. R.J.F. van Gerwen¹⁷, ir. W.G.F. van den Wittenboer¹⁸, ir. P. Toussaint¹⁹,
ir. J.M. Meij

4.4.1 ELEKTRICITEITSVRAAG VOOR ELEKTRISCH VERVOER

De belasting van het elektriciteitsnet door elektrisch vervoer wordt bepaald door de hoeveelheid vervoer die plaatsvindt met voertuigen die hun elektriciteit uit het openbare net halen. Voor de scenario's *Duurzame Groei* en *Duurzame Balans* is de elektriciteitsvraag (het secundaire energiegebruik, dus zonder transport- en distributieverliezen) voor de verschillende vervoersvormen voor het jaar 2020 weergegeven in tabel 4.4.1 [Roos,1997]. Vergeleken met een totaal Nederlands elektriciteitsverbruik van 240 PJ in 1990 is dit weinig.

Tabel 4.4.1

Secundair elektriciteitsverbruik voor vervoer in PJ per jaar. Bron: [Roos, 1997].

	secundair elektriciteitsverbruik (PJ per jaar)		
	referentiejaar	Duurzame Groei	Duurzame Balans
	1990	2020	2020
individueel personenvervoer	-	5.4	5.8
collectief personenvervoer	4.3	2.7	3.2
goederenvervoer	0.6	1.4	1.6
totaal	4.9	9.5	10.6

Uit tabel 4.4.1 kunnen voor de beide scenario's een aantal conclusies getrokken worden:

- De elektriciteitsvraag voor goederenvervoer (voornamelijk kleine elektrische bestelwagens voor stadsdistributie en vervoer per spoor) is klein ten opzichte van de elektriciteitsvraag voor de overige vervoersvormen.
- De elektriciteitsvraag voor collectief personenvervoer neemt af, omdat het materieel efficiënter met energie omgaat en omdat het treinvervoer afneemt.
- De elektriciteitsvraag voor individueel personenvervoer neemt toe en is in 2020 de grootste post in tabel 4.4.1.

Met betrekking tot de invloed op de elektriciteitsvraag (en daarmee de invloed op de elektriciteitsinfrastructuur) kan goederenvervoer buiten beschouwing worden gelaten, omdat daar de toename van de elektriciteitsvraag klein is ten opzichte van personenvervoer. Het collectief personenvervoer komt aan de orde in par. 4.4.3.

17 KEMA, afd. KST,
Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
R.J.F.vanGerwen@kema.nl

18 EnergieNed,
Postbus 9042
6800 GD Arnhem

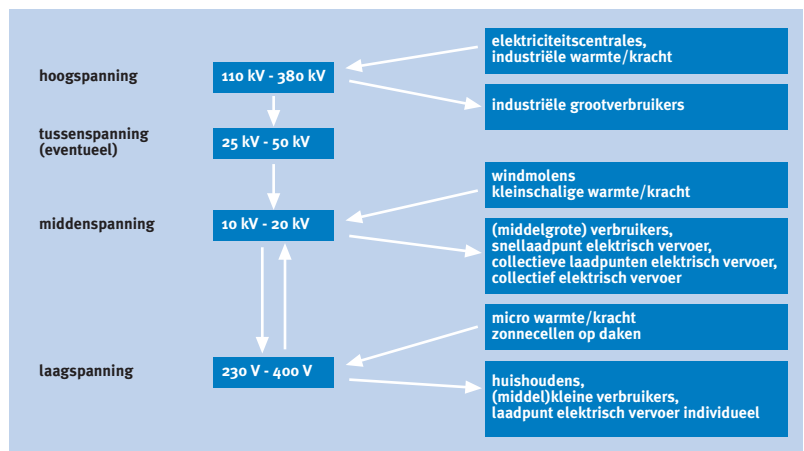
19 Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
ToussaintP@sep.nl

4.4.2 CAPACITEIT VAN DE ELEKTRISCHE INFRASTRUCTUUR

Naar verwachting zal vooral individueel personenvervoer een sterke invloed hebben op het elektriciteitsverbruik en de benodigde energie-infrastructuur. Het betreft batterij-elektrische voertuigen en hybride-elektrische voertuigen die voor stadsritten kunnen bijladen uit het net. Om de invloed van elektrisch vervoer op de infrastructuur te kunnen inschatten, is het van belang op welk spanningsniveau elektrische voertuigen zullen worden aangesloten. Fig. 4.4.1 geeft de plaats van laadeenheden ten opzichte van het elektriciteitsnet in Nederland schematisch weer. Hierin wordt getoond dat elektrische voertuigen zullen worden geladen via het laagspanningsnet of via het middenspanningsnet. Op het laagspanningsnet zullen individuele laadpunten worden aangesloten. Snellaadstations of collectieve laadpunten zullen (evt. via een aparte distributietransformator) op het middenspanningsnet worden aangesloten.

Fig. 4.4.1

Schematische weergave van de plaats van laadeenheden ten opzichte van het elektriciteitsnet in Nederland [Gerwen, 1998].



Midden- en hoogspanningsniveau

De elektriciteitsvraag voor elektrische voertuigen zal op midden- en hoogspanningsniveau niet tot problemen leiden. Het aandeel elektrisch vervoer ten opzichte van het totale elektriciteitsverbruik is klein (1,4% in scenario *Duurzame Groei* en 1,5% in scenario *Duurzame Balans* voor het jaar 2020) en valt ruim binnen de te verwachten autonome groei van het transport- en distributienet. Ook vindt voortdurende vervanging plaats van kabels in het net die dan zeker op de nieuw te verwachten elektriciteitsvraag zullen worden uitgelegd. De openbare of commerciële (snel)laadstations worden aangesloten op het 10 kV-distributienet. Wat betreft de distributie zijn hier geen technische problemen te verwachten. Voor lange tochten zijn openbare of commerciële snellaadstations noodzakelijk, maar door de kleine actieradius van de elektrovoertuigen moeten deze op korte afstand van elkaar staan. Dit zal een lage bezettingsgraad per station opleveren, wat weer resulteert in een hoge prijs per kWh.

Laagspanningsniveau

Op laagspanningsniveau (woningniveau) is een nadere beschouwing noodzakelijk. Uit experimenten blijkt dat men veel eerder geneigd is de auto thuis te laden dan aan een openbaar laadpunt [Schuld, 1997]. Het grootste deel van de auto's zal dan ook voornamelijk aan een individueel laadpunt thuis of bij het huis aan de openbare weg worden geladen.

In 2020 zal 8,4% (*Duurzame Groei*) respectievelijk 14% (*Duurzame Balans*) van het huishoudelijk energiegebruik voor het laden van elektrische voertuigen worden gebruikt (bij een penetratie van elektrische voertuigen per huishouden van respectievelijk 29% en 23%). Afhankelijk van het gemiddelde vraagpatroon van de overige huishoudelijke apparatuur kan een tijdelijke overbelasting van het laagspanningsdistributienet in een woonwijk voorkomen. Dit distributienet is er niet op uitgelegd om aan iedere woning het maximale vermogen te kunnen leveren, maar om het gemiddelde maximale vermogen te kunnen leveren. Een woning kan maximaal 5 kW tot 10 kW uit het net vragen (afhankelijk van het aansluitvermogen) maar gemiddeld over een woonwijk ligt dat tussen de 0,7 kW en 1,2 kW, omdat niet alle woningen tegelijkertijd hun aansluitvermogen vragen. Het distributienet in de wijk is uitgelegd op dit zogenaamde maximale gelijktijdige vermogen. De elektrische wagens die ook nog eens met een grote gelijktijdigheid (bijv. om zes uur na het thuiskomen) op het net worden aangesloten kunnen tot overbelasting in het distributienet leiden.



Fig. 4.4.2

Inductief laden. Bron: [Nissan, North America].

Uitgaande van een gemiddeld huishoudelijk vraagpatroon is in fig. 4.4.3 weergegeven wat de maximale gelijktijdige penetratiegraad (het maximaal aantal auto's dat in een woonwijk tegelijkertijd kan worden geladen) is. Met name in de avonduren (van zes tot twaalf) ligt de gelijktijdige penetratie bij 2,5 kW laadvermogen beneden de 20%. Dat is minder dan de eerdergenoemde verwachte penetratiegraden van 29% en 23% voor de duurzame scenario's in het jaar 2020. Hoewel het onwaarschijnlijk is dat alle elektrische wagens in een wijk ook rond die tijd opgeladen worden, is het evenmin onwaarschijnlijk dat de maximaal gelijktijdige penetratiegraad wordt overschreden. Een oplossing daarvoor (zonder meteen het net te hoeven verzwaren) is belastingsturing.

SNELLADEN

Om een batterij met een capaciteit van 30 kWh (een startaccu heeft een capaciteit van ca. 1 kWh) in een kwartier te kunnen opladen is een vermogen nodig van 120 kW. Dit is 20 tot 25 maal de capaciteit van een standaard woonhuisaansluiting en 12 maal de capaciteit van een drie-fasenaansluiting. Snelladen aan huis is dus met de huidige netstructuur onmogelijk, tenzij er extra opslagmogelijkheden in huis geplaatst worden. Opslag in huis heeft echter weer een negatieve invloed op het uiteindelijke rendement.

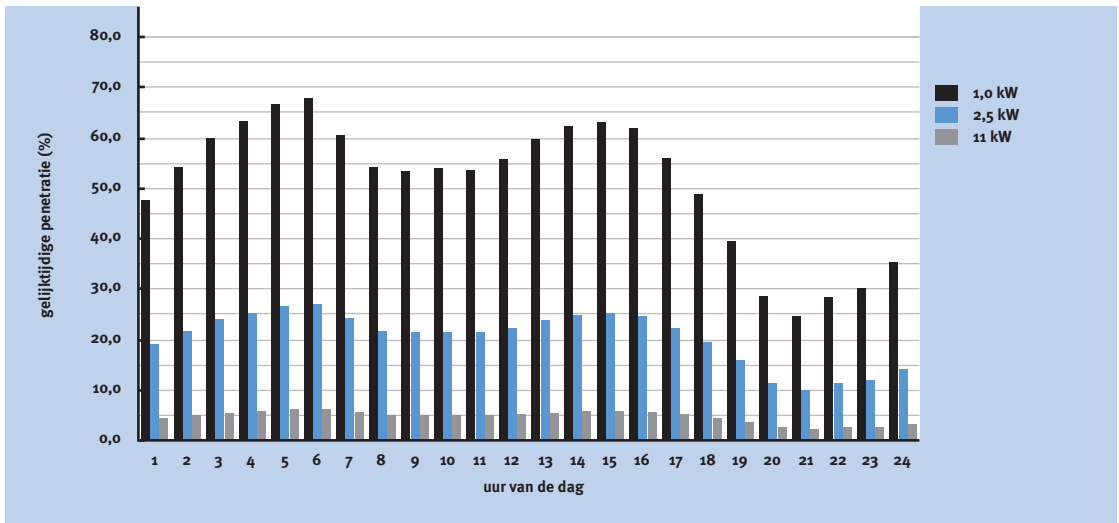


Fig. 4.4.3

De maximaal toegestane gelijktijdige penetratiegraad van elektrische voertuigen bij laadvermogens van 1 kW, 2,5 kW en 11 kW [Schuld, 1997]. Het opladen met 1 kW geeft een oplaadtijd van 30 uur voor de accu van 30 kWh, het opladen met 2,5 kW duurt 12 uur, met 11 kW minder dan 3 uur.



Fig. 4.4.4

Openbaar laadpunt. Bron: [General Motors, USA].

Als we ervan uitgaan dat de consument zijn auto zo snel mogelijk wil opladen, dan zal hij met een drie-fasengroep (zoals ook voor elektrisch koken wordt gebruikt) een lader van 11 kW kunnen gebruiken. Het laden duurt dan nog ongeveer drie uur.

Uit fig. 4.4.3 kan worden opgemaakt dat bij een laadvermogen van 11 kW nog maar in enkele procenten van de huishoudens gelijktijdig een elektrische auto geladen kan worden. In de periode tussen zes en negen uur 's avonds mag een piek in de elektriciteitsvraag verwacht worden. Theoretisch is deze piek te voorkomen door belastingsturing, ware het niet dat de wens om de auto snel weer op te laden vaak conflicteert met de belastingsturing. Een dergelijke regeling heeft dus alleen kans van slagen als er regelmatig uitzonderingen mogelijk zijn.

Conclusie

We kunnen concluderen dat echt snelladen (120 kW) aan huis met het huidige net niet mogelijk is. Zelfs wanneer laden met 11 kW bij de woning gebruikelijk wordt, moeten er reeds bij een penetratie van 2,2 % elektrische voertuigen maatregelen zoals verzwaring van het net of belastingsturing genomen worden. Als de genoemde penetratiegraden (29 en 23 %) van de duurzame scenario's waarheid worden, zijn al sturingsmaatregelen nodig bij de toepassing van 2,5 kW laders. Een maximaal laadvermogen van 1 kW levert geen problemen op, maar die beperking werkt funest op de introductie van elektrisch vervoer. Technieken voor snelladen en voor sturing van de elektriciteitsvraag moeten dan ook worden aangemerkt als sleuteltechnologie. Beide technologieën komen in par. 4.5 aan de orde.

Ook zal er niet bij iedere woning plaats zijn om te laden. In het scenario *Duurzame Groei* is er bij ongeveer 1 miljoen woningen geen plek om te laden bij de deur of op de oprit. Een openbare laadfaciliteit is dan noodzakelijk. Deze moet aan

voorwaarden voldoen wat betreft (elektrische) veiligheid, eenvoudige bedienbaarheid, vandalismebestendigheid, automatisch betalen, beveiliging tegen oneigenlijk gebruik (als parkeerplaats in plaats van als laadplek) en dergelijke. Een dergelijke laadfaciliteit kan als sleuteltechnologie voor elektrisch vervoer worden gezien.

Kwaliteit van de netspanning

Een vraag die samenhangt met de introductie van (snel)laders voor elektrische voertuigen in de woonomgeving is in hoeverre de kwaliteit van de netspanning hieronder te lijden zal hebben. In de VS [Domijan, 1998] wordt verwacht dat de kwaliteit van de netspanning in de woonomgeving sterk te lijden zal hebben van de introductie van laadapparaten. Dit kan leiden tot het slecht functioneren of zelfs uitvallen van gevoelige elektrische apparaten zoals pc's. Dit betekent tevens dat de distributiebedrijven extra moeten investeren om de kwaliteit van de netspanning op peil te houden.

De Nederlandse situatie is naar verwachting anders [Gerwen, 1996]. Apparaten die op het net worden aangesloten dienen te voldoen aan richtlijnen met betrekking tot de kwaliteit in relatie tot het elektriciteitsnet (ElektroMagnetische Compatibiliteit, EMC). Zogenaamde EMC-eisen stellen grenzen vast voor de:

- elektromagnetische gevoeligheid van een apparaat voor storingen van buitenaf (ElectroMagnetic Susceptibility, EMS)
- elektromagnetische verstoringen die door een apparaat worden geproduceerd (ElektroMagnetische Interferentie, EMI).

Grofweg kan worden gesteld dat bij huishoudelijke apparaten de nadruk ligt op eisen aan het produceren van elektromagnetische verstoringen en bij industriële apparaten op de gevoeligheid voor elektromagnetische verstoringen van buitenaf. Als laadapparaten voldoen aan de EMC-eisen die gelden voor huishoudelijke apparaten (apparaten met een aansluitvermogen kleiner dan 11 kW, dat wil zeggen apparaten die niet meer nodig hebben dan een 'normale' drie-fasengroep zoals die ook voor inductief koken wordt gebruikt), dan zijn problemen met de kwaliteit van de netspanning vrijwel uitgesloten. Problemen met de kwaliteit van de netspanning zoals geschetst in [Domijan, 1998] zullen hier dan ook niet voorkomen. Aanloopproblemen kunnen voorkomen als fabrikanten van industriële laadapparaten zich op de huishoudelijke markt gaan storten zonder hun apparaten aan te passen aan de EMC-eisen die voor huishoudelijke apparatuur gelden.

4.4.3 ELEKTRISCHE INFRASTRUCTUUR VOOR RAILVERVOER

ing. A.A. Hirdes²⁰

HISTORIE

De ontwikkeling en de invoering van de elektrische tractie dateert van de laatste twee decennia van de vorige eeuw. In deze periode werd deze tractievorm hoofdzakelijk gebruikt voor de lokale spoorwegen.

De elektrische tractie voor hoofdspoorwegen in Nederland dateert van 1908. In dat jaar startte de ZHESM²¹ met de exploitatie van de lijn tussen Den Haag en Rotterdam. De gekozen spanning bedroeg 10.000 V met een frequentie van 25 Hz. Dit was voor die tijd een zeer hoge spanning. Hoewel de waarden voor de spanning en frequentie ten opzichte van de momenteel gangbare spanningen nu wat vreemd overkomen, moet men zich wel realiseren dat er in die tijd nog geen sprake van standaardisatie was. Iedereen die behoefte aan elektrische tractie had wekte zelf zijn elektrische vermogen op.

De exploitatie van de lijn was ondanks een aantal technische problemen een succes. Toch koos men in 1921 voor 1500 V gelijkspanning voor de verdere elektrificatie in Nederland. Belangrijke overwegingen hierbij waren:

- De robuuste en betrouwbare gelijkstroommotoren.
- Het beschikbaar komen van goedkope en betrouwbare kwikdampgelijkrichters.
- Het feit dat telefoonlijnen niet door gelijkstroomsystemen beïnvloed worden.²²
- De geringe afstanden tussen de knooppunten.
- Het regeringsbesluit om het spoorwegnet te voeden uit het openbare net.
- Een betere uitgangspositie van de Nederlandse industrie.

Na de Tweede Wereldoorlog is de spanning bij de wederopbouw opnieuw ter discussie gesteld. Hierbij is vooral gekeken naar het 3 kV gelijkspanningssysteem, omdat dit systeem tot redelijke besparingen van de vaste installaties zou leiden. Omdat de wederopbouw zonder systeemwisseling veel sneller zou verlopen, is besloten om bij 1500 V gelijkspanning te blijven. De juistheid van deze keuze werd bevestigd, toen de inhoud van een belangrijk deel van de Nederlandse onderstations in Duitsland werd teruggevonden en weer kon worden gebruikt.

HUIDIGE SITUATIE

Het railvervoer was lange tijd onder te verdelen in hoofdspoorwegen ('heavy rail') en lokale spoorwegen (tram en metro), ieder met een eigen systeem van elektriciteitsvoorziening. De laatste tijd staat een tussenvorm, de 'light rail', sterk in de belangstelling.

Voor hoofdspoorwegen worden vier genormaliseerde systemen gebruikt, die elk weer een aantal varianten kennen. Deze systemen zijn:

²⁰ NS Railinfrabeheer,
afdeling Technische Systemen 700 III,
Postbus 2025
3500 HA Utrecht
aahirdes@ns.nl

²¹ Zuid Hollandse Elektrische
Spoorweg Maatschappij.

²² Beïnvloeding door zwerfstromen
was nauwelijks een probleem,
omdat er nog geen grote landelijke
leidingnetten waren.

- 1500 V gelijkspanning
- 3000 V gelijkspanning
- 15 kV 16 ²/₃ Hz eenfase-wisselspanning
- 25 kV 50 Hz wisselspanning.

De spanningsgrenzen van deze systemen zijn vastgelegd in de Europese Norm EN 50.163. Vooral de laatste twee zijn geschikt voor zware belastingen en distributie over grote afstanden. De systemen voor lokale spoorwegen zijn eenvoudiger, omdat de vermogensbehoefte geringer is en er minder eisen aan de distributie gesteld worden. Er wordt vrijwel altijd gebruik gemaakt van gelijkspanning. Gebruikte spanningen zijn 600 V, 750 V, 900 V, 1200 V en 1500 V. Er bestaat geen normering voor deze spanningen.

De licht railvoertuigen moeten geschikt zijn voor de energie- en seinsystemen die van zowel de hoofdspoorwegen als de lokale spoorwegen in het werkgebied liggen. Elk van deze spoorwegtypen kent zijn specifieke behoeften ten aanzien van de elektrische infrastructuur. In deze paragraaf wordt hoofdzakelijk ingegaan op de gevolgen voor de infrastructuur van de hoofdspoorwegen.

Het tractienet

Het tractienet levert elektrische energie aan de railvoertuigen. Het bestaat in grote lijnen uit voedingspunten, een transportsysteem en schakelstations. In de voedingspunten (onderstations) in Nederland wordt de uit het openbare net toegeleverde energie omlaag getransformeerd en gelijkgericht tot 1500 V nominaal. De gelijkstroom wordt dan verzameld op de verzamelrail en daarna via een schakelinstallatie verdeeld over de verschillende afnamegroepen. Het systeem wordt bovendien vanuit het onderstation beveiligd. De onderlinge afstand tussen de voedingspunten is 10 à 15 km.

Het transportsysteem bij heavy rail en trams bestaat in de regel uit een bovenleiding voor de voeding en een of beide spoorstaven voor het retourcircuit. Alleen in Zuid-Engeland kent men een derde rail voor heavy rail. Metrosystemen maken meestal gebruik van een derde rail voor de voeding en een of beide spoorstaven voor het retourcircuit. De metro in Londen kent in afwijking hiervan een vierde rail voor het retourcircuit.

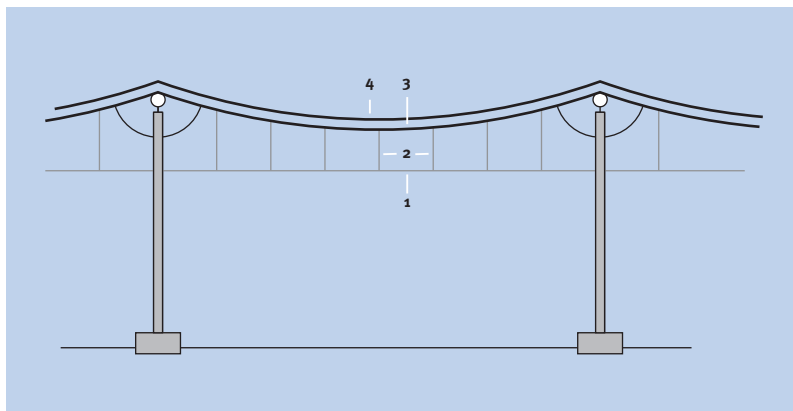
Sommige integrale transportsystemen maken ondergronds gebruik van een derde rail en boven de grond van een bovenleiding (bijv. de 'Amstelveenlijn').

Bovenleidingsystemen

Voor een goede stroomafname is een goede combinatie van bovenleidingsysteem en stroomafnemer vereist. De afstemming tussen beide elementen wordt kritischer naarmate de snelheid hoger wordt. Omdat een sleepstuk eenvoudiger te vervangen is dan een bovenleiding, moet de slijtage alleen aan het sleepstuk plaatsvinden. De bovenleiding wordt getoond in fig. 4.4.5.

Fig. 4.4-5

Bovenleiding. Het Nederlandse 1500 V-bovenleidingsysteem bestaat uit een koperen draagkabel (3) met een doorsnede van 150 mm² die via hangdraden (2) verbonden is met 2 rijdraden van 100 mm² koper elk (1). De rijdraden zijn in zigzag (+ en - 30 cm t.o.v. de hartlijn van het spoor) opgehangen om voor een gelijkmatige slijtage van het sleepstuk borg te staan. Ter verlaging van de elektrische weerstand is er parallel aan de draagkabel nog een tweede kabel (4) van 150 mm² opgehangen die periodiek elektrisch met de draagkabel verbonden is. De bovenleiding is opgebouwd uit secties van ongeveer 1500 m lang.



De standaard bovenleiding voor 1500 V bestaat in Nederland uit koperen geleiders met een totale doorsnede van 500 mm². Bovenleidingen voor 15 kV- en 25 kV-systemen kunnen als gevolg van de lagere stroomsterktes lichter uitgevoerd worden. Hier gebruikt men veelal een bronzen draagkabel van 70 of 120 mm² in combinatie met een enkele koperen rijdraad van 120 of 150 mm².

Een tram kan meestal toe met een eenvoudiger bovenleiding. Bij de ‘tramop-hanging’ ontbreekt de draagkabel. De rijdraad is direct aan de zijwaartse bevestiging opgehangen.

Dimensionering van het tractienet

Bij de dimensionering van het tractienet worden de belangrijkste ingangsvariabelen gevormd door de dienstregeling en het gebruik van het materieel.

Daarnaast speelt het gekozen tractiesysteem met zijn specifieke eigenschappen natuurlijk een belangrijke rol. Dit betekent dat het tractienet als het ware aan de hand van de dienstregeling ontwikkeld wordt. Hoewel er door beschikbaarheidseisen en componentkeuze natuurlijk altijd enige marge in het systeem aanwezig is, betekent deze manier van werken dat iedere dienstregeling met al zijn varianten op zijn energetische behoefte onderzocht moet worden. Ook de gevolgen van wijzigingen in het gebruik van materieel mogen in dat verband niet buiten beschouwing blijven.

Op dit moment drukken simulatietechnieken, geavanceerde vermogens-elektronica en ontwikkelingen op het gebied van schakelaars al hun stempel op de configuratie van het tractienet. De simulatietechnieken maken de dimensionering van het tractienet eenvoudiger, omdat de gevolgen van wijzigingen in de dienstregeling en het gebruik van materieel sneller en eenvoudiger zichtbaar te maken zijn. Keerzijde is wel dat het tractienet met minder marge gedimensioneerd wordt, waardoor het systeem gevoeliger wordt voor onverwachte vermogenstoename, bijvoorbeeld als gevolg van storingen of vertragingen.

De vermogens-elektronica in het materieel heeft misschien wel de grootste invloed.

Het maakt de treinaandrijving beter regelbaar, waardoor de acceleratie comfortabeler wordt. Daarnaast wordt het rendement ten opzichte van de oude weerstandsregelingen aanzienlijk vergroot. Waar de oude systemen zichzelf begrensd in geval van een (te) lage spanning van de bovenleiding, blijven moderne treinen veel langer de maximaal toelaatbare stroom trekken. Het tractienet in Nederland is ooit ontworpen voor 4 kA gedurende maximaal 15 seconden en eenmaal per 10 minuten een trein. Nu rijden er treinen met een onderling tijdsverschil van drie à vier minuten, die gedurende de volledige acceleratietijd 4 kA continu vragen. Dit is bij sommige samenstellingen een minuut of tien achtereen mogelijk. Dit had onder andere uitgebrande kabels tot gevolg. Nieuwe schakelaars hebben vooral invloed op de kosten van de levensduur van installaties. Vacuümschakelaars voor de voeding van onderstations en distributie bij de wisselspanningssystemen zijn in vergelijking tot hun olie(arme) en SF₆²³ voorgangers nagenoeg onderhoudsvrij, betrouwbaarder en compacter. Alleen voor netspanningen van 52 kV en hoger blijft SF₆ vooralsnog onontkoombaar. Ook op het gebied van de gelijkstroom zijn er interessante ontwikkelingen, die zeker verder zullen gaan. De firma ACEC heeft een halfstatische schakelaar ontwikkeld, waarin de stroom met behulp van vermogenselektronica onderbroken wordt. De betrouwbaarheid is helaas nog niet op het gewenste niveau, maar dat is een kwestie van tijd. Onderstations die met gestuurde gelijkrichters uitgevoerd zijn of worden hebben in sommige gevallen helemaal geen gelijkstroomvermogenschakelaars meer nodig.

TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN

Hoewel het lastig is om goede uitspraken over de toekomst te doen, zijn er toch een aantal ontwikkelingen zichtbaar:

- Een verhoging van de rijsnelheid.
- Een snellere acceleratie.
- Treinen gaan dichter op elkaar rijden.
- Recuperatief remmen en energieopslag.
- Verdere integratie van light railconcepten.
- Concurrentie op het spoor en dus een hoge mate van onafhankelijkheid van het net ten opzichte van de dienstregeling.

Hierna zal nader worden ingegaan op de gevolgen van deze ontwikkelingen voor de Nederlandse elektrische infrastructuur.

²³ SF₆ is een gas met gunstige eigenschappen voor gebruik in schakelaars. Het is echter ook een sterk broeikasgas. Daarom is in 1997 in Kyoto afgesproken het verbruik terug te dringen. Zie ook deel 2, par. 2.1, Materialen voor elektrische isolatie.

Een hogere rijsnelheid

Een verhoging van de snelheid leidt tot een grotere behoefte aan energie. In het huidige net heeft een normale trein genoeg aan ongeveer 6 MW (overigens het maximale dat in Nederland per trein beschikbaar is). Een enkel TGV-stel vraagt ongeveer 11 MW. Omdat men ook met gekoppelde samenstellingen rijdt (maximaal 2 stellen) moet er dus ongeveer 22 MW beschikbaar zijn. Door de hoge

Fig. 4.4.6

De TGV-'duplex' met twee passagiersniveaus. 8800 kW vermogen geeft een topsnelheid van 300 km per uur. Foto: C. Tillier.



snelheid en daardoor grote treinafstand worden er bovendien veel hogere eisen aan de transportcapaciteit van het net gesteld. Een grotere treinafstand betekent een grotere ruimtelijke spreiding van de totale belasting van het onderstation. Het bereiken van alle treinen stelt dus hoge eisen aan de transportcapaciteit van het net.

De onderlinge afstand tussen 2 TGV's is nu bij 300 km per uur minimaal ongeveer 3 minuten, dus ongeveer 15 km. Hiervoor zijn alleen de zwaardere 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz eenfase-wisselspanning en 25 kV 50 Hz wisselspanning geschikt. Voor Nederland betekent dat dus de introductie van een nieuw systeem als men hard wil rijden. Inmiddels heeft men gekozen voor 25 kV wisselspanning.

Sneller accelereren

De acceleratietijd is afhankelijk van het beschikbare vermogen, de asdruk en het aantal aangedreven assen. Het vermogen dat via de wielband aan de spoorstaaf overgedragen kan worden is afhankelijk van de wrijvingsweerstand tussen wielband en spoorstaaf. Deze wrijvingsweerstand is onder andere afhankelijk van de asdruk.

Omdat het vermogen het product tussen koppel en toerental is, zullen lichtere en sneller accelererende treinen dus over een groter aantal aangedreven assen (meer motoren) moeten beschikken. Voor de vaste netvoedingsinstallaties betekent dit grotere belastingsprongen en hogere eisen aan het transportvermogen van het systeem. Een andere mogelijkheid is het installeren van meer onderstations.

Treinen rijden dicht op elkaar

Een kortere treinopvolgtijd vraagt meer vermogenstransport en heeft dus ingrijpende gevolgen voor de energievoorziening. De gevolgen zijn groter naarmate

het spanningsniveau lager is. Het Nederlandse 1500 V gelijkspanningssysteem is in dit verband een slecht uitgangspunt, omdat meer energietransport als gevolg van de lage spanning nauwelijks mogelijk is. In principe zijn de volgende oplossingen denkbaar:

- De totale geleidersdoorsnede van de bovenleiding vergroten.
- Meer onderstations bouwen.
- Overschakelen naar een hogere spanning.

Het vergroten van de geleidersdoorsnede van de bovenleiding geeft bij nieuwbouw beperkt soelaas. Bij bestaande systemen is het bijplaatsen van extra geleiders niet mogelijk. Het systeem ziet er weliswaar robuust uit, maar bevindt zich door voorgaande uitbreidingen aan de grens van de eisen voor mechanische stabiliteit. Vooral wind kan door het grote windvangende oppervlak een grote belasting zijn. De rijdraad mag niet te ver uitwaaien in verband met de breedte van de stroomafnemer. Verzwaring betekent grootschalige vervanging en geeft maar een beperkte verbetering.

15 kV 16 ²/3 Hz eenfase-wisselspanning en 25 kV 50 Hz wisselspanning laten opvolgtijden van 1 minuut en soms minder toe. Met simulaties is aan te tonen dat de afstand tot het onderstation dan ongeveer gelijk wordt aan de treinafstand. Dit betekent afstanden van 1 à 1,5 km tussen de onderstations. De bestaande 200 onderstations moeten dan aangevuld worden met 400 à 800 extra onderstations, afhankelijk van de grootte van het gebied waarvoor dit geldt. Bij deze afstanden wordt ook de voeding uit het openbare middenspanningsnet een probleem, zodat het invoeren van een eigen middenspanningsdistributienet onontkoombaar wordt.

Recuperatief remmen

Bij het afremmen van de trein komt er een grote hoeveelheid energie vrij. Deze energie kan op een aantal manieren nuttig worden gebruikt:

- Hergebruik in de trein zelf, bijvoorbeeld voor verwarming. Dit is de minst efficiënte methode, maar wel het eenvoudigste toe te passen. Het elektriciteitsnet merkt hier niets van.
- Terugleveren in het tractienet heeft alleen zin als er een trein in de buurt is om de energie op te nemen. Door de beperkte marges ten aanzien van de maximale spanningen²⁴ kan de teruggeleverde energie niet over grotere afstanden getransporteerd worden. Bij de dimensionering van de vaste installaties mag men er niet zonder meer van uitgaan dat er altijd een recupererende trein in de buurt aanwezig is. De gevolgen van de eventuele verhoogde spanning door het terugleveren en de gevolgen voor de kortsluitselectiviteit moeten worden opgevangen.
- Teruglevering aan het openbare net is de meest geavanceerde vorm, maar heeft ook de meeste consequenties voor de vaste installaties. De DC-netten

.....
²⁴ Zie ook de Europese Norm EN 50.163.

- moeten de gelijkrichters vervangen door omvormers die de gerecupereerde energie weer kunnen omzetten naar een 50 Hz wisselspanning. Op dit moment is ombouw niet rendabel.
- De laatste optie is het opslaan van de gerecupereerde energie in de trein zelf of via het tractienet bij de onderstations. De haalbaarheid van deze oplossing hangt sterk af van de beschikbare opslagstechnieken, en wordt op het moment nog niet als rendabel gezien.

Samengevat kan men zeggen dat recuperatie – buiten hergebruik in de trein – alleen een grote toegevoegde waarde heeft in gebieden met zeer dichte vervoersstromen en of bij systemen met een hoge transportcapaciteit.

Verbeteringen in opslagsystemen kunnen deze situatie echter veranderen.

Verdere integratie van light railconcepten

Integratie van light railconcepten is een logische stap voorwaarts, maar vaak minder eenvoudig dan het op het eerste gezicht lijkt. Het materieel moet geschikt zijn voor zowel de spanningssystemen in de stedelijke gebieden als voor de spanningssystemen voor de heavy rail. Ten aanzien van de energievoorziening voor de tractie blijven de problemen beperkt. De toenemende verkeersintensiteit is ook zonder light rail een punt van aandacht. Er zullen alleen overgangen tussen de gebieden met verschillende bovenleidingsspanning geïmplementeerd moeten worden. Dit is meer een praktisch probleem; het wordt in Parijs al veel toegepast. Wel nieuw zal de behoefte aan zeer compacte overgangen zijn.

Concurrentie op het spoor

In verband met de grensoverschrijdende openstelling van de hogesnelheidsnetten moeten er afspraken gemaakt worden over standaarden. Het zal logisch zijn dat de spoorbreedte hetzelfde moet zijn als men wil doorrijden, maar ook over zaken zoals de bovenleidingspanning, de rijdraadhoogte, de breedte van de stroomafnemer en het maximaal af te nemen vermogen moeten afspraken gemaakt worden. In dit verband worden door de UIC (Union International de Chemin de fer) de zogenaamde TSI²⁵-normen opgesteld. In een later stadium zal deze normering ook aangepast worden voor grensoverschrijdend verkeer met lagere snelheden.

Zoals eerder is gesteld, is de energievoorziening tot nu toe om de dienstregeling en het daarbij behorende gebruik van materieel heen gebouwd. Het is duidelijk dat deze belangrijke gegevens voortaan niet meer beschikbaar zijn voor de technische ontwerpafdeling. We weten dus niet wie er wanneer met welke trein gaat rijden. De klant (de transportonderneming) gaat ervan uit dat de energie altijd voorhanden is. Dat is in de concessie afgedekt. Dit vraagt een grote flexibiliteit in de energievoorziening.

CONCLUSIE

Een verdere verdichting van de vervoersstromen vereist een zwaar(der) transportsysteem en een groot opgesteld vermogen per km. Dimensionering van een dergelijk net is alleen mogelijk door toepassing van geavanceerde simulatiemodellen in combinatie met methodieken om onafhankelijk van de dienstregeling te ontwerpen. Ingrijpende aanpassingen lijken in dit verband dan ook onvermijdelijk.

Hogere snelheden en zwaar goederenvervoer hebben ertoe geleid dat er een nieuw systeem (25 kV) geïntroduceerd wordt.

Invoer van light rail dat naast de regionale systemen ook geschikt moet zijn voor een of beide heavy railsystemen vraagt om innovatieve oplossingen.

Als sleuteltechnologieën voor het railvervoer in de komende decennia zijn te noemen:

- Simulatiemodellen (software).
- Compacte overgangssystemen tussen heavy- en light railenergiesystemen.
- Treindetectie- en beveiligingssystemen voor light rail.
- Converters voor verschillende energiesystemen (light rail).
- Omzeters voor het terugleveren van gerecupereerde energie.
- Opslagmogelijkheden voor de korte termijn (minuten tot uren), afhankelijk van de treinopvolgtijd voor opslag van gerecupereerde energie, voor stationaire opslag of opslag aan boord.
- Vermogensregelingen voor de combinatie van opslag aan boord met externe energietoevoer.
- Vermogensregelingen voor aandrijving tot 1500 V/4 kA.
- Vermogensschakelaars voor 25 KV wisselspanning.
- Vermogensschakelaars en gestuurde gelijkrichters 1500 V gelijkspanning.

4.5 SLEUTELTECHNOLOGIEËN

In de volgende paragrafen wordt een aantal belangrijke technologieën voor de elektrificatie van vervoer behandeld. De behandeling in deze paragrafen richt zich uitsluitend op de toepassingen in vervoer; de meeste technologieën worden in deel 2 in een algemeen kader behandeld. Ook de werkingsprincipes komen in deel 2 aan de orde.

4.5.1 REVOLUTIE OF EVOLUTIE?

*P.C. McKay*²⁶

Technologische vernieuwingen hebben sterk de neiging om zich langs evolutionaire weg te ontwikkelen, ondanks dat er vaak serieuze pogingen ondernomen worden om een technologische revolutie te ontketenen. Er zijn diverse redenen aan te wijzen voor de kracht van evolutionaire ontwikkelingen. Allereerst is er bij kleine ontwikkelingsstappen vanuit de bestaande technologie een kleiner risico op mislukking. Daarnaast is er vaak al veel geïnvesteerd in de bestaande technologie, waardoor er sprake kan zijn van kapitaalvernietiging bij het introduceren van een geheel nieuwe technologie. Vaak is er een grote investering nodig om de juiste randvoorwaarden te scheppen, zodat de nieuwe technologie geïntroduceerd kan worden. De dreiging van een revolutie kan ook als katalysator werken op de evolutionaire ontwikkeling en deze versnellen. Al deze zaken tezamen maken technologische revoluties tot een uitzondering.

De invoering van de elektrische auto als vervanging van de conventionele auto met inwendige verbrandingsmotor is tot op zekere hoogte revolutionair, al moeten we ons vanuit een historisch perspectief realiseren dat de eerste automobielen vooral elektrisch aangedreven waren. De problemen rond de laadinfrastructuur bij de introductie van elektrische voertuigen zijn een duidelijk voorbeeld van de randvoorwaardelijke problemen die samenhangen met de introductie van een nieuwe technologie. De belangstelling voor het elektrische voertuig heeft een versnelde evolutionaire ontwikkeling van het conventionele voertuig in gang gezet. Deze ontwikkeling is een combinatie van beide technologieën, het hybride voertuig. De hybride is uitgerust met zowel een verbrandingsmotor (op conventionele of alternatieve brandstof) als een elektromotor gekoppeld aan een batterij. Afhankelijk van de uitvoering kan de verbrandingsmotor dienen als aandrijving van de wielen, en of van een generator voor het voeden van de elektromotor en het laden van de batterij. De kracht van deze ontwikkeling is dat deze uit twee richtingen komt:

- Uit de al genoemde ontwikkeling van het conventionele voertuig dat een aantal voordelen meekrijgt van het elektrische voertuig, zoals een beperking van lokale emissies en een laag energieverbruik.

.....
²⁶ ECN Beleidsstudies,
Postbus 1
1755 ZG Petten
mckay@ecn.nl

- Uit de ontwikkeling van het elektrische voertuig, waarin een aantal huidige nadelen en vooral de beperkte actieradius in combinatie met het hoge gewicht en de hoge prijs van de batterij zijn gecompenseerd. De verwachting is dat in de evolutie van het hybride voertuig gaandeweg steeds meer mechanische componenten vervangen zullen worden door elektrische en elektronische componenten. Dat geldt bijvoorbeeld voor de versnellingsbak en de eventuele vermogensverdeling tussen de primaire en de elektrische aandrijving.

Uiteindelijk kan zelfs de primaire krachtbron van een hybride in de toekomst volledig elektrochemisch worden. De combinatie van een verbandingsmotor en een generator wordt dan vervangen door een brandstofcel. Het elektrische voertuig met een brandstofcel voor de opwekking van de benodigde elektriciteit is een revolutionaire ontwikkeling die midden in de belangstelling staat. Om de infrastructurele problemen te omzeilen is er een duidelijke trend waarneembaar om het revolutionaire karakter iets af te zwakken ten gunste van een mogelijk snellere toepasbaarheid. De huidige generatie brandstofcellen heeft namelijk waterstof als brandstof nodig. Dit geeft in de praktijk twee problemen. Aan de ene kant is waterstof moeilijk op te slaan aan boord van een voertuig, en aan de andere kant is de infrastructuur om waterstof te kunnen tanken niet aanwezig. Er zijn nu ontwikkelingen in gang gezet om gebruik te maken van een bestaande brandstof en een bestaande infrastructuur door de conversie naar waterstof aan boord van het voertuig te laten plaatsvinden.

Het voordeel is dat deze ontwikkelingen de technologie voortbrengen die het revolutionaire brandstofcel-hybride voertuig en wellicht het brandstofcelvoertuig tot een realiteit zullen maken. Het hybride concept (met beperkte elektriciteitsopslag) heeft goede mogelijkheden voor het recupereren van remenergie. Een direct door een brandstofcel aangedreven voertuig zou hiervoor aan boord waterstof moeten genereren²⁷.

Er zullen nog vele kleine doorbraken nodig zijn op diverse gebieden om de geschetste ontwikkelingen te laten slagen. Een evolutionaire revolutie?

²⁷ Voorlopig is het rendement van elektriciteitsopslag groter dan dat van waterstofproductie, maar ook dit gebied is volop in ontwikkeling.

4.5.2 STURING VAN DE ELEKTRICITEITSVRAAG

ir. R.J.F. van Gerwen²⁸, ir. W.G.F. van den Wittenboer²⁹, ir. P. Toussaint³⁰

Bij het thuis opladen van elektrische auto's moet de elektriciteitsvraag vanaf een bepaalde penetratiegraad gestuurd worden.

Met deze sturing ('demand side management', DSM) kan de elektriciteitsvraag verschoven worden van een 'belast' tijdstip naar een 'onbelast' tijdstip [Schuld, 1997]. Daarbij worden twee vormen van sturing van de belasting onderkend: direct en indirect. Indirecte sturing van de belasting gebeurt door het toepassen van een gedifferentieerd elektriciteitsstarief (bijv. het dag- en nachttarief). Op deze manier worden gebruikers gestimuleerd om apparaten met een hoog vermogen (wasdroger, wasmachine, vaatwasser, elektrische boiler) alleen te gebruiken tijdens daluren. Een dergelijk systeem kan uitgebreid worden met een directe aflezing thuis van het momentane energiegebruik (uitgedrukt in euro's) of een nieuwe variant van de muntgasmeter, waarbij regelmatig een chipkaart moet worden opgeladen en in de elektriciteitsmeter moet worden gestopt om elektriciteit te hebben. Deze manier van sturing kan effectief zijn (zeker bij voldoende terugkoppeling over de vermeden energiekosten), maar het resultaat is nooit zeker.

Bij directe belastingsturing is het resultaat wel zeker. Bepaalde gebruikers worden door het elektriciteitsbedrijf op afstand in- en uitgeschakeld. De nachstroomboilers zijn daarvan een voorbeeld. Dit vraagt om extra investeringen door het energiebedrijf. Daarnaast wil de gebruiker zekerheid dat bijvoorbeeld zijn elektrische auto 's ochtends wel weer volledig geladen is.

Technisch gesproken levert demand side management geen problemen op, alle technologieën die ervoor nodig zijn lijken beschikbaar. Een universele standaard voor gebruikers, fabrikanten van apparatuur en energiedistributiebedrijven ontbreekt echter nog. Demand side management is nauw gerelateerd aan het versturen van informatie over het elektriciteitsnet en het bestuurbaar maken van applicaties, waarop in par. 2.6.6 uitvoerig wordt ingegaan.

Overigens is het een dermate belangrijk instrument voor de elektriciteitssector – onder andere in verband met de optimale benutting van het net – dat de verdere ontwikkeling daarvan ongetwijfeld zal plaatsvinden [Schuld, 1997].

28 KEMA, afdeling KST,
Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
R.J.F.vanGerwen@kema.nl

29 EnergieNed,
Postbus 9042
6800 GD Arnhem

30 Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
ToussaintP@sep.nl

4.5.3 ELEKTROMOTOREN VOOR MOBIELE TOEPASSINGEN

dr. A. Bos³⁰

INLEIDING

Elektromotoren worden al meer dan 150 jaar gebruikt in mobiele toepassingen. Een van de pioniers was de Groningse hoogleraar Sibrandus Stratingh, die in 1835 met de hulp van instrumentmaker Christophus Becker een elektrisch modelvoertuigje bouwde op basis van roterende elektromagneten.

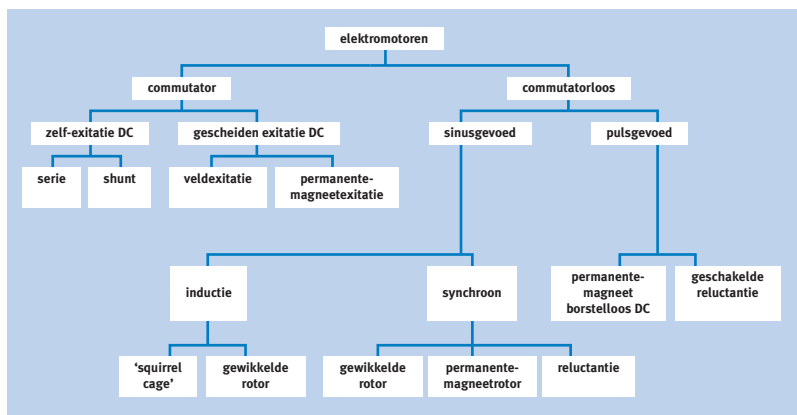
De toepassing van elektriciteit voor voortbeweging werd in de loop van de 19e eeuw vooral ontwikkeld voor de elektrische tram, waarbij Siemens een pioniersrol vervulde. Tegen het einde van de 19e eeuw waren belangrijke delen van het Amerikaanse en Europese tramweganet geëlektrificeerd.

Tijdens de opkomst van het autonome voertuig tegen het einde van de 19e eeuw was de elektrische aandrijving een geduchte concurrent van de stoom- en de verbrandingsmotor. Onder bepaalde omstandigheden was de elektro-auto lange tijd zelfs superieur aan zijn concurrenten. Na de jaren vijftig werd het elektrische voertuig om allerlei redenen – waaronder maar zeer ten dele technische – voor decennia in enkele niche-toepassingen gedrukt. Geholpen door milieuargumenten en nieuwe technische ontwikkelingen zal de elektro-auto de komende jaren weer kunnen concurreren met de (inmiddels ook sterk verbeterde) verbrandingsmotorvoertuigen.

Voor de elektrische componenten van de eerste elektro-auto's greep men terug op de systemen zoals deze gebruikt werden in de elektrische tram. Wat betreft de elektromotor ging het om een gelijkstroommotor met seriebekrachtiging, waarvan het rendement nogal afnam ten gevolge van de noodzakelijke verkleining van de afmetingen. Dit type motor bleef de afgelopen 100 jaar bij elektrisch bewogen autonome voertuigen als standaardtype in gebruik. Dit ondanks de complexiteit van de motor die ook slijtagegevoelige onderdelen bevat, de (kool)borstels en de bijbehorende roterende contacten van de commutator [Mom, 1995; Mom, 1997].

Fig. 4.5.1

Elektromotoren voor tractiedoeleinden in elektrische voertuigen [Chan, 1997]. Voor een uitleg van de werking van de voornaamste typen zie deel 2, par. 6.4 Kracht en voeding voor elektronische apparaten.



31 ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten

De afgelopen 15 tot 20 jaar zijn er echter tal van andere typen elektromotoren in beeld gekomen. Een kort overzicht van de verschillende motoren die op dit moment in gebruik zijn en een voorzichtige prognose van te verwachten ontwikkelingen volgen hierna. De lineaire motor wordt niet behandeld, aangezien deze voor autonome toepassingen niet van belang wordt geacht.

EEN OVERZICHT

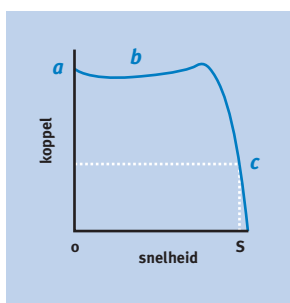
In fig. 4.5.1 wordt een indeling gegeven van de verschillende typen elektromotoren. Het gaat te ver om al deze motoren te beschrijven. In de hiernavolgende alinea's worden dan ook alleen de motoren beschreven, die op dit moment op enige schaal in autonome elektrische voertuigen worden toegepast [Chan, 1997; Gloor, 1996; Keuvelaar, 1993; Mom, 1995]. Voor een uitleg van de werking van deze motoren verwijzen we naar deel 2, par. 6.4 Kracht en voeding voor elektronische apparaten.

Een belangrijk element bij het gebruik van een aandrijfsysteem in een voertuig berust op het directe verband tussen motorvermogen en snelheid dat terug te vertalen is naar motorkoppel en toerental. Het ideale verband tussen motorvermogen en snelheid van een voertuig heeft de vorm van een hyperbool en wordt de ideale maximale-aandrijfkraachthyperbool genoemd. Praktisch gesproken komt dit neer op een hoog koppel bij stilstand of zeer lage snelheid, gevolgd door een constant koppel over een breed toerentalbereik bij grotere snelheden. De conventionele gelijkstroommotor kan deze ideale hyperbool goed benaderen, maar het materiaalgebruik, de complexiteit en de afmetingen van de motor leiden tot belangrijke energieverliezen. De koppel-toerentalkarakteristiek van de commutatorloze wisselstroommotoren is door recente technische ontwikkelingen op het gebied van elektronica en materialen inmiddels vergelijkbaar of zelfs superieur aan die van gelijkstroommotoren.

Fig. 4.5.2

Ideale maximale-aandrijfkraachthyperbool.

- a koppel bij stilstand
- b versnellingskoppel
- c koppel bij hoge snelheid



Gelijkstroommotoren

Zoals eerder werd vermeld, is de gelijkstroommotor het oudste type elektromotor dat nog steeds veelvuldig wordt toegepast. Dit geldt vooral voor de seriegeschakelde gelijkstroommotor, waarmee de vanouds elektrisch aangedreven vorkheftrucks worden uitgerust. De koppel-toerentalkarakteristiek van deze motoren is zodanig dat daarvoor geen complexe elektronische regelingen nodig zijn. Nadelen van gelijkstroommachines zijn naast de al genoemde aanwezigheid van koolborstels het gewicht, de kosten, de lage maximale snelheid en het lage rendement.

De verschillende bestaande variaties van dit type motor leiden tot verschillende verbeteringen zoals een eenvoudig regelbare snelheid en een hoog startkoppel (DC serie geschakeld), een goede constante snelheidskarakteristiek (DC parallel geschakeld) of verbeterd rendement (permanent magneet bekrachtigd). De laatste variant wordt met name gebruikt als een batterij de stroom moet leveren.

Dit type motor wordt in diverse elektrische auto's ingebouwd, waaronder de Daihatsu Hijet (DC serie geschakeld), Mazda Bongo (DC parallel geschakeld), Fiat 900E/E2 en Suzuki Senior Tricycle.

Een vermogensdichtheid van 0,25 - 0,33 KW/kg is op dit moment 'state of the art'. In tabel 4.5.1 worden de voornaamste eigenschappen van enkele elektromotoren voor tractie weergegeven.

	Gelijkstroommotor	Borstelloze gelijkstroommotor	Synchrone elektromotor	Asynchrone motor
maximaal rendement (%)	85 - 89	95 - 97	~90	94 - 95
rendement bij 10% deellast (%)	80 - 87	73 - 82	?	93 - 94
maximaal toelaatbaar toerental (min ⁻¹)	4.000 - 6.000	4.000 - 10.000	3.000 - 10.000	9.000 - 15.000
vermogensdichtheid (kW/kg)	< 0,3	?	> 0,8	< 0,2
kosten per kW piekvermogen aan de as (\$) ³²	20 - 30	5 - 20	?	2,75 - 5,0
robuustheid	goed	redelijk	goed	uitstekend

Tabel 4.5.1

Vergelijking van enkele typen elektromotoren voor tractie. Vooral met betrekking tot de kosten moet enige reserve in acht genomen worden gezien de geringe ervaring met nieuwe typen [Mom, 1995].

Wisselstroommotoren

Wisselstroommotoren zijn onder andere aantrekkelijk door de afwezigheid van koolborstels. Naast eigenschappen als eenvoud en betrouwbaarheid zijn wisselstroommotoren tegenwoordig vrijwel onderhoudsvrij, hebben lage bedrijfskosten, een hoog rendement en een hoge vermogensdichtheid.

Door het gebruik van nieuwe magnetische materialen kunnen motoren met hoge vermogensdichtheden bij een laag gewicht worden geconstrueerd.

De complexe elektronische regelingen die tegenwoordig mogelijk zijn kunnen vervolgens de motoren de gewenste koppel-toerenkarakteristiek geven.

De meest gebruikte wisselstroommotoren zijn de borstelloze wisselstroommotoren en de draaistroommotoren, onderverdeeld in de synchrone en de asynchrone of inductiemotor.

De synchrone elektromotor

De synchrone elektromotor kan wegens zijn eigenschappen licht worden uitgevoerd. Het ontbreken van koolborstels en het gebruik van permanente magneten kan leiden tot een hoog rendement. Het toerental komt niet boven 10.000 toeren per minuut. Ook worden er hoge eisen gesteld aan de regeling. De Audi Duo en de Renault Clio, maar ook Japanse fabrikaten als Nissan en Toyota maken gebruik van een synchrone motor. Door permanente magneten te 'begraven' in het magnetische rotorcircuit wordt bij constante vermogenslevering een breed snelheidsgebied bereikt. Een dergelijke motor werd gebruikt in

³² Kosten in 1995.

de Ford/GE ETX-II. Een variant, die door Mercedes in een model 190 werd ingebouwd, was het door MagnetMotor ontwikkelde MM-concept, een synchrone buitenpoolmotor met een hoog rendement en een hoge vermogensdichtheid. Het piekkoppel hiervan bedroeg 1.000 Nm.

De asynchrone of inductiemotor

Dit type motor is vanwege zijn robuustheid en eenvoud de meest gebruikte industriële motor. Door de afwezigheid van koolborstels en de robuuste constructie is een toerental tot 15.000 toeren per minuut mogelijk, wat weer kan leiden tot gewichtsverlaging en dus een verhoging van de vermogensdichtheid. De motorkarakteristiek vraagt een complexe vermogensregeling voor mobiele toepassingen, waardoor de voordelen ten opzichte van gelijkstroommotoren beperkt blijven.

Dergelijke motorconcepten werden toegepast in een Chrysler Voyager, in de Ford ETX-II en Aerostar, en in de Nissan FEV. Ook General Motors maakte er gebruik van in de Impact 4.

De borstelloze gelijkstroommotor

Eigenlijk wordt deze motor gevoed met geschakelde gelijkstroom of wisselstroom. Maar omdat de rotor een permanente magneet is, gedraagt de motor zich als een gelijkstroommotor en wordt daarom zo aangeduid. Voordelen van deze motor zijn een hoog rendement en vanwege een verbeterde warmtehouding een verhoogde elektrische belasting en vermogensdichtheid ten opzichte van de gelijkstroommotor. De Japanse Iza (geproduceerd door de Tokyo Electric Power Company) is uitgerust met vier naafmotoren van dit type. Een borstelloze gelijkstroommotor met permanente neodymium-ijzermagneten werd ontwikkeld door Unique Mobility.

Overige wisselstroommotoren

Van de overige typen wisselstroommotoren moet in ieder geval de *reluctantiemotor* genoemd worden. Dit type bestaat in een aantal variaties, die echter grotendeels door de synchrone permanent magneet bekrachtigde motoren verdrongen zijn. Een kenmerk voor deze motor is het verschil in het aantal rotor- en statorpolen. Op dit moment is er nog slechts belangstelling voor de *geschakelde reluctantiemotor*, een motor die perspectieven biedt voor tractiedoeleinden. De verwachting is dat vooral het rendement en de vermogensdichtheid van deze motor hoger zouden moeten zijn dan bij de asynchrone motoren. Tot nog toe is dit echter nog niet aangetoond.

De elektromotor

Op basis van de beschikbare literatuur zijn slechts zeer globaal de trends in de ontwikkeling van elektromotoren aan te geven.

Ruwweg kan gesteld worden dat de toepassing van gelijkstroommotoren afneemt. De prestatie van gelijkstroommotoren en van synchrone motoren met een vermogen < 1 kW is beter dan die van asynchrone motoren. Boven 5 kW is dit omgekeerd. Voor elektro-auto's is het vermogen voor de meeste toepassingen niet lager dan 10 kW, wat zou pleiten voor asynchrone motoren. In [Smokers, 1997c] wordt dit bevestigd: van de autotypen, waarvan het motortype wordt aangegeven is meer dan de helft (ca. 52%) in het bezit van een asynchrone motor, 13% van een synchrone motor, eveneens 13% van een borstelloze gelijkstroommotor en 21% van een gewone gelijkstroommotor.

Wat betreft de ontwikkelingen richt Japan zich voornamelijk op de permanent magneet synchrone motor, terwijl de asynchrone motor in de VS een grotere belangstelling heeft. Ook Siemens is na ruim een eeuw nog steeds bij de ontwikkeling betrokken en houdt zich met beide motorsystemen bezig.

De belangrijkste ontwikkeling bij de asynchrone motor is de vervanging van de conventionele regeling, de variabel-voltage variabele-frequentie (VVVF). Deze voldoet niet voor de motorregeling in elektrische voertuigen. Tegenwoordig gebruikt men vermogenselektronica in de zogenaamde veldgeoriënteerde regeling (Field Oriented Control, FOC) (zie par. 4.5.4).

Naast verbeteringen in de motorregeling vinden de belangrijkste ontwikkelingen plaats op het gebied van materialen voor lichte en krachtige permanente magneten (zie deel 2, par. 2.4). De al genoemde neodymium-ijzermagnetten zijn een voorbeeld van deze ontwikkeling. Bovendien lijkt de plaatsing van de magneten in de motor nog verbeterd te kunnen worden.

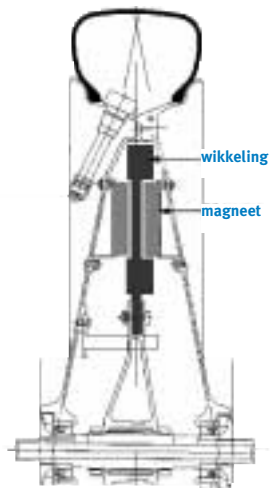


Fig. 4.5.3
Naafmotor [Ramsden, 1997].

De overbrenging

Naast de motor zelf is eveneens de overbrenging naar de wielen van belang. In het kort kan hierover gemeld worden dat de conventionele tandwielenversnelling snel terrein lijkt te verliezen aan de planetaire overbrenging, die een hoge overbrengingsverhouding en een hoog overbrengingsrendement biedt.

Bovendien is er een tendens naar systemen waarbij het vermogen direct op de wielen wordt overgebracht. Dit weliswaar oude principe biedt tal van voordelen, maar kan eigenlijk nu pas efficiënt werken door het beschikbaar komen van lichte motoren met een hoog rendement en door de noodzakelijke complexe regelingen. Een voorbeeld hiervan is de genoemde Iza, die uitgerust is met vier (borstelloze gelijkstroom) naafmotoren [Chan, 1997; MOM, 1995; Smokers, 1997c].

4.5.4 VERMOGENSREGELING

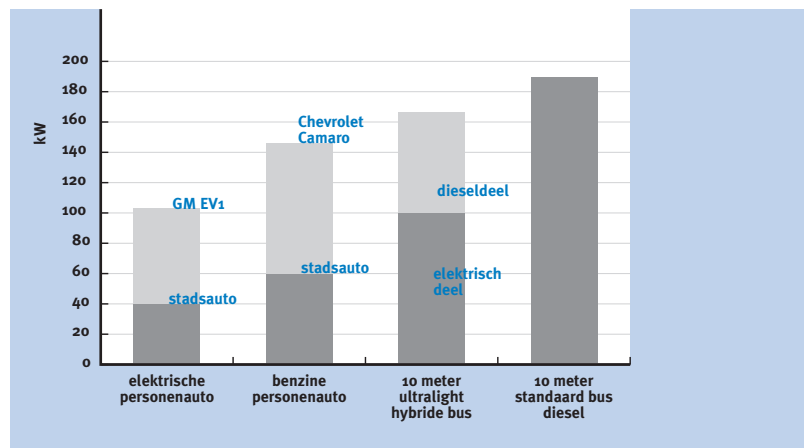
PRAKTIJKERVARINGEN MET VERMOGENSREGELING IN ELEKTRISCHE VOERTUIGEN ing. W. Heijboer³³

Elektromotoren worden al sinds vele jaren in koppel, vermogen of toerental geregeld. Voor mobiele toepassingen werden tot voor kort uitsluitend de permanent-magneet gelijkstroommotor of (voor grotere vermogens) de serie-gelijkstroommotor toegepast. Thans vinden ook shuntmotoren (gelijkstroom) en asynchrone motoren hun toepassing in elektrisch aangedreven voertuigen.

Fig. 4-5.4 geeft een overzicht van de gangbare motorvermogens in elektrische en hybride voertuigen en hun conventionele tegenhangers.

Fig. 4-5.4

Een overzicht van de gangbare motorvermogens in elektrische en hybride voertuigen en hun conventionele tegenhangers. Meer informatie over de hybride stadsbus wordt gegeven in par. 4-5-9. O.a. naar [General Motors, 1997; Volvo, 1997].



Tot ongeveer 20 jaar geleden werd vooral de weerstandsregeling gebruikt om de motoren (tot ca. 12 kW) te regelen. Dit ging gepaard met grote verliezen. Later zijn de transistor en thyristor gebaseerde rijregelingen³⁴ ontstaan die een beter rendement (ca. 85%) kenden, maar storingsgevoelig waren en nog niet echt goed regelden.

³³ Spijkstaal Elektro b.v.,
Postbus 9
3200 AA Spijkenisse

³⁴ Onder rijregeling wordt hier verstaan de combinatie van vermogens-elektronica, besturings-elektronica en software.

³⁵ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, een halfgeleiderement (zie deel 2, par. 2.5).

Regelingen voor serie-gelijkstroommotoren

De huidige generaties elektronische rijregelingen voor serie-gelijkstroommotoren zijn gebaseerd op toepassing van MOSFETS³⁵, kennen nauwelijks verliezen (rendement 98%) en zijn digitaal op elke denkbare karakteristiek in te stellen. Dergelijke regelingen kunnen ingesteld worden op de gewenste waarde van de acceleratiesnelheid, deceleratiesnelheid, maximumvermogen of maximum toerental. Ook een lineaire of proportionele reactie op het 'gas'pedaal is in te stellen. Het terugwinnen van remenergie (al dan niet proportioneel geregeld) is standaard en er is een compleet storingsdiagnosesysteem ingebouwd. Het gehele aandrijfsysteem wordt bewaakt en bestuurd door elektronica. De rege-

lingen zijn over het algemeen ongevoelig voor storingen. De seriemotor kent een maximaal motorkoppel bij stilstand, het motorkoppel neemt met het toenemen van het toerental voortdurend af. Bij het maximale toerental is er een zeer laag motorkoppel en een relatief laag vermogen. Het maximale vermogen wordt bij ca. 50% van het maximale toerental bereikt. Een en ander maakt de motor geschikt voor toepassingen waarin bij lage snelheid een grote trekkracht nodig is.

Regelingen voor shuntmotoren

Ook voor shuntmotoren bestaan thans zeer goede regelingen die gebaseerd zijn op de IGBT³⁶ of de MOSFET-techniek. Het voordeel van shuntmotoren is dat het kiezen van de rijrichting en het regelen van de motoren bij hoge toerentalen bij een relatief lage stroom geschiedt. Het draaimoment bij zeer lage toerentalen is aanvaardbaar. De shuntmotor heeft over het algemeen een constant motorkoppel vanaf stilstand tot het maximum vermogen dat bij ca. 60% van het maximale toerental geleverd wordt. Daarna is er een constant vermogen tot het maximale toerental met een afnemend motorkoppel. Deze motoren hebben een geschikte karakteristiek voor toepassing in elektrisch aangedreven voertuigen.

Regelingen voor asynchrone motoren

Voor mobiele toepassingen zijn thans ook tot continuvermogens van ca. 100 kW asynchrone motoren met drie-fasenregelingen beschikbaar. Deze motor is zeer eenvoudig van opbouw, kent geen slijtagegevoelige onderdelen als koolborstels en een collector. De regeling van deze motor is wat complexer en kent voorlopig nog relatief hoge verliezen (rendement ca. 95%). Het aanloopmoment van de motor is lager dan dat van vergelijkbare serie-gelijkstroommotoren. De regelbaarheid is door de frequentieregeling zeer goed.

De drie genoemde motortypen worden momenteel naast elkaar gebruikt³⁷.

Uiteindelijk zal de asynchrone motor waarschijnlijk het meest toegepast worden. Voorwaarden zijn dat het aanzetkoppel en het rendement van de regeling verbeterd worden. De (complexe) regelingen moeten tevens een grote betrouwbaarheid bezitten.

Algemeen kan gesteld worden dat ondanks de enorme ervaring op het gebied van het regelen van elektromotoren voor stationaire toepassingen het aantal aanbieders van elektronische rijregelingen voor mobiele toepassingen beperkt is. Vooral de vaak lage spanning en de daarmee gepaard gaande hoge stromen vragen een andere aanpak. Ook blijkt de mechanische belasting in voertuigen aanzienlijk hoger.

.....
36 Integrated Gate Bipolar Transistor, een halfgeleiderelement dat veel gebruikt wordt in omzetter. Zie deel 2, par. 2.5.

37 Meer over de werking van verschillende elektromotoren in par. 6.4.1 van deel 2.

Er blijft dan ook nog wel het een en ander te wensen over. Enige voorbeelden zijn:

- Miniaturisatie en kostprijsverlaging: rijregelingen (incl. de vermogenselektronica) zijn nog steeds relatief groot en duur.
- Verbetering van de mechanische eigenschappen. Rijregelingen zijn gevoelig voor vocht, stof en trillingen (zelfs ‘volledig gesloten’ exemplaren blijken niet echt ongevoelig te zijn).
- Rijregelingen zijn vaak moeilijk en tegen hoge kosten te repareren. Een meer modulaire opbouw kan dit punt sterk verbeteren.
- Een storingsindicatie die ook voor de gebruiker begrijpelijk is, zodat er eventueel telefonisch gerepareerd kan worden.
- Een adequate lekspanningsindicatie en -beveiliging is gelet op de veiligheid vooral bij hogere spanningen van belang.
- Integratie van een batterijmanagementsysteem en motorinformatie die beide op het dashboard getoond worden (temperatuur, toerental, stroomverbruik, ontladingsgraad, enz.).
- Toepassing van digitale aansturing van alle functies, zodat met een bus-systeem gewerkt kan worden. De betrouwbaarheid kan hiermee sterk worden vergroot.

In het algemeen ligt er nog een taak bij de normalisatie-instituten en de overheid om zich te buigen over het veiligheidsaspect van elektrische voertuigen. Voor voertuigen voor intern transport bestaat er een duidelijke Europese richtlijn (L384) die een maximale boordspanning van 96 V voorschrijft.

Bij vorkheftrucks en elektrische trekkers wordt er algemeen gebruik gemaakt van spanningen van 24 - 48 - 80 V (Europa) of van 24 - 36 - 72 - 96 V (Engeland en de VS).

Bij snellere elektrische voertuigen komen we eigenlijk alle voltages tegen, variërend van 72 tot 600 V. De hoge spanningen zijn uiteraard zeer onveilig bij aanraking, maar wetgeving voor mobiele installaties ontbreekt tot op heden.

VERMOGENSREGELING IN ELEKTRISCHE EN HYBRIDE VOERTUIGEN

*dr.ir. B. Gravendeel*³⁸

Inleiding

Theoretisch is er geen arbeid verricht wanneer een voorwerp door het zwaartekrachtsveld beweegt en bij het beginpunt is teruggekomen. Wanneer er geen wrijvingskrachten zouden bestaan, zou een willekeurige rit met een voertuig over een horizontaal vlak ook geen energie kosten. In werkelijkheid speelt wrijving echter een belangrijke rol.

We bekijken een rijcyclus van een conventionele auto en kijken naar de processen die daarbij optreden. Aan het begin van de cyclus staat de auto stil, daarna versnelt de auto tot een zekere snelheid. Daarna wordt er met constante snel-

38 HMA Power Systems,
Postbus 3007
2980 DA Ridderkerk
B.Gravendeel@hma.nl

heid gereden, gevolgd door het afremmen. Na afloop staat de auto weer stil. Tijdens het versnellen aan het begin van de rijcyclus, wordt de chemische energie van de brandstof omgezet in rotatie-energie en warmte. De rotatie-energie wordt voor een belangrijk deel omgezet in de kinetische energie van het voertuig. Een gedeelte van de toegevoerde energie is nodig voor het overwinnen van wrijvingskrachten tijdens het rijden. De warmte die ontstaat door het verbrandingsproces en door de wrijving wordt aan de omgeving afgegeven. Tijdens het rijden met constante snelheid wordt de chemische energie gebruikt voor het overwinnen van de wrijving, die vervolgens in warmte omgezet wordt. Tijdens het afremmen wordt de kinetische energie van de auto in de remmen omgezet in warmte. Netto is dus na de rijcyclus chemische energie omgezet in warmte. Fysisch gezien is er echter geen arbeid verricht.

Met een elektrische aandrijving in een voertuig kan de energie die tijdens het remmen vrijkomt terug worden gewonnen en opgeslagen. Het energieopslagmedium zou ook kunnen dienen om de belasting voor de verbrandingsmotor gunstiger te maken. De verbrandingsmotor zou bij dezelfde rijcyclus gedimensioneerd kunnen worden voor het gemiddelde vermogen in plaats van voor het piekvermogen. Het verschil tussen piekbelasting en gemiddelde belasting wordt in dat geval door het energieopslagmedium geleverd. Het is ook mogelijk de energie voor de rijcyclus op te slaan in een vliegwiel, waarbij de verbrandingsmotor komt te vervallen [Offringa, 1997]. Het vliegwiel wordt dan bij iedere halte met behulp van elektriciteit weer op toeren gebracht. De benodigde omzetting van chemische naar elektrische energie vindt in dit geval plaats in de elektriciteitscentrale. In Nederland gebeurt dit in de centrale opwekeenheden bij een gemiddeld rendement van 44% (1997).

Wanneer we de conventionele en hybride aandrijving met elkaar vergelijken, zien we dat de hybride (elektrische) optie energetisch veel gunstiger is. Afhankelijk van de rijcyclus (hoe meer er afgeremd wordt, hoe groter het voordeel) kan een besparing van 25 tot 35% gerealiseerd worden [Offringa, 1997].

Elektrische vermogensregeling

In fig. 4.5.5 zijn de vermogenscomponenten van een hybride voertuig weergegeven.

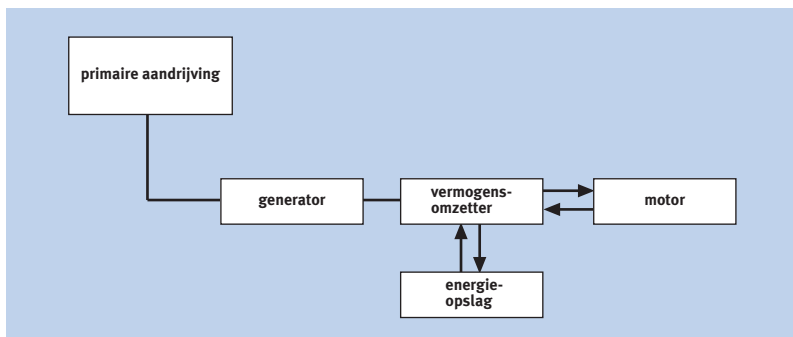
In deze figuur zijn de verbindingen met het 'Power Management System' (PMS) weggelaten. Het PMS is met alle hiervoor geschetste delen verbonden.

De vermogensomzetter kan een spanningsbronomzetter met bijvoorbeeld IGBT's³⁹ zijn. Dit type omzetters is betrouwbaar en robuust. In combinatie met een geschikte machineregeling is de combinatie van omzetter en motor volkomen transparant voor de overige componenten en het aandrijfproces. Vrijwel op het zelfde moment kan het koppel dat aan de as van de motor geleverd wordt

.....
39 Integrated Gate Bipolar Transistor, een halfgeleiderelement dat veel gebruikt wordt in omzetters. Zie deel 2, par. 2.5.

Fig. 4-5-5

De vermogenscomponenten van een hybride voertuig.



van grootte en of van richting veranderen. Het PMS is ook aangesloten op de mens-machine interface. Deze zorgt voor het juiste 'voertuiggevoel' bij de bestuurder.

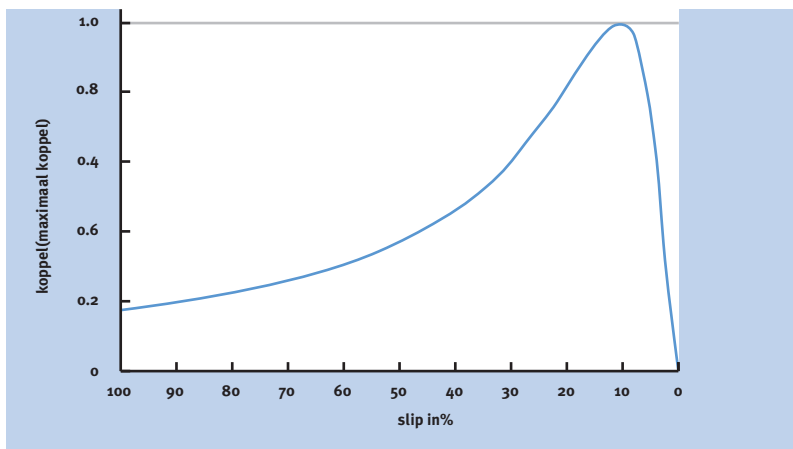
De rijcyclus

Voor mobiele toepassingen lijkt de asynchrone motor voorlopig de beste optie te zijn. Pas op de lange termijn zou de dure permanent-magneetmotor een geschikt alternatief kunnen zijn in situaties waar de afmetingen kritisch zijn. De toepassing van een vermogenselektronische veldregeling kan de karakteristieken van een asynchrone machine aanzienlijk verbeteren. De motor bestaat uit een vast deel (de stator) en een draaiend deel de rotor. De afwijking van het toerental van de rotor ten opzichte van het 'toerental' van het magnetische veld van de stator wordt *slip* genoemd. In fig. 4.5.6 wordt het maximale koppel ten opzichte van het percentage slip van een asynchrone machine getoond.

Het maximale koppel wordt hier bereikt voor een slip van iets meer dan 10%. Wordt de slip groter, dan komt de motor in een instabiel gebied terecht en zal het toerental terugzakken naar nul, omdat de motor het belastingskoppel niet kan leveren.

Fig. 4-5-6

De relatie tussen koppel en slip bij een asynchrone motor. Verticaal staat het koppel in verhouding tot het maximale koppel, horizontaal staat de slip, de afwijking van het rotortoerental ten opzichte van het toerental van het aandrijvende magnetische veld (hier gegeven in %). Het gebied tussen 100% en de top van de grafiek vertegenwoordigt een ongewenste toestand, de motor kan de belasting niet aan en komt tot stilstand. Het maximale koppel wordt dus geleverd bij een kleine slip [Pollefliet,1996].



Wanneer een asynchrone machine aangesloten wordt op een frequentieomzetter, draagt deze zorg voor een statorveld dat net iets sneller loopt dan de rotor. Hiermee wordt bereikt dat er een constante slip aangehouden wordt. De as levert nu bij oplopend toerental een constant koppel. Deze situatie kan door gaan totdat de omzetter zijn maximale uitgangsspanning bereikt heeft. De aandrijving komt dan terecht in een punt van constant vermogen. Dit vermogen blijft op deze waarde totdat het maximale toerental is bereikt.

Als we kijken naar de te bereiken koppel-toerenkromme voor een asynchrone motor gecombineerd met een vermogensomzetter met bijbehorende regeling, dan is een bijna vierkante koppel-toerenkromme te bereiken. In fig. 4.5.7 is een koppel-toerenkromme van een voertuig $T(n)$ gegeven, zoals die voor een voertuig in een bepaald snelheidsbereik geldt. Het benodigde koppel wordt verondersteld kwadratisch met het toerental te veranderen. Tevens is in de grafiek de

Fig. 4.5.7

De koppel-toerenkromme van een voertuig $T(n)$ en de maximaal bereikbare koppel-toerenverhoudingen van de asynchrone motor met regeling. Het toerental 0,6 vertegenwoordigt de maximale snelheid die met deze combinatie haalbaar is.

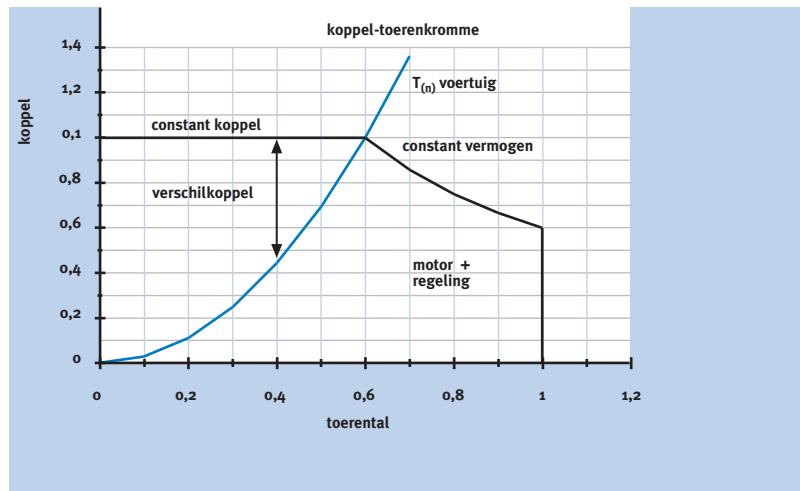
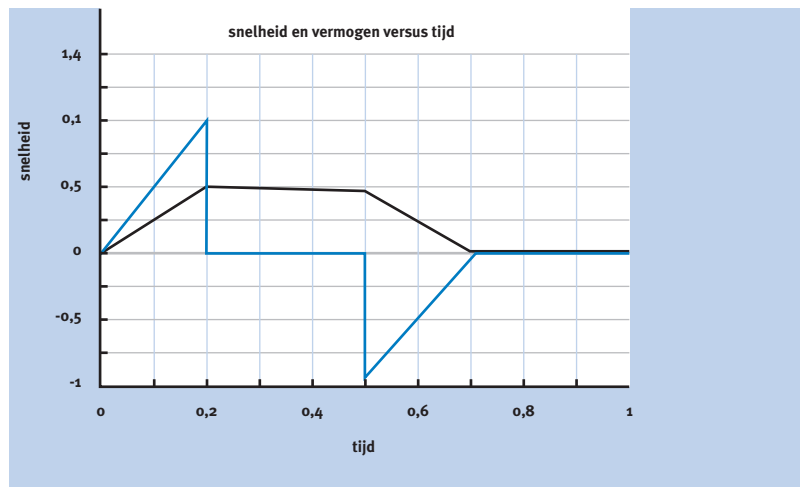


Fig. 4.5.8

De snelheid (zwart) en het vermogen (blauw) uitgezet tegen de tijd tijdens een willekeurige rit. De figuur zou de rijcyclus van een bus of metro kunnen zijn.



koppel-toerenkromme van de combinatie van motor en regeling aangegeven. Het horizontale gedeelte van 0% tot 60% toeren is het constant-koppelgebied. Het gedeelte rechtsboven is het constant vermogensgebied. Het verschilkoppel in de figuur is het maximale koppel dat overblijft om het voertuig te versnellen. Als het voertuig een snelheid bereikt heeft die overeenkomt met toerental 0,6, dan maakt het aandrijvend koppel evenwicht met het tegenkoppel van het voertuig: de snelheid van het voertuig heeft zijn maximum bereikt.

Dit betekent, dat de toepassing van een vermogenselektronische regeling de versnellingsbak overbodig kan maken. Alleen een vaste toerentalreductie is nog nodig, wat aanzienlijke besparingen in gewicht, ruimte en onderhoud mogelijk maakt. De maximale koppelvariaties die op basis van de voertuigdynamica gewenst zijn, moeten in de mens-machine interface worden vastgelegd. Ook kunnen hierin zaken als wielslipbeheersing en automatisch afstand houden tot de voorganger verwerkt zijn.

Als we kijken naar het verloop van het vermogen en de snelheid in de tijd bij een bepaalde rijcyclus, zien we bijvoorbeeld het volgende (fig. 4.5.8).

In de aanzetperiode (het versnellen) neemt het vermogen toe van 0 tot 1. Dit betekent dat er met maximaal koppel aangezet wordt, zonder dat daarvoor over het hele toereengebied het maximale vermogen nodig is. Pas bij het maximale toerental is het benodigde vermogen 1. De stroom door de motor is echter vanaf het eerste ogenblik hoog om het gewenste koppel te realiseren.

In fig. 4.5.8 is duidelijk te zien dat na de periode van versnellen (0 - 0,2 in de tijd) het koppel weggenomen wordt en het voertuig zonder aandrijving 'uitrijdt'. Tijdens het uitrijden neemt de snelheid ten gevolge van wrijving af. Na deze periode (bij $t = 0,5$) remt het voertuig af. Het koppel is nu negatief en dus ook het vermogen. De aandrijving levert energie terug aan het systeem. Als het voertuig tot stilstand is gekomen, wordt er enige tijd gewacht voordat weer aan een volgende cyclus begonnen wordt.

Conclusie

Vermogenselektronische omzetters maken een optimale benutting van de energiebron aan boord van het voertuig mogelijk. De elektrische tussenstappen zijn voor de gebruikers en opwekeenheden in het voertuig volledig transparant: als er een vermogensvraag is wordt daaraan direct voldaan via de vermogenselektronica. Een versnellingsbak wordt dan overbodig; alleen een vaste toerenreductie is voldoende. Beperkingen komen uit de belasting of uit de bron: deze kunnen niet onbeperkt snel vermogen opnemen en of leveren. Het 'voertuiggevoel' kan volledig elektronisch aangepast worden.

4.5.5 ACCU- EN LAADTECHNOLOGIE

ACCUTECHNOLOGIE

dr.ir. D. Schmal⁴⁰, ing. W. Heijboer⁴¹, ir. J.M. Meij

Een van de sleuteltechnologieën voor het opslaan van elektriciteit is de opslag in chemische vorm in oplaadbare batterijen of accu's. In deze paragraaf wordt ingegaan op de belangrijke eigenschappen van batterijtypen voor mobiele toepassingen. Voor de basisprincipes verwijzen we naar deel 2, hoofdstuk 5.

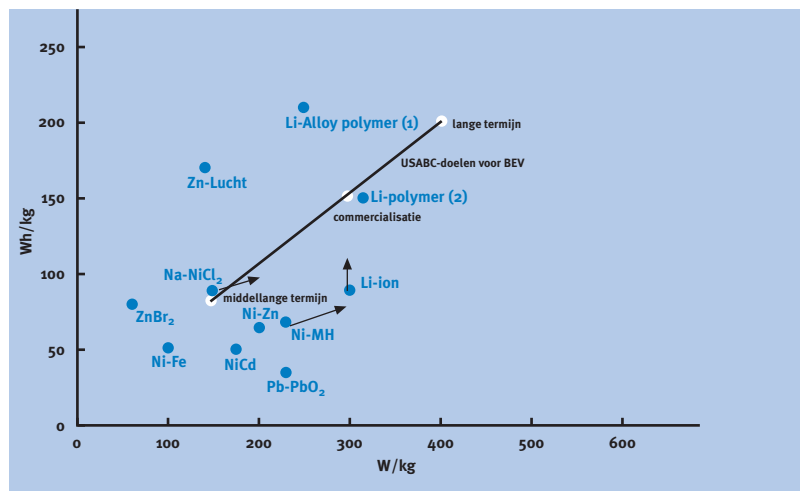
Eigenschappen

De belangrijkste kenmerken voor een voertuigbatterij zijn de *specifieke energie* (per kg) en de *energiedichtheid* (per liter). Zij hebben grote invloed op de actieradius van het voertuig.

Het *specifieke vermogen* (per kg) is van belang voor het optrekken, maar vormt bij batterij-elektrische voertuigen vaak minder een knelpunt dan de specifieke energie. Bij hybride voertuigen is het specifieke vermogen daarentegen bepalend voor de rijeigenschappen.

Fig. 4-5-9

Specifieke energie en specifiek vermogen van een aantal batterijtypen. De pijlen geven de ontwikkeling tot en met 2003 aan. Naar [Smokers, 1997c; Schillemans, 1993; Brunia, 1995; USCAR, 1997; LTC, 1998; CARB, 1998]
1. Gegevens van fabrikant LTC voor kleine batterijen.
2. Productie in 2003.



Het *laad- en ontladrendement* heeft direct invloed op het primaire energieverbruik van het voertuig. Een goed afgeregeld loodaccusysteem heeft een rendement van ca. 80%, voor andere batterijtypen ligt deze waarde tussen 60 en 90%. De *zelfontlading* is een maat voor het energieverlies dat optreedt door interne ontlading van de batterij.

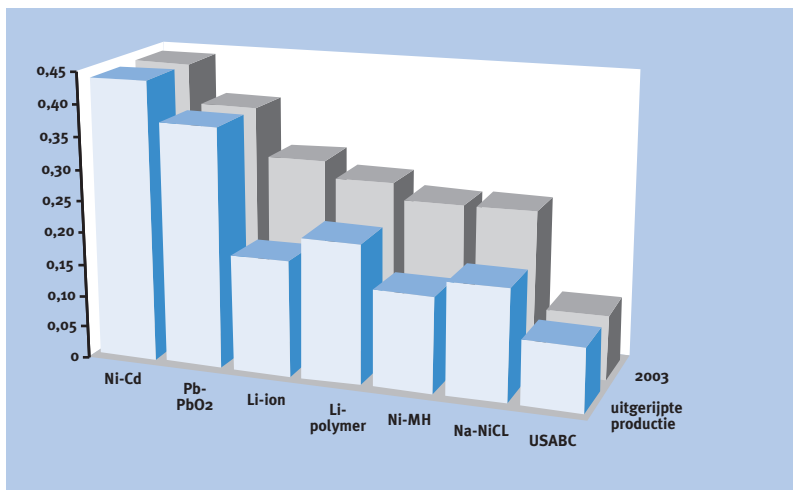
De *levensduur* van de batterij bepaalt mede de economische aantrekkelijkheid van het systeem. De levensduur wordt vaak gegeven als het aantal laad- en ontladcycli en als een aantal jaren. Van praktische aard zijn eigenschappen zoals *bedrijfstemperatuur* en *eenvoud van bedrijfsvoering*.

40 TNO-MEP,
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn
d.schmal@mep.tno.nl

41 Spijkstaal Elektro b.v.,
Postbus 9
3200 AA Spijknisse

Fig. 4-5.10

Projectie van de kosten/ $kWh/laadcyclus$ (\$) van verschillende batterijtypen in 2003 en bij uitgerijpte groot-schalige productie. Ook de waarde die is afgeleid van het USABC lange-termijndoel is aangegeven. Zie voor bronnen fig. 4-5-9.



In fig. 4-5.9 worden de specifieke energie en het specifieke vermogen van een aantal batterijtypen gegeven. Ook de doelen van de lopende onderzoeksprogramma's van USABC⁴² worden aangegeven.

Ten behoeve van elektrische aandrijving (vooral voor batterij-elektrische voertuigen) zijn meer dan tien verschillende typen batterijen in ontwikkeling. Het ontwikkelingsstadium varieert van commercieel verkrijgbaar (bijv. lood-zwavel-zuurtractieaccu's) tot pre-productiefase (bijv. lithium-polymeerbatterijen).

De meeste batterijen zijn opgebouwd uit zogenaamde monopolaire cellen, dat wil zeggen dat in de serieschakeling de elektrische verbinding tussen de positieve en de daaraan gekoppelde negatieve plaat buitenom gebeurt. Dit betekent dat de elektrische stroom door de gehele plaat naar de verbindingsstrip moet lopen. Consequentie hiervan is onder andere een beperkt specifiek vermogen (W/kg) vanwege de benodigde stroomgeleiders. Door over te schakelen op bipolaire cellen (de plaat is aan de ene zijde positief en aan de andere zijde negatief, waardoor er geen aparte geleidingsstrips buitenom nodig zijn) zijn veel hogere specifieke vermogens te bereiken (bij min of meer gelijkblijvende of iets lagere specifieke energie). De bipolaire batterij stelt hogere eisen aan de afdichting en dergelijke, omdat er geen contact mag zijn tussen de elektrolyten in de verschillende cellen.

Stand van zaken

Door de groeiende belangstelling voor elektrische aandrijving en de daarmee gepaard gaande groeiende budgetten (bijv. USABC met een budget van 300 miljoen US dollars in vier jaar, vergeleken met budgetten in de orde van 10 miljoen US dollars in de VS voor die tijd) worden er belangrijke vorderingen gemaakt in de ontwikkeling van veelbelovende batterijtypen. Door verschillende grote

.....
⁴² U.S. Advanced Battery Consortium.

bedrijven wordt gewerkt aan de verdere ontwikkeling van de lood-zwavelzuur-accu, de nikkel-cadmiumbatterij, de nikkel-metaalhydridebatterij, en de diverse typen lithiumbatterijen (vooral lithium-polymeer en lithium-ion). Verder wordt met redelijk veel inspanning – echter per type slechts door 1 à 2 bedrijven – gewerkt aan de natrium-nikkelchloridebatterij, de zink-luchtbatterij en de zink-broombatterij. Dit laatste heeft tot gevolg dat de kans dat de ontwikkeling succesvol is sterk bepaald wordt door de financiële draagkracht van het bedrijf, technische tegenvallers, en dergelijke. Zo is de ontwikkeling van de natrium-zwavelbatterij zowel door ABB als door CLP Power/RWE Energie door veiligheidsproblemen gestaakt. Aan de overige typen wordt wel gewerkt, maar met veel minder inzet van mankracht en budget.

Alle hierboven genoemde batterijtypen zijn ingebouwd in demonstratie-batterij-elektrische voertuigen. De gebruikte batterijen in demonstraties van hybride-elektrische voertuigen zijn veelal de tractiebatterijen die voor batterij-elektrische voertuigen zijn ontwikkeld, waarbij de typen worden gekozen met een zo groot mogelijk specifiek vermogen om het gewicht acceptabel te houden [Schillemans, 1993; BATCONF, 1996; EHVT, 1996].

Trends

De verdere ontwikkeling van batterijen voor toepassing in hybride-elektrische voertuigen zal sterk worden bepaald door de milieuwetgeving en de mede daaraan gerelateerde verbeteringen in de emissies van inwendige verbrandingsmotoren. Het is bijvoorbeeld de vraag of een Zero Emission Vehicle (ZEV) werkelijk is vereist of dat men kan volstaan met een zgn. E(quivalent)ZEV, waarbij de emissies van de elektriciteitscentrale zijn verdisconteerd. De ontwikkelingen zullen in eerste instantie hun toepassing vinden in stedelijke gebieden en dan vooral in professioneel vervoer (hierbij wordt meer belang gehecht aan de 'overall' kosten in tegenstelling tot particulier personenvervoer, waarbij vooral de initiële investering bepalend is bij de keuze van een voertuig). Het meest aantrekkelijk in dit verband zijn de op lithium gebaseerde batterijen. Bij dit type zijn veiligheid en productiekosten belangrijke punten voor de ontwikkeling. Streefwaarden voor de kosten van geavanceerde oplaadbare batterijen zijn in de orde van 100 tot 200 US dollars per kWh voor batterij-elektrische voertuigen. Ter vergelijking: de kostprijs van conventionele tractiebatterijen die in zeer grote aantallen worden gemaakt ligt tussen 100 en 150 US dollars per kWh. Vanwege de veel gunstiger actieradius en de mogelijkheid om de bestaande infrastructuur voor brandstof te gebruiken, wordt de laatste twee jaar steeds meer aandacht besteed aan de ontwikkeling van hybride-elektrische voertuigen. Een bijkomend aspect bij deze ontwikkeling is dat dit voertuig een logische weg is in de ontwikkeling naar een volledig door brandstofcellen aangedreven voertuig, in die zin dat de inwendige verbrandingsmotor-generatorset relatief eenvoudig kan worden vervangen door een brandstofcel.

Een belangrijke voorwaarde voor het slagen van hybride-elektrische voertuigen is het beschikbaar komen van voor dit doel geschikte opslagsystemen voor elektrische energie (hoog specifiek vermogen in combinatie met voldoende levensduur). Deze ontwikkeling staat voor batterijen (en ook andere opslagsystemen zoals supercondensatoren en vliegwheels) nog in de kinderschoenen en zal de nodige inspanningen vergen.

De eisen die men kan stellen aan batterijen voor batterij-elektrische en hybride-elektrische voertuigen zijn onder andere afkomstig van USABC⁴³ en staan in tabel 4.5.2.

Tabel 4.5.2

Eisen aan batterijen voor batterij-elektrische en hybride-elektrische voertuigen, onder andere afkomstig van USABC. N.g. = niet gespecificeerd; n.b. = niet beschikbaar. 1. Batterijen voor batterij-elektrische voertuigen. 2, 3. Batterijen voor hybride-elektrische voertuigen. Bron: [Westinghouse, 1995].

	1 USABC		2 NIST ⁴⁴		3 INEL ⁴⁵	
	middellange termijn	lange termijn	'dual mode' parallel	batterij voor piekvermogen	'range extender' parallel	batterij voor piekvermogen
vermogen (kW)	80	80	100	50 - 70	60 - 90	50 - 75
energieopslag (kWh)	40	40	6-8	0,5-2	3,5 - 7	0,5 - 0,75
gewicht (kg)	n.g.	n.g.	136	23	100	50 - 150
specifiek vermogen (W/kg)	150 - 200	400	733	2.200 - 3.100	600 - 900	900 - 1.200
specifieke energie (Wh/kg)	80 - 100	200	44 - 59	22 - 88	35 - 70	10 - 12
vermogen/energie ratio	2	2	13 - 17	25 - 140	13 - 17	100
energiedichtheid (W/l)	135	300	n.b.	n.b.	90 - 130	10 - 20
life (cycli)	600	1.000	2.000	100.000	1.500	100.000
kosten (\$/kWh)	150	100	< 133	250 - 600	200	1.000

LAADTECHNOLOGIE

Snelladen van batterijen

Voor het laden van batterijen worden steeds weer nieuwe methoden toegepast. Het doel van snelladen is de batterij in een zo kort mogelijke tijd weer van energie te voorzien. Daarbij is het niet altijd noodzakelijk om tot 100% van het batterijvermogen te laden. Als bijvoorbeeld in een zeer korte tijd maximaal 80% van de capaciteit bereikt wordt, hoeft dat in het gebruik geen bezwaar te zijn. De karakteristieken van de batterij vormen het uitgangspunt voor de laadstrategie (overigens ook voor de ontladstrategie die verwerkt is in de besturing van de toepassing). De meeste snellaadmethoden baseren zich op het doorlopen van verschillende fasen in het laadproces, waarbij de overgang naar de volgende fase bepaald wordt door de toestand van de batterij. Met name de batterijspanning wordt daarvoor gemeten. Voor loodaccu's, NiCd- en NiMH-batterijen wordt eerst met een constante laadstroom een 'bulk' lading toegepast tot een bepaalde spanning bereikt is. Dan wordt met een afnemende laadstroom voor een beperkte tijd verder geladen, waarna overgeschakeld wordt op een kleine

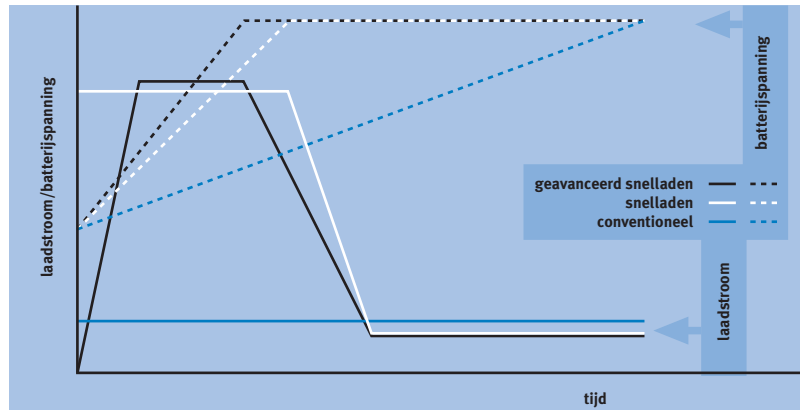
⁴³ U.S. Advanced Battery Consortium.

⁴⁴ National Institute of Standards and Technology, www.nist.gov/

⁴⁵ Idaho National Energy Laboratory, [inmiddles INEEL](http://inmiddles.ineel.gov/).

onderhouds-laadstroom om de batterij op de juiste spanning te houden. Meer geavanceerde methoden maken gebruik van actieve stroombegrenzing om voorgeprogrammeerde curven in de laadstroom te doorlopen. Ook hier wordt de curve gekoppeld aan metingen van de celspanning. Vaak wordt ook de temperatuur van de batterij bewaakt en geregeld. Ook worden systemen toegepast die gebruik maken van puls-vormige laadstromen en zeer korte polariteitswisselingen, die invloed hebben op de structuur van de elektrode tijdens de opbouw van het materiaal uit de elektrolyt. Voor de lithium-ionbatterijen is een goede laadregeling onontbeerlijk, omdat het bij overlading vrijkomende lithium brandgevaarlijk is.

Fig. 4-5.11
Schematische weergave van enkele laadtechnieken voor batterijen.



Ervaringen uit de praktijk

De actieradius van batterijaangedreven voertuigen wordt nog vaak als onvoldoende beschouwd. Ontwikkelingen in batterijtechnologie ontstaan volgens twee paden. Allereerst via het bereiken van een betere batterijprestatie op basis van bestaande principes. Daarnaast via de ontwikkeling van productietechnieken en de verhoging van de levensduur voor nieuwe batterijprincipes. Deze laatste categorie ontwikkelingen zijn uiterst kostbaar en moeilijk in de tijd te voorspellen. Ook de afweging tussen kosten en baten is moeilijk te maken. De verdere ontwikkeling van bestaande en beproefde batterijprincipes kan een behoorlijke prestatieverbetering betekenen en in ieder geval de gebruiksmogelijkheden verbreden.

Als voorbeeld kan de ontwikkeling in het kader van de praktijkproef Elektrische voertuigen (SSZ) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat⁴⁶ genoemd worden. Bij deze praktijkproef is door de toepassing van snellaadtechniek bij nikkel-cadmium-(NiCad)batterijen de laadtijd teruggebracht van 8 naar 1 uur. Verder is proefondervindelijk vastgesteld dat door de batterijen maar tot ca. 90% op te laden en eenmaal per twee weken de batterijen volledig door te laden het waterverbruik (ten gevolge van elektrolyse bij het opladen) in de batterijen met 75% daalde en de batterijefficiëntie met 10 tot 15% steeg.

.....
⁴⁶ Meerjarenprogramma 'Stiller, schoner en zuiniger verkeer en vervoer in stedelijk gebied' (SSZ) dat door Novem wordt uitgevoerd.

In een demonstratie heeft het voertuig dat met deze techniek is uitgerust in 6 uur een afstand van 325 km afgelegd (afwisselend rijden en snelladen). Belangrijk bij het snelladen is dat de batterij en de lader op een intelligente manier met elkaar communiceren. De lader moet om een maximale laadstroom af te kunnen geven voortdurend op de hoogte zijn van zaken zoals batterijtemperatuur, buitenluchttemperatuur, het voor de temperatuur gecorrigeerde gaspanningsvoltage, de laadtoestand, enz.

In de lader moet het laadprofiel van de batterij ingeprogrammeerd kunnen worden en alle parameters op eenvoudige wijze aangepast worden.

De temperatuur van de batterij (dit geldt voor vrijwel ieder batterijtype) moet voortdurend in een optimale toestand zijn en dus moet er naar behoefte gekoeld of verwarmd worden. Voor de bovengenoemde praktijkproef zijn de batterijen voorzien van een koelsysteem. Naar aanleiding van de positieve resultaten bij deze praktijkproef zijn wij van mening dat er ten aanzien van laadsnelheid en laadrendement bij de verschillende batterijtypen nog forse winsten te behalen zijn.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

- Als er op dit moment toekomstige winnaars aangewezen moeten worden op het gebied van batterijen voor batterij-elektrische voertuigen, dan is op de korte termijn de NiMH-batterij een goede keuze. De lithium-ionbatterij heeft vooral een hoger specifiek vermogen en zal voor voertuigtoepassingen binnen enige jaren beschikbaar zijn. De lithium-polymeerbatterij bezit een bijzonder hoge specifieke energie en biedt (voor voertuigtoepassingen) op de wat langere termijn de beste specificaties. De NaNiCl-batterij zal door de hoge werktemperatuur waarschijnlijk slechts in niche-toepassingen gebruikt gaan worden.
- In batterij-elektrische en hybride-elektrische voertuigen is een goed management van de batterij essentieel om maximale prestaties te leveren in combinatie met een acceptabele levensduur van de batterij. Daarvoor is modellering van de batterij en een vertaling daarvan naar besturingssoftware vereist. De huidige batterijmanagementsystemen zullen nog aanzienlijk verbeterd moeten worden. Om veiligheidsredenen worden lithium-ionbatterijen voor 'notebook'-pc's reeds standaard uitgerust met een IC en ingebouwde vermogenselektronica om de laad- en ontladstromen te regelen. In de toekomst zouden intelligente batterijen gebruikt kunnen worden die voorzien zijn van sensors en logica met ingeprogrammeerde karakteristieken, gekoppeld aan een standaard communicatie-interface.
- De ontwikkeling van geavanceerde batterijen met een hoge specifieke energie, die gebruik maken van weinig of geen toxische stoffen (zoals de lithiumbatterij) voor batterij-elektrische voertuigen is nog in het beginstadium. Hierin is nog veel te bereiken.

- Ook veiligheidsaspecten van batterijen zijn van belang. Hieronder vallen bijvoorbeeld:
 - Botsveiligheid (schokproeven, valproeven, gedrag in water, bij brand).
 - Ontwikkeling van waterstof en zuurstof (o.a. bij laden) en andere emissies.
 - Consequenties van hoge gelijkspanning (tot ca. 1000 V).
 - Bescherming tegen overladen.
- Er is behoefte aan de ontwikkeling van goedkope en betrouwbare batterijen voor hybride-elektrische voertuigen (momenteel worden de betere en vaak duurdere batterij-elektrische batterijen gebruikt). Systemen met een lage investering en een goed recyclingniveau (> 95%) zijn mogelijk op basis van loodzwavelzuurtechnologie.
- Omdat te verwachten is dat de toepassing van snelladen zal toenemen, dient de verdere ontwikkeling van batterijen mede gericht te zijn op de mogelijkheden voor snelladen. Ook voor het terugwinnen van remenergie is snelladen van belang (zowel bij batterij-elektrische als bij hybride-elektrische voertuigen). Ter aanvulling kunnen hier echter ook supercondensatoren (zie par. 4.5.5 en deel 2) worden gebruikt.

MOGELIJKHEDEN IN NEDERLAND

De brede Nederlandse expertise op het gebied van batterijen en voertuig aandrijving in combinatie met de relevante industriële kennis en mogelijkheden biedt goede kansen voor de ontwikkeling van hybride aandrijfsystemen voor professionele toepassingen. Hierbij zal vooral de integratie in systemen mogelijkheden bieden. Omdat de ontwikkelingen op dit gebied zeer snel gaan, moet hiermee snel worden gestart. Als men rekening houdt met de industriële capaciteit in Nederland liggen er tevens goede kansen voor de ontwikkeling van opslagsystemen voor deze specifieke toepassing. Recente typen lithium-polymerbatterijen maken gebruik van koolstofvezels en polymeerelektrolyten in dunne gelamineerde structuren.

Ook in de behoefte aan goede batterijmanagementsystemen (software en hardware) kan op basis van bestaande expertise bij bedrijven en kennisinstituten goed worden voorzien. Ook hiervoor geldt dat een snelle start nodig is om te kunnen concurreren met het buitenland. Deze behoefte geldt zowel voor batterij-elektrische als voor hybride-elektrische toepassingen van batterijen.

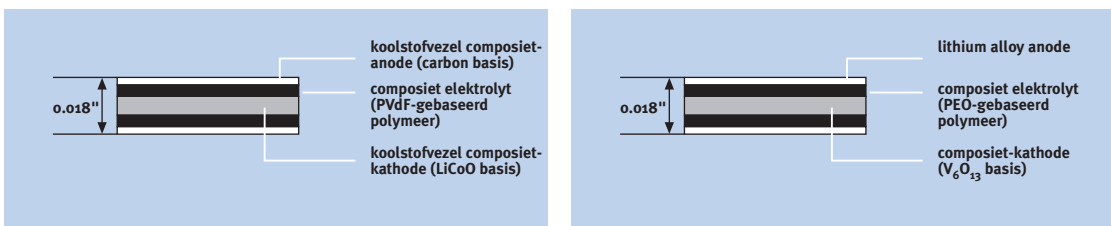
Fig. 4-5.12

Voorbeeld van de opbouw van lithium-polymerbatterijen.

[links] lithium-ionpolymer.

[rechts] lithium-alloypolymer.

Bron [LTC, 1998].



4.5.6 SUPERCONDENSATOREN⁴⁷

dr.ir. D. Schmal⁴⁸, dr.ir. L. Plomp⁴⁹

Supercondensatoren zijn componenten voor het opslaan van elektriciteit. Hun eigenschappen liggen tussen die van gewone diëlektrische condensatoren en batterijen in. Er is een breed scala aan potentiële toepassingen, al dan niet in combinatie met batterijen of brandstofcellen. Een verbeterde functionaliteit, een hogere efficiëntie en lagere kosten voor de beoogde systemen zijn de drijfveren voor de ontwikkeling.

Opslagsystemen waarin supercondensatoren zijn opgenomen lijken van bijzonder belang voor de ontwikkeling van elektrische voertuigen, vooral voor de zogenaamde hybride-elektrische voertuigen waarin een verbrandingsmotor of een brandstofcel wordt toegepast. In plaats van een hoge specifieke energie en een hoog specifiek vermogen komt de nadruk bij het opslagsysteem voor deze toepassing steeds meer te liggen op een hoog specifiek vermogen. De toepassing van supercondensatoren in combinatie met batterijen kan dan een reductie van massa en volume van het opslagsysteem betekenen. Ook een reductie van de kosten en een verbetering van de systeemefficiëntie is mogelijk. De hoge energiepulsen van regeneratief remmen, die over het algemeen slecht in een batterij zijn op te slaan en de levensduur bekorten kunnen worden opgeslagen door de supercondensator te laden. Deze energie kan bij de acceleratie weer worden gebruikt of vertraagd worden afgestaan aan de batterij.

Doordat bij het laden en ontladen geen chemische omzettingen plaatsvinden is het mogelijk om een zeer groot aantal cycli (> 10.000) te doorlopen zonder dat de prestaties merkbaar achteruit gaan. Dit is een voordeel ten opzichte van batterijen. Een nadeel is de hoge zelfontlading van supercondensatoren (orde van grootte van 10% per dag). Bij batterijen is de zelfontlading in het algemeen kleiner dan 1% per dag.

STAND VAN ZAKEN

De huidige supercondensatoren hebben een maximale specifieke energie van minder dan 10 Wh/kg. Het specifieke vermogen is maximaal ca. 1.000 W/kg. In het laboratorium zijn waarden tot 4.000 W/kg gedemonstreerd [PNGV, 1994]. In de VS, Japan en Europa lopen onderzoeksprogramma's om te komen tot verbetering. Op dit moment wordt er vooral veel aandacht besteed aan ontwikkeling en verbetering van de basismaterialen voor supercondensatoren. De in de VS geformuleerde ontwikkelingsdoelen voor middellange en lange termijn staan weergegeven in tabel 4.5.3.

.....
⁴⁷ Meer over supercondensatoren in deel 2, Hoofdstuk 5, Opslag.

⁴⁸ TNO-MEP,
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn
d.schmal@mep.tno.nl

⁴⁹ ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
L.Plomp@ecn.nl

Tabel 4-5-3

Ontwikkelingsdoelen voor supercondensatoren [Burke, 1996].

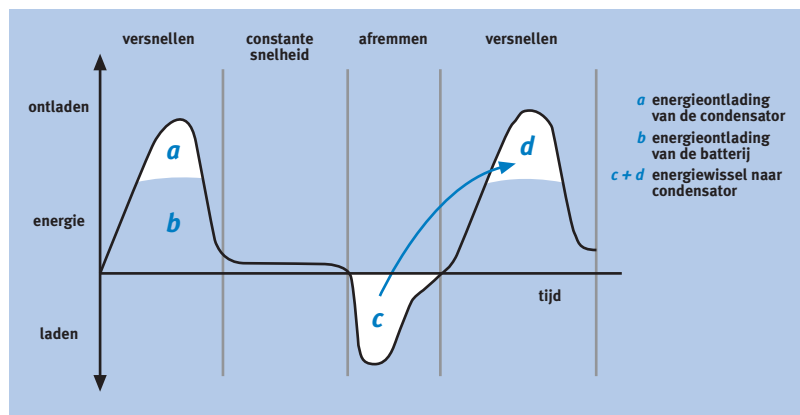
	middellange termijn	lange termijn
specifiek vermogen (W/kg)	> 500	> 1.600
specieke energie (Wh/kg)	> 5	> 15
energiedichtheid (Wh/l)	> 11	> 37
rendement	> 90%	> 90%
energiecapaciteit (Wh)	500	750
vermogen (kW)	50	80
voltage (V)	200 - 300	200 - 300
gewicht (kg)	< 100	< 50
volume (l)	< 45	< 20
cyclische levensduur	> 100.000	> 300.000
kalendrische levensduur	> 5 jaar	> 10 jaar

TRENDS

De eigenschappen van supercondensatoren zijn zodanig dat zij vooral kansen bieden voor toepassingen, waarbij de specifieke energie laag kan zijn en het specifieke vermogen hoog moet zijn. In de praktijk betekent dit dat opslagsystemen op basis van supercondensatoren vooral in aanmerking komen voor brandstofcel-elektrische en hybride-elektrische voertuigen. Ook hierbij zal meestal de specifieke energie echter te laag zijn, omdat in veel toepassingen waarden van enkele tientallen Wh/kg gewenst zijn. Daarom zien we nu ontwikkelingen, waarbij supercondensatoren gebruikt worden naast batterijen in brandstofcel-elektrische, hybride-elektrische en batterij-elektrische voertuigen voor het leveren en opvangen van piekvermogen. Proeven in Japan [Chugoku, 1996] leverden enige energiebesparing op en een toename van de levensduur van de batterij met een factor 1,5. Een sleutelfactor in de toepassing van supercondensatoren is de ontwikkeling van elektronische interfaces die laad- en ontladstromen optimaal op het batterij- en condensatorsysteem kunnen afstemmen [Burke, 1996].

Fig. 4-5.13

De verdeling van vermogen tussen supercondensator en batterij. Naar [Chugoku, 1996].



Met betrekking tot de kosten zullen dezelfde streefgetallen gelden als bij batterijen. Dit betekent waarden van maximaal enkele honderden US dollars per kWh voor hybride toepassingen. Bij productie van grote aantallen moet dit in principe mogelijk zijn.

TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN IN NEDERLAND

In Nederland vinden geen specifieke ontwikkelingen plaats op het gebied van supercondensatoren voor elektrische aandrijving. Eventuele kansen hiervoor liggen vermoedelijk vooral op het gebied van de ontwikkeling van materialen. Dit dient te gebeuren in samenwerking met (buitenlandse) bedrijven (bijv. in het kader van EU-programma's).

Net als bij batterijen is de ontwikkeling van managementsystemen (meet- en regeltechniek) van belang voor supercondensatoren. Met name de lineaire afname van de spanning met de lading stelt eisen aan deze systemen. Mogelijk liggen hiervoor kansen in Nederland.

4.5.7 BRANDSTOFCELLEN VOOR MOBIEEL GEBRUIK⁵⁰

dr. S.B. van der Molen⁵¹, dr.ir. B.J.C.M. Rutten⁵²

INLEIDING

Zoals in par. 4.5.1 al werd opgemerkt, kunnen hybride voertuigen om meer redenen gezien worden als een evolutionaire stap in de ontwikkeling van het wegvervoer. Zeker is dat in de komende tijd de hybride technologie zijn intrede zal doen, waarbij de emissies sterk kunnen worden teruggedrongen en de efficiëntie sterk kan toenemen. De Toyota Prius en de Audi Duo zijn de eerste commercieel verkrijgbare hybride personenauto's. De marktintroductie van beide modellen heeft in 1997 plaatsgevonden. Reeds in deze modellen blijkt de kracht van het concept: de opgave van de fabrikant voor het brandstofverbruik van de Prius is de helft van het verbruik van een vergelijkbare conventionele auto. Beide modellen maken gebruik van een verbrandingsmotor als primaire krachtbron.

Een volgende stap kan de vervanging van de verbrandingsmotor en van de generator door een brandstofcel zijn. Bij een brandstofcel-hybride voertuig zijn beide componenten niet langer nodig: de brandstofcel is een krachtbron die direct elektriciteit uit brandstof maakt.

In deze paragraaf zal de stand van de techniek van brandstofceltechnologie voor mobiele toepassingen worden beschreven, waarna afgesloten wordt met een beschrijving van het energiesysteem in een brandstofcel-hybride voertuig.

⁵⁰ Meer over brandstofcellen in deel 2, par. 3.2.3 van deel 2.

⁵¹ ECN, Brandstoffen, Conversie & Milieu, Postbus 1, 1755 ZG Petten, vandermolen@ecn.nl

⁵² AVV, afdeling Leefbaarheid, Postbus 1031, 3000 BA Rotterdam, b.j.c.m.rutten@avv.rws.minvenw.nl

STAND VAN DE TECHNIEK

In het verleden werden demonstraties gegeven van experimentele voertuigen met de fosforzure en de alkalische brandstofcel. Het gebruik van de fosforzure brandstofcel wordt niet langer onderzocht. Het Belgische/Engelse bedrijf ZEVCO heeft een alkalische brandstofcel in een bestelauto geleverd in 1998. Daarnaast is er een hernieuwde belangstelling voor het evalueren van de beschikbaarheid van hoge-temperatuurbrandstofcellen, met name van de vaste oxide brandstofcel voor treinlocomotieven. Een echt grote toekomst wordt gezien voor de polymere brandstofcel. In de laatste jaren is het aantal demonstraties en experimenten met elektrische voertuigen met een polymere brandstofcel zeer sterk toegenomen. Veelzeggend is dat Daimler Benz en Ford aandeelen hebben genomen in het Canadese Ballard Power Systems dat brandstofceltechnologie voor mobiele toepassingen heeft ontwikkeld en daarmee wereldwijd toonaangevend is. Beide automobiefabrikanten hebben een 25% aandeel genomen in Ballard en investeren 320 miljoen dollar (Daimler) en 420 miljoen dollar (Ford) in dit samenwerkingsverband. Ballard zelf heeft aandrijflijnen voor bustoepassingen ontwikkeld, heeft er in 1997 drie in zowel Chicago als Vancouver gedemonstreerd en zal in 1999 starten met de commerciële productie van brandstofcelbussen. Daarnaast heeft Chicago al aangekondigd dat zij bij een succesvolle afloop van het huidige experiment haar gehele busvloot geleidelijk zal vervangen door brandstofcelbussen.

Daimler heeft een brandstofcelbus ontwikkeld en een -personenauto (Mercedes A-klasse). Daimler neemt in 1999 een beslissing of men deze personenauto in productie wil gaan nemen. In het jaar 2005 wil Daimler 100.000 Mercedes A-klasse auto's met brandstofcelaandrijving per jaar produceren.

In Europa werkt men verder aan de Volvo, Renault en Fiat. In Japan hebben bedrijven zoals Toyota en Mazda de laatste jaren goede vorderingen gemaakt. Het ziet ernaar uit dat de autofabrikanten echt mogelijkheden zien om de nu bijna marktrijpe verbrandingsmotorhybriden in de toekomst te vervangen door brandstofcel-hybride voertuigen.

Recente ontwikkelingen hebben in de periode 1993-1998 geleid tot een groot aantal demonstraties van brandstofcellen in bussen, bestelauto's en personenauto's. Tabel 4.5.4 geeft hiervan een overzicht.

De polymere brandstofcel heeft waterstof (H_2) als brandstof nodig. Dit kan in drukcilinders, opgeslagen in metaalhydriden of (sterk gekoeld) in vloeibare vorm. De waterstof kan aan boord van het voertuig worden opgeslagen of aan boord worden geproduceerd uit een koolwaterstof [Höhlein, 1997]. De waterstofopslag aan boord van het voertuig wordt gezien als een tijdelijke oplossing vanwege de veiligheidsproblemen bij grootschalige toepassing en de ongunstige verhouding tussen gewicht en volume van de energie-inhoud per eenheid massa en volume. Een belangrijke recente ontwikkeling is de opslag van water-

Jaar	Fabrikant	Voertuig	Brandstofcel	Vermogen brandstofcel	Actie- radius	Brandstof
1993	Ballard	10 m bus	Ballard, polymere brandstofcel	90 kW		H ₂ gecomprimeerd
1994	Daimler Benz	bestelbus	Ballard, polymere brandstofcel	50 kW		H ₂ gecomprimeerd
1995	Ballard	prototype 12 m bus	Ballard, polymere brandstofcel	250 kW		H ₂ gecomprimeerd
1996	Daimler Benz	multi-purpose busje (V-klasse)	Ballard, polymere brandstofcel	50 kW		H ₂ gecomprimeerd
	Toyota	personenauto (RAV ₄)	Toyota, polymere brandstofcel	20 kW + batterij		H ₂ metaalhydride
1997	Daimler Benz	12 m bus	Ballard, polymere brandstofcel	250 kW	250 km	H ₂ gecomprimeerd
	Ballard	12 m bus in bedrijf in Chicago	Ballard, polymere brandstofcel	250 kW		H ₂ gecomprimeerd
	Daimler Benz	personenauto (A-klasse)	Ballard, polymere brandstofcel	50 kW		methanol
	Toyota	personenauto (RAV ₄)	Toyota, polymere brandstofcel	20 kW + batterij	500 km	methanol
	Renault	personenauto (Laguna break)	De Nora, polymere brandstofcel	30 kW + batterij	500 km	H ₂ vloeibaar
1998	Mazda	personenauto (Demio)	?	20 kW + supercondensator	170 km	H ₂ metaalhydride
	Zevco	personenauto Subaru, Cityvan, Londen taxi TX1	Zevco, alkalische brandstofcel	5 kW + batterij	?	H ₂ gecomprimeerd
	GM	personenauto EV1, Opel Sintra	?, polymere brandstofcel	? + batterij	480 km	methanol

Tabel 4.5.4

Demonstratieprojecten in mobiele toepassingen [Fuel Cells 2000, 1998; Zevco, 1998; General Motors, 1997].

.....
53 Deze beperking geldt niet voor voertuigparken, 'fleet-owners', busmaatschappijen. Dergelijke voertuigen komen dagelijks terug op een vaste plaats. Met de petrochemische industrie zijn uitstekende afspraken te maken over levering van waterstof op dergelijke locaties.

stof in microscopische koolstofbuisjes (zgn. nanotubes), die in staat zijn 30 liter moleculaire waterstof per gram koolstof te absorberen. Een en ander bevindt zich nog in het laboratoriumstadium (Boston Northeastern University), zodat het nog onduidelijk is of deze ontdekking tot praktische resultaten zal leiden. De meest wezenlijke belemmering voor introductie van waterstof is het ontbreken van een infrastructuur voor de brandstof distributie. De kosten voor het opzetten van een distributienet voor waterstof zijn bijzonder groot.

Oliemaatschappijen zullen hiertoe pas overgaan, als de afzetmarkt voldoende groot is. En die zal er niet komen zonder brandstofcelvoertuigen met waterstoftanks aan boord. Een typisch kip-ei probleem ⁵³.

Productie van H₂ uit aan boord aanwezige brandstof ligt dan ook meer voor de hand, in elk geval in een overgangssituatie van benzinevoertuigen naar brandstofcelvoertuigen. Hiervoor is op dit moment methanol een zeer geschikte

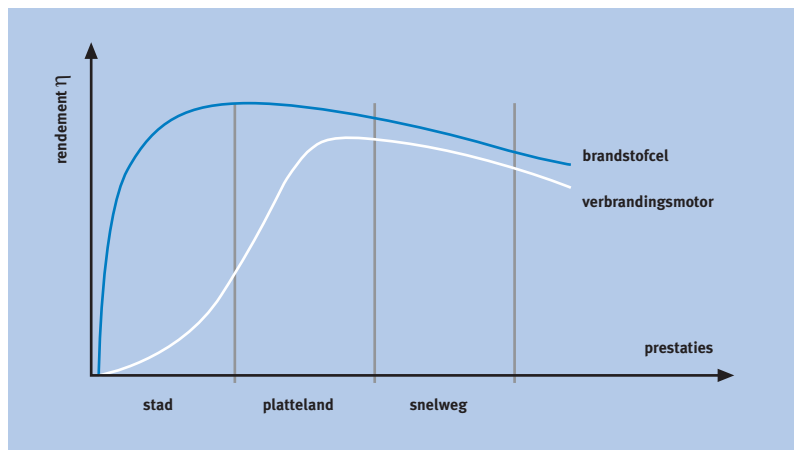
brandstof. Er wordt dan ook zeer veel aandacht besteed aan de omzetting van methanol tot schone H_2 voor de polymere brandstofcel. Garry Hefferman van Ford Motor Co's, manager van 'corporate technology planning' ziet waterstof als brandstof als zeer onwaarschijnlijk, maar ziet zeer goede mogelijkheden voor methanol naast de bestaande logistieke brandstoffen. Oliemaatschappijen daarentegen zien methanol niet als brandstof voor grootschalige toepassing. Als dit zo blijft, zal de techniek voor het aan boord produceren van waterstof uit de gangbare logistieke brandstoffen moeten komen. In elk geval is dat marketingtechnisch de meest eenvoudige route, omdat er aan de distributie-infrastructuur niets hoeft te worden gewijzigd. Begin 1997 heeft Chrysler aangekondigd dat ze binnen twee jaar een demonstratie van een polymere brandstofcel met benzine als brandstof heeft gepland. Chrysler gebruikt voor de omzetting de 'reformer' technologie die wordt ontwikkeld door Arthur D. Little. In oktober 1997 kwam dit bedrijf in het nieuws met een 50 kW benzine-reformer in combinatie met brandstofcelstapelings. Men stelt dat de ontwikkelde reformer geschikt is voor verschillende koolwaterstoffen, inclusief methanol. Het is ook tekenend dat ARCO-products met EXON Research en de dochteronderneming Delphi van General Motors gezamenlijk een 'on-board' benzine-reformer aan het ontwikkelen zijn. Shell Research, toonaangevend in de ontwikkeling van katalyseprocessen, is inmiddels betrokken bij de ontwikkeling van een reformer in samenwerking met Daimler Benz. Ook andere partijen werken aan reformers gebaseerd op stoomreforming, autotherme of partiële oxidatiereformers. Voor stoomreforming geldt dat het hogetemperatuurreformersysteem geschikt moet worden gemaakt voor de combinatie met de lage-temperatuurbrandstofcel. Bij de toepassing met de polymere brandstofcel bestaat er een lichte voorkeur voor autotherme en partiële oxidatiereformers [Nurdin, 1997; Hornburg, 1997].

Welke technologie uiteindelijk zal doorbreken is op dit moment moeilijk aan te geven. Behalve van technologische ontwikkelingen hangt dit af van strategische beslissingen van belangrijke spelers in de auto- en olie-industrie en van de ontwikkeling van kosteneffectieve componenten.

Een vergelijking van het rendement van een verbrandingsmotorhybride met die van een polymere brandstofcel vraagt om twee redenen een zorgvuldige analyse. Ten eerste verschilt de variatie van het rendement als functie van de belasting voor een polymere brandstofcel sterk van die van een verbrandingsmotor. In fig. 4.5.14 wordt weergegeven dat de brandstofcel een totaal ander (gunstiger) deellastgedrag vertoont dan een verbrandingsmotor.

Fig. 4-5.14

Belastingsgedrag van een brandstofcel en een verbrandingsmotor getoond aan de hand van het rendement in verschillende gebruikssituaties.



Ten tweede zijn de meeste rendementbeschuwingen voor polymere brandstofcellen gebaseerd op modelberekeningen die uitgaan van geoptimaliseerde componenten zoals compressoren, expanders, reformers, enz. De eerste systemen zullen evenwel nog niet de geoptimaliseerde componenten zijn. Daarbij zal de grootte van de brandstofcellenstapeling zo zijn gekozen dat de kosten en het gewicht zo laag mogelijk zijn. Dit kan betekenen dat dan bij het werkpunt van de brandstofcel het rendement voor een hybride polymere brandstofcel niet optimaal is.

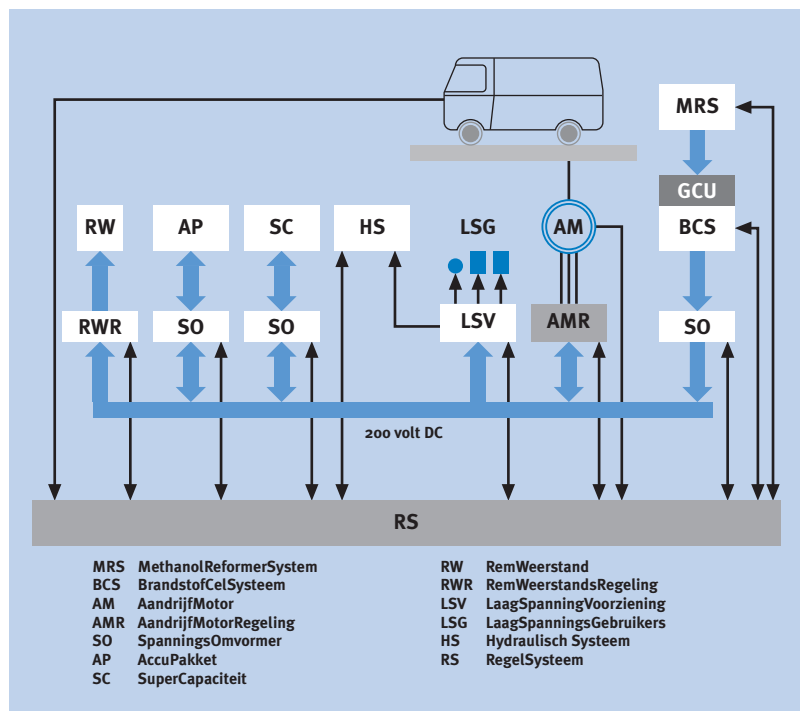
Recent en deels nog lopend onderzoek in opdracht van de IEA (Höhlein, 1997) heeft als voorlopig resultaat opgeleverd dat de brandstofcel in potentie bijna een halvering van het primaire brandstofverbruik kan opleveren. Echter, de bandbreedte is groot: van een gelijk verbruik tot bijna een halvering. Daarbij is als referentie het verbruik van de gemiddelde (tamelijk zuinige) personenauto in het jaar 2005 genomen (5 l. per 100 km) volgens de Europese ritstandaard. De gehele cyclus is beschouwd (vanaf winning naar raffinage tot wiel). Voor een auto met verbrandingsmotor is een energetisch rendement van 17% à 18% verondersteld. Een groot aantal brandstofcelsystemen zijn beschouwd. Het beste scoort de auto met gecompriëerde waterstof aan boord, geproduceerd uit aardgas. Het energetisch rendement van deze auto met een polymere brandstofcel ligt tussen 22% en 31%. Van de beschouwde systemen scoort de direct met methanol gestookte brandstofcel het laagst: 16% tot 22%. Ook hier wordt in een raffinaderij de methanol uit aardgas geproduceerd. Een goede middenpositie wordt ingenomen door het systeem dat Daimler in zijn Mercedes A-klasse heeft geïntroduceerd: reforming aan boord van methanol naar waterstof. Het energetisch rendement van dit systeem ligt tussen 17% en 24%. Een veelbelovende techniek is reforming aan boord van het voertuig van benzine naar waterstof: een energetisch rendement tussen de 19% en 27% wordt voorspeld. Het emissieniveau van al deze voertuigen is bijzonder laag. Het zijn allemaal 'Near Zero Emission Vehicles' en de emissie ligt vele malen onder het in 2005

vast te leggen EURO4-niveau. Indien de beloofde doorbraak inderdaad wordt waargemaakt (zoals bijv. Daimler voor 2005 heeft aangekondigd) dan kunnen de emissienormen waarschijnlijk al voor het jaar 2010 op het niveau van de 'Near Zero Emission Vehicles' worden vastgelegd en is alle emissiewetgeving vanaf dat jaar als een historische rimpeling te beschouwen: de voertuigen zijn dan maximaal schoon en bijzonder zuinig. De research en ontwikkeling van de milieuprestatie zal zich dan toespitsen op verdere vermindering van het energiegebruik van de auto.

KOSTEN, GEWICHT EN AFMETINGEN

Om te kunnen concurreren met de interne verbrandingsmotor zal de brandstofcel met toebehoren aan bepaalde criteria op het gebied van kosten, gewicht en afmetingen moeten voldoen. Weliswaar hoeft de brandstofcelauto niet op alle criteria onder het niveau van de traditionele auto te scoren, maar enigszins in de buurt moet deze prestatie toch wel kunnen uitkomen. Op dit moment is daarvan nog geen sprake, maar studies geven aan dat het brandstofcelvoertuig in elk geval qua kosten zal kunnen concurreren met het voertuig met een interne verbrandingsmotor. Daarbij is onder andere uitgegaan van massaproductie. Omdat mechanisch gezien de brandstofcel (en de reformer) uitermate eenvoudige apparaten zijn, waarin geen bewegende delen voorkomen, is het voorstelbaar dat de kosten vergelijkbaar of zelfs lager zullen zijn dan bij verbrandingsmotoren. Bij goed functioneren vallen de onderhoudskosten laag uit.

Fig. 4-5-15
Schematische weergave van de systemen in een brandstofcel-hybride voertuig.



Gewicht en afmetingen van brandstofcellen en interne verbrandingsmotoren worden gekarakteriseerd door de vermogensdichtheid. De eerste prototypen waren erg volumineus en zwaar. Inmiddels heeft Ballard/Daimler de vermogensdichtheid al met een factor 5 verbeterd en is de brandstofcel-reformereenheden van dusdanige afmetingen dat ze in een Mercedes A-klasse auto past. De Europese Commissie heeft voor 2005 een streefwaarde voor de kostprijs van minder dan 100 ECU/kW geformuleerd.

SYSTEEMBESCHRIJVING

Het verbruik van een auto met een brandstofcel hangt niet alleen af van het vermogen en het rendement van een brandstofcel, maar ook van het totale systeem en de regelstrategie voor zo'n systeem. Om de impact van de elektromagnetische vermogenstechnologie voor zo'n polymere brandstofcel te kunnen aangeven, is het nodig om een overzicht te geven van de componenten in zo'n systeem. In fig. 4.5.15 wordt een schematische weergave gegeven van de energievoorziening in een brandstofcelhybride-elektrische auto. De centrale rol van de vermogenselektronische regeling (RS) komt hier duidelijk naar voren.

De brandstof is in dit geval methanol. De methanol wordt in de reformer (MRS) omgezet in waterstof en komt via de gaszuiveringsunit (GCU) beschikbaar voor de brandstofcel. Hier wordt brandstof aan de anode toegevoerd en lucht aan de kathode. De stroom en spanning komen via een spanningsomvormer (SO) beschikbaar op het gewenste spanningsniveau voor het aandrijven van elektromotoren (AM) en het laden van het accupakket (AP) voor elektrische energieopslag en de supercapaciteitbank (SC) voor het kort gevraagde piekvermogen. De interface-componenten in de vorm van spanningsomvormers en regelingen zorgen voor de juiste aanpassing van de componenten op de 200 V-spanningsbus van het systeem. Om de efficiëntie van het systeem te verhogen wordt de remenergie teruggewonnen. De remweerstand (RW) als generator is via de remweerstandregeling (RWR) gekoppeld aan de spanningsbus. Verder voorziet het systeem in een laagspanningsvoorziening (LSV) voor laagspanningscomponenten in het systeem. Om de energiestromen tussen de componenten optimaal te laten verlopen is een regelsysteem essentieel. De communicatie tussen alle componenten kan via een bussysteem plaatsvinden.

4.5.8 AUTOMATISCHE VOERTUIGGELEIDING

*ir. C. Witziers*⁵⁴

INTRODUCTIE

Wanneer door vermogenselektronica een koppeling ontstaat tussen informatica en elektrotechniek, ligt het voor de hand menselijke taken te ondersteunen door de toepassing van informatica. Op het gebied van elektrisch vervoer zou dit betekenen dat systemen voor voertuiggeleiding een rol gaan spelen. Deze paragraaf gaat in op de mogelijkheden en toekomstverwachtingen op dit gebied, waarna besloten wordt met een nadere beschouwing van de relatie tussen voertuiggeleiding en elektrisch of hybride vervoer.

De twee belangrijkste begrippen in de toekomst van vervoer- en transportmiddelen zijn Intelligente Transport Systemen (ITS) en Automatische Voertuig Geleiding (AVG). AVG betreft het deels of geheel automatiseren van de rijtaak (besturing). AVG heeft over het algemeen betrekking op het vervoer over de weg: het individueel en collectief personenvervoer en het goederenvervoer. Voorbeelden zijn systemen die rijtaken van bestuurders overnemen, zoals navigatiesystemen, en systemen die ondersteunen bij het op de juiste weg blijven ('lane keeping') en het bewaren van de juiste afstand ('Adaptive Cruise Control', ACC). De verzameling AVG-systemen kan worden gezien als een deelverzameling van ITS. ITS zijn meer algemeen systemen die de logistiek ondersteunen. Tot ITS behoren ook transportsystemen die niet over de weg gaan, zoals transport over water, door de lucht of over rails. Ook systemen die gebruik maken van verschillende modaliteiten, of helpen verschillende van deze modaliteiten te kiezen ('multimodaal vervoer') vallen onder ITS. Tevens kunnen logistieke oplossingen voor specifieke problemen hieronder vallen, zoals onbemande voertuigen die momenteel bij Schiphol en in Capelle aan den IJssel rondrijden ('people movers') of Combi-Road[®] [CTT, 1996].

Uiteraard zijn er systemen die over de grens tussen AVG als ITS gaan. Voor de overzichtelijkheid van het verhaal zal de grens echter 'hard' gehouden worden, en zullen de diverse systemen als zodanig ingedeeld worden.

Vanwege de grote invloed die de toepassing van AVG-systemen op de maatschappij kan hebben, is niet alleen een technologische benadering gewenst. Reeds in een vroeg stadium zullen bij de ontwikkeling van AVG-systemen ook gedragsaspecten, individuele en maatschappelijke acceptatie en juridische aspecten belicht moeten worden.

Hierna zullen de begrippen AVG en ITS nader worden besproken. Allereerst zal de rol van de marktpartijen ten aanzien van AVG en ITS worden behandeld om meer algemeen begrip voor de houding van de verschillende marktpartijen te kweken. Vervolgens zal dieper worden ingegaan op een aantal specifieke systemen op het gebied van AVG en ITS, die ontwikkeld worden of beschikbaar zijn.

54 TNO Wegtransport AVG,
Postbus 6033
2600 JA Delft
Witziers@wt.tno.nl

MARKTPARTIJEN BIJ AVG EN ITS

In het algemeen kan worden gesteld dat AVG-systemen vooral tot doel hebben de verkeersveiligheid en het comfort van de individuele bestuurder te verhogen. De individuele bestuurder staat centraal en wordt in het rijden ondersteund door middel van intelligentie van vooral zelfstandig in het voertuig opererende systemen. De initiatieven die ten behoeve van AVG worden ontplooid komen in het algemeen voor rekening van de automobieliindustrie, die de individuele bestuurder als belangrijkste klant ziet en hiermee ook aan product- en marktontwikkeling kan doen. Het initiatief ligt bij de aanbieder; er is in het algemeen sprake van 'technology push'. Er zal bij onderzoek naar AVG vooral worden gekeken naar winstgevendheid en marktmogelijkheden.

Intelligente transportsystemen die niet binnen de deelverzameling van AVG vallen, worden in het algemeen door twee partijen geïnitieerd. Enerzijds speelt de overheid de rol van initiator, die systemen zoekt voor de oplossingen voor het transport en voor de verbetering van de doorstroming en de algemene verkeersveiligheid. Anderzijds is er een rol weggelegd voor bedrijven die oplossingen zoeken voor specifieke logistieke problemen. Hierbij spelen de probleemeigenaren dus de rol van initiatiefnemer, en is er dus sprake van 'market pull'. Met name factoren zoals efficiëntie en effectiviteit zijn hierbij van belang. De overheid, een speler met bijzondere belangen, zal hierbij steeds het collectief van industrieën en particulieren als 'klant' zien.

AVG

Zoals eerder vermeld, heeft AVG voornamelijk te maken met het verlichten van de rijtaak van de bestuurder. Door middel van sensoren op en in het voertuig, communicatie van voertuig naar voertuig en informatie van de 'wegkant'⁵⁵ wordt de bestuurder geholpen. Het realiseren van AVG-systemen kan verschillende voordelen met zich meebrengen. Behalve op comfort en veiligheid hebben de systemen ook invloed op de milieubelasting, de verkeersefficiëntie en de kosten van het vervoer.

AVG heeft in het algemeen de potentie om een aantal van de huidige problemen met betrekking tot congestie en vervuiling gedeeltelijk te kunnen oplossen. Er kleven echter ook negatieve aspecten aan AVG:

- Een groter gebruiksgemak kan drempelverlagend werken: het aantal gereden kilometers kan toenemen, wat nadelig is voor het energieverbruik en de milieubelasting.
- De veiligheid van AVG-systemen wordt bepaald door de betrouwbaarheid van de techniek en de mate waarin de gebruiker zich aanpast aan de geboden veiligheid. Wanneer de techniek faalt, kunnen de gevolgen catastrofaal zijn.

⁵⁵ Alles wat niet uit voertuigen komt, komt van de 'wegkant'.

ITS

De overheid ziet zich steeds vaker geconfronteerd met een infrastructuur, die de toenemende verkeersstromen niet meer kan verwerken. Congestie, grote economische schade en negatieve invloeden op het milieu en de verkeersveiligheid zijn het gevolg. Er zullen dan ook oplossingen gevonden moeten worden. In plaats van het uitbreiden van het wegennet wordt steeds vaker gesproken over ITS als een van de instrumenten om de problemen te lijf te gaan.



Fig. 4-5.16

'People mover' in Capelle aan den IJssel.

Fig. 4-5.17

Het Combi-Road[®] systeem dat oorspronkelijk als elektrisch vervoer met sleepcontacten werd opgezet.

De meeste systemen waarvan de ontwikkeling door de overheid gestimuleerd wordt hebben tot doel het gedrag van het collectief van bestuurders te beïnvloeden. De bestuurders kunnen geadviseerd of verplicht worden het rijgedrag af te stemmen op de verkeersstromen door bijvoorbeeld een andere routekeuze, een andere snelheid of een aangepast gedrag ten aanzien van rijstrookwisseling (zoals verboden in te halen, slechts 1 baan gebruiken). Hiervoor is een informatiestroom van de wegkant naar het voertuig noodzakelijk, die op verschillende gebieden wordt vormgegeven en gestructureerd. Het ontwikkelen van gereedschappen hiervoor heeft betrekking op:

- Communicatie tussen het voertuig en de wegkant om de bestuurder te informeren en te beïnvloeden ten bate van collectieve veiligheid (over ongevallen of gevaarlijke situaties) of doorstroming (waarschuwing voor een file, waarmee de bestuurder vervolgens een andere route kan kiezen). Gedacht kan worden aan informatie via Dynamische Route Informatie Panelen (DRIPS, op een deel van de Nederlandse snelwegen rond Rotterdam, Amsterdam en Utrecht reeds aanwezig), radioinformatie (zgn. RDS/TMC⁵⁶ systemen), bakencommunicatie en GPS⁵⁷/gsm-communicatie.
- Verkeersmanagementgereedschappen, waarbij onderzoek wordt gedaan naar verschillende toepassingen van systemen met de hiervoor genoemde technieken. Hierbij kan worden gedacht aan informatie over de keuze van een vervoermiddel, maatregelen voor de routekeuze zoals informatievoorziening (zowel landelijke informatie via radio, tv als lokale file-informatie via DRIPS) of elektronisch tolheffen (keuze van route en reismoment wordt beïnvloed). Tevens kan worden gedacht aan maatregelen om bestuurdersgedrag

56 Radio Data System, systeem voor het meezen van tekst met het radiosignaal.

57 Global Positioning System, waarmee met behulp van satellieten een positie wordt bepaald.

- actief te beïnvloeden, zoals Intelligente SnelheidsAdaptatie (ISA), waarbij het voertuig door de wegkant een maximale snelheid opgelegd krijgt.
- Nieuwe transportmiddelen, gecombineerd met een eigen infrastructuur. Een voorbeeld is Combi-Road[®], waarbij onbemande truck-opleggercombinaties over een voor hen gereserveerde rijstrook rijden.

Status van ITS

Voor alle toepassingen van ITS die hiervoor genoemd zijn, is het van cruciaal belang dat de juiste informatie wordt verzameld en na verwerking wordt doorgezonden naar de bestuurders.

Voor die informatieverzameling is in de afgelopen jaren het gehele hoofdwegennet (de A-wegen in Nederland) voorzien van meetapparatuur, die in staat is vast te stellen wat de lokale weers- en verkeerscondities zijn. In de gehele randstad kunnen snelheden en verkeersdichtheden vrijwel continu gemeten worden. Tevens kan met behulp van zogenaamde gladheidsmeldsystemen vastgesteld worden of zelfs voorspeld worden waar gladheid kan optreden. Deze vaste systemen kunnen op discrete plaatsen meten. Ook wordt geëxperimenteerd met mobiele informatieverzameling.

DE INDUSTRIE

De meeste AVG-activiteiten van de industrie zijn primair gericht op de afnemer. Comfort en veiligheid zijn daarom belangrijke onderwerpen. De ontwikkeling van technologie ter verbetering van de verkeersefficiëntie en het verkeersmanagement zal alleen tot stand komen, wanneer de industrie zich sterk met deze technologie kan profileren en er op korte termijn een markt zal ontstaan (binnen 5 jaar, maar zeker binnen 10 jaar), of wanneer de industrie door de overheid gestimuleerd of gedwongen wordt. Overigens werkt de industrie over het algemeen aan systemen, die autonoom en in de bestaande infrastructuur kunnen functioneren. Onzekere factoren met betrekking tot de infrastructuur kan men hiermee uit de weg gaan.

Bekende ontwikkelingen uit de industrie zijn:

- Het Elektronisch Stabiliteits Programma (ESP). Door differentieel te remmen kan in een kritische situatie de stabiliteit van een voertuig hersteld worden. Dit systeem werkt alleen als noodhulp in kritische situaties, maar is omdat het in geval van nood de rijtaak van de bestuurder ondersteunt toch een van de eerste vormen van AVG.
- Voertuignavigatiesystemen.
- ‘Intelligent Autonomous Cruise Control’ of ook wel ‘Adaptive Cruise Control’ genoemd (IACC, ACC). Hierbij wordt met behulp van een afstandssensor automatisch een zekere veiligheidsafstand tot de voorligger gehandhaafd.
- ‘Stop & Go’, een vorm van ACC waarbij ook het filerijden in longitudinale zin geautomatiseerd wordt.

De eerste twee systemen zijn reeds op de markt. ACC en Stop & Go komen waarschijnlijk de komende jaren (binnen 5 jaar) beschikbaar voor productievoertuigen. Daarnaast wordt in verschillende vaak gesubsidieerde onderzoeksprogramma's samen met universiteiten en onderzoeksinstellingen gewerkt aan een verscheidenheid aan ontwikkelingen op het gebied van AVG. Enkele voorbeelden zijn:

- 'Collision warning'/'Collision avoidance', systemen die bij een verhoogde kans op een botsing met een object de bestuurder waarschuwen of eventueel zelfs ingrijpen.
- 'Lane keeping' en systemen voor laterale (zijdelingse) voertuiggeleiding.
- 'Platooning'. Door het vormen van pelotons, waarin de voertuigen zeer dicht op elkaar rijden kan de capaciteit van een rijstrook sterk verhoogd worden.
- 'Platooning' gecombineerd met zijdelingse voertuiggeleiding. Een aantal vrachtwagencombinaties volgt automatisch een andere vrachtwagen, de pelotonleider. Een chauffeur is op deze manier in staat verschillende vrachtwagencombinaties te besturen, waardoor loonkosten bespaard kunnen worden.

Opgemerkt dient te worden dat fabrikanten door de steeds verdergaande productaansprakelijkheid voorzichtig zijn met het automatiseren van rijtaken in productievoertuigen. Zolang er op dit punt geen duidelijke richtlijnen bestaan, zal de invoering van verregaande automatische voertuiggeleiding slechts moeizaam verlopen.

De basis voor de ontwikkelingen waarbij rijtaken worden overgenomen door bestuurders zal de 'X by wire' techniek zijn.

'Throttle by wire' geeft hoofdzakelijk vrijheden op het gebied van motormanagement en snelheidsregelingen en wordt reeds op kleinere schaal toegepast bij voertuigen die door een dieselmotor worden aangedreven, bij bussen en bij geavanceerdere nieuwe typen voertuigen (bijv. de Mercedes-A klasse). Met behulp van mechatronica wordt de standaardkabel die tot nu toe werd gebruikt voor de bediening van de gasklep, vervangen. De drijfveer voor deze ontwikkeling is niet alleen de mogelijke toepassing in rijtaakondersteuning, maar ook het feit dat de milieueisen steeds stringenter worden. Deze eisen zullen in de toekomst voor zowel vollast, deellast als voor transient (overgangs)gedrag gelden. De 'simpele' aansturing van brandstofinjectie en gasklep, zoals tot nu toe gebruikelijk was zal hierbij niet meer voldoen. De verwachting is dat in het begin van het volgende decennium de meeste nieuwe voertuigen met een throttle by wire zullen zijn uitgerust.

'Brake by wire' is een systeem dat de tot nu toe mechanisch/hydraulische remsystemen op den duur zou moeten vervangen. Momenteel is de regelgeving echter nog zodanig dat brake by wire systemen, ofwel elektromechanische remsystemen, nog niet toegestaan zijn zonder een mechanische back-up. De industrie is al zover dat de systemen reeds gelijkwaardig zijn aan, of zelfs

betrouwbaarder zijn dan de conventionele systemen. De introductie van elektrische componenten in de sturing van remsystemen gebeurde echter reeds jaren geleden bij de introductie van ABS. De meest recente, reeds actieve toepassing van intelligente sturing van remsystemen is het eerdergenoemde ESP. Zolang de overheden in Europa en Amerika echter nog eisen dat het remsysteem wordt voorzien van een mechanische back-up, zal de ontwikkeling in deze richting opgehouden worden.

‘Steer by wire’, bij het sturen van een voertuig zonder de mechanische stuurstang is niet alleen de regelgeving een probleem. Waar bij brake by wire noodsituaties kunnen worden opgevangen door de remmen te blokkeren (ofwel: de opstart- of ‘default’status van het systeem is remmen), is het moeilijker bij een stuursysteem te bepalen wat de defaultstatus zou moeten zijn. Toch zijn ook hier de eerste verschijnselen van invoering reeds te zien. Een aantal voertuigen zijn reeds uitgevoerd met een elektrische in plaats van een hydraulische stuurbekrachtiging. Problemen zoals hiervoor beschreven zijn nog steeds barrières voor de invoering, die derhalve ook niet in de komende 5 tot 10 jaar te verwachten is.

Opgemerkt kan nog worden dat elektronische besturingssignalen steeds vaker vervangen worden door lichtpulsen via glasvezelkabels (‘X by light’). De lichtsignalen zijn ongevoelig voor elektromagnetische storingen.

TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN

Individueel personenvervoer

De invloed van gebruikers in het individueel personenvervoer op de ontwikkeling van AVG zal zich in eerste instantie beperken tot hun wensen en hun koopgedrag. Voertuigen zullen steeds comfortabeler en veiliger worden. De kans is aanwezig dat men hierbij technieken op het gebied van automatische voertuiggeleiding gaat toepassen. Overigens moet men niet verwachten dat de penetratiegraad van bijvoorbeeld de ACC of van andere AVG-systemen zonder overheidsbemoediging in korte tijd zeer groot zal zijn. De geschiedenis leert dat een veiligheidsverhogend systeem zoals ABS ook zo’n 20 jaar nodig had om een hoge penetratiegraad te realiseren. Deze relatief lange periode heeft niet zozeer te maken met technologische problemen bij de ontwikkeling, maar meer met de prijsstrategie, die fabrikanten over het algemeen voor accessoires hanteren. Daarnaast zullen de systemen die beschikbaar komen in eerste instantie opereren in gemengd verkeer (voertuigen met en zonder AVG). De verbeteringen met betrekking tot de verkeersafwikkeling zullen hierdoor kleiner zijn dan theoretisch haalbaar is.

Zonder duidelijke afspraken tussen overheid en industrie zal er op het gebied van filebestrijding en vermindering van de milieubelasting door toepassing van AVG niet snel progressie geboekt worden. Vooral omdat de meest hoopgevende

systemen op dit terrein (platooning) verregaande veranderingen van de infrastructuur behoeven.

ITS kan waarschijnlijk wel op redelijk korte termijn invloed uitoefenen op de verkeersafwikkeling en de bestuurder informeren over de verkeersdrukte en intelligente routenavigatieapparatuur, die eventueel zijn gekoppeld met de communicatie tussen het voertuig en de wegkant.

Collectief personenvervoer

De potentiële invloed van gebruikers in het collectief personenvervoer is veel groter. Busmaatschappijen kunnen bijvoorbeeld een grote invloed uitoefenen op de ontwikkeling van AVG, waarbij kostenbesparing en efficiëntie belangrijke argumenten kunnen zijn. Toch is juist voor deze toepassing de betrokkenheid en acceptatie van de passagier zeer belangrijk. Dit laatste bemoeilijkt de ontwikkeling en toepassing van AVG in het collectief vervoer.

Demonstratieprojecten kunnen hier een grote rol spelen.

Goederenvervoer

Verregaande vormen van AVG kunnen waarschijnlijk het eerst verwacht worden in het goederenvervoer. Door de potentiële kostenbesparing van AVG-systemen zullen grote transporteurs bereid zijn te investeren in nieuwe ontwikkelingen. Concreet kan hierbij worden gedacht aan het automatisch aan- en afkoppelen van opleggers, het automatisch vullen van spoorreinen met trailers en de vorming van vrachtwagenpelotons. Er ontstaat dan een vraag naar nieuwe vervoersconcepten. De industrie en de overheid zullen hierop verder moeten inspelen.

ELEKTRISCHE AANDRIJVINGEN EN DE COMBINATIE MET AVG

Een voor de hand liggend toekomstbeeld is de koppeling van elektrische aandrijvingen in combinatie met AVG. Een aantal aspecten zijn voordelig in deze koppeling:

- De regeling voor longitudinale voertuiggeleiding/platooning is eenvoudiger te realiseren (de beschikbaarheid van vermogen is gemakkelijker te regelen en zowel acceleraties als deceleraties kunnen door de elektromotor worden gerealiseerd).
- Ook is de betrouwbaarheid van elektrisch aangedreven systemen groter en kan remenergie gemakkelijker worden opgeslagen.
- Het voertuig kan door de aanwezigheid van een spanningsbron met een hoge capaciteit relatief eenvoudig worden uitgebreid met een elektrische servomotor voor laterale geleiding. De stap naar bijvoorbeeld een volledig steer by wire systeem is makkelijker te maken.
- Het is mogelijk dat de eerder genoemde X by wire systemen een brede introductie van elektrische aandrijving zullen steunen. Door het hogere elektri-

- sche vermogen dat nodig is voor dergelijke toepassingen zullen hogere spanningsniveaus dan tot nu toe gebruikelijk gewenst zijn. De alom bekende niveaus van 12 en 24 V zullen stijgen naar minimaal 36 V, en de accucapaciteit zal hoger worden. Hierdoor zal langzaam de functie van de huidige brandstofmotor als generator voor elektrische energie belangrijker worden. De motor zou langzaam de vorm van een hybride aandrijving kunnen aan nemen (Overigens is een andere ontwikkeling die in deze richting als belangrijk zou kunnen worden aangemerkt die waarin de dynamo tevens een aandrijf-functie krijgt: prototypen waarin de functie van startmotor en dynamo zijn gecombineerd zijn reeds getoond, en de aandrijving door de startmotor is een volgende stap).
- Tot nu toe echter zijn de ontwikkelingen op het gebied van voertuigintelli-gentie en van elektrische aandrijvingen in zekere mate gescheiden gehou-den. Een van de oorzaken hiervoor is vermoedelijk dat het voortbouwen op de huidige stand van de techniek van voertuigintelligentie een zekerder marktpotentie heeft dan die waarbij voertuigintelligentie wordt gebaseerd op een mogelijke doorbraak van het elektrisch aangedreven voertuig. Andersom kan een groot deel van de voertuigintelligentie vermoedelijk onaf-hankelijk van de daadwerkelijke aandrijving worden ontwikkeld.

4.5.9 INTEGRAAL ONTWERPEN

ir. J.M. Meij

INTRODUCTIE

In de voorgaande paragrafen zijn technologieën behandeld die een belangrijke rol zullen spelen in de toekomstige elektrisch aangedreven vervoermiddelen. Veel van deze technologieën hebben een grote invloed op de opbouw van het voertuig. Bovendien zijn ze vaak onderling sterk afhankelijk. De veranderingen die daardoor veroorzaakt worden zijn dusdanig groot dat in de ontwerpfase een fundamentele heroverweging van de gebruikelijke werkwijze en configuratie op zijn plaats is. In deze paragraaf wordt de noodzaak en het potentieel van integraal ontwerpen getoond aan de hand van het voorbeeld van een hybride stads-bus. De noodzaak tot een integraal nieuw ontwerp bestaat echter ook voor hybride en elektrische personenvoertuigen.

DE 'ULTRALIGHT' STADSBUS

In 1994 is een project gestart op initiatief van de Rotterdamse openbaar ver-voersmaatschappij RET om een hybride lage-vloerstadbus te realiseren. In de loop van het project zijn verschillende partijen erbij betrokken om tot de uitein-delijke realisatie te komen: Duvedec (styling en lay-out), Fokker Special Products (carrosserie en wielophanging), TRAXIS (voorheen HOLEC, elektrische

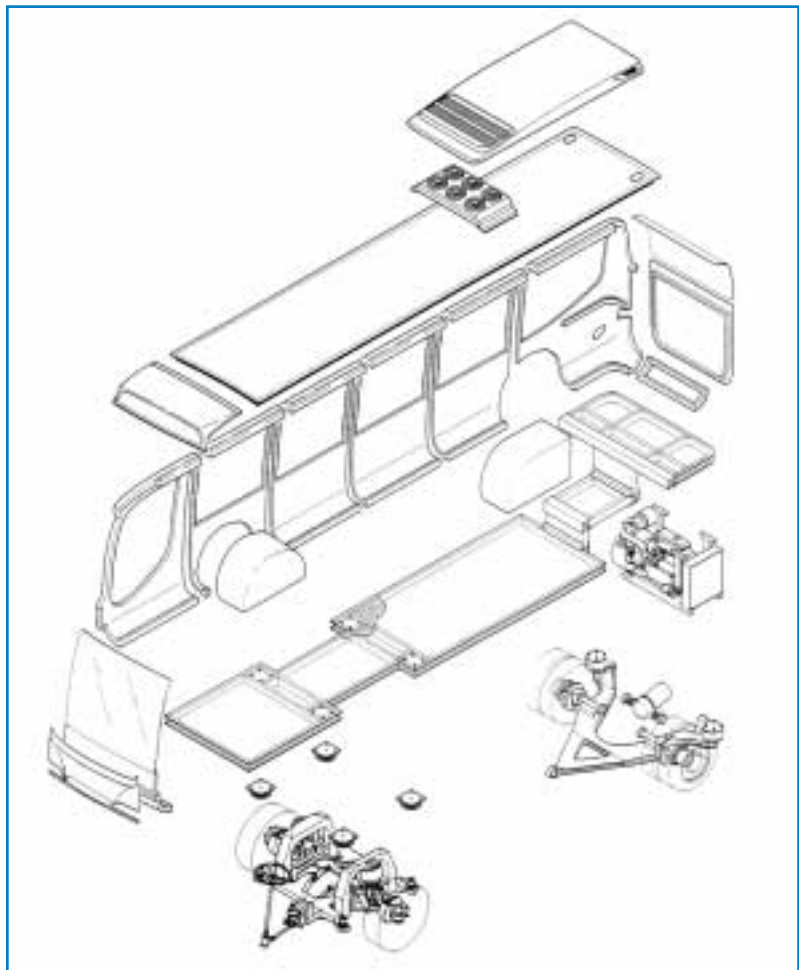
aandrijving en aanvullende energievoorziening) en Den Oudsten (voertuigsystemen en assemblage). Het project werd geleid door de Gemeentelijke Afdeling Project Innovatiebevordering Rotterdam en ondersteund door de RET als eindgebruiker. Aan de financiering werd bijgedragen door het Europese THERMIE programma, het Ministerie van Economische Zaken en de betrokken industrie-partijen [Volgers, 1998].

Eisen aan de nieuwe bus

Na een aantal iteratieslagen werden de volgende eisen voor de bus vastgelegd: de bus moest aan strenge emissienormen voldoen en de rijeigenschappen moesten minstens even goed zijn als die van een standaard stadsbus. De maximale snelheid van 80 km per uur moest met een volle belading op een vlakke weg (voor een beperkte afstand) gehaald worden. De bus moest een aantrekkelijk uiterlijk en een lage vloer hebben en geschikt zijn voor het vervoer van 70 passagiers.

Fig. 4-5.18

De elementen van de carrosserie.



Ontwerp voor gewichtsbesparing

Een stadsbus is bij uitstek een vervoermiddel dat veelvuldig optrekt en afremt, waardoor iedere kilogram belangrijk is. Het versnellen van massa kost nu eenmaal energie. De toepassing van een hybride concept vraagt ondanks dat er minder batterijen nodig zijn dan bij een volledig elektrisch voertuig toch nog een flinke hoeveelheid batterijen. De gewichtstoename is navenant. Het extra gewicht van de batterijen vraagt om een 30% lichter voertuig.

De conventionele bussen worden gebouwd op een stalen balkenchassis dat compleet met motor, aandrijving en besturing van de grote fabrikanten ingekocht wordt. De busconstructeurs voegen hieraan de opbouw en het complete interieur toe. Een lichtere opbouw alleen zou niet de gewenste gewichtsbesparing kunnen realiseren en afgezien van het feit dat een op specificatie gemaakt licht chassis kostbaar is, valt er aan een dergelijk chassis niet veel meer op gewicht te besparen. Dit maakt een andere ontwerp- en constructiemethode noodzakelijk.

De vliegtuigtechnologie die door Fokker Special Products werd ingebracht maakte het mogelijk ook voor een bus een zelfdragende carrosserie te realiseren. Fig. 4.5.18 toont de opbouw van de zelfdragende carrosserie.

Deze bouwwijze resulteert voor het casco in vier ton gewichtsbesparing, waarvan drie ton ontstaat door het lichtere casco zelf. Eén ton ontstaat extra, doordat andere delen en systemen ten gevolge van de eerste gewichtsverlaging lichter kunnen worden uitgevoerd. De helft van de gewichtsbesparing wordt echter weer gebruikt door het gewicht van het hybride systeem, de loodbatterijen en de daarvoor benodigde constructieve maatregelen.

Tabel 4.5.5

Vergelijking van de gewichtsopbouw van de integraal ontworpen en de conventionele bus.

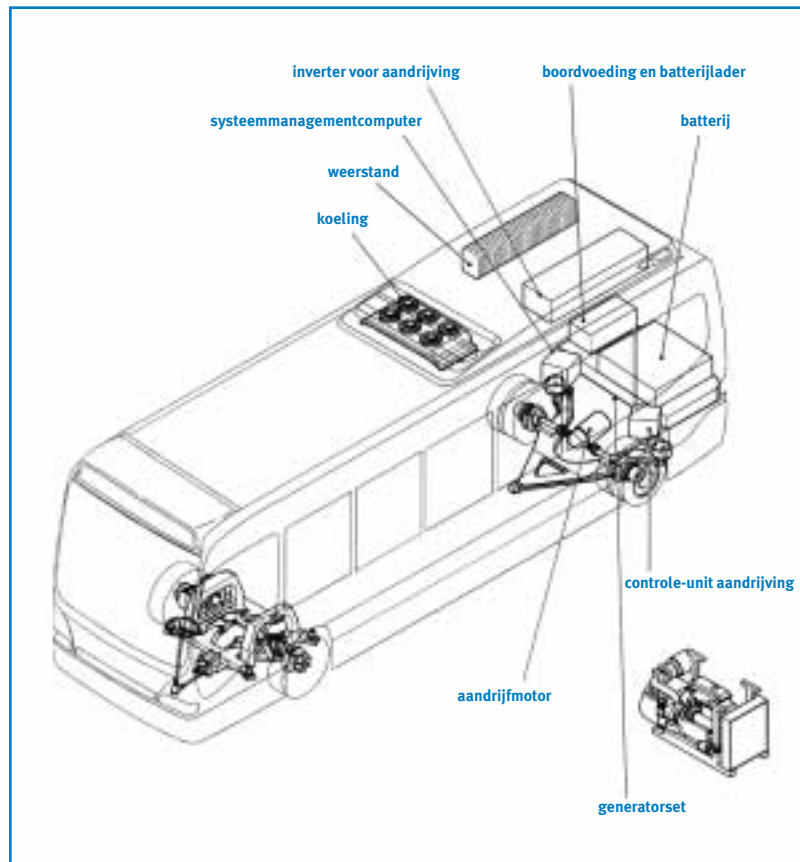
Integraal ontwerp		Conventionele opbouw	
wielen, ophanging	1.423	wielen, ophanging	1.800
generatorset	1.000	dieselmotor	1.000
elektromotor	450	versnellingsbak (automaat)	600
boordbatterijen	60	boordbatterijen	80
tractiebatterijen	850	brandstof	300
vermogensregeling, incl. koeling	400	balken	1.200
Totaal tractieset		Totaal rijdend chassis	4.980
body: vloer, dak, zijwanden	1.729	carrosserie	3.500
afwerking (glas, interieur, deuren etc.)	1.805	afwerking + interieur	2.000
bus leeg	7.717	bus leeg	10.480
passagiers 70 x 70	4.900	passagiers 70 x 70	4.900
totaal	12.617	totaal	15.380

Andere aandrijftechnologie

De bus is gebaseerd op een dieselmotor met een beperkt vermogen die gedimensioneerd is op het gemiddelde gebruik, en via een permanent-magneetgenerator verbonden is met de elektrische wisselstroom-aandrijfmotor en de batterijen. De vermogensregeling van de elektromotor met IGBT's⁵⁸ maakt een versnellingsbak overbodig, alleen een eindreductie in het differentieel wordt gebruikt. De IGBT's worden gekoeld met lucht. In combinatie met de elektromotor met een continuvermogen van 60 kW (piek 110) wordt een traploze acceleratie van 0 tot 90 km per uur mogelijk. De gehele combinatie van aandrijftechnologie is dus anders. Zo anders dat het substitueren van het conventionele aandrijfsysteem door het hybride systeem niet mogelijk is, en in het beste geval tot een suboptimaal systeem zou leiden. Fig. 4.5.19 toont een de voornaamste componenten van het aandrijfsysteem.

De batterijen leveren ook een deel van het vermogen dat voor de acceleratie nodig is; de generator draait op een constant, optimaal toerental. De remenergie wordt teruggevoerd naar de batterijen, en als deze vol zijn naar een weerstand die de elektriciteit omzet in warmte.

Fig. 4.5.19
Hoofdcomponenten in het aandrijfsysteem van de hybride bus.



58 Integrated Gate Bipolar Transistor, een halfgeleiderelement dat veel gebruikt wordt in omzeters. Zie deel 2, par. 2.5.

Resultaat integraal ontwerp

De uiteindelijke bus is modulair opgebouwd uit zes elementen, een dak en een vloer van sandwichmateriaal. De delen worden verlijmd. Door zijwandbevestiging van het meubilair is de vloer van de bus geheel vrij voor gemakkelijk onderhoud.

De bus weegt 8.000 kg ten opzichte van 10.000 kg voor een conventionele bus. Het verbruik is 1 liter per vijf kilometer, de helft van het verbruik van een conventionele stadsbus. Er is gekozen voor geavanceerde Pb/PbO₂-batterijen. Met het eerste model is ca. 800 km gereden. De acceleratie en het regeneratief remmen voldeden aan de verwachtingen, evenals de ook geheel nieuw ontworpen ophanging. De emissie van schadelijke stoffen en lawaai is laag te noemen. De aanschafkosten van de hybride bus zijn hoger dan die voor een conventionele bus, maar de operationele kosten zijn lager. De uiteindelijke kosten zullen naar verwachting ongeveer gelijk zijn aan die van een conventionele bus. Tijdens de laatste fase van een (nogal extreme) remtest voor bergachtig terrein bleken de batterijen echter sneller dan verwacht vol te raken. De weerstand die het overschot van de remenergie moest afvoeren raakte oververhit en veroorzaakte brand. Het prototype werd hierdoor onbruikbaar. Een nieuw exemplaar zal naar verwachting in het voorjaar van 1999 gereed zijn. Gedacht wordt aan het toepassen van een kleinere dieselmotor, bijvoorbeeld een 2 liter 'tdi' motor.

Andere voorbeelden van integraal ontwerpen

De drijfveren voor een herbezinning op het ontwerpproces van personenvoertuigen liggen besloten in twee trendbreuken die voortkomen uit de wens de efficiëntie en milieuprestaties van de personenvoertuigen te verbeteren. De eerste trendbreuk wijst in de richting van kleinere, lichtere voertuigen met een onderscheidend uiterlijk en een milieuvriendelijke uitstraling. De herbezinning begint hier bij het totale voertuigconcept en leidt naar een meer integrale aanpak om een aantal redenen:

- Het integreren van zoveel mogelijk onderdelen om te besparen op kosten en gewicht. Uiteindelijk kan dit leiden tot het combineren van fotovoltaïsche (PV)-opwekking en polymere batterijen of supercondensatoren met vezelversterking als carrosserie (plaatwerkdelen). Volumes in handvatten, dashboardbekleding en dergelijke kunnen worden gecombineerd met bepaalde typen supercondensatoren.
- Het lichter maken van het totaal maakt lichtere deelsystemen mogelijk. Voorbeelden zijn te vinden in de vering, de wielophanging, de banden en het motorvermogen.
- Cumulatieve effecten kunnen leiden tot het overbodig worden van gewichtsgerelateerde functies zoals stuur- en rembekrachtiging.

De tweede trendbreuk is de introductie van elektrische (of hybride) aandrijving. Zodra op de een of andere wijze een elektrische aandrijving wordt geïntroduceerd, dient voor een optimaal resultaat de gehele aandrijflijn te worden herontworpen. De redenen hiervoor zijn:

- De elektromotor heeft een andere motorkarakteristiek (koppel/toerenkromme) dan de verbrandingsmotor.
- Om de elektromotor goed te benutten is een elektronische vermogensregeling nodig. De combinatie van vermogenselektronica en elektromotor heeft echter geheel andere eigenschappen dan de combinatie van elektromotor en versnellingsbak. Het heeft geen zin om de elektromotor af te stemmen op de belasting zonder de vermogenselektronica en de besturing ervan in de beschouwing te betrekken. Ook de batterijen zijn gekoppeld aan en worden bewaakt door de vermogensregeling en hebben op hun beurt weer invloed op het systeem.
- Een elektrische aandrijving heeft een tientallen malen langere levensduur dan een verbrandingsmotor. Dit maakt een andere omgang met het concept ‘auto’ mogelijk, waarbij bijvoorbeeld batterijen en carrosserie gemakkelijk vervangen kunnen worden en het chassis tientallen jaren meegaat.
- De combinatie van gewichtsverlaging en het toepassen van elektrische aandrijving maakt een grotere ontwerpvrijheid mogelijk, waardoor een betere luchtweerstand gerealiseerd kan worden.

Voor personenauto's kan een integraal herontwerp voor het optimaliseren van luchtweerstand, gewicht en andere eigenschappen voor hybride systemen leiden tot grote verbeteringen. Het Rocky Mountain Institute voorspelt een verbruik van 1 liter per 50 km op de korte termijn. Voor een uitgerijpte ‘hypercar’ zou dit kunnen oplopen tot 60 à 120 km per liter.

Toekomstverwachting

Als de acceptatie bij de klanten (openbaar vervoerbedrijven) voldoende blijkt, kan het beschreven busconcept toegepast worden op een nieuwe generatie bussen. Ook bij tram- of light rail voertuigen en de nieuwe generaties ‘people movers’ valt op dezelfde wijze veel winst te boeken. Integraal ontworpen lichte voertuigen met elektrische aandrijving kunnen ook de milieuprestaties in het individuele personenvervoer enorm verbeteren.

Met dank aan ing. H.J. Hartgers, Fokker Special Products, Hoogeveen.

4.6 CONCLUSIES

*ir. J.M. Meij, dr. S.B. van der Molen*⁵⁹

De conclusies uit de bijdragen in dit hoofdstuk zijn ingedeeld naar verschillende invalshoeken. Na de conclusies sluiten we het hoofdstuk af met een opsomming van mogelijkheden voor het ontwikkelen van kennis, producten en diensten voor de elektrificatie van vervoer.

ELEKTRIFICATIE VAN VERVOER

De elektrificatie van het vervoer zal doorgaan, waarbij nu ook het wegvervoer steeds vaker gebruik zal maken van elektrische aandrijving. De eerste succesvolle elektrisch aangedreven voertuigen zullen hybriden zijn, waarbij de seriehybriden of mechanisch ontkoppelde parallelhybriden de beste papieren hebben. Seriehybriden hebben van de hybriden de minste mechanische onderdelen, en kunnen daarnaast profiteren van het gunstige constante toeren-tal van de primaire aandrijfmotor. Ook kan de hybride profiteren van de ontwikkelingen op het gebied van interne verbrandingsmotoren die nog steeds plaatsvinden. Het aandeel van de hybriden in het personenvervoer varieert in de bestudeerde scenario's van 2 tot 40%. De doorbraak van batterij-elektrisch vervoer zal plaatsvinden wanneer de specifieke energie van de batterijen 3 à 4 maal die van een loodaccu bedraagt, en wanneer snellaadtechnologie het (incidenteel) laden bij de pomp mogelijk maakt. De eerste succesvolle elektrische voertuigen zullen klein en licht zijn, voor de korte afstand als vervanger van de tweede (boodschappen of woon-werk) auto. Het is mogelijk dat dit voertuig een twee- of een driewieler⁶⁰ is. Veel milieuwinst is te behalen door de vervanging van tweetakt-tweewielers door elektrische tegenhangers.

Batterij-elektrisch vervoer krijgt alleen in de duurzame scenario's een kans en bereikt daar een aandeel van 21 tot 25%. De brandstofcel zal waarschijnlijk het eerst zijn intrede doen in een hybride systeem (met batterijen en supercondensatoren voor o.a. terugwinning van remenergie) in combinatie met een reformer voor vloeibare brandstof. Het moment van introductie hangt af van de prijsontwikkeling van de brandstofcel en de ontwikkeling van 'on-board' reformers. Recente ontwikkelingen wijzen erop dat deze reformers voor de toepassing van conventionele brandstoffen binnen 5 jaar beschikbaar zullen komen. Het voordeel zit vooral in het bijna nul-emissieniveau van stoffen zoals NO_x, SO₂ en CO₂ en het lagere energiegebruik. Als gevolg van het lagere energiegebruik is voorlopig ook de CO₂-uitstoot lager dan bij de verbrandingsmotor. Duurzaam of CO₂-loos autorijden komt pas in beeld als de productiemethoden voor vloeibare brandstof uit biomassa verder ontwikkeld worden, of als op duurzame wijze gegenereerde waterstof efficiënt en veilig opgeslagen kan worden. Brandstofcel-(hybride)elektrische auto's verschijnen in de duurzame scenario's en in het ongeremde groeiscenario met een aandeel van 9 tot 15%.

59 ECN, Brandstoffen, Conversie & Milieu, Postbus 1, 1755 ZG Petten, vandermol@ecn.nl

60 Een halve-breedte of 'man wide' voertuig.

De regelsystemen in de elektrisch aangedreven voertuigen nodigen uit tot het implementeren van veiligheids- en comfortverhogende automatische voertuiggeleidingssystemen. Het is waarschijnlijk dat dergelijke systemen snel in deze voertuigen toegepast worden.

Voor alle elektrische voertuigen geldt dat een integraal ontwerp nodig is om met succes te kunnen concurreren met conventionele voertuigen. Het aanpassen van verbrandingsmotorvoertuigen leidt tot suboptimale oplossingen.

OPSLAGMIDDELEN

Veelbelovende batterijtypen op dit moment zijn de NiMH, en de lithium-ionbatterijen. Het ziet ernaar uit dat de toekomstige geavanceerde lithium-polymeerbatterijen dicht in de buurt komen van de specifieke energie die nodig is voor concurrentie met verbrandingsmotorvoertuigen. Het specifieke vermogen blijft nog wat achter bij de USABC-streefwaarden, maar vormt minder een knelpunt. De projecties voor het prijsniveau per kWh zien er ten opzichte van de loodaccutechnologie redelijk gunstig uit. Als we de levensduur in cycli in de berekening betrekken, dan zijn de nieuwe batterijtypen bij uitgerijpte grootschalige productie flink goedkoper in gebruik dan loodaccu's.

NaNiCl batterijen kunnen een rol spelen in niche-toepassingen.

Supercondensatoren kunnen in hybriden en batterij-elektrische voertuigen spanningspieken opvangen en vermogenspieken leveren en daarmee de levensduur en de prestaties van het batterijsysteem vergroten.

ELEKTRISCHE INFRASTRUCTUUR

De beschikbaarheid van 'thuis' snelladers van 11 kW zou een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het eventuele succes van batterij-elektrische voertuigen met geavanceerde batterijen. Als meer dan enige procenten van de mensen in een wijk tegelijkertijd een elektrische auto met een dergelijke lader oplaadt, dan kunnen er problemen optreden in het laagspanningsnet. Belastingsturing zou een (tijdelijke) oplossing kunnen bieden, maar moet volgens meer geavanceerde methoden dan tijdgekoppelde tarieven geschieden. Misschien kunnen mensen gestimuleerd worden langzaam te laden door de elektriciteitsprijs te koppelen aan de vermogensafname, zodat alleen als het strikt nodig is 'snel' geladen wordt. De enige echte oplossing voor dit probleem is vergroting van de capaciteit van het distributienet. De 120 kW snelladers bij benzinstations zijn gekoppeld aan het middenspanningsnet en zullen wat vermogen betreft geen problemen opleveren.

RAILVERVOER

Het totale railvervoer zal toenemen, maar er zal efficiënter met energie worden omgegaan. Terugwinning van remenergie zal waarschijnlijk beginnen rond de grote knooppunten en zich zo uitbreiden over de rest van het spoornet.

Kortdurende opslag kan bij de knooppunten (grote stations) forse energiebesparing opleveren door de remenergie van een remmende trein na een paar minuten af te staan aan de eerstvolgende versnellende trein.

VERMOGENSELEKTRONICA

Voor alle elektrisch aangedreven voertuigen geldt dat de integrale beschouwing van de keten van stroombron naar vermogenselektronica naar motor in combinatie met de voertuigkarakteristieken een essentiële voorwaarde is voor het bereiken van optimale configuraties. De centrale regeling speelt daarbij een belangrijke rol als interface naar de gebruiker en als intelligente sturing van het vermogen. Een vroege standaardisatie voor de gegevensuitwisseling tussen de componenten van het aandrijfsysteem kan tot grotere flexibiliteit en kosteneffectiviteit leiden.

VERKEERS- EN VERVOERSCONCEPTEN

Zonering en het stimuleren van specifieke vervoermiddelen voor de verschillende zones zullen waarschijnlijk de elektrificatie van het vervoer bevorderen. Verwacht wordt dat ook het stimuleren van vervoersconcepten als autodeelsystemen, elektrisch spoorvervoer, milieuvriendelijk stadsverkeer en individueel openbaar vervoer een positieve invloed zal hebben op de elektrificatie van het personenvervoer. Voor het goederenvervoer zal stimulering van het elektrisch spoorvervoer en het aanleggen van stadsdistributiecentra een positieve invloed hebben op de elektrificatie.

CONGESTIE

De elektrificatie van vervoer heeft weinig invloed op de congestie, tenzij nieuwe voertuigconcepten worden gecombineerd met geavanceerde systemen voor voertuiggeleiding en maatregelen die stimuleren het voertuiggebruik aan te passen aan de vervoersbehoefte en de omgeving. Vooral halve breedte-voertuigen en tweewielers kunnen dan een bijdrage leveren. Automatische voertuiggeleiding en intelligente transportsystemen zullen waarschijnlijk eerst in het collectieve personenvervoer en in het goederenvervoer hun intrede doen.

SCHEEPVAART

Elektrificatie van de scheepvaart biedt verschillende voordelen en kan op zichzelf waardevolle kennis en technologie opleveren. Met de toenemende belangstelling voor de toepassing van elektrische aandrijving in schepen lijkt het voor de zeevaart interessant om de energiebesparingsmogelijkheden door de plaatsing van windturbines op het schip te onderzoeken. Ook maakt elektrificatie nieuwe vormen van aandrijving mogelijk, zoals de asloze propeller (zie deel 2, par. 6.4.3).

Vermogenselektronica

- Ontwikkeling van regelstrategieën.
- Beveiliging en betrouwbaarheid van elektronische regelingen.
- Laadregelingen, strategieën en sensoren.
- Het beheersen van EMC/EMI bij elektronische regelingen.
- Conditiebewaking van aandrijfsystemen.
- Geavanceerde regelingen voor batterij-elektrische en hybride voertuigen ook voor recuperatie van remenergie:
 - Miniaturisatie en kostprijsverlaging.
 - Verbetering van de mechanische eigenschappen.
 - Modulaire opbouw voor eenvoudiger reparaties.
 - Een adequate lekspanningsindicatie en -beveiliging. Dit wil zeggen beveiliging van gelijkstroom vanaf 96 V boordspanning.
 - Integratie van een batterijmanagementsysteem en motorinformatie die beide op het dashboard getoond worden (temperatuur, toerental, stroomverbruik, ontladingsgraad, enz.). Deze integratie is inclusief storingsindicaties, die ook voor de gebruiker begrijpelijk zijn.
 - Toepassing van digitale aansturing van alle functies, zodat met een bus-systeem gewerkt kan worden en de betrouwbaarheid hiermee sterk kan worden verhoogd.
- Adaptieve regelingen, instelbaar op verschillende configuraties van batterijen, generator, elektromotor en voertuig. (Een nieuw batterijpack vraagt misschien een andere regel- en laadstrategie.)
- Vermogensregelingen voor elektrische vaertuigen en andere grote platformen.
- Vermogensregelingen voor spoorvervoer.

Batterijen

- Geavanceerde batterijen (lithium-ion en lithiumpolymeer).
- Intelligente batterijen met ingebouwde sensors, logica en (standaard)interface.
- Veiligheidsaspecten van batterijen.
- Hoog-vermogenbatterijen voor hybride-elektrische voertuigen.
- Snel laadbare batterijen.
- Batterijmanagementsystemen.

Laadtechnologie

- Laad-straatmeubilair:
 - Snellaadstations lokaal.
 - Snellaadstations 'onderweg'.

- Laad- en snellaadstations bij transfercentra (NS-stations, carpoolplaatsen, luchthavens).
- Laadpaaltjes individueel, voor de deur.
- Laadpaaltjes openbaar bij parkeerplaatsen met afrekensysteem.
- Laadpaaltjes voor tweewielers, thuis en bij scholen en stations.
- Snellaadpaaltjes voor tweewielers onderweg, in winkelcentra en bij stations.
- Elektrische infrastructuur voor snellaadstations.
- Vergroting van de capaciteit van de elektrische infrastructuur in woonwijken ten behoeve van elektrisch vervoer.

Voertuiggeleiding

- Standaardisatie van de aansturing en signaaloverdracht voor voertuiggeleiding.
- Elektronische/digitale interfaces voor longitudinale voertuiggeleiding.
- Elektronische en elektromechanische interfaces voor laterale voertuiggeleiding (sturen).

Supercondensatoren

- Materialen voor supercondensatoren.
- Laad- en ontladmanagement, regeltechniek.

Primaire aandrijving

- Geavanceerde verbrandingsmotoren voor (serie-)hybride auto's, geoptimaliseerd voor één vast toerental.
- Brandstofcellen en componenten, en fabricageprocessen hiervoor.
- Reformers en reformercomponenten voor brandstofcelauto's voor het toepassen van conventionele brandstoffen.

Elektrische aandrijving

- Lichte en compacte motoren met een hoog rendement.

Ontwerp

- Lichte integraalconcepten voor taxi, bus, tram en trein.
- Nieuwe veiligheidsconcepten voor lichte voertuigen.
- Het combineren van supercondensatoren, batterijen en brandstofcellen met andere functies door deze zaken in een vroeg stadium in het vormgevingsproces mee te nemen.

REFERENTIES

- BATCONF, *Proceedings 11th Annual Battery Conference*, Long Beach California, 9-12 January (1996)
- Brogan, J.J., e.a., *Diverse choices for electric and hybrid motor vehicles*, OECD paper, US Department of Energy (1992)
- Brunia, A., e.a., *Energie-opslagsystemen voor fotovoltaïsche systemen, een inventarisatie*, TNO-MEO rapport R95/221 (1995)
- Burke, A.F., *Electrochemical Capacitors for Electric vehicles, Proceedings 12th international Electric Vehicle Symposium v.1* (1994)
- Burke, A.F., in: *Proceedings 11th Annual Battery Conference*, Long Beach California, BATCONF, 9-12 January (1996)
- CARB, California Environmental Protection Agency Air Resources Board, *Zero emission vehicle biennial program review* (1998)
- Chan, C.C., K.T. Chau, An overview of power electronics in electric vehicles, *IEEE Transactions in Industrial Electronics* **44** (1), pp. 3-13 (1997)
- Chugoku, Electric Power Co. Inc. , Tokyo R & D Co. (1996), www.energia.co.jp/tech/topics/trance.html
- Clayton, B.R. (ed.), *Proceedings of the First (BWEA) Wind Assisted Ship Propulsion Symposium*, Glasgow, British Wind Energy Association, November (1985)
- CTT, Centrum Transport Technologie, Combi-Road®, Projectbureau Combi-Road®, eindrapport (1996)
- *De Nederlandse energiehuishouding*, CBS (1998)
- Domijan, A., *EV charging could interfere with the grid*, University of Florida, 16 april, Environmental Network News (ENN) (1998)
- EHVT, *Electric & Hybrid Vehicle Technology'96* (1996)
- Elzen, B., e.a., *Verkeer en vervoer in de 21e eeuw; Deelproject 3: Strategieën voor innovatie*, rapport nr. SEP-97.Doc, Universiteit Twente (1997)
- ENN, Environmental news network, *clean rocket fuel*, <http://www.enn.com>, (1998a)
- EV1 Product Information, General Motors (1997), www.gm.com/vehicles/us/innovations/
- Fairford Electronics, *Softstarting principles, the induction motor* (1997), www.fairford.co.uk/ss2.html
- Fuel Cells 2000, www.fuelcells.org
- General Motors, *Advanced technology vehicles* (1997), www.gm.com/vehicles/us/innovations/fuelcellcar.htm
- Gerwen, R.J.F. van, *Rendementsmetingen aan een laadapparaat voor een elektrische Volkswagen Caravelle*, KEMA-rapport 41971-IES96-1103 (1996)
- Gerwen, R.J.F. van, P. Toussaint, *Wegwijzers naar 2050; verkeer en vervoer in de 21e eeuw*, rapport nr. 42020-KST 97-3250, Sep (1998)

- Gloor, R., *Elektrische Antriebsysteme* (1996), www.energie.ch/doc/antriebe/antr_main.htm
- Höhle, B., Fuel cell systems for transportation, *Proceedings Commercializing Fuel Cell Vehicles 97*, Frankfurt, Intertech Conferences, Portland, USA (1997)
- Hornburg, G., Hydrogen & methanol fuel cell systems (Daimler), *Proceedings Commercializing Fuel Cell Vehicles 97*, Frankfurt, Intertech Conferences, Portland, USA (1997)
- <http://www.enn.com/news/enn-stories/1998/04/041698/ev.shtm>
- *Hybrid Electric Vehicle Program-Components-Batteries* (1998), webdevvh4.nrel.gov/components/batteries.html
- Janse, P., e.a., *Masterplan elektrische en hybride voertuigen*, notitie, Centrum voor Energiebesparing en schone technologie CE/TNO-WT, 14 november (1997)
- Jansen, A., e.a., *Mobilopolis, de actieve fietsstad*, Projectbureau IVVS (1997)
- Kalhammer, F.R., e.a., *Performance and availability of batteries for electric vehicles: a report of the battery technical advisory panel*, California Environmental Protection Agency Air Resources Board, CARB, El Monte (1995)
- Keuvelaar, B., Aandrijvingen voor elektrische automobielen, in: G.P.A. Mom, e.a. (eds.), *Autotechnical trends*, Hogeschool Gelderland/HTS Apeldoorn (1993)
- Korver, W., e.a., *Verkeer en vervoer in de 21e eeuw; Deelproject 1: Vervoerbehoefte en vervoerssystemen*, rapport nr. INRO-VVG 1997-15, TNO (1997a)
- Kuller, D., B. Kapfer, *Energy storage devices-Latest realities, Lithium polymer batteries for electric vehicles*, EnV'98 3M/IREQ (1998)
- LTC, Lithium Technology Corporation, *Technology overview*, (1998), www.lithiumtech.com/technology.htm
- Mason, W.T., U. Kristiansson, *Hybrid EVs versus pure EVs: which give greater benefits?* Society of Automotive Engineers, paper 94Co17
- Mom, G.P.A., *Geschiedenis van de auto van morgen*, Kluwer (1997)
- Mom, G.P.A., V. van der Vinne, *De elektro-auto: een paard van Troje?* Kluwer (1995)
- NASA, ERAST Environmental research aircraft and sensor technology, <http://www.dfrc.nasa.gov/Projects/erast/index.html> (1998)
- Nurdin, M., Fuel cell vehicles; an increasingly competitive reality?, *Proceedings Commercializing Fuel Cell Vehicles 97*, Frankfurt, Intertech Conferences, Portland, USA (1997)
- Offringa, L.J.J., *Electric power for a flywheel unit with a synchronous electrical permanent magnet machine*, proefschrift TU Delft (1997)
- PNGV, A public private partnership for a new generation of vehicles between government, universities, suppliers and some automotive companies, *Program Plan* (1994), www.ta.doc.gov/pngv/introduction/involved.htm

- Pollefliet, J., *Elektronische vermogenscontrole en aandrijftechniek*, Uitgeverij Nevelland, België (1996)
- Ramsden, V.S., e.a., *Design of an in-wheel motor for a solar powered electric vehicle*, EMD'97, IEE (1997)
- Riley, R.Q., *Electric and hybrid vehicles, an overview of the benefits challenges and technologies* (1997), www.rqriley.com/ev-tech.html
- Roos, J.H.J., e.a., *Verkeer en vervoer in de 21e eeuw; Deelproject 5: Energie in de 21e eeuw*, rapport nr 3.831.1, Centrum voor Energiebesparing en schone technologie (CE) (1997)
- Schillemans, R.A.A., *Inventarisatie oplaadbare batterijen*, TNO-MEP rapport R 93/231 (1993)
- Schol, E., K.F.B. de Paauw, *Verkeer en vervoer in de 21e eeuw; Deelproject 4: Personenvervoer en leefstijl*, rapport nr. ECN-BS/ES/7.7019/98, ECN (1997)
- Schuld, J., *Verkeer en vervoer in de 21e eeuw; Deelproject 5: Elektrische infrastructuur*, rapport nr. 59718-TDP 97-107236, KEMA/ Centrum voor Energiebesparing en schone technologie (CE) (1997)
- Sinclair, F., *Autogiro boats*, Illustrated talk to the Amateur Yacht Research Society , 5th December (1995), www.webstrand.org/yachts/auto/
- Smokers, R., e.a., *Verkeer en vervoer in de 21e eeuw; Deelproject 2: Nieuwe aandrijfconcepten*, rapport nr. 97.OR.VM.089.1/RSM, TNO (1997b)
- Smokers, R, e.a., *Elektrische en hybride voertuigen*, Een quick scan van de stand van zaken en trends, rapport nr 97.OR.VM.025.1/RSM, TNO (1997c)
- *Statistisch zakboekje 1997*, CBS (1997)
- USCAR, 1994, Partnership for New Generation of Vehicles Program (1994)
- USCAR, *Newsletter winter 1997*, Bridging the R&D and Commercialisation gap (1997), www.uscar.org/news/usabcjan97.html
- Volgers, G.J., *Hybrid bus, an integral approach*, Lecture presentation for the 15th Electric Vehicle Symposium, Brussels, 1-3 October (1998)
- Volvo Bus corporation, Göteborg, Sweden, *Product specification Volvo, B10B*, RSP 82274.06.97 (1997)
- Wellicome, J.A., *Broad appraisal of economic an technical requisites for a wind driven merchant vessel*, Occasional publication no. 2 RINA, November (1975)
- Westinghouse, Energy storage requirements for hybrid systems, in: *Status and evaluation of hybrid electric vehicle batteries for short term applications* (1995)
- Wilkinson, S.L, *Chemical & Engineering News*, American Chemical Society, October 13 (1997)
- Zevco, *Press release 30 juli* (1998), London, www.zevco.co.uk

2

1 Inleiding

1.1 INLEIDING

Deel 1 van 'Stroomversnelling' richt zich vooral op de grote lijnen en de technologieaspecten die specifiek belangrijk zijn voor de daar behandelde toepassingsgebieden. Deel 2 gaat dieper in op de technologie in meer algemene zin.

Elektrische technologie wordt toegepast bij het vervullen van een breed scala van functies. Uiteraard voor het omzetten van elektriciteit in licht, kracht, warmte en dergelijke, maar ook voor functies in de elektriciteitsvoorziening zelf.

Deze functies vormen de rode draad voor Deel 2 dat een beeld probeert te scheppen van technologieën die een sleutelrol zullen spelen in onze elektriciteitsvoorziening en voor het efficiënt gebruik van elektriciteit. Ook wordt er aandacht gegeven aan technologieën die wat minder ver ontwikkeld zijn, maar waarvan verondersteld wordt dat ze voldoende 'doorbraakpotentieel' bezitten om in een later stadium een belangrijke rol te gaan spelen.

Het is niet de bedoeling om een compleet overzicht van alle technologieën voor de elektriciteitshuishouding te geven. Wel is het doel de lezer attent te maken op een aantal technologiegebieden die in de toekomst van invloed kunnen zijn.

In Deel 2 komen aan de orde:

Materialen en componenten (hoofdstuk 2)

Het hoofdstuk begint met de elektrische isolatiematerialen of diëlektrica, gevolgd door de conventionele geleidende materialen en de kabels en lijnen uit deze materialen. Ook de materialen en de geleideropbouw voor de lage- en hoge-temperatuursupergeleiders worden hier behandeld. Daarna komen de halfgeleidermaterialen aan bod. Aparte aandacht is er voor de werkingsprincipes en kenmerken van magneetmaterialen. Via de werking van de losse vermogens-elektronische componenten wordt de stap gemaakt naar de werking en kenmerken van basisschakelingen voor de conversie van stroom en spanning.

Technologieën in het elektriciteitsvoorzieningssysteem (hoofdstukken 3-6)

In dit deel worden belangrijke of 'doorbraak'technologieën onder de aandacht gebracht aan de hand van een indeling in opwekking, transport en distributie, opslag, en gebruik van elektriciteit. Het gebruik van elektriciteit wordt uitvoerig behandeld. Ook enige nieuwe toepassingsmogelijkheden in de industrie komen aan de orde. Hiervoor is gedeeltelijk gebruik gemaakt van geactualiseerde versies van bijdragen uit de STT-publicatie 'Elektriciteit in perspectief' uit 1994, die voornamelijk gericht was op industriële toepassingen.

2

2

Materialen en componenten

De componenten waaruit onze elektromagnetische hulpmiddelen zijn opgebouwd, berusten vaak op de bijzondere elektrische of magnetische eigenschappen van bepaalde materialen. De ontwikkelingen in en de verwachtingen voor de voornaamste materialen op elektrisch en magnetisch gebied worden in deze paragraaf behandeld. We beginnen met verschillende typen elektrische isolatiematerialen, gevolgd door geleidende, supergeleidende en halfgeleidende materialen. Ook de permanente magneetmaterialen komen aan bod. Speciale aandacht is er voor vermogenselektronische componenten. De paragraaf wordt afgesloten met een bijdrage over geleidende kunststoffen.

2.1 MATERIALEN VOOR ELEKTRISCHE ISOLATIE

2.1.1 ELEKTRISCHE ISOLATIEMATERIALEN VOOR KABELS

dr.ir. P.H.F. Morshuis¹

Elektrische isolatoren worden toegepast om hoge spanningen te isoleren ten opzichte van de aardpotentiaal. Isolatoren of isolatieconstructies zijn opgebouwd uit (combinaties van) isolatiematerialen. De elektrische isolatie-eigenschappen van een isolator worden hoofdzakelijk bepaald door de aanwezigheid van defecten in of op het isolatiemedium, de kwaliteit van de elektroden, maar natuurlijk ook door het ontwerp van de isolator. Bij isolatiematerialen worden de isolatie-eigenschappen alleen bepaald door de eigenschappen van het materiaal; men spreekt van de intrinsieke sterkte van een materiaal. Deze intrinsieke sterkte ligt orden van grootte boven de doorslagveldsterkte van een constructie. Ter illustratie: de intrinsieke doorslagveldsterkte van polyethyleen is ca. 1.000 kV/mm, de maximaal in de praktijk gehanteerde waarde is ca. 25 kV/mm.

Elektrische isolatiematerialen worden ook wel diëlektrica genoemd. Een diëlektricum is gedefinieerd als een medium dat weinig of geen vrije ladingsdragers bevat en waarin (geheel of gedeeltelijk) terugwinbare elektrostatiche energie kan worden opgeslagen. Een diëlektricum kan worden toegepast als isolatiemateriaal, maar bijvoorbeeld ook als medium waarin elektrostatiche energie kan worden opgeslagen.

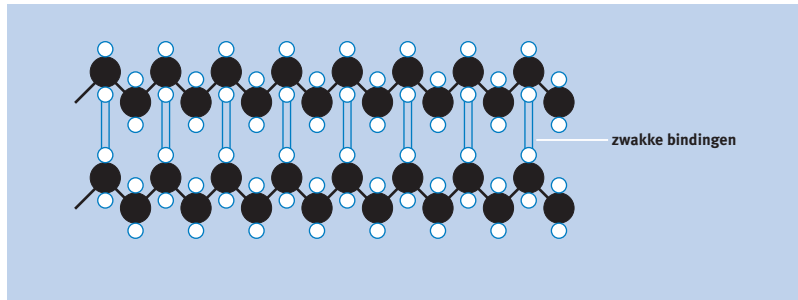
In het vervolg zal uit praktische overwegingen de term diëlektricum of diëlektrisch materiaal worden gebruikt.

Diëlektrische materialen worden op grote schaal toegepast in de elektriciteitsvoorziening. Papier gedrenkt in olie wordt sinds het einde van de vorige eeuw gebruikt, polyethyleen sinds de Tweede Wereldoorlog, epoxy sinds de jaren vijftig en 'cross-linked polyethyleen' (XLPE) sinds de jaren zestig. Er hebben zich vele nieuwe ontwikkelingen voorgedaan op het gebied van polymeren. In de elektriciteitssector is echter nog weinig terug te vinden van deze ontwikkelingen. Eigenlijk worden alleen in extreme condities speciale materialen toegepast, vooral wanneer er sprake is van een zeer hoge TEMA (gelijktijdige Thermisch-Elektrisch-Mechanisch-Ambient)-belasting van componenten. Met 'ambient' worden hier omgevingsinvloeden zoals vervuiling en UV-straling bedoeld. Sinds enige tijd hebben ook de steeds scherpere milieueisen een toenemende invloed op de keuze van de isolatiemedia.

¹ TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek,
Postbus 5031
2600 GA Delft
p.h.f.morshuis@et.tudelft.nl

Fig. 2.1.1

Molecuulstructuur van 'cross-linked polyethyleen' (XLPE): de verticale bindingen zorgen voor de kruisverbindingen tussen de ketens.



PAPIER EN OLIE

In een groot deel van het Nederlandse distributienet worden kabels gebruikt die bestaan uit een koperen (later ook aluminium) geleider en een loodmantel met in olie gedrenkte papierwikkelingen als diëlektricum. Ook wordt een mengsel van olie, hars en was gebruikt. Een voordeel van deze 'Gewikkelde Papier Lood Kabels' (GPLK) is het herstellende vermogen van de olie na een deelontlading. Een tweede voordeel van deze isolatievorm is het koelend vermogen. Dit speelt echter vooral een rol bij transformatoren.

De toepassing van olie wordt echter steeds vaker als ongewenst beschouwd vanwege de milieubelasting bij lekkage. De inmiddels beschikbare afbreekbare olie is nog vele malen duurder dan de conventionele olies.

VASTE STOFFEN VOOR WISSELSpanningssystemen

Bij het zoeken naar en het ontwikkelen van nieuwe diëlektrica gaat het niet in de eerste plaats om het verbeteren van de elektrische eigenschappen. Veel belangrijker is de mogelijkheid om materialen te combineren in een kabel of een andere isolatieconstructie. Dan spelen vragen als hoe goed hechten twee materialen, hoe sterk is de grenslaag (in elektrisch opzicht) en hoe gemakkelijk zijn materialen in een productieproces te verwerken.

De grensvlakken vormen meestal de zwakste schakel in een isolatieconstructie en dienen met de nodige aandacht behandeld te worden. De doorslagveldsterkte parallel aan een interface is zeer veel lager dan de doorslagveldsterkte loodrecht op een interface of in een materiaal. Onderzoek naar de verschillende parameters die de kwaliteit van een grensvlak tussen isolatiemedia bepalen staat internationaal in de aandacht [Tanaka, 1997]. Dit relatief nieuwe onderzoeksterrein zal met het toenemen van de bedrijfspeldsterkte in bijvoorbeeld hoogspanningskabels nog in belang toenemen.

Verder is het van groot belang dat aandacht wordt besteed aan 'multi factor aging', ofwel de bestendigheid van diëlektrica tegen een combinatie van verouderingsfactoren zoals temperatuur, mechanische spanning en elektrisch veld. Vaak is wel het gedrag van een isolatiemateriaal bekend onder invloed van één grootte, (of het elektrische veld of de temperatuur), maar is er weinig bekend over het gedrag wanneer deze invloeden tegelijkertijd optreden.

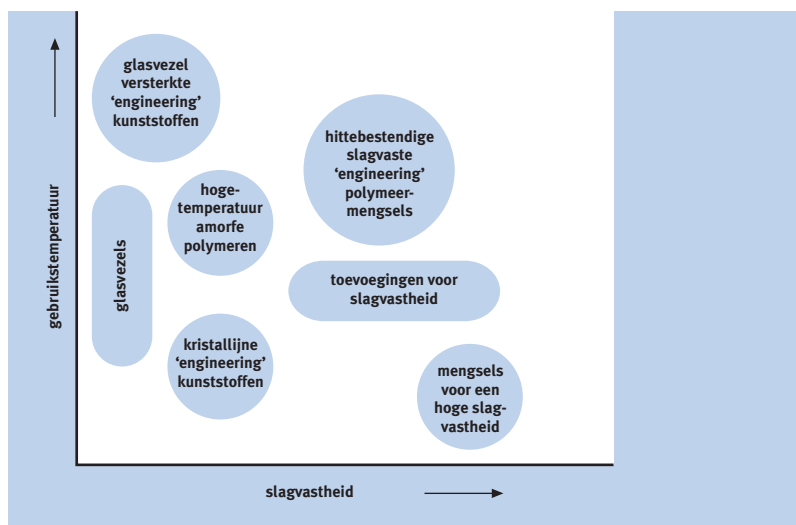
In de vergelijking met olie valt op te merken dat vaste diëlektrica niet zelfherstellend zijn en een laag koelend vermogen hebben.

Polymeermengsels en composieten

Een polymeermengsel bestaat uit twee of meer polymeren, resulterend in nieuwe fysische en mechanische eigenschappen, waardoor een aantal beperkingen van de afzonderlijke polymeren wordt opgeheven. Nagenoeg alle polymeren kunnen worden verbeterd door toepassing in mengsels. De gebruikstemperatuur en de materiaalsterkte van deze mengsels vergeleken met de basismaterialen en met composieten zijn weergegeven in fig. 2.1.2. Zoals uit de figuur blijkt, zijn polymeermengsels aantrekkelijk, wanneer zeer hoge eisen (thermisch, mechanisch) aan het isolatiemateriaal worden gesteld.

Fig. 2.1.2

Tweede generatie polymeermengsels van technische kunststoffen [Reed, 1997].



Vaak wordt koolstof (roet) aan polyethyleen toegevoegd om een hogere elektrische geleidbaarheid te bereiken voor de toepassing in semi-isolerende lagen tussen de geleider en het 'echte' isolatiemateriaal. De semi-isolerende laag zorgt voor een geleidelijke vermindering van het elektrisch veld (zie ook par. 2.2, Geleiders) [Reed, 1997].

In situaties waar goede mechanische eigenschappen zijn vereist kunnen vezels als Kevlar een voordeel bieden boven glasvezels. De lagere diëlektrische constante van de Kevlarvezels geeft bovendien lagere verliezen in wisselstroomnetten. Omdat het mengen van vezels en basispolymeren vaak problemen oplevert, kan het gebruik van vezelvormende mengsels uitkomst bieden.

VASTE STOFFEN VOOR GELIJKSPANNINGSSYSTEMEN

Het belangrijkste onderwerp op het gebied van diëlektrica voor gelijkspanning is ruimtelading. Ruimtelading is vrije elektrische lading die lokaal in het diëlektricum aanwezig is. Vooral wanneer kunststoffen worden toegepast voor hoge gelijkspanning blijkt ruimtelading een nog niet te overkomen probleem te zijn. Vanwege het unipolaire karakter van de spanning treedt ruimteladingsinjectie uit de elektroden op. Fig. 2.1.3 geeft de relatie tussen de frequentie van de spanning en de totale hoeveelheid gedetecteerde ruimtelading. Beneden de 0,1 Hz is de aanwezigheid van ruimtelading niet meer te verwaarlozen.

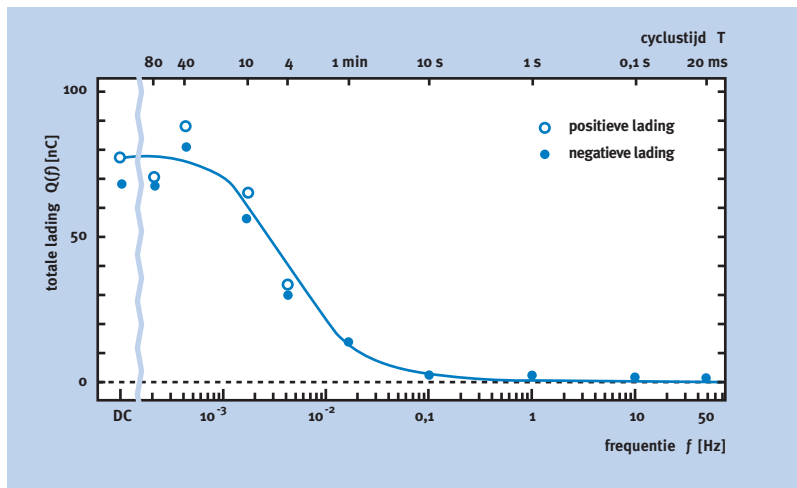
Ruimtelading kan ontstaan door het aanbrengen van een potentiaalverschil over een diëlektricum, maar bijvoorbeeld ook door mechanische spanningen en door bestraling met een elektronenkanon. In veel gevallen is deze gelokaliseerde (trapped) lading zeer stabiel en kan zelfs vele maanden na het kortsluiten van het diëlektricum nog aanwezig zijn. De belangrijkste eigenschap van ruimtelading in een diëlektrisch materiaal is dat ze het elektrisch veld beïnvloedt. Consequentie is dat het elektrisch veld in de isolatie van een DC-hoogspanningscomponent niet berekend kan worden met de standaard veldberekeningsmethoden. Om zo'n veld goed te kunnen beschrijven is daarom de bepaling van de plaats en van de grootte van de ruimtelading van belang. Daarnaast hebben bij DC-toepassingen de temperatuur en het temperatuurverloop in het materiaal veel ongewenste invloed (veldinversie) op het elektrisch veld [Jeroense, 1997; Salah, 1997].

De mogelijkheden om de plaats en de grootte van de ruimtelading te bepalen zijn de laatste jaren sterk verbeterd en internationaal vindt op dit gebied veel onderzoek plaats.

De uitdaging op dit gebied is het vinden van een kunststof isolatiemateriaal waarin de vorming van ruimtelading (nagenoeg) afwezig is. Er vindt een enorme onderzoeksinspanning plaats op dit gebied, onder andere aan de Technische

Fig. 2.1.3

Relatie tussen de totale hoeveelheid ruimtelading in XLPE-modellen en de frequentie van de testspanning [Hampton, 1997].



Universiteit Delft [Jeroense, 1997; Hampton, 1997; Ieda, 1997; Morshuis, 1997].
Het onderzoek richt zich vooral op:

- Niet-lineaire diëlektrica waarin veldinversie niet of in verminderde mate optreedt [Salah, 1997].
- Ontwikkeling van ruimteladingsarme materialen, bijvoorbeeld door toevoeging van additieven en vulmaterialen die de geleidbaarheid verbeteren [Salah, 1997].

Tot nu toe is er nog geen oplossing gevonden en gelijkspanningsverbindingen zijn daarom nog steeds van het conventionele type (papier en olie), een medium dat niet zo gevoelig blijkt te zijn voor ruimtelading [Morshuis, 1997].

Mogelijkerwijs ligt een doorbraak in het verschiet. De firma ABB heeft in 1997 een kunststof gelijkspanningskabel op de markt gebracht (HVDC Light) voor spanningen tot 100 kV. Een eerste traject is in Zweden in gebruik genomen. Of het toegepaste isolatiemateriaal ook voor de hogere spanningen (400 - 500 kV) toegepast kan worden is nog onbekend.

2.1.2 MONOKRISTALLIJNE EN KERAMISCHE DIËLEKTRICA

Dipl.ing. P.H.W. Droste²

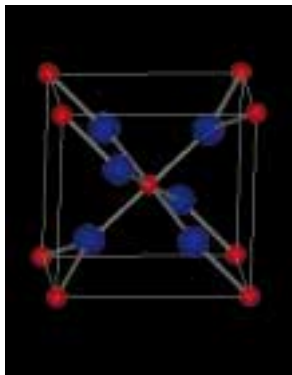


Fig. 2.1.4
Kristalstructuur van rutiel (TiO_2).

Monokristallijne en keramische diëlektrica worden gebruikt als substraatmateriaal voor filters, hoog-vermogenresonantiekringen en microgolfsystemen. Deze diëlektrica maken de integratie van condensatoren in geïntegreerde schakelingen mogelijk. In het algemeen hebben monokristallijne materialen een betere stabiliteit dan de polykristallijne (keramische) materialen. Monokristallen van saffier en rutiel worden toegepast in de hoogfrequente filters voor satellietssystemen en in hoogfrequente frequentieomzetter voor hoge vermogens. Dergelijke omzetter worden gebruikt voor hoogtoerenmotoren. Gemalen monokristallijne materialen zouden in combinatie met kunststoffen voordelen kunnen bieden bij DC-kabels, omdat hiermee temperatureffecten of lokale opladingen genivelleerd kunnen worden. De kristallen worden door de isolerende kunststof gemengd. Materialen die hiervoor geschikt worden geacht zijn niobium gedoopt strontiumtitaanaat ($SrTiO_3$), rutiel (TiO_2), of gedoopt korund (SiC). Een interessant nieuw materiaal voor deze toepassing is Calcium-Titanaat-Neodymium-Aluminaat (CTNA). De mogelijkheden zullen verder toenemen naarmate nieuwe verbindingen worden ontwikkeld. De beschikbaarheid van zeer kleine éénkristallen (nanokristallen) zal dergelijke combinaties met kunststoffen nog effectiever maken.

² Escete b.v.,
Postbus 3896
7500 DW Enschede
kristalx@aol.com

In alle bovengenoemde toepassingen zijn niet alleen de elektrische, maar ook de mechanische eigenschappen van de materialen van belang [Alford, 1998].

2.1.3 'INTELLIGENTE' MATERIALEN

dr.ir. P.H.F. Morshuis³

De isolerende functie van de in elektrische systemen gebruikte kunststoffen springt het meest in het oog. Vele kunststoffen hebben echter ook andere eigenschappen die voor de elektriciteitssector van nut kunnen zijn. Deze eigenschappen kunnen sterk afhankelijk zijn van bijvoorbeeld de grootte van het elektrische veld, het magnetische veld, de temperatuur, de druk of de vochtigheid. Dit maakt het mogelijk dergelijke materialen als sensor toe te passen. We kunnen onderscheid maken tussen toepassingen van intelligente materialen voor het lokaal en het gedistribueerd meten van bepaalde grootheden.

Lokaal meten

Hier moet vooral worden gedacht aan het op één plaats in het net meten van de stroom of de spanning, waarbij gebruik wordt gemaakt van optische kristallen. Het Faraday-effect voor het meten van stroom of het Pockels-effect voor het meten van de spanning worden reeds toegepast in stroom-, dan wel spanningstransformatoren in het elektriciteitsnet.

Het Faraday-effect is een magneto-optisch effect, waarbij het polarisatievlak van een elektromagnetische golf (licht) wordt gerooteerd als gevolg van een magnetisch veld parallel aan de bewegingsrichting van de golf. Met andere woorden: het magnetisch veld van een wisselstroom van een bepaalde grootte leidt tot een bepaalde polarisatie van een lichtbundel. Als we deze polarisatie meten, weten we de grootte van het magnetisch veld, en dus van de stroom.

Het Pockels-effect is een elektro-optisch effect in vaste stoffen, waarbij de polarisatie van een elektromagnetische golf (licht) verandert als gevolg van een elektrisch veld loodrecht op de bewegingsrichting van de golf. Als we deze polarisatie meten, weten we de grootte van het elektrisch veld en dus van de spanning. Vanwege de geringe afmetingen van de sensor is de reductie in de benodigde ruimte ten opzichte van de klassieke stroom- en spanningstransformatoren enorm. Optische technieken die het Pockels-effect toepassen bij het meten van de spanning en het elektrisch veld hebben een groot aantal voordelen:

- Door hun zeer geringe afmetingen (kleiner dan $1 \times 1 \times 1$ mm is mogelijk) en de afwezigheid van geleidende materialen wordt het elektrisch veld door de aanwezigheid van de sensor nagenoeg niet beïnvloed.
- De sensoren kunnen in een zeer breed frequentiespectrum worden toegepast (van gelijkstroom tot in het GHz-gebied).
- Er kan een zeer grote meetgevoeligheid worden bereikt, $0,1 - 1$ V/cm.
- De sensor en het meetinstrument zijn galvanisch gescheiden.
- De verwachting is dat met de snelle ontwikkelingen in de optische telecommunicatietechnologie de toepassing van dit soort sensoren een grote vlucht zal nemen [Hidaka, 1996].

.....
3 TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek,
Postbus 5031
2600 GA Delft
p.h.f.morshuis@et.tudelft.nl

Gedistribueerd meten

Het gedistribueerd meten van bepaalde grootheden staat erg in de belangstelling. In tegenstelling tot lokaal meten kan in dit geval de waarde van een bepaalde grootheid in een complete constructie worden gemeten (zie tabel 2.1.1). Een goed voorbeeld van gedistribueerd meten is de technologie die sinds kort wordt toegepast in hoogspanningskabels. Een glasvezel in de mantel van de kabel meet de temperatuur over de gehele lengte van de kabel. Hier wordt gebruik gemaakt van het Rayleigh-effect, waarbij een verstrooiing van het licht optreedt als functie van de temperatuur. Wanneer nu een korte laserpuls met een bekend frequentiespectrum door de glasvezel wordt gestuurd, kan het temperatuurprofiel langs de kabel uit het frequentiespectrum van het ontvangen lichtsignaal worden geëxtraheerd. Op deze manier kunnen op een eenvoudige manier plaatselijke 'hot spots' worden gedetecteerd. Nieuwe uitdagingen op dit gebied zijn bijvoorbeeld het gedistribueerd detecteren van vocht en mechanische spanningen. Hoogspanningskabelsystemen kunnen in de toekomst op deze manier beter worden bewaakt, waardoor een nog betere kwaliteit van elektriciteitslevering kan worden gegarandeerd.

Tabel 2.1.1

Diverse toepassingen van gedistribueerd meten. Bron: KEMA.

Parameter	Toepassing
temperatuur	hoogspanningskabel en lijnen generatoren, transformatoren kolenvergasser koeltorens stadsverwarmingsleidingen vloeibaar -aardgasinstallatie chemische reactoren en ovens boorschachten tunnels landingsbanen, wegdekken branddetectie in schepen en gebouwen
mechanische spanning	stoompijpen doorbuiging brugligger treindetectie
vocht	betonrot hoog- en middenspanningskabels
olie, diesel en benzine	lekkage hoogspannings-oliedrukkabels lekkage onder pompstations lekkage pijpleidingen systemen
chemie en biotechnologie	PH (zuurgraad)

2.1.4 DIAMANTLAGEN

Dipl.ing. P.H.W. Droste⁴, ir. J.M. Meij

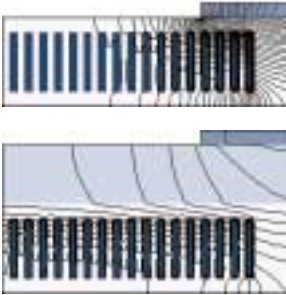


Fig. 2.1.5

Simulatie van het temperatuurverloop bij koeling van een laserdiode-array op een silicium substraat met koelkanalen met en zonder een Chemical Vapour Deposition (CVD) -diamantlaag voor de warmteverdeling. De lijnen geven een temperatuurverschil van 1 °C aan.

Bron: [Fraunhofer IAF, 1998].

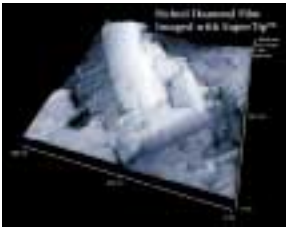


Fig. 2.1.6

Diamantlaag met geëtste banen.

Bron: [ThermoMicroscopes, 1997].

...

Zie ook pagina 336

.....

4 Escete b.v.,
Postbus 3896
7500 DW Enschede
crystalx@aol.com

5 Double Diffused Metal Oxide
Semiconductor Field-Effect
Transistor.

Diamant combineert twee aantrekkelijke eigenschappen voor een diëlektricum: een hoge isolatiewaarde voor elektriciteit en een zeer hoge geleidbaarheid voor warmte.

Een hoge isolatiewaarde en een lage diëlektrische constante zijn van groot belang voor schakelingen met een hoge schakelfrequentie. Deze eigenschappen hebben invloed op de maximale schakelfrequentie, de onderlinge capacatieve beïnvloeding van elementen en het energieverlies in de chip.

Behalve de elektromagnetische beïnvloeding is ook de afvoer van warmte in dergelijke schakelingen een probleem. Met een geleidbaarheid van 1.300 tot 1.700 W/mK functioneren industrieel vervaardigde diamantlagen vier tot acht keer beter dan andere warmtegeleidende materialen zoals koper (400 W/mK) of AlN (200 W/mK). Het gebruik van een diëlektricum van diamant kan de warmteafvoer enorm verbeteren, en daarmee de prestaties van het chip-pakket. Niet alleen wordt hiermee oververhitting voorkomen, maar ook worden de spanningen tussen de materialen ten gevolge van de opwarming tijdens het gebruik verminderd.

Dit maakt dat diamant een oplossing zou kunnen bieden als substraat voor schakelingen die veel stroom moeten verwerken op een kleine oppervlakte, en die bij hoge schakelfrequenties functioneren. Er wordt gedacht aan meerlagen chips waarbij verschillende schakelingen in één bouwelement verenigd worden (Multi Chip Modulen: MCM's), maar ook aan schakelingen waarin stuelelektronica en logica worden gecombineerd met vermogenselektronica. Deze zogenaamde Multi Chip Power Modulen (MCPM) worden gezien als de volgende stap in de ontwikkeling van vermogenselektronica. Aangezien de stuelelektronica en de behuizing ervoor vaak de omvang van de schakelementen evenaren, kan hiermee veel ruimte bespaard worden, wat bijvoorbeeld in mobiele toepassingen een belangrijke factor is. Een andere toepassing is de koeling van laserdiodes (zie fig. 2.1.5).

Enkele bedrijven zijn in staat om grootschalig polykristallijne diamantlagen te produceren met behulp van Chemical Vapour Deposition. Hierbij worden koolwaterstofgassen als methaan of ethaan verdund met waterstof, waarna in een vacuümkamer met behulp van een zeer hete gloeidraad de koolstofatomen op een verhit substraat aangroeien. De grootste oppervlakten worden momenteel op germanium-IR-vensters aangebracht, in dit geval alleen als bescherming tegen beschadiging door zand en zeewater.

De kwaliteit van industrieel vervaardigde diamantlagen is toereikend om DMOSFET⁵-transistoren te produceren. De diamantlagen worden op silicium of andere conventionele substraten gekweekt, en daarna als composiet of (na scheiding) als zelfstandig substraat gebruikt.

Bij schakelingen die bij hoge temperaturen moeten functioneren kan diamant geen grote rol spelen, omdat diamant bij 800 °C in de lucht verbrandt. Een dergelijk hoge-temperatuursysteem zou in een beschermende atmosfeer van argon bedreven moeten worden.

Een punt van aandacht voor de constructie van schakelingen is dat diamantfilm gevoelig is voor scheurvorming, wat nadelig is voor de kwaliteit van de chip.

2.1.5 ELEKTRISCH ISOLERENDE GASEN: ALTERNATIEVEN VOOR SF₆

*dr.ir. P.H.F. Morshuis*⁶



Zie pagina 336 voor een gedetailleerde kleurenversie van figuur 2.1.7

SF₆ (Zwavelhexafluoride) wordt alom toegepast als drukgasisolatie in gesloten schakelmaterieel. Het heeft een aantal goede eigenschappen voor de beheersing van de bij het schakelen optredende ontladingen.

De gestelde limieten aan de uitstoot van broeikasgassen tijdens de wereldklimaatconferentie in Kyoto in 1997 hebben ook consequenties voor het gebruik van SF₆ in gasgeïsoleerde systemen. Een taskforce in de CIGRÉ-werkgroep 23.10 heeft in 1996 een rapport gepubliceerd [ELECTRA, 1996] over de effecten van SF₆ op het broeikas effect.

De belangrijkste conclusie van bovenstaande studie was dat de relatieve bijdrage van SF₆ tot het totale broeikas effect te verwaarlozen is. Bovendien stelt men dat de bijdrage van de elektriciteitssector aan de SF₆-emissie bijzonder klein is. Desondanks doet de commissie een aantal aanbevelingen voor de omgang met SF₆, waarin onder meer standaarden voor hergebruik en voor zorgvuldige behandeling aan de orde komen.

Een ander probleem is dat er bij hoge temperaturen in SF₆ giftige ontledingsproducten ontstaan, die bij het vrijkomen van het SF₆ in de atmosfeer komen. Het hergebruik van SF₆ zal sterk moeten toenemen en er zullen maatregelen moeten komen tegen lekkage, bijvoorbeeld tijdens onderhoud van installaties. Daarnaast moet er gezocht worden naar mogelijke vervangers voor SF₆ in gasgeïsoleerde isolatiesystemen. Vooral daar waar grote hoeveelheden SF₆ toegepast zullen worden, zoals in gasgeïsoleerde lijnen kan door vervanging van een kleine fractie (< 10%) SF₆ door stikstof toch een behoorlijke besparing in de hoeveelheid SF₆ worden verkregen. Wanneer het gaat om een complete vervanging, ziet het er naar uit dat alleen lucht (onder hoge druk) een – voor het milieu – acceptabele oplossing is [Niemeyer, 1998].

⁶ TU Delft, Opleiding
Elektrotechniek,
Postbus 5031
2600 GA Delft
p.h.f.morshuis@et.tudelft.nl

2.2 GELEIDERS

2.2.1 CONVENTIONELE GELEIDERMATERIALEN EN KABELS

CONVENTIONELE GELEIDERMATERIALEN

ir. W. Boone⁷

Het grootste deel van de elektriciteit die wij gebruiken bereikt ons via het elektriciteitsnet. Hoewel de snelheid van de individuele elektronen klein is, verplaatst de lading zich daarbij met grote snelheid door een geleider. In de praktijk worden koper (Cu) en aluminium (Al) gebruikt als geleidermateriaal (ooit is een niet succesvolle poging gewaagd natrium als geleidermateriaal te introduceren). In kabels is koper om prijstechnische redenen geleidelijk verdrongen door aluminium. De relevante eigenschappen worden in tabel 2.2.1 aangegeven.

Tabel 2.2.1

Eigenschappen van de meest gebruikte geleidermaterialen.

	Cu	Al
Specifieke weerstand (ohm-meter)	$1,7241 \times 10^{-2}$	$2,82648 \times 10^{-2}$
Dichtheid (kg/m ³)	8.890	2.700
Smeltpunt (°C)	1.083	652 - 657
Specifieke warmte, 20 °C (J/kg K)	$0,39 \times 10^3$	$0,88 \times 10^3$
Lineaire uitzettingscoëfficiënt	$16,8 \times 10^{-6}$	$23,6 \times 10^{-6}$
Treksterkte (N/m ²)	24×10^7	16×10^7
Rek (%)	38,5	6

Het belangrijkste technische onderscheid tussen koper en aluminium wordt bepaald door verschil in dichtheid en specifieke weerstand: aluminium is beduidend lichter dan koper, maar heeft een slechtere specifieke weerstand waardoor een dikkere geleider nodig is om dezelfde lage weerstand te verkrijgen. De uiteindelijke elektrische weerstand van een geleider bij toepassing met gelijkstroom wordt uiteindelijk bepaald door:

- specifieke materiaaleigenschappen
- afmetingen
- temperatuur.

Er bestaat verschil tussen de weerstand onder gelijkstroomcondities en die onder wisselstroomcondities. Wanneer wisselstroom wordt toegepast, moeten de volgende effecten worden meegenomen in de vaststelling van de uiteindelijke elektrische weerstand:

- het ‘skin’-effect ofwel het stroomverdringingseffect. Ten gevolge van het wisselend elektrisch veld wordt de stroom verdrongen naar de rand, waardoor maar een deel van de geleider nuttig wordt gebruikt en derhalve de ‘effectieve’ weerstand toeneemt.

7 KEMA Nederland B.V., TDP,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
w.boone@kema.nl

- het ‘proximity’-effect. Wanneer een aantal geleiders in elkaars omgeving wordt geïnstalleerd, wordt door het magnetische veld van de stroomvoerende geleiders de stroomverdeling in de geleiders beïnvloed, waardoor de weerstand van de geleider toeneemt.

In de volgende formule wordt het bovenstaande samengevat:

$$R = R' [1 + k_s + k_p]$$

R = wisselstroomweerstand

R' = gelijkstroomweerstand

k_s = ‘skin’-effectfactor

k_p = ‘proximity’-effectfactor

Voor de praktische uitvoering zien we naast geïsoleerde kabels die vaak ondergronds worden gebruikt, ook lijnen die worden gespannen tussen masten. De lijnen zijn niet geïsoleerd en bestaan meestal uit een rechthoekige doorsnede massief materiaal. Soms wordt staalkabel gebruikt voor extra sterkte.



Fig. 2.2.1
Opbouw van kunststofgeïsoleerde kabels.

...

Zie pagina 336 voor een kleurenversie van figuur 2.2.1.

KABELS

H. Geene⁸

In deze paragraaf zullen we verder ingaan op de historie, het heden en de toekomst van ondergrondse kabelverbindingen.

Historie

De eerste ondergrondse kabelverbindingen dateren van het einde van de vorige eeuw. In die tijd werden de kabels al voorzien van papierisolatie, gedrenkt in olie of massa (kabelvet).

In de oliedrukkabel wordt het inwendige van de kabel voortdurend onder een lichte oliedruk gehouden. Hierdoor wordt vermeden dat er zich tussen de papierlagen luchtgevulde holten vormen, wat een versnelde veroudering van de kabel tot gevolg zou hebben. De oliedrukkabel heeft zich over de jaren heen bewezen als een bijzonder robuuste en bedrijfszekere kabel en is toegepast voor de allerhoogste spanningsklassen in Nederland tot 380 kV. Desondanks heeft in de jaren zeventig de overgang naar kunststofgeïsoleerde kabels ingezet. Naast de lagere investeringskosten brengt ook de bedrijfsvoering van kunststofkabelsystemen aanvullende voordelen met zich mee. Zo zijn de kunststofkabelsystemen onderhoudsvrij en hebben zij lagere verliezen dan de oliedruksystemen.

In fig. 2.2.1 wordt de opbouw van kunststofgeïsoleerde kabels getoond.

Behalve de oliedrukkabel kennen we uit het verleden nog de uitwendige gas-

⁸ NKF Kabel,
Postbus 26
2600 MC Delft

drukkabel, een kabeltype waarbij een in massa gedrenkte, papiergeïsoleerde ader voortdurend onder een uitwendige gasdruk wordt gehouden door middel van een stalen buis, waarin de drie aders van het kabelsysteem worden getrokken. Dit kabeltype is vrijwel uitsluitend gebruikt in het 150 kV-net en wordt heden ten dage nauwelijks meer geïnstalleerd.

Het laatste kabeltype waarvan hier melding wordt gemaakt is de ook nu nog vaak toegepaste massakabel. Vooral in het 10 kV-distributienet is vrijwel uitsluitend met dit kabeltype gewerkt. Omdat de elektrische belasting relatief laag is, zijn hier geen extra voorzieningen nodig om de in massa gedrenkte papierisolatie holtevrij af te sluiten. Inmiddels heeft ook in het 10 kV-distributienet de kunststofkabel zijn intrede gedaan.

Concluderend kunnen we stellen dat Nederland van oudsher een land is waar veel kabel wordt toegepast. De voordelen van kunststofkabels die tot uitdrukking komen in de totale gebruikerskosten van het kabelsysteem ('cost of ownership') hebben de papiergeïsoleerde kabel naar de achtergrond gedrukt.

TRENDS EN NIEUWE ONTWIKKELINGEN

Kunststofkabelsystemen

Het type isolatie dat meestal in kunststofkabels wordt gebruikt wordt aangeduid met XLPE, een chemisch vernet polyethyleen, dat ten opzichte van polyethyleen het voordeel van een hogere bedrijfstemperatuur heeft, wat op zijn beurt weer tot uitdrukking komt in een hoger toepasbaar transportvermogen.

Ondergrondse versus bovengrondse verbindingen

In het Nederlandse elektriciteitsplan dat jaarlijks wordt uitgegeven door de elektriciteitssector valt op te maken dat het aandeel ondergrondse kabelverbindingen in het elektriciteitsnet verder toeneemt. Zo kunnen we constateren dat het laag- en middenspanningsnet momenteel vrijwel volledig zijn verkabeld. Voor de hoogspanningsverbindingen spelen de hoge investeringskosten van kabelverbindingen bij de afweging boven- of ondergronds nog steeds een belangrijke rol. Volgens recent uitgevoerde Cigré-studies is een 150 kV ondergrondse verbinding nog ongeveer zeven maal zo duur als een bovengrondse lijn [Cigré, 1996]. Deze verhouding is echter sterk afhankelijk van lokale omstandigheden, de toegepaste rekenmethoden en hoe verschillende aspecten zoals milieu worden gewogen. We zien steeds vaker dat in verstedelijkte gebieden ondanks de economische argumenten voor ondergrondse kabelverbindingen wordt gekozen.

Korte en lange afstandsnetten

De uitvoeringsvorm van het elektriciteitsnet is sterk afhankelijk van de afstand tussen de opwekkers en de gebruikers. Zo kan het transport van grote hoeveel-



Fig. 2.2.2
HVDC-kabel.



Zie pagina 336 voor een kleuren-
versie van figuur 2.2.2.

heden elektrische energie over zeer lange afstanden – denk bijvoorbeeld aan de geplande verbinding tussen Noorwegen en Nederland – momenteel uitsluitend met gelijkspanning worden uitgevoerd vanwege de grote spanningsverliezen die met het transport van wisselstromen over grote afstanden gepaard gaan. Deze verbindingen, de zogenaamde HVDC (High Voltage Direct Current)-verbindingen bestaan doorgaans uit papiergeïsoleerde kabels. Een trend die zowel in de hoogspannings- als in de middenspanningskabelverbindingen te zien is, is de integratie van glasvezels voor het diagnostiseren van de verbinding en voor telecommunicatie. Hierdoor kunnen de kabelverbindingen optimaal worden belast en veelzijdiger worden gebruikt.

Kabelverbindingen en milieu

Het groeiende milieubesef heeft ook zijn invloed doen gelden op de kabeltechniek en zal steeds vaker van beslissende betekenis zijn bij de keuze van de toegepaste materialen. Uit recent uitgevoerde 'life cycle analyses' [Geurts, 1995] volgt dat het energieverbruik van de kunststofkabel zich tijdens de levenscyclus positief aftekent ten opzichte van de papiergeïsoleerde kabel. Eveneens blijkt dat de energie die nodig is bij de het produceren van kabels en het winnen van de grondstoffen verwaarloosbaar is ten opzichte van de energieverliezen die optreden tijdens de levensduur van de kabel. Vandaar dat het zoeken naar kabels met lagere verliezen meer loont dan het verlagen van het energieverbruik tijdens de productie. Mogelijkerwijs zouden hier supergeleidende kabels de oplossing kunnen bieden.

2.2.2 SUPERGELEIDERS

dr. H.J. Veringa⁹, Dipl.ing. P.H.W. Droste¹⁰, ir. J.M. Meij

Het fenomeen supergeleiding treedt in een groot aantal materialen bij zeer lage temperaturen op. De elektrische weerstand van het materiaal wordt dan gelijk aan nul. Dit betekent dat de weerstandsverliezen en bijbehorende warmteontwikkeling die bij alle normale geleiders inherent is aan het transporteren van stroom, hier ontbreken. Dit schept nieuwe perspectieven voor het transporteren van stroom, het opslaan van elektriciteit en het creëren van zeer sterke magneetvelden. Ook kunnen supergeleiders gebruikt worden voor het volledig afschermen van magneetvelden.

Zeer sterke magneetvelden kunnen worden toegepast in generatoren, motoren, versnellers en kernfusiereactoren. Hier zijn veldsterkten nodig van 4 tot 12 tesla. Ter vergelijking: het magnetisch veld van een permanente staaf- of ringmagneet bedraagt niet meer dan 1,3 tesla.

Met normale geleiders zoals koper is het in principe wel mogelijk om voldoende hoge stroomdichtheden te halen, maar als gevolg van de ohmse weerstand is

⁹ ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
veringa@ecn.nl

¹⁰ Escete b.v.,
Postbus 3896
7500 DW Enschede
crystalx@aol.com

de warmteproductie zeer hoog met hoge bedrijfskosten.

Supergeleidende materialen kunnen in stationaire toestand (geen wisselstroom en wisselveld) zonder warmtedissipatie stroomdichtheden voeren die in normale geleiders niet gehaald worden zonder dat het materiaal smelt.

Tegenover deze zeer aantrekkelijke eigenschap staat het feit dat supergeleiders moeten worden bedreven bij een temperatuur die beneden een kritieke overgangstemperatuur ligt. Deze temperatuur (T_c) ligt voor de klassieke supergeleidende materialen tussen 10 en 20 K (-263 en -253 °C), voor de in 1986 ontdekte hoge-temperatuursupergeleiders (HTS) tussen de 65 en 80 K (-208 en -193 °C). Om 10 tot 20 K te bereiken, moeten tot nu toe dure koeltechnieken worden toegepast die supergeleidende systemen bij aanschaf en in bedrijf kostbaar kunnen maken. Deze systemen kunnen bij de HTS-geleiders eenvoudiger en goedkoper worden uitgevoerd. Zoals in par. 6.3 wordt aangegeven, staat ook op het gebied van koeltechnologie de ontwikkeling niet stil. Elektrisch aangedreven koelers kunnen het gebruik van lastige cryogene vloeistoffen of extreem onderhoudsbehoevende systemen overbodig maken. Ondanks de benodigde koeling zijn de voordelen van supergeleidende systemen aanleiding geweest om fabricageprocedures voor supergeleiders te ontwikkelen en te optimaliseren en een begin te maken met de toepassing van deze nieuwe technologie. Verdere informatie is te vinden in [Buckel, Newhouse, 1995; Veringa, 1981].

MATERIALEN

Sinds de ontdekking van de supergeleiding in 1911 aan kwik zijn er veel materialen gevonden die beneden een zekere kritieke overgangstemperatuur T_c supergeleidend zijn. In fig. 2.2.3 zijn de T_c -waarden van een aantal supergeleidende materialen weergegeven. De 'lage-temperatuur'supergeleiders NbTi (niobiumtitanium) en Nb₃Sn (niobiumtin) worden momenteel het meeste toegepast, en hebben T_c -waarden van respectievelijk 10 en 18 K (-263 en -255 °C).

Daarvan wordt NbTi op dit moment het meeste toegepast. De grootste markt voor NbTi wordt momenteel gevormd door MRI (Magnetic Resonance Imaging)-scanners voor medische toepassingen. Daarnaast wordt NbTi gebruikt in magneten voor hoge veldsterkten, die worden toegepast in het natuurkundig onderzoek.

Nb₃Sn, Nb₃Al (niobiumaluminium) en V₃Si (vanadiumsilicium) worden vooral toegepast in situaties waarin NbTi niet aan de specificaties kan voldoen.

Voorbeelden zijn hoge-veldsterktemagnetten voor veldsterkten boven 10 T, bijvoorbeeld voor kernfusieonderzoek. Nb₃Sn is duurder en brosser dan NbTi.

YBaCuO (Yttriumbariumkoperoxide) heeft een kritieke temperatuur van 94 K, en was het eerste materiaal dat gebruik kon maken van relatief goedkope stikstofkoeling. De toepassing van YBaCuO is tot nu toe beperkt gebleven tot dunne-

filmtoeepassingen als SQUID-sensoren en stroombegrenzers. In 1996 werd het mogelijk om *schijnbaar* monokristallijne blokken met een ribbe van enkele centimeters te produceren. Het is daarna een Japans onderzoeksteam gelukt om echte monokristallen te laten groeien. Voor gebruik in de sterkstroom- en de hoogfrequenttechniek is de ontwikkeling van perfecte monokristallen in bruikbare afmetingen noodzakelijk. Net als bij andere materialen is ook hier gebleken dat dunne lagen sterk afwijkende eigenschappen vertonen ten opzichte van

Fig. 2.2.3

[links] De kritieke temperatuur van een aantal belangrijke supergeleidende materialen.

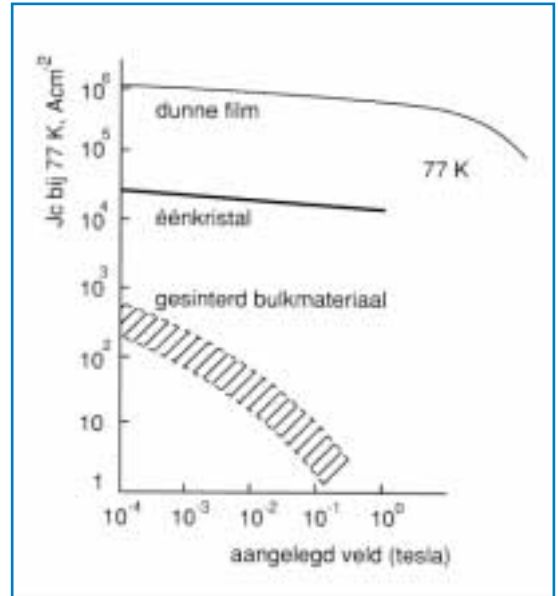
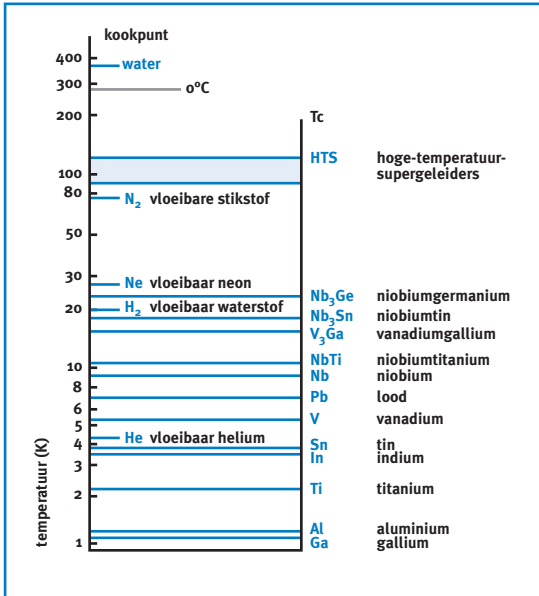


Fig. 2.2.4

[rechts] Het verband tussen stroomdichtheid en het aangelegde veld bij 77 K voor een hoge-temperatuur-supergeleidend materiaal als dunne laag, voor éénkristal en als keramisch bulkmateriaal.

bulkmaterialen. Waarschijnlijk zal het zonder perfecte monokristallen niet mogelijk zijn om de vereiste resultaten in de productie van draad en componenten te behalen.

BiSrCaCuO, een bismuthlegering, is in 1987 ontdekt in Japan en vormt een belangrijke vertegenwoordiger van de HTS-materialen voor grootschalige toepassing. Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_x, ook wel afgekort als Bi-2212, wordt verder ontwikkeld voor toepassingen in sterke magneetvelden (> 20 T). Bi-2223 kan hogere stromen voeren bij hogere temperaturen dan Bi-2212. Er zijn behoorlijke lengten kabel van Bi-2223 verkrijgbaar, die aan de basis liggen van veel demonstratiemodellen die functioneren bij 77K, de temperatuur van een op stikstof gebaseerde koeling.

Op thallium gebaseerde legeringen zijn volop in ontwikkeling zoals TlAl₁Ba₂Ca₂Cu₃O_x (Tl-1223). Vooral met dunne- en dikke-filmtechnieken worden hiermee hoge stroomdichtheden gehaald.

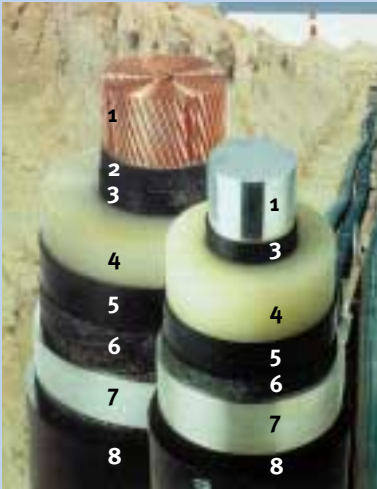


Fig. 2.2.1

Opbouw van kunststofgeïsoleerde kabels.

- 1 Geleider van strengen koper of massief aluminium.
- 2 Semigeleidende tape.
- 3 Semigeleidend geëxtrudeerd XLPE (Cross-linked polyethyleen).
- 4 Isolatie van XLPE.
- 5 Semigeleidend geëxtrudeerd XLPE.
- 6 Waterkerende laag van semigeleidende zweltapes.
- 7 Metaalmantel van een loodlegering.
- 8 Buitenmantel van geëxtrudeerd polyethyleen.

Bron: NKF Kabel.

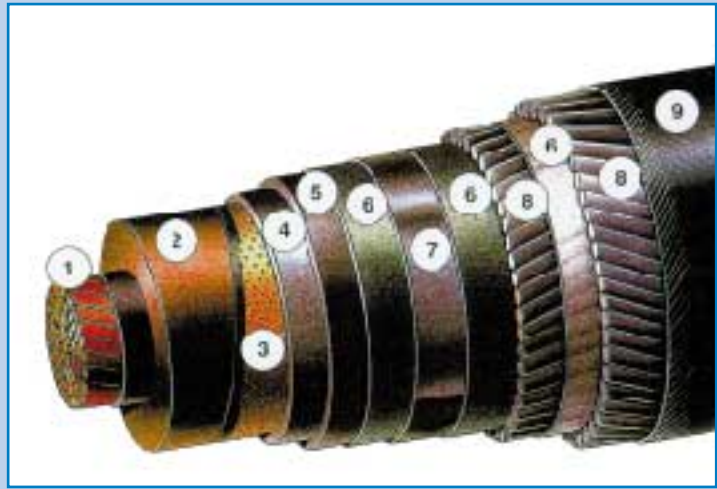


Fig. 2.2.2

HVDC-kabel.

- 1 Koperen geleider
- 2 Olie geïmpregneerde papierisolatie
- 3 Halfgeleidende laag
- 4 Loodmantel
- 5 Polyethyleen mantel
- 6 Vulmateriaal
- 7 Staalbandage
- 8 Stalen bewapening
- 9 Polypropyleen buitenmantel

Bron: [Sep 1996].

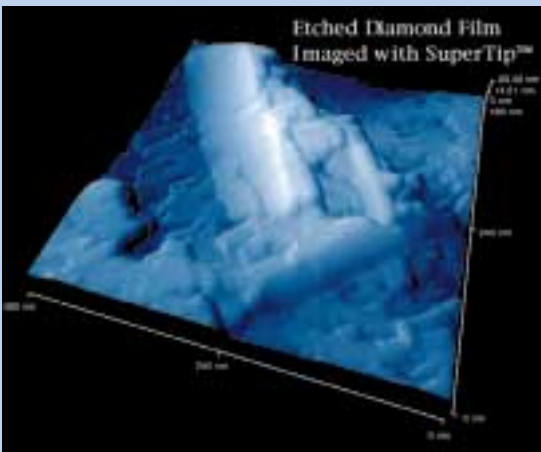


Fig. 2.1.6

Diamantlaag met geëtste banen.

Bron: [ThermoMicroscopes, 1997].

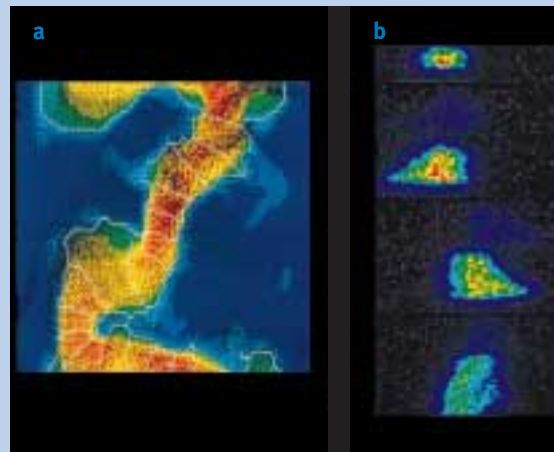


Fig. 2.1.7

a Een simulatie van een ontlading in SF_6 .

b Het ontstaan, stabiliseren en uitdoven van een ontlading. Naar [Delalandre, 1998].

De keramische materialen zoals YBaCuO, Bi-2223 en Tl-1223 stellen hoge eisen aan de verwerking, maar zijn desondanks geschikt om verwerkt te worden in draad voor transformatoren, lagers voor vermogensmotoren, als materiaal voor SMES¹¹-systemen en voor schakelelementen in de vermogenstechniek. De mogelijkheden voor toepassingen in transformatoren zullen aanmerkelijk vergroot worden door de ontwikkeling van systemen voor de beheersing van magneetveldinvloeden.

De supergeleidende lagersystemen maken aanzienlijk verbeteringen mogelijk bij vliegwielsystemen. De lagers vragen geen onderhoud en hebben lage koelingskosten.

Bij temperaturen beneden de kritieke temperatuur en een magnetische veldsterkte beneden een (temperatuurafhankelijke) kritieke waarde, B_{c2} , kunnen de supergeleidende materialen zonder weerstand een stroom voeren. De maximale stroomdichtheid neemt toe naarmate de temperatuur en het veld dalen.

Fig. 2.2.5 geeft het verband tussen de maximale stroomdichtheid (j_c), en het magnetische veld en de temperatuur weer van Nb₃Sn en NbTi. De kritieke temperatuur en het kritieke magneetveld zijn eigenschappen die bepaald worden door de chemische samenstelling van het materiaal en worden intrinsieke eigenschappen genoemd. De maximale stroomdichtheid is daarnaast tevens afhankelijk van de metallurgische toestand van het materiaal.

In vergelijking met de lage-temperatuursupergeleiders zijn de hoge-temperatuursupergeleiders veel gevoeliger voor magneetvelden. Hoe hoger het magneetveld, hoe lager de haalbare stroomdichtheid. Dit bemoeilijkt de toepassing van hoge-temperatuursupergeleiders in de sterkstroomsector.

De maximaal haalbare stroomdichtheden zijn afhankelijk van de wisselwerking tussen de magnetische flux en het supergeleidende materiaal. In supergeleiders waarin het magneetveld gemakkelijk kan binnendringen – of het nu keramische of niet-keramische materialen zijn – is de magnetische flux gequantiseerd. Dit wil zeggen dat de flux is opgedeeld in kleine eenheden die zich manifesteren als supergeleidende kringstroompjes. Door het aanleggen van een magneetveld zal deze magnetische flux het materiaal in zeer veel kleine, maar goed gedefinieerde eenheden kunnen binnendringen. Daarnaast kunnen deze fluxeenheden (quanta) onder gunstige omstandigheden worden verankerd aan bepaalde posities in het materiaal. Het zijn meestal juist de niet-supergeleidende gebiedjes die energetisch aantrekkelijk zijn voor deze verankering of 'fluxpinning'. Dit vastpinnen van magnetische flux in het materiaal is van belang, omdat de 'wandellende' flux de supergeleiding op zeker moment teniet doet. De kracht waarmee de magnetische flux aan de 'pinning'-centra wordt verankerd, is aan een maximum gebonden waarvan de waarde sterk temperatuur- en veldafhankelijk is. Deze verankering ontstaat onder andere door een lokale onderdrukking of modulatie van de intrinsieke supergeleidingseigenschappen.



Zie pagina 338 voor figuur 2.2.5

¹¹ Superconducting Magnetic Energy Storage.

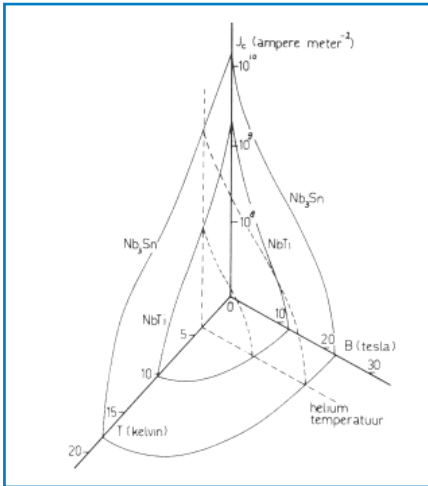


Fig. 2.2.5
[links] Het verband tussen de kritieke stroomdichtheid en het aangelegde veld voor NbTi en Nb₃Sn.

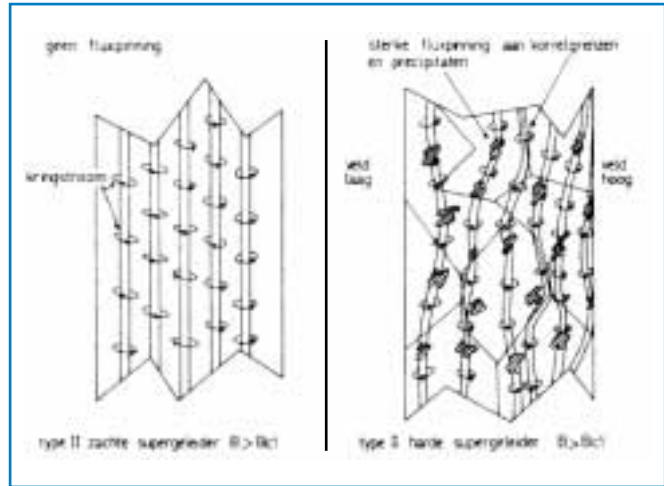


Fig. 2.2.6
[rechts] Het gedrag van magnetische flux in een supergeleidend materiaal met en zonder fluxverankerung ('fluxpinning').

Dit vindt onder andere plaats bij fouten in het kristalrooster en bij insluitingen (precipitaten) in het materiaal. In fig. 2.2.6 is het fluxverloop in een supergeleidend materiaal schematisch weergegeven. In dit voorbeeld is er sprake van fluxpinning aan zowel korrelgrenzen als precipitaten. Het verloop in het magnetieveld is een gevolg van de stroomdichtheid in het materiaal zelf.

Het is belangrijk om bij het optimaliseren van de stroomdichtheid een goede balans te vinden tussen de dichtheid van de kristalfouten en de daarmee verband houdende werkverharding en precipitatiedichtheid. Een te grote dichtheid beperkt de eigenschappen van de matrix en daarmee T_c en B_{c2} , een te lage dichtheid reduceert de stroomdichtheid j_c .

Nb₃Sn dankt zijn fluxpinning aan de aanwezigheid van korrelgrenzen en dat betekent dat voor hoge stroomdichtheden een hoge opbrengst van Nb₃Sn (door een vaste-stofreactie tussen Nb en Sn) en een minimale kristallietgrootte vereist zijn. Om die reden moet de diffusielengte voor Sn in de tinhoudende matrix minimaal zijn en de temperatuur van gloeiing zo laag mogelijk. Daarom is compartimentering van de supergeleidende fase in extreem dunne filamenten noodzakelijk. Dit laatste brengt met zich mee dat Nb₃Sn-draad en de verwerking ervan tot elektromagneten zeer kostbaar is.

KABELS VAN LAGE-TEMPERATUURSUPERGELEIDERS

Dezelfde eigenschappen van het kristalrooster die aanleiding geven tot een relatief hoge kritieke temperatuur resulteren tevens in een voor metalen zeer hoge specifieke elektrische weerstand boven T_c . Als er een stroom door het materiaal loopt en er door welke oorzaak dan ook een verstoring optreedt, dan is een relatief grote lokale warmteontwikkeling daarvan het gevolg. Daar ook de soortelijke warmte juist bij die lage temperaturen zeer klein is, kan een geringe verstoring een aanzienlijke temperatuurstijging veroorzaken. Bij een overgang

van de supergeleidende naar de normale toestand zou derhalve de stroom – zeker als de geleider in een magneet inductief belast is – zijn weg moeten vinden door het hoogohmige materiaal, namelijk de supergeleidende stof die nu in de normale toestand verkeert. Om dit te voorkomen, wordt het materiaal omgeven door een goede normale geleider (koper) met een goed thermisch en elektrisch contact.

Dit laatste wordt bereikt door het supergeleidende materiaal te verdelen in vezels (filamenten) en deze op te nemen in een kopermatrix. Uiteraard moet het matrixmateriaal direct of indirect in verbinding staan met het koelmiddel (in de meeste gevallen vloeibaar helium). Als de warmteontwikkeling bij het teruglopen van het stroomvoerend vermogen van de supergeleider als gevolg van het oplopen van de temperatuur minder sterk toeneemt dan het vermogen om de warmte af te voeren, dan is een stabiele situatie bereikt. We noemen deze vorm van beveiliging cryogene stabilisatie. Deze stabilisatie is eenvoudig en betrouwbaar gebleken, maar vereist nogal grote hoeveelheden matrixmateriaal (meestal koper) in verhouding tot de supergeleider. Dit heeft een sterke reductie van de maximale stroom per eenheid van geleideroppervlak tot gevolg, zodat de mogelijkheid om compacte hoge-veldsterktemagneten te maken vervalst.

De oorzaken van verstoringen van de supergeleidende toestand zijn van magnetische en mechanische aard. De mechanische verstoringen treden op zodra de geleiders tot magneten worden gewikkeld en moeten worden bestreden door een juiste keuze van materialen en geleiderconstructie. De magnetische verstoringen vinden hun oorzaak in de magnetische eigenschappen van de supergeleiders. Doordat het materiaal geen weerstand heeft, zullen er bij het aanleggen van een veld kringstromen geïnduceerd worden die de lokale veldveranderingen tegengaan. Deze kringstromen in de supergeleider zullen niet vanzelf uitdoven. Als de daarin opgeslagen energie groter wordt dan de warmteopnamecapaciteit in de supergeleidende toestand, treden er instabiliteiten op die desastreuze gevolgen kunnen hebben als niet aan de eisen van cryogene stabilisatie is voldaan. Deze opgeslagen energie neemt snel af met de dikte van de supergeleidende laag en men ziet dan ook dat beneden een bepaalde laagdikte de instabiliteiten niet meer optreden. De geleider wordt dan adiabatisch stabiel genoemd. Voor NbTi bedraagt deze grenswaarde 50 tot 70 μm en voor Nb₃Sn kunnen afhankelijk van de bereidingswijze laagdikten van 20 μm worden toegelaten. Deze beperkingen in de draad- of laagdikte maken multifilamenten noodzakelijk en daarmee dus een bewerkelijke fabricageroute.

Naast cryogene en adiabatische stabilisatie is ook dynamische stabilisatie van belang, die optreedt als elk filament zich bevindt in een goed geleidende matrix. Deze stabilisatie berust op het onderdrukken van snelle magnetische

fluxbewegingen in het matrixmateriaal, waardoor het filament de tijd krijgt om de warmte af te voeren, voordat de omliggende filamenten hierdoor worden beïnvloed. Deze laatste vorm van stabilisatie is van het grootste belang om een collectieve magnetische instabiliteit te onderdrukken. Juist hierdoor is het mogelijk met NbTi-filamenten in koper hoge stromen per eenheid van composietoppervlakte te halen, voorzover de j_c -waarde van het NbTi niet de beperking oplegt. Lage-veldsterktemagneten (voor toepassingen tot 4 tesla) kunnen van NbTi-composieten zeer compact gebouwd worden. Omdat de dynamische stabilisatie van Nb₃Sn dat is gemaakt volgens de gangbare methode zeer veel problemen geeft (de stroomdichtheden zijn zeer hoog en er is slechts een beperkte hoeveelheid laagohmig normaal geleidend materiaal) is het nog niet goed mogelijk lage-veldsterkte van Nb₃Sn-composieten in compacte vorm toe te passen.

Geleideropbouw

In fig. 2.2.7 is als voorbeeld een metallografische doorsnede van een adiabatisch en dynamisch gestabiliseerde multifilament NbTi-geleider gegeven.

In fig. 2.2.8 wordt een doorsnede van een Nb₃Sn-geleider getoond. De Nb₃Sn-geleiders kunnen volgens een aantal verschillende methoden gemaakt worden. Al deze methoden hebben gemeen dat het gaat om een groot aantal zeer kleine filamenten. Dat deze filamenten op grond van de stabilisatie veel dunner zijn dan de voorgeschreven waarden heeft te maken met de beperkte diffusielengte voor tin bij het vormen van Nb₃Sn.

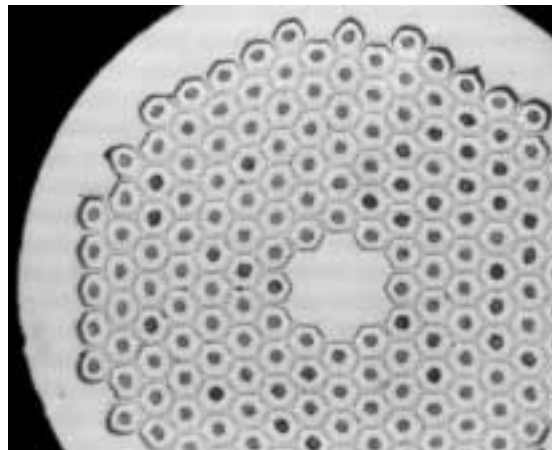
Voor grotere installaties worden samengestelde geleiders gebruikt. Deze bestaan uit een groot aantal draden met verstevigingselementen, extra koper voor stabilisatie en vaak ook een of meer koelkanalen. De totale geleider is zo enkele tientallen millimeters in diameter, doorgaans vierkant of rechthoekig en kan een stroom tussen 10 en 20 kiloampères voeren op de plaats waar het veld maximaal is.

Fig. 2.2.7

[links] Een doorsnede van een gestabiliseerde multifilament NbTi-geleider. De geleider heeft een diameter van ca. 1 mm.

Fig. 2.2.8

[rechts] Een gestabiliseerde Nb₃Sn-geleider met een diameter van ca. 1 mm.



KABELS VAN HOGE-TEMPERATUURSUPERGELEIDERS

De meeste HTS-materialen zijn bros en moeilijk te verwerken tot een oprolbare kabel. Twee methoden om toch een kabel te fabriceren zijn de zogenaamde 'poeder in buis'-methode en de 'coated conductor'-methode. Zowel de kostprijs als de stroomdichtheid van de draden moeten echter nog verbeterd worden. De kosten worden momenteel vooral bepaald door de kosten van het materiaal en de fabricage.



Fig. 2.2.9

Laagstructuur van Bi-2223 in zilvermatrix. De totale dikte ligt tussen 7 en 10 mm. Bron: [Tomsic, 1997].

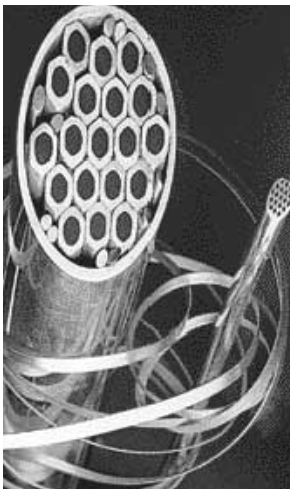


Fig. 2.2.10

HTS-kabel en band. Bron: American SuperConductor.

De poeder in buis-methode

Deze methode is gebaseerd op traditionele technieken voor het maken van draad, en was de eerste methode die kabels opleverde die in toepassingen voor hoge stroomsterkten gebruikt konden worden.

Het keramische poeder (veelal Bi-2223) wordt in een zilveren buis gebracht, waarna de gevulde buis wordt afgesloten en tot een draad getrokken wordt.

De draad wordt vervolgens gebundeld tot een kabel of in een aantal lagen gewalst tot een band. Ook wordt wel uitgegaan van een strip, die tot een buis gevormd wordt. De beste prestaties liggen momenteel voor een kabel van meer dan een kilometer lang op meer dan 50 A. De tot nu toe in dergelijke lengten gehaalde stroomdichtheden liggen tussen de 100 en de 220 A/mm².

Voor de kortere lengten bandmateriaal is reeds 500 A/mm² gehaald, en deze waarde neemt jaarlijks met ca. 80A/mm² toe [Ten Haken, 1998]. Ter vergelijking: in normale hoogspanningskabels is 1,5 A/mm² het maximum.

De 'coated conductor'-methode

Deze techniek is gebaseerd op de dunne-filmtechnieken die gebruikt worden voor de productie van elektronische componenten. Men verwacht dat deze techniek zal kunnen uitgroeien tot een grootschalige fabricagemethode voor HTS-kabels. De dunne-filmtechnologie wordt goed beheerst bij het maken van kleine objecten zoals de 8 inch siliciumwafels voor chipsfabricage. Dit is echter een 'batch'-proces, terwijl voor de fabricage van kabel eigenlijk een continuproces nodig is. Twee technieken worden momenteel ontwikkeld, Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) en Rolling Assisted Biaxial Texturing (RABiTS™)¹².

De textuur van de substraatlaag waarop de supergeleiderlaag wordt opgebracht is van groot belang, want deze zorgt voor de uitlijning van de atomen in de geleider, die van grote invloed is op de geleiding. Recente ontwikkelingen gaan uit van een speciaal getextureerde nikkelfolie die met een elektronenstraaldepositiemethode voorzien wordt van twee zeer dunne bufferlagen, die dienen als chemische barrière tussen het nikkel en de supergeleider. De textuur in het nikkel dient intact te blijven. Vervolgens wordt de supergeleidende YBa₂Cu₃O_x-laag aangebracht met laserdepositiemethoden¹³. Voor kleine afmetingen worden met coated conductortechnieken reeds waarden tot 2.000 A/mm² bereikt (77K, 0T) en men verwacht dat 10.000 A/mm² haalbaar is.

¹² Handelsmerk van Lockheed Martin Energy Research Corporation.

¹³ Ontwikkeling bij Oak Ridge National Laboratory, USA.

De geleiders die op een van de bovenstaande methoden gevormd worden moeten uiteraard nog gekoeld worden tot beneden de kritieke temperatuur. Hiervoor wordt vaak een buitenmantel waarin de geleiders liggen gebruikt, die wordt omspoeld door vloeibare stikstof.

EISEN VOOR VERSCHILLENDE TOEPASSINGEN

De eisen die gesteld worden aan de geleiders variëren per toepassing. Tabel 2.2.2 geeft de waarden weer voor de voornaamste toepassingen van supergeleiders.

Tabel 2.2.2

Eisen aan supergeleiders per toepassingsgebied [Ten Haken, 1998].

Toepassing	Eisen aan geleiderelement				
	stroom- dichtheid (A/mm ²)	magneet- veld (T)	temperatuur (K)	stroom door geleider (A)	kosten (\$/kA)
kortsluitstroom- begrenzer	100 - 1.000	0,3 - 3	40 - 77	1.000 - 10.000	10 - 30
motor (1 MVA)	1.000	2 - 4	25 - 77	100 - 500	10
generator (100 MVA)	500	4 - 5	20 - 50	500 - 1.000	10
transformator	100 - 1.000	0,1	20 - 77	200 - 2.000	10
transmissiekabel	100 - 1.000	0,2	65 - 77	20 - 100	10 - 100
SMES (1 MWh)	1.000	5 - 10	20 - 50	10.000	2,5
MRI-magneet	100 - 1.000	1 - 4	20 - 50	50 - 200	10

TOEKOMSTVERWACHTING

Voor speciale toepassingen als MRI-scanners worden reeds NbTi-supergeleiders in kleine series gebruikt.

Hoewel er in de VS, Japan en Europa samen jaarlijks honderden kilometers HTS-band worden geproduceerd, liggen de meeste toepassingen hiervan nog in het demonstratiestadium. De meeste voorbeeldprojecten zijn transformatoren en transportleidingen. Ook zijn prototypen van bouwgroepen voor de actieve, storingsvrije stroombegrenzing op een bereik van milliseconden beschikbaar. Binnen 3 à 4 jaar zullen deze componenten in serie beschikbaar zijn.

De voordelen van de supergeleidende kabel als transportmedium voor elektriciteit maken dat er een aanhoudende inspanning zal plaatsvinden om tot praktische toepassingen te komen. De efficiëntieverhoging spreekt voor zich, maar ook kan de verhoogde stroomdichtheid compactere transformatoren, generatoren en elektromotoren mogelijk maken. De vloeibare stikstof die voor HTS-systemen gebruikt kan worden, kan de milieuvriendelijke olie in transformatoren en

ondergrondse leidingen vervangen. Ook heeft een HTS-geleider een hogere marge boven de optimale temperatuur dan een conventionele geleider. Dit kan de flexibiliteit en stabiliteit van het systeem verbeteren.

De ontwikkelingen in koeltechnologie zullen mede bepalend zijn voor de verdere ontwikkelingen in de toepassing van supergeleiders. De lage-temperatuursupergeleiders hebben eigenlijk een doorbraak op dit gebied nodig om tot groot-schalige invoering te komen. Bij de hoge-temperatuursupergeleiders zal vooral een doorbraak in de vervaardiging van de kabels kunnen leiden tot toepassing op grote schaal.

In de hoogfrequente techniek worden wereldwijd al kleine series filters en antennes toegepast. De uiteindelijke bouwdeelen zullen grotendeels ook op een dunne-filmbouwwijze geproduceerd kunnen worden. De volgende ontwikkelingsstappen worden verwacht:

0 - 5 jaar	basisstationfilters voor mobiele telefonie.
5 jaar	datatransferfilters en resonators voor satellieten.
10 jaar	mixers and multiplexers voor optische kabelsystemen.
20 jaar	volledig supergeleidende computersystemen.

2.2.3 GELEIDENDE KUNSTSTOFFEN

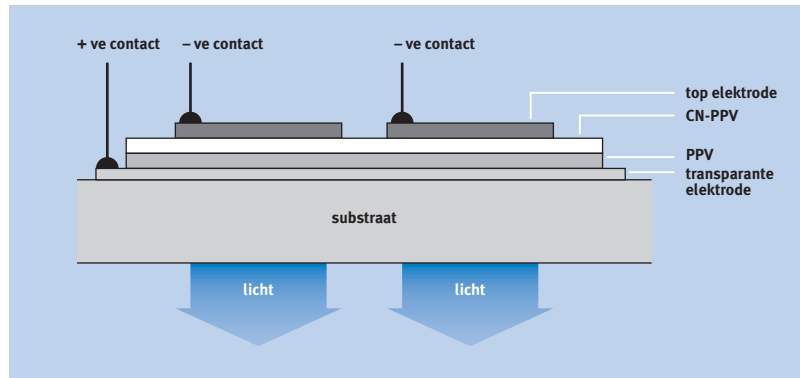
ir. J.M. Meij

De meeste kunststoffen zijn goede elektrische isolators. Veel toepassingen van kunststoffen in de elektrotechniek en de elektronica berusten op die isolerende eigenschappen. Het blijkt echter ook mogelijk om kunststoffen te produceren met geleidende eigenschappen. Genoemd werd reeds de toevoeging van koolstof (roet) aan polyethyleen om dit materiaal enigszins geleidend te maken ten behoeve van veldgeleiding in kabels. De toevoeging van koolstofvezels of roestvrijstaalvezels heeft hetzelfde effect in sterkere mate, zodat deze materialen geschikt zijn voor toepassingen zoals elektromagnetische afscherming van elektronische apparaten met een kunststof behuizing.

Er wordt sinds het einde van de jaren zeventig veel onderzoek gedaan naar polymeren die intrinsiek geleidend zijn zonder dat geleidende vulmiddelen worden toegevoegd. De geleiding van dergelijke polymeren wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van afwisselend enkele en dubbele bindingen in de moleculketen. In deze vorm is het polymeer nog een halfgeleider, maar dotering met ionen zorgt ervoor dat lading zich steeds makkelijker over het gehele molecuul kan verplaatsen en de geleiding verder toeneemt. Om een stroom door een draad van geleidend polymeer te laten vloeien moeten de ladingen van de ene naar de andere keten springen. Dit 'hoppen' kost meer energie dan het verplaat-

Fig. 2.2.11

Opbouw van een lichtdiode van polymeren. PPV = polyphenyleen-vinyleen, CN-PPV = Cyano-PPV. Bron: [Cambridge Display Technologies, 1998].



sen van lading langs een molecuul, en het verbeteren ervan is dan ook onderwerp van veel onderzoek. Afhankelijk van de dotering ligt het intrinsieke geleidingsvermogen van deze kunststoffen tussen 10^{-8} S/cm (een redelijke isolatiewaarde) en 10^5 S/cm (ongeveer een tiende van dat van koper). Geleidende kunststoffen zijn over het algemeen moeilijk te verwerken (spuitgieten) omdat ze niet smeltpaar zijn. Verwerking uit oplossing is vaak wel mogelijk door zijketens aan te brengen. Ook de verbetering van deze eigenschappen is een punt van onderzoek [Cowie, 1994; Zundert, 1998; Kaner, 1988].

Polyacetyleen was de eerste kunststof waar geleidende eigenschappen werden aangetroffen. Momenteel wordt naast deze stof onderzoek verricht aan onder andere polypyrrool, polyaniline, polythiofeen en polyphenyleen-vinyleen. Op dit moment worden geleidende kunststoffen al toegepast in onder andere batterijen en antistatische of geleidende coatings. Op korte termijn worden toepassingen verwacht in wegwerpelektronica (prijsetiketten, anti-diefstal etiketten) en als LED's (lichtgevende diodes, zie fig. 2.2.11) in polymere displays of als backlights voor LC-displays. Uiteindelijk kunnen deze materialen leiden tot plastic beeldschermen ('oprolbare televisie'), PV-cellen (zie par. 3.2.1) en laserdiodes.

2.3 HALFGELEIDERMATERIALEN

Dipl.ing. P.H.W. Droste¹⁴

Par. 1.4 van Deel 1 beschrijft de gevolgen van ontwikkelingen in materialen voor de productie van vermogenselektronische componenten. Deze paragraaf gaat dieper in op de materiaalontwikkelingen zelf. We zullen aandacht geven aan silicium, galliumarsenide en siliciumcarbide.

SILICIUM

Monokristallijn silicium (Si) is het standaardmateriaal voor de vervaardiging van geïntegreerde schakelingen (chips). Van staven monokristallijn silicium worden plakken gezaagd, die dienen als substraat voor de fabricage van de chips. De kostprijs van dergelijke geïntegreerde schakelingen is in grote mate afhankelijk van de oppervlakte per chip en van het aantal schakelingen dat op een siliciumplak past. Naarmate daarop meer schakelingen passen, kunnen er per procesgang meer chips gemaakt worden, met als resultaat een verlaging van de kosten.

Fig. 2.3.1

[links] Opname met een ultrahoogvacuüm-microscop van de oppervlakte van mono-kristallijn silicium. Hier en daar zijn verontreinigingen en roosterfouten zichtbaar.
Bron: [ThermoMicroscopes, 1997].

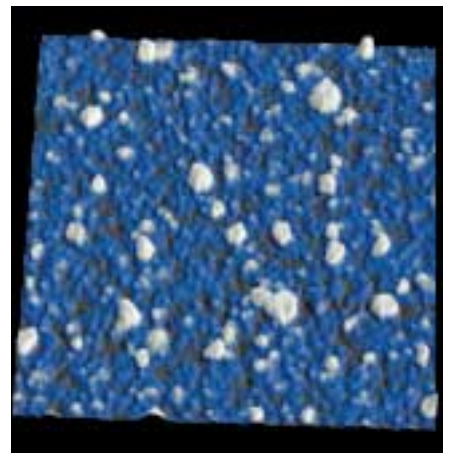
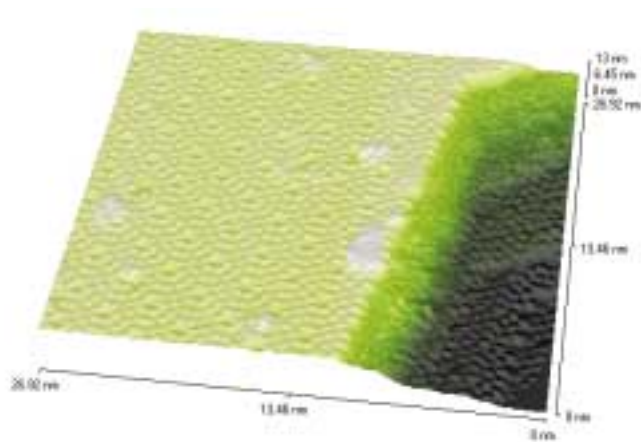


Fig. 2.3.2

[rechts] Multikristallijn silicium (5 μm opname).
Bron: [ThermoMicroscopes, 1997].

Zowel in de computerindustrie als in de vermogenselektronica is een toenemende vraag naar componenten met een hoge vermogensdichtheid waarneembaar. Hiervoor wordt er van de substraatproducenten gevraagd plakken (wafers) van een aanzienlijk hogere kwaliteit te leveren. Hierbij speelt de micromechanica een belangrijke rol. Smallere geleiderbanen (10 nm) maken kleinere structuren mogelijk (al naar gelang de belasting van 13 nm² tot enkele cm²). In combinatie met micromechanische koelsystemen worden zo zeer kleine bouwelementen met een zeer hoge vermogensdichtheid gefabriceerd. De koelsystemen kunnen direct op de achterzijde van de chips geëtst worden en of door middel van een 'bonding'-proces als sandwichplakken worden aangebracht. Kleine tandradpompen, compressoren en leidingsystemen met de benodigde ventielen kunnen worden geïntegreerd.

14 Escete b.v.,
Postbus 3896
7500 DW Enschede
crystalx@aol.com

De hoog-vermogensschakeltechniek zal in dit geval profiteren van de toekomstige ontwikkelingen op het gebied van de chiptechniek.

Door de productie van grotere siliciumwafers (momenteel is een diameter van 16 inch mogelijk) met een diameter tot 22 inch kunnen de onderdelen voor hoge-energiesystemen aanzienlijk meer vermogen leveren en worden ze dienstengevolge goedkoper.

De toepassingen van deze vermogenscomponenten uit silicium zijn echter beperkt tot schakelfrequenties beneden 1 GHz. Voor hogere frequenties zijn halfgeleiders met een grotere elektronenmobiliteit nodig, tenzij het silicium gedurende het gebruik tot 70 °K gekoeld wordt.

Voor fotonische systemen worden vaak de voor de chipindustrie onbruikbare randen van monokristallijne siliciumblokken gebruikt. Deze kleine stukken worden omgesmolten tot grote multikristallijne siliciumblokken. Ook hiervan zijn de uiterste randen weer niet bruikbaar. Deze gaan als grondstof terug naar de substraatfabrikanten.

Dergelijke grote multikristallijne siliciumblokken kunnen met een maximale ribbe van 96 cm geproduceerd worden. Het (laboratorium)rendement van multikristallijn materiaal bij fotonische omzetting is 17%, terwijl monokristallijn materiaal 21% rendement geeft. Het rendement is echter niet allesbepalend: bij blokafmetingen van 100 * 100 * 200 cm zou een volledige bekleding van de buitenmuren van woningen met multikristallijn materiaal toch voordeliger zijn dan met monokristallijne cellen. In het eerste geval lijkt een terugverdientijd van 5 jaar haalbaar (uitgaande van netto productiecosten, de ideale energieopbrengst en een levensduur van 15 jaar). Met de explosieve groei in de fotonische industrie zou er een tekort aan randstukken 'PV grade'-silicium kunnen ontstaan.

GALLIUMARSENIDE

Galliumarsenide is als grondstof ook geen nieuwkomer. Voor het maken van schakelingen voor hoge frequenties en van transistoren met een zeer hoge versterkingsfactor (tussen 1 en 10 miljoen) is GaAs een beter uitgangsmateriaal dan silicium.

De productie van grote galliumarsenide kristallen (4 inch diameter) levert echter nog problemen op, omdat de homogeniteit en derhalve een foutloze structuur niet gegarandeerd kan worden. De technologieën stranden momenteel nog op materiaalproblemen met de smeltkroezen en de controle van de fasegrens tussen vloeibaar en vast. Diverse ondernemingen proberen het probleem door middel van nieuwe materialen op te lossen, maar een doorbraak op dit gebied zal zeker nog enkele jaren op zich laten wachten. In de fotonische techniek is dit materiaal vanwege het hogere rendement (25%) aanzienlijk economischer dan silicium. De nieuwe generaties satellieten zijn uitgerust met GaAs-panelen. Wanneer over enkele jaren grotere diameters gerealiseerd kunnen worden, is

Fig. 2.3.3

Siliciumcarbide diode (5 x 5 mm) die functioneert bij een temperatuur van 600 °C. De diode straalt blauw licht uit. Bron: [NASA Lewis, 1996].



het kostenvoordeel van silicium verdwenen en zouden zonnecellen voor huishoudelijke en industriële toepassingen grotendeels met galliumarsenide kunnen worden vervaardigd. De gezondheids- en milieuaspecten dienen echter niet uit het oog verloren te worden. GaAs is geen ongevaarlijk materiaal.

SILICIUMCARBIDE

Siliciumcarbide (SiC) komt voor in een aantal verschillende kristalstructuren, ieder met specifieke elektrische eigenschappen. SiC heeft een lagere mobiliteit van ladingsdragers dan Si en GaAs, maar is superieur in eigenschappen als doorslagveldsterkte, verzadigingssnelheid en thermische geleidbaarheid. Hierdoor wordt het mogelijk schakelaars met hogere blokkeerspanningen en hogere schakelfrequenties te produceren. Men verwacht uiteindelijk schakelspanningen van meer dan 20 kV te bereiken en schakelfrequenties boven 10 GHz. Bedrijfstemperaturen van 300 °C in lucht en 600 °C in inerte gassen lijken haalbaar [Neudeck, 1995].

De technologie op het gebied van siliciumcarbidesubstraten voor de productie van hoge-temperatuurbouwelementen met een hoog vermogen is vooral in de VS en in Rusland een punt van onderzoek. De elementen zijn interessant voor de bouw van omzeters met een hoog elektrisch en thermisch vermogen, vooral in systemen waarbij de maximale belasting minutenlange uitschieters in piekvermogens en -temperatuur kent. Dergelijke omzeters worden onder andere toegepast in elektrische centrales en zullen waarschijnlijk ook ingezet gaan worden bij het transport van elektriciteit.

Een ander toepassingsgebied ligt in de systemen met thermische overbelastingregelaars. Deze worden in toenemende mate ingezet voor de beveiliging en stroombegrenzing onder hoge thermische belastingen. Al naar gelang de bouw van de regeling, kan de temperatuurbelasting van de schakeling ook nog een regelende functie vervullen. Toepassingen zijn bijvoorbeeld te vinden in generatoren, opslagsystemen, elektrische ovens en elektromagneten voor grote vermogens.

Voor de toekomst zullen combinaties tussen silicium en siliciumcarbide voor regelsystemen met een hoog vermogen ontwikkeld worden, die elk als materiaal hun eigen prestatiekenmerken hebben. De afmetingen van de siliciumcarbidekristallen zijn nu nog beperkt tot iets meer dan 1 inch diameter. Er wordt gewerkt aan kristalgroeitechnieken die een diameter van 2 inch mogelijk moeten maken. Dit is de diameter die voor de productie in grotere series noodzakelijk is. Knelpunten worden nog gevormd door de verbindingen naar de SiC-elementen en door de behuizing, die tegen hoge temperaturen en grote temperatuurwisselingen bestand moeten zijn.

2.4 PERMANENTE MAGNETEN EN MAGNEETMATERIALEN

dr. W.A. van Kampen¹⁵, ir. J.M. Meij

FUNCTIES EN TOEPASSINGEN

Magneten spelen een belangrijke rol in ons dagelijks leven, doch zijn meestal ingebouwd in apparaten en blijven dus ongezien. De voornaamste taken waarvoor permanente magneten worden gebruikt, zijn:

- De omzetting van mechanische energie naar elektriciteit en vice versa, zoals in generatoren, elektromotoren, ‘actuators’, microfoons en luidsprekers.
- Het uitoefenen van krachten, bijvoorbeeld bij het optillen of vastzetten van voorwerpen of het sluiten van een koelkastdeur.
- De omzetting van mechanische energie naar warmte, in wervelstroom- en hysterese-momentapparaten, bijvoorbeeld in de snelheidsmeter van een auto.

MAGNETISCHE EIGENSCHAPPEN

Magneetvelden

Een belangrijke magnetische grootheid is de magnetische veldsterkte H , die wordt uitgedrukt in A/m. In een vacuüm leidt de magnetische veldsterkte H tot een fluxdichtheid B . Men zegt dat B wordt geïnduceerd door H .

$$B = \mu_0 H \quad \mu_0 = 1,25664 \text{ vs/A/m (de magnetische permeabiliteit van vacuüm)}$$

Wanneer materiaal aanwezig is, wordt de magnetische permeabiliteit hiervan uitgedrukt ten opzichte van de permeabiliteit van vacuüm, zodat

$$B = \mu_p \mu_0 H \quad \text{waarin } \mu_p = \text{de relatieve permeabiliteit ten opzichte van vacuüm is.}$$

De fluxdichtheid B in een bepaald medium wordt uitgedrukt in tesla (of voltseconden/m²)¹⁶. De aarde bezit een magneetveld met een dichtheid van 0,0001 tesla, genoeg om een kompasnaald te doen draaien. De maximale fluxdichtheid van permanente magneten is circa 1,3 tesla. Supergeleidende spoelen kunnen magneetvelden tot 20 tesla opwekken.

Magnetisatie

Magneetmateriaal bestaat uit een kristalrooster waarin zich magnetische gebiedjes of domeinen bevinden die elk een magnetisch moment bezitten. Door extern een magnetiserend veld op te wekken, wordt het magnetisch moment van de domeinen dezelfde kant op gericht, evenwijdig aan bepaalde voorkeursassen in het kristalrooster. Na het verwijderen van het magnetiserende veld blijft door deze voorkeursrichting van het kristalrooster een bepaalde fluxdichtheid aanwezig, die remanentie genoemd wordt. Wordt magnetisatie uitgevoerd

¹⁵ Magnetics Enterprise,
Wolsteeg 2c
2311 TP Leiden
mgnetics@worldaccess.nl

¹⁶ De grootheden voor fluxdichtheid B (in tesla of voltseconden/m²) en veldsterkte (in ampère/m) behoren tot het SI-stelsel. Er bestaat een voorkeur om B (een continue grootheid) te beschouwen als een maat voor het magnetische veld. Het verband tussen B en H drukt de invloed uit van de materie. Bij de overgang naar ander materiaal is H discontinu en kan zelfs van richting veranderen. Oudere grootheden zijn ook in gebruik, zoals voor B de gauss (= 10⁻⁴ tesla) en voor H de oersted, waarbij $B = H$ in vacuüm.

bij weekijzer, dan verdwijnt de ordening van de domeinen grotendeels. Het materiaal van permanente magneten bezit de eigenschap dat de ordening van de domeinen onder goede omstandigheden grotendeels blijft bestaan als het magnetiserende veld wordt opgeheven.

Hystereselus

De magnetische eigenschappen van een materiaal worden weergegeven door het verband tussen de grootte van de magnetische veldsterkte H en de magnetische fluxdichtheid B in het materiaal. Wordt een cyclische magnetisatie uitgevoerd met behulp van een uitwendig magnetiserend veld, waarbij magnetisch materiaal achtereenvolgens maximaal wordt gemagnetiseerd in één richting en in de tegenovergestelde richting, dan wordt het verband tussen B en H aangegeven door een gesloten symmetrische curve, de (maximale) hystereselus, aangegeven in fig. 2.4.1.

Een maat voor de grootte van de hystereselus wordt aangegeven door de snijpunten met de H - en B -as, respectievelijk met de waarden H_c en B_r . De coërcitieve veldsterkte H_c is daarbij een maat voor de weerstand tegen demagnetisatie, de remanente fluxdichtheid B_r een maat voor het in- en uitwendige veld van het materiaal. Bij permanent (hard) magnetisch materiaal, liggen de snijpunten met de H -as ver uit elkaar, bij zacht magnetisch materiaal zoals weekijzer liggen de snijpunten dicht bij elkaar. Voor verschillende permanent magnetische materialen kan de vorm van de hystereselus sterk uiteenlopen. De hystereselus is ook afhankelijk van temperatuurveranderingen en zal daarbij uitdijen of inkrimpen in de B - en H -richting. De wijze waarop de hysteresecurven kunnen variëren heeft belangrijke gevolgen voor ontwerp, productie en stabiliteit van constructies.

Fig. 2.4.1

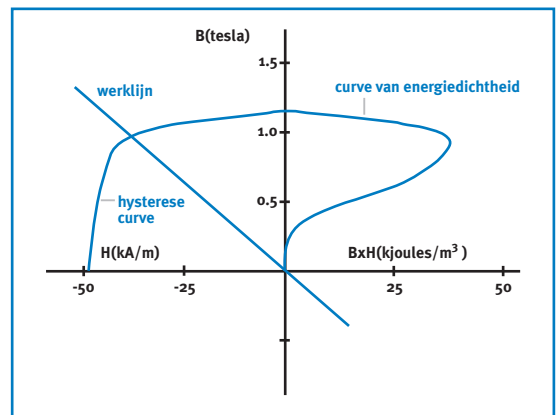
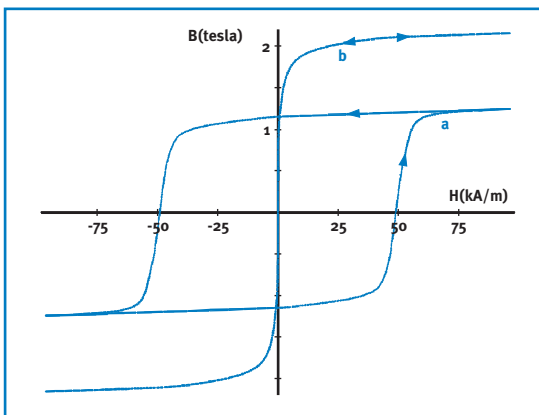
[links] Hystereselus van (a) permanent magnetisch materiaal en (b) van weekijzer.

Fig. 2.4.2

[rechts] Werklijn en energiedichtheid in het materiaal van een permanente magneet.

Energiedichtheid

Wanneer permanente magneten gebruikt worden om in een luchtspleet een magnetisch veld op te wekken, zoals in motoren of in een draaispoelmeter, dan



is het theoretische optimum van $(B \times H)_{\max}$ x (volume) van de luchtspleet gelijk aan $(B \times H)_{\max}$ x (volume) van de magneet. Naarmate de energiedichtheid $B \times H$ van permanent magnetisch materiaal groter is, is minder materiaal nodig is om een gewenst veld op te wekken. Het hangt van de configuratie van het magnetische circuit buiten de magneet af of het veld in de luchtspleet kleiner, gelijk of groter is dan van de magneet.

Werklijn en demagnetisatie

Bij een permanente magneet in een magnetisch circuit, bepaalt het circuit buiten de permanente magneet hoe het verband is tussen B en H . Dit verloopt bijvoorbeeld volgens een rechte lijn in het eerste of derde kwadrant, die de werklijn wordt genoemd. Het snijpunt van de werklijn en een hysteresecurve wordt het werkpunt genoemd. Het werkpunt ligt binnen of op de maximale hystereselus. In een constructie zal men trachten de werklijn zo te kiezen dat het product van $B \times H$ van het magneetmateriaal maximaal is (zie fig. 2.4.2). Dit kan echter leiden tot het teruglopen van de magnetisatie bij variërende temperatuur als de hystereselus bij het optimum van $B \times H$ een knik, de 'knie', vertoont en de werklijn de knie passeert. In dat geval treedt demagnetisatie op bij een waarde van H die dichterbij nul ligt dan H_c .

Temperatuurbestendigheid

Onder invloed van de temperatuur verandert de magnetisatie van een permanente magneet. Bij een matige temperatuur en een goed uitgelegd uitwendig magnetisch circuit is deze verandering tijdelijk.

Boven de werkt temperatuur verliest de magneet gedeeltelijk zijn magnetisatie, maar kan opnieuw gemagnetiseerd worden.

Bij hoge temperaturen, afhankelijk van het materiaal, treden veranderingen op in de metallurgische structuur en wordt onherstelbare schade toegebracht.

De maximale werkt temperatuur loopt van circa 100 °C voor neodymium-magneten, 250 °C voor samarium-kobalt en keramische magneten tot circa 500 °C voor Alnico-magneten. Tabel 2.4.1 geeft een overzicht van de belangrijkste eigenschappen van enige magneetmaterialen.

Tabel 2.4.1

Gegevens van enige magneetmaterialen naar [Buschow, 1997; Magnet].

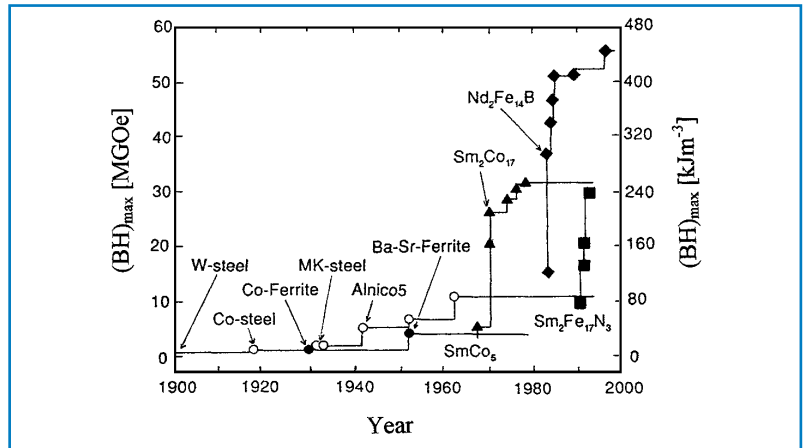
Materiaal	Maximale werkt temperatuur (°C)	$(BH)_{\max}$ (kJm ⁻³)	Br (T)	Temperatuurcoëfficiënt dB_r/dT (%/°C)	JH_c (kA/m)
Sr-ferriet	300	7 - 37	0,20 - 0,44	-0,2	140 - 400
Alnico	500 - 540	10 - 88	0,6 - 1,4	-0,02	30 - 275
Fe-Cr-Co		10 - 66	1,0 - 1,6	-0,03	26 - 51
SmCo ₅	250 - 300	120 - 200	0,8 - 1,05	-0,04	600 - 2.000
Sm (Co,Fe,Cu,Zr) ₇		150 - 240	0,95 - 1,15	-0,03	450 - 1.300
Nd-Fe-B	100 - 150	200 - 350	1,0 - 1,3	-0,13	750 - 1.500

ONTWIKKELING EN TOEPASSING VAN MAGNEETMATERIALEN

Fig. 2.4.3 toont de grote toename van de maximale energiedichtheid $(B \times H)_{\max}$ met de introductie van magneetmaterialen gebaseerd op de zeldzame aardelementen neodymium (Nd) en samarium (Sm). De hoge prijs van deze elementen maakt permanente magneten op basis van zeldzame aarden nog duur, zodat voor constructies van enige omvang gebruik wordt gemaakt van staalmagneten (Alnico) die naast ijzer onder andere aluminium, nikkel en kobalt bevatten, en de harde ferrieten (Ferroxdur) die ijzeroxide met barium, strontium of kobalt bevatten.

Fig. 2.4.3

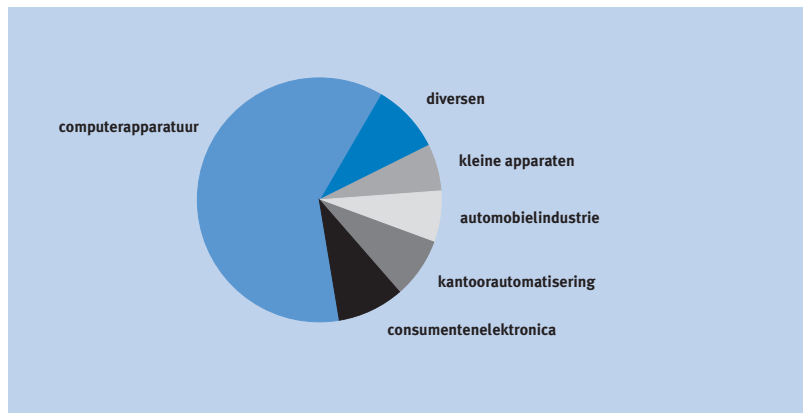
Ontwikkelingen in materialen voor permanente magneten.
Naar [Buschow, 1997].



De moderne magneetmaterialen worden nu vooral gebruikt in kleine elektromotoren en actuators en hebben geleid tot een ongekende miniaturisatie. Er wordt intensief gezocht naar magneetmaterialen en fabricagemethoden die de prijs naar beneden zullen brengen. Een voorbeeld zijn de NdFeB-magneten die met behulp van een bindmiddel zijn geperst. Deze magneten zijn minder kostbaar dan de gesinterde NdFeB-magneten en worden reeds op grote schaal toegepast. Fig. 2.4.4 toont de verdeling over toepassingen.

Fig. 2.4.4

Toepassingen van geperste NdFeB-magneten naar [Croat, 1997].



De hoge weerstand tegen demagnetisatie van modernere materialen heeft sinds de ontdekking van de harde ferrieten toepassingen van permanente magneten mogelijk gemaakt zonder dat er altijd een sluitjuk aanwezig hoeft te zijn. De sluiting van de koelkastdeur is daar een voorbeeld van: het magnetisme van de sluitstrip blijft behouden, ook als de deur open staat. In stappenmotoren en andere actuators of generatoren kunnen in permanent magnetisch materiaal meerdere polen van tegengesteld teken in het materiaal bestaan. In de fietsdynamo heeft de permanente magneet de vorm van een rechte cilinder met noord- en zuidpolen naast elkaar op de eindoppervlakken.

Een doorbraak in motoren en actuators voor groot vermogen en tegelijkertijd geringe omvang in het gebied van kilowatts en megawatts kan verwacht worden in het begin van de 21e eeuw. Zo heeft autofabrikant Nissan aangekondigd dat zij in 2000 een batterij-elektrische auto (de Altra EV) op de markt zullen brengen die is uitgerust met een 62 kW NdFeB permanente magneetmotor met een efficiëntie van 89%.

In projecten zoals het 'All electric ship'¹⁷ worden permanente magneetmotoren ontwikkeld met vermogens in het megawatt-gebied.

In deze paragraaf gebruikte literatuur [Chalmers, 1991; Howe, 1991].

¹⁷ Zie Deel 1, par. 4.3.2
Voertuigconcepten.

2.5 OMZETTERS VOOR SPANNING EN STROOM

dr.ir. B. Gravendeel¹⁸, ir. P.T.M. Vaessen¹⁹, ir. J.M. Meij

Zoals uit Deel 1 van deze uitgave blijkt, zullen omzeters voor spanning en stroom een grote rol gaan spelen in onze elektriciteits huishouding. De elektronische schakelingen voor het manipuleren van spanning en stroom in dergelijke omzeters worden vermogens elektronische schakelingen genoemd.

Door het beschikbaar komen van halfgeleiders voor steeds grotere vermogens zullen juist op het gebied van deze omzeters de komende jaren grote veranderingen plaatsvinden, en worden nieuwe methoden voor de beheersing van elektromagnetische velden steeds belangrijker. Omdat de kern van de omzeters wordt gevormd door halfgeleiders, zullen we eerst een aantal belangrijke halfgeleiders voor vermogens elektronica behandelen.

HALFGELEIDERS VOOR VERMOGENSELEKTRONICA

De halfgeleiders, die in vermogens elektronica toegepast worden kunnen als volgt verdeeld worden:

- Halfgeleiders, die ‘aan’ en ‘uit’ gaan door toestandsveranderingen in het netwerk. De voornaamste halfgeleider van dit type is de diode. Een diode gaat ‘aan’ en laat in één richting stroom door wanneer er voorwaartse spanning over komt te staan. Hij gaat weer ‘uit’ wanneer de spanning van polariteit wisselt. Beide toestandsveranderingen worden door het netwerk om de diode heen geïnitieerd.
- Halfgeleiders, die met een extern commando aangezet kunnen worden, maar slechts uitgaan doordat het netwerk rondom de halfgeleider de stroom naar nul forceert. Tot deze categorie behoren de thyristoren.
- Halfgeleiders, die met een extern commando aan- en uitgezet kunnen worden, ongeacht de toestand van het netwerk. In deze categorie komen elementen zoals de Gate Turn Off thyristor (GTO), de Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) en de Integrated Gate Controlled Thyristor (IGCT) voor.

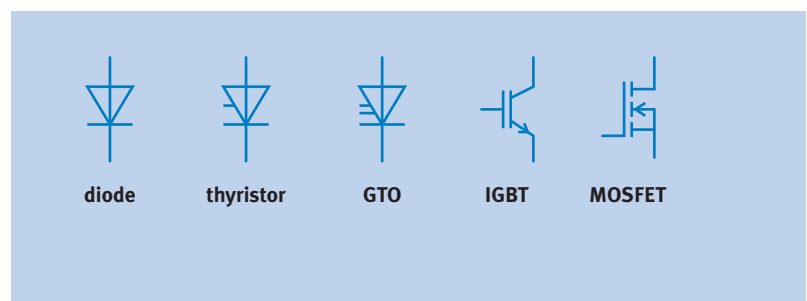
Fig. 2.5.1

De symbolen voor de belangrijkste halfgeleiders voor vermogens elektronica.

Hieronder zullen we een korte beschrijving geven van de voornaamste halfgeleiders voor vermogens elektronica.

18 HMA Power Systems,
Postbus 3007
2980 DA Ridderkerk
B.Gravendeel@hma.nl

19 KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
p.t.m.vaessen@kema.nl



Transistor

De bipolaire (lagen) transistor werkt als stroomversterker en bestaat uit een drielagenstructuur van gedoteerd halfgeleidermateriaal. De stroomversterking wordt veroorzaakt door het injecteren van elektronen uit de emitterlaag (N). Eenmaal in de basislaag (P) kunnen deze vrij bewegende elektronen gemakkelijk de collectorlaag (N) bereiken. De recombinatie (met gaten) die plaatsvindt in de dunne basislaag is verantwoordelijk voor de kleine basisstroom. Met moderne lagentransistoren zijn stroomversterkingsfactoren tot 1.000 haalbaar. Dit wil zeggen dat een kleine stroom door de basis een 1.000 keer grotere stroom veroorzaakt tussen de emitter en de collector.

MOSFET

Het principe van de werking van de MOSFET (metal oxide semiconductor field-effect transistor) is gebaseerd op het veranderen van de weerstand en daarmee de stroom in een halfgeleidende laag door een elektrostatisch veld. Het elektrostatische veld wordt veroorzaakt door een spanning die wordt aangelegd tussen een van de polen van de halfgeleidende laag (source) en de stuur elektrode (gate). Doordat de stuur elektrode volledig geïsoleerd is, is er sprake van spanningsgestuurde stroomversterking.

Thyristor

De thyristor is een uit vier lagen opgebouwd halfgeleidend element met een PNPN -structuur en drie aansluitingen: anode, kathode en 'gate'. Door het injecteren van een ontsteekstroom (positieve puls) via de gate kan de thyristor *ontsteken* en overgaan van de blokkeertoestand in de doorlaattoestand. Dit kan ook met licht gebeuren in de zogenaamde 'light-triggered-thyristors'.

Na het ontsteken heeft de stuur elektrode geen invloed meer op het dan geleidende element. Onder invloed van veranderingen in het circuit, waarbij de spanning omkeert komt de thyristor weer in de spertoestand (blokkeertoestand) terecht.

In deze toestand zal de sperstroom bij een verhoging van de aangelegde spanning tussen anode en kathode slechts weinig toenemen tot aan de doorslagspanning U_{bo} . Als doorslag optreedt, daalt de spanning tot circa 1 V (doorlaatspanning) en wordt de stroom in de thyristor begrensd door de overige circuitelementen en de voedingsspanning. Het terugvallen van de spanning tot de doorlaatspanning wordt het *kippen* genoemd, de thyristor komt dan weer in de doorlaattoestand.

GTO

Bij een Gate Turn Off thyristor (GTO) kan – anders dan bij een thyristor – de hoofdstroom worden uitgeschakeld door middel van een forse (negatieve) gatepuls. De doorlaatspanning is eveneens hoger dan die van een thyristor met als

Fig. 2.5.2

Schematische weergave van een PNP-transistor. Met PNP-transistoren kunnen stroomversterkingsfactoren tot 1.000x bereikt worden. De stuurstroom op de basis initieert een grote hoofdstroom tussen de emitter en de collector.

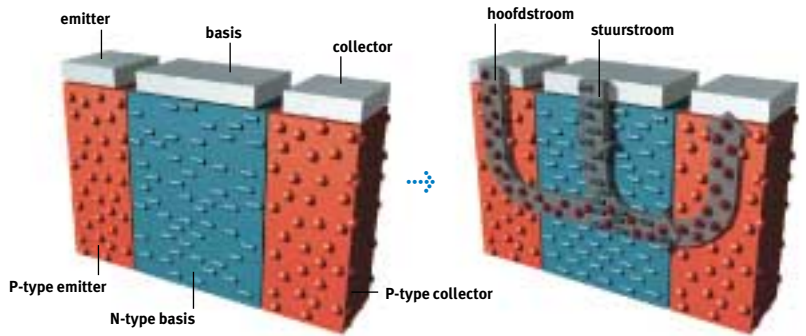


Fig. 2.5.3

Schematische weergave van een MOSFET. MOSFETS zijn geschikt voor spanningen van 20 V tot 1.000 V en stromen van 0,1 A - 50 A. De MOSFET wordt gestuurd door de spanning die tussen de (verder geïsoleerde) gate en de source wordt aangelegd. Het elektrostatische veld dat daardoor ontstaat verlaagt de weerstand in de p-type tussenlaag, zodat een goed geleidende verbinding ontstaat.

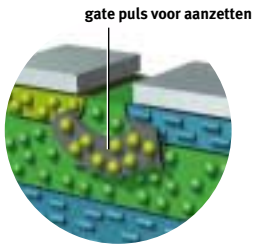
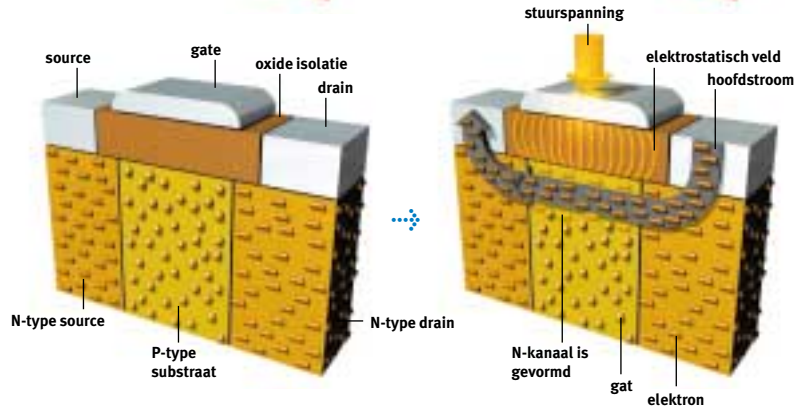


Fig. 2.5.4 a

De Gate Turn Off thyristor (GTO) is inzetbaar bij spanningen tot 10 kV en stromen tot 10 kA. Zowel in de sperrichting als in de doorlaatrichting ontstaan verliezen.

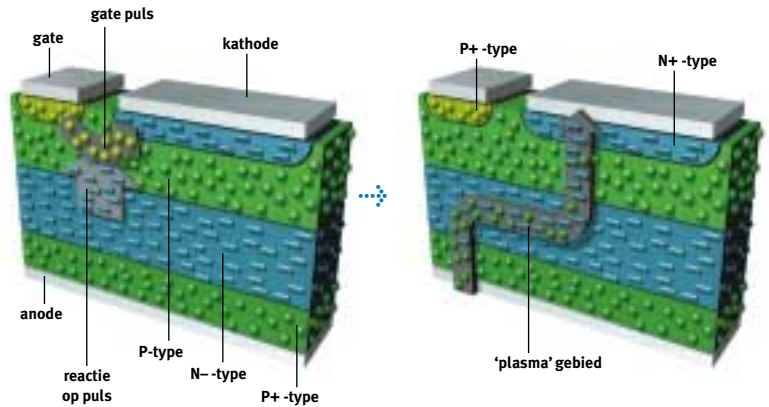


Fig. 2.5.4 b

De Gate Commutated Thyristor (GCT) kan zeer hoge vermogens snel schakelen. Vaak wordt een circuit voor de aansturing geïntegreerd (IGCT).

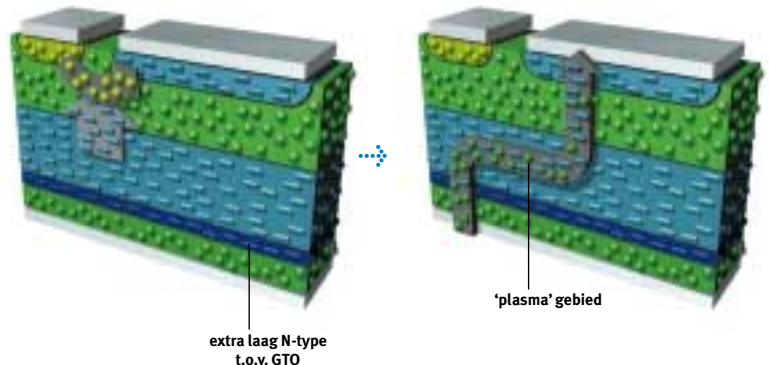
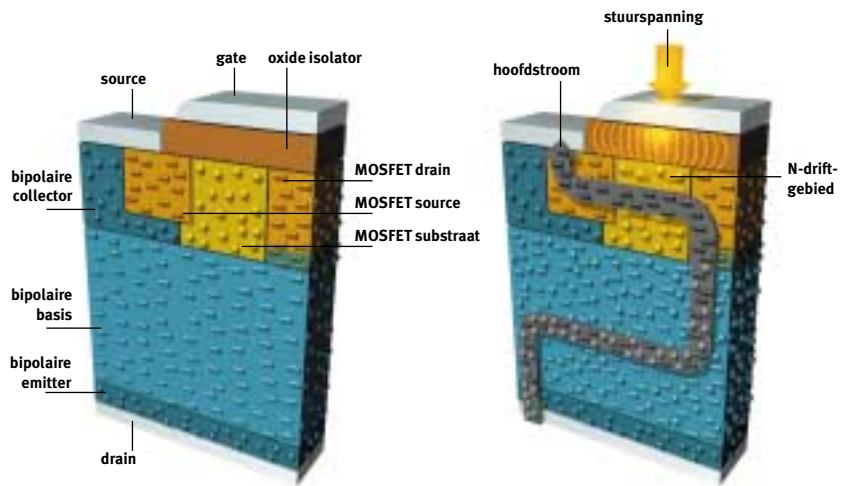


Fig. 2.5.5

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). De door een elektrostatisch veld in de MOSFET gestuurde hoofdstroom vormt de stuurstroom voor de bipolaire transistor. Hierdoor kunnen enorme stroomversterkingen worden gerealiseerd. IGBT's kunnen worden ingezet voor spanningen tussen de 600 V en 3,5 kV; ontwikkelingen naar 6,5 kV zijn gaande. De maximale stroom ligt tussen 2 A en 2 kA, de schakelfrequentie tot 20 kHz voor hoogvermogenstoepassingen, zoals regelbare aandrijvingen en 120 kHz voor 'lichere' toepassingen, zoals geschakelde voedingen.



gevolg meer doorlaat- en schakelverliezen. De voordelen van GTO's liggen vooral in hogere schakelfrequenties en een eenvoudige uitschakeling.

De snelheid van de spanningstoename in de doorlaatrichting (uitgedrukt in $\text{kV}/\mu\text{s}$) mag tijdens het uitschakelen niet te hoog worden, anders kan beschadiging van de gatestructuur optreden. Ook de snelheid van de stroomtoename in de doorlaatrichting in $\text{A}/\mu\text{s}$ mag niet te hoog zijn om verspreiding van de stroom over de gehele doorsnede van het halfgeleider tablet te verkrijgen. Om de toenamesnelheden (steilheden) te begrenzen, moeten beveiligingsnetwerken worden aangebracht die extra schakelverliezen veroorzaken.

IGBT

Een Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) combineert de voordelen van een bipolaire transistor (lage doorlaatverliezen) met die van een MOSFET (spanningsgestuurde stroomversterking).

Fig. 2.5.6

Verskillende vermogenshalfgeleiders. De grootste afgebeelde halfgeleider is ongeveer 10 cm in diameter. De boven- en onderzijde van de schijf zijn de contactvlakken voor de hoofdstroom. Bron: GEC Alsthom.



Wanneer de spanning tussen de gate en de source boven een bepaalde drempelwaarde komt, ontstaat er een inversielaag onder de gate van de IGBT. Deze inversielaag verbindt het n-driftgebied met het n+sourcegebied net zoals bij de MOSFET. Een stroom elektronen vloeit door deze inversielaag. Deze stroom trekt gaten aan uit het p+draincontact naar het n-driftgebied.

In het MOSFET-deel wordt stroomgeleiding mogelijk door het aanleggen van een spanning op de gate (metaal). Door het aldus ontstane elektrische veld worden gaten afgestoten en verwijderd uit de gate-omgeving. Tegelijkertijd worden elektronen aangetrokken die op hun beurt tussen source en drain een zogenaamde n-channel vormen. In het bipolaire PNP-transistordeel zorgt de aanwezigheid van elektronen op het grensvlak naar de MOSFET voor aantrekking van gaten van de emitter. Deze gaten vloeien van de emitter naar de MOSFET-drain en vormen zo de relatief grote hoofdstroom. Ook ontstaat er een parasitaire stroom elektronen vanuit de source naar het p-gebied eronder.

De slimme combinatie van MOSFET en bipolaire transistor maakt een vermogensversterkingsfactor van 10 miljoen mogelijk, zodat IGBT's rechtstreeks met micro-elektronicacircuits gekoppeld kunnen worden. Ter illustratie: een typische vermogensversterking van bipolaire transistoren is 1.000 (bij vermogens kleiner dan 1 kW) en van thyristoren 50 tot 5 (voor vermogens vanaf 5 MW).

Trends in vermogenshalfgeleiders

Enkele trends op het gebied van vermogenshalfgeleiders zijn:

- Het verlagen van de doorlaatspanning bij IGBT's door het toepassen van de zogenaamde trenchtechnologie.
- Het verdringen van de GTO door de IGBT bij lage spanningen tot blokkeerspanningen van 4,5 kV.
- Het verdringen van de GTO bij hoge spanningen door de GCT²⁰ en de IGCT, waarbij de uitstekende schakeleigenschappen van de IGBT gecombineerd worden met het superieure doorlaatgedrag van de thyristor.
- De opkomst van 'smart power', de integratie van analoge, digitale en vermogensfuncties in een enkele chip. Omzetters van 1.200 V bij 50A worden reeds gemaakt.

In Deel 1 wordt in par. 1.4, Trends in vermogenselektronica, dieper ingegaan op deze trends en de gevolgen ervan.

VERMOGENSELEKTRONISCHE OMZETTERS

Een vermogenselektronische schakeling wordt gebouwd met bovengenoemde halfgeleiders tezamen met enkele passieve componenten, zoals spoelen en condensatoren. Er wordt zeer spaarzaam gebruik gemaakt van weerstanden. (De passieve componenten worden beschreven in Bijlage 1, Basisbegrippen).

²⁰ (Integrated) Gate Controlled Thyristor, zie fig. 2.5.4 b

De omzetteren kunnen in vier klassen worden onderverdeeld:

- AC-DC-omzetter (gelijkrichter, wisselrichter).
- DC-AC-omzetter (inverter).
- DC-DC-omzetter.
- AC-AC-omzetter.

We zullen de voornaamste basisbegrippen hierna toelichten.

AC-DC-omzetter (gelijkrichter, wisselrichter)

Een veel voorkomende taak is het omzetten van een hoge wisselspanning naar een lagere gelijkspanning. Een degelijke omzetter komt voor in vrijwel alle elektronische apparaten. Steeds vaker worden universele omzetteren gebruikt, die een brede reeks van ingangsspanningen en zelfs gelijkstroom accepteren. Een actuele toepassing is het omzetten van een AC- in een hogere DC-spanning, die nodig is voor het transport door middel van High Voltage DC (HVDC)-verbindingen.

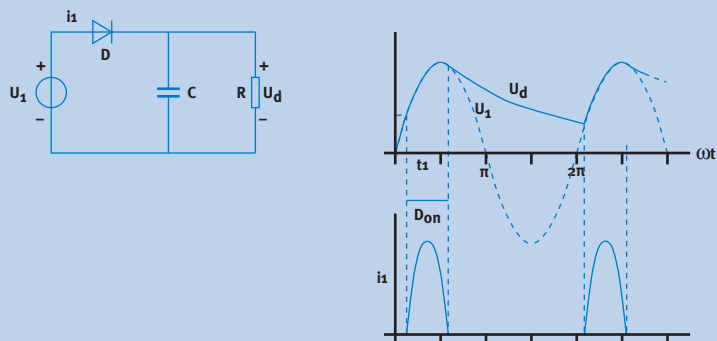
Passieve omzetter

Een van de meest gebruikte AC-DC omzetteren is de transformator in combinatie met een diode en een condensator. De transformator brengt eerst de wisselspanning naar de gewenste waarde. De diode laat slechts een deel van de wisselspanning door, en spert tijdens de perioden van omgekeerde polariteit. De condensator moet in die perioden de spanning aanvullen. Het resultaat is een lichte zaagtandvorm in de aangeboden spanning. Hoe groter de condensator, hoe minder de spanning terugvalt. Deze gelijkrichters zijn een belangrijke bron van netvervuiling door de harmonischen²¹ die ontstaan door de korte pieken in de spanning. Vanwege de kleine vermogens worden ze op één fase van het net aangesloten.

Fig. 2.5.7 toont het schema van de éénfase-stergelijkrichter, zoals deze schakeling genoemd wordt. U_1 stelt de uitgangsspanning (AC) van de transformator voor. De éénfase-bruggelijkrichter is uitgerust met vier diodes in een brugschakeling, zodat de spanning in beide polariteitsfasen doorgelaten wordt. Het resultaat is

Fig. 2.5.7

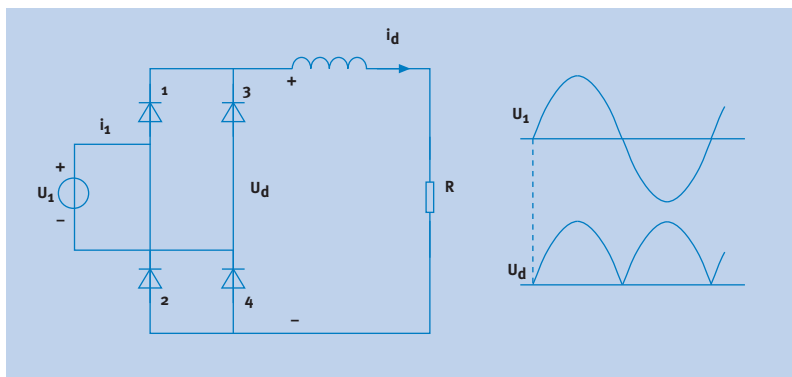
Schema en uitgangsspanning van een voeding met een éénfase-stergelijkrichter. De spanningspiek die gedurende de doorlaattijd (D_{on}) van de diode doorgelaten wordt is getekend in de onderste grafiek.



²¹ Signalen met een frequentie die veelvoud is van de grondfrequentie van de spanningspieken.

Fig. 2.5.8

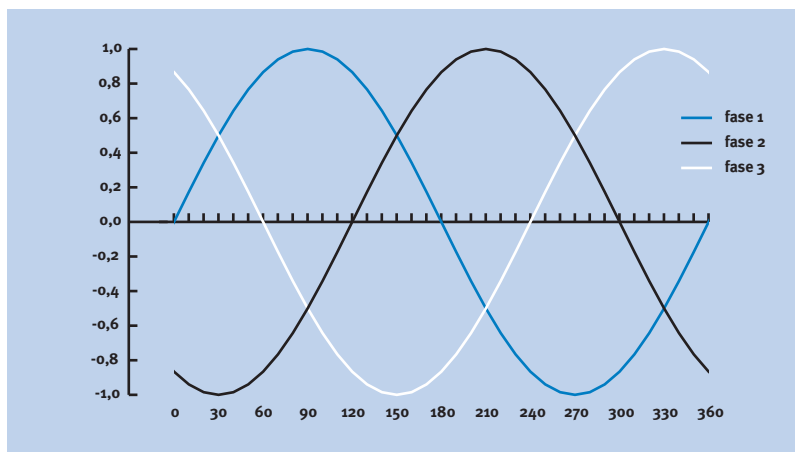
Schema en uitgangsspanning van een voeding met een éénfase-bruggelijkrichter. Er is nog geen condensator in de schakeling opgenomen om de spanningsdalingen aan te vullen.



dat tussen de spanningspieken een kleiner ‘gat’ ontstaat dan bij een éénfase-stergelijkrichter het geval is. Het is dan ook eenvoudiger om hier een min of meer stabiele spanning te creëren met een condensator en een spoel. Voor het gelijkrichten van grotere vermogens wordt meestal een driefasengelijkrichter gebruikt. Het resultaat is dan een uitgangsspanning met zes pieken per netspanningscyclus. Bij een driefasensysteem zijn de spanningen van de drie aders 120° ten opzichte van elkaar verschoven, zoals getoond in fig. 2.5.9.

Fig. 2.5.9

Spanningsverloop bij een driefasensysteem.



Stuurbare éénfase-bruggelijkrichter

De diodes in een éénfase-bruggelijkrichter kunnen we vervangen door thyristoren, waarmee het tijdstip waarop de volgende halfgeleider de stroom gaat geleiden uitgesteld kan worden. Door dit uitstel ontstaat er in iedere halve cyclus een klein negatief stukje in het spanningsverloop. De verschuiving van het begin van de geleiding ten opzichte van de nuldoorgang van de ingangsspanning wordt aangegeven als een hoek, de ontsteekhoek α . De uitgangsspanning is evenredig met de cosinus van de ontsteekhoek. Hoe groter de ontsteekhoek wordt ingesteld, hoe kleiner de uitgangsspanning, totdat de hoek zo groot wordt dat het tweede kwart van de cyclus bereikt wordt ($\alpha > 90^\circ$ of $1/2\pi$).

Stuurbare wisselgelijkrichter

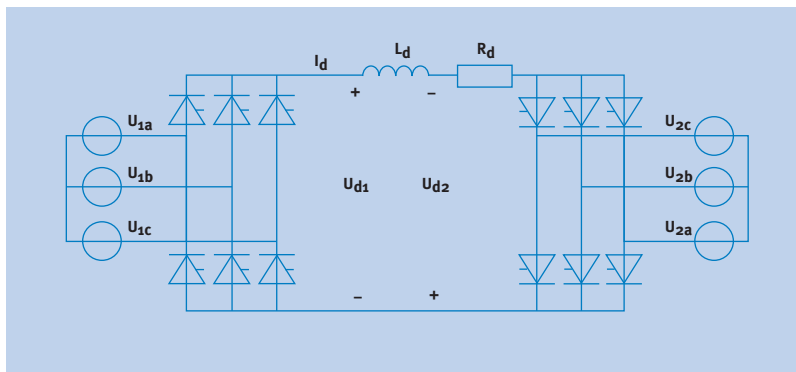
Als de ontsteekhoek groter wordt dan 90° (maar kleiner blijft dan 180°), wordt de gemiddelde uitgangsspanning negatief. Als er niet voldoende stroom blijft lopen om de thyristoren in geleiding te houden, stopt de doorlaat. Wanneer er aan de uitgang echter voldoende vermogen beschikbaar is, gaat de schakeling wisselrichten: het vermogen gaat lopen van de DC- naar de AC-kant. Bij de stuurbare wissel- en bruggelijkrichter loopt de stroom achter op de spanning ('ijlt na'). Dit betekent dat deze schakeling altijd blindvermogen vraagt. Voor grotere vermogens worden driefasige bruggelijkrichters gebruikt. Het werkingsprincipe blijft echter hetzelfde.

Ruggelings geschakelde stuurbare gelijk/wisselrichter

Door twee stuurbare gelijkrichters te combineren ontstaat een AC-AC-converter, die desgewenst gesplitst kan worden door een lange verbinding. Deze verbinding transporteert dan DC. Zo zal de gelijkstroomverbinding tussen Noorwegen en Nederland bestaan uit twee sets van deze schakelingen, een set in Nederland en een set in Noorwegen, verbonden door een bipolaire kabel. De verbinding gaat echter niet uit van een driefasen-systeem, maar van een twaalffasige spanning, die speciaal voor de omzetting uit de normale driefasige netspanning gemaakt wordt. Fig. 2.5.10 toont het principe van een HVDC-verbinding waarbij wordt uitgegaan van drie fasen.

Fig. 2.5.10

Principe van een HVDC-verbinding.



DC-AC-omzetter (inverter)

Een inverter maakt uit een constante gelijkspanning een wisselspanning. Een gelijkrichter en een inverter vormen samen een frequentieregelaar en kunnen een wisselstroommotor in toerental regelen. In een noodstroomstelsel of Uninterruptable Power Supply (UPS) maakt de inverter van de door een accu geleverde gelijkspanning de gewenste 230 V wisselspanning. Ook de door PV-cellen opgewekte elektriciteit (gelijkstroom) wordt door een inverter omgezet naar 230 V wisselspanning, voordat teruggeleverd kan worden aan het net.

Halve brug inverter

Deze schakeling gaat uit van twee elektronische schakelaars die om beurten in de doorlaatstand geschakeld worden. De voor de schakelaars geplaatste condensatoren veroorzaken bij de schakelfrequentie van de schakelaars een deling van de DC-ingangsspanning U_{in} in een positieve en een negatieve spanning ten opzichte van een derde spanning van o Volt. De schakelaars leiden zo beurtelings de positieve en de negatieve spanning naar de uitgang. Tussen de nulleder en de uitgang ontstaat nu een blokvormige spanning van beurtelings $+1/2 U_{in}$ en $-1/2 U_{in}$.

De blokvormige uitgangsspanning beperkt de toepassing van deze inverter tot bijvoorbeeld asynchrone machines. De schakeling is goed in staat blindvermogen te leveren.

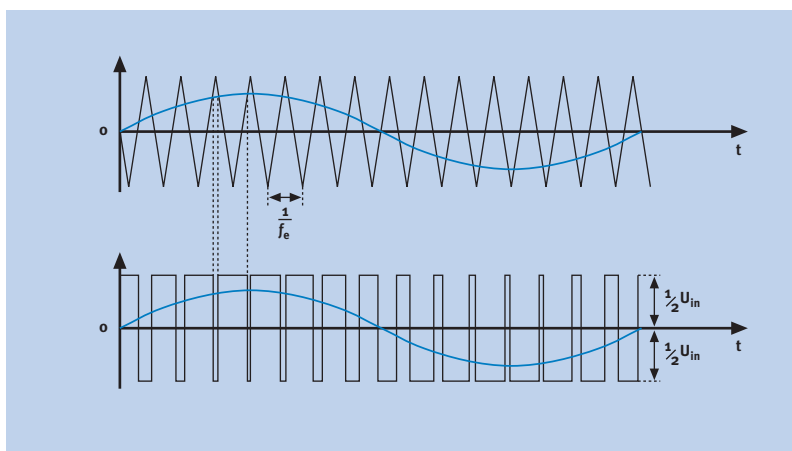
Pulsbreedte modulator

De pulsen die de halfgeleiders (ook in de vorige schakeling) aansturen worden gegenereerd door de modulator. Om een betere benadering van de sinusvorm te krijgen, wordt een hogere schakelfrequentie toegepast, die wordt afgeleid van het verschil in signaal tussen een driehoekig draaggolfsignaal en een referentiesinus. Daarbij wordt negatief ($-1/2 U_{in}$) geschakeld wanneer de spanning van de draaggolf groter is dan de spanning van de referentiesinus, en positief ($+1/2 U_{in}$) wanneer de draaggolf kleiner is. Zo ontstaat bij een piek in de sinus een groot positief en een klein negatief blok. Afgevlakt geven deze gemoduleerde blokspanningen de vorm van een sinus. Fig. 2.5.11 toont het principe van de pulsbreedtemodulatie.

De meeste UPS-schakelingen en draaistroomaandrijvingen maken gebruik van driefasige spanningsinverters, opgebouwd uit drie halve-bruginverters. Daarbij zijn de stuursignalen voor de drie schakelaarparen 120° ten opzichte van elkaar verschoven. Ook hier kan weer pulsbreedtemodulatie worden toegepast, wanneer een betere benadering van de sinus gewenst is.

Fig. 2.5.11

Principe van pulsbreedtemodulatie (of pulse width modulation, UPS). De bovenste grafiek toont het driehoekig draaggolfsignaal en de referentiesinus, de onderste grafiek de resulterende blokvormige pulsen en het 'afgevlakte' resultaat.



AC-AC-omzetter

Cycloconverter

Voor zeer grote elektrische aandrijvingen wordt ook wel een cycloconverter gebruikt, een AC-AC-omzetter zonder tussentrap. De uitgangsspanning van de converter wordt gevormd met gelijkgerichte halve perioden van de ingangsspanning. De grootte van de wisselspanning kan door sturing van de gelijkrichter worden beïnvloed.

Wisselspanningsinsteller

Door thyristoren in serie met de stroomaanvoerlijnen te plaatsen, kan de wisselspanning omlaag gebracht worden. Afhankelijk van de ontsteekhoek laten de thyristoren een deel van de spanning door naar de belasting. Deze schakeling wordt veel gebruikt om de aanloopstroom van asynchrone elektromotoren te beperken. Naarmate het toerental toeneemt, wordt geleidelijk meer spanning doorgelaten. Dit noemt men vaak een 'soft start'-schakeling.

Transformatoren zijn strikt genomen geen vermogens-elektronische convertoren, maar worden veel toegepast om de ene wisselspanning in de andere om te zetten. Ook regeltransformatoren worden nog veel toegepast, waarbij kleine spanningsaanpassingen worden bereikt door mechanisch naar de juiste wikkeling te schakelen.

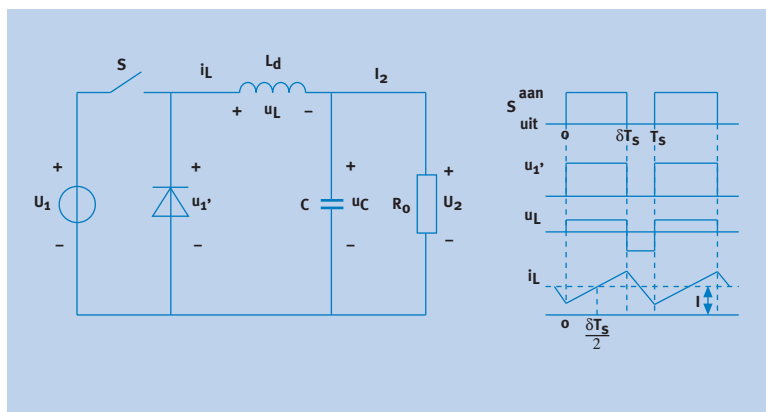
DC-DC-omzetter

Chopper

Een chopper is een gelijkspanning-gelijkspanningsomzetter. Uit een constante gelijkspanning wordt door de chopper een intermitterende gelijkspanning gemaakt. Dit proces gebeurt vrijwel zonder verlies. De uitgangsspanning kan zowel lager ('down-chopper') als hoger ('up-chopper') zijn dan deingangsspanning. In fig. 2.5.12 wordt een voorbeeld van een chopper gegeven.

Fig. 2.5.12

Voorbeeld van een 'down' chopper.



De weerstand R wordt middels een schakelaar aangesloten op een spanningsbron. Als de schakelaar continu 'aan' staat, loopt er een stroom door de weerstand ter grootte van U/R .

Als de schakelaar even lang 'aan' als 'uit' staat, loopt er een stroom van slechts de helft van U/R . De aan- en uit-perioden moeten echter wel worden uitgevlakt tot een constante spanning door een combinatie van een spoel en een condensator.

Voor een bepaalde waarde van de verhouding tussen 'aan' en 'uit' staat in fig. 2.5.12 ook de vorm van de stroom door de weerstand als functie van de tijd. De grootte van de rimpel op de stroom wordt beïnvloed door de waarde van R en L .

Schakelende voeding

Een schakelende voeding wordt veel gebruikt voor consumentenelektronica en is een speciale uitvoering van de chopper. Het choppercircuit wordt daarbij gevoed via een gelijkrichter met een grote buffercondensator. Dit resulteert in een gelijkspanning van ca. 300 V. Het choppercircuit wekt een blokgolf op met een frequentie tussen 10 kHz en enige honderden kHz. Nu wordt deze hoogfrequente wisselspanning met een kleine transformator omlaag gebracht naar de gewenste waarde. Hierna wordt weer een gelijkrichting toegepast en na filtering (afvlakking) staat de juiste DC-spanning aan de uitgang ter beschikking.

De aan het begin van deze paragraaf beschreven passieve voedingen hebben als nadeel dat daarin een relatief grote en zware transformator zit, die ook nog vrij veel verliezen geeft. De schakelende voeding heeft weliswaar meer componenten, maar de transformator kan veel kleiner zijn dan die in een passieve voeding, omdat het een hoogfrequente transformator is. Schakelende voedingen zijn daarom kleiner en goedkoper dan passieve voedingen. Een nadeel van de schakelende voedingen is echter dat de diodegelijkrichters die direct op de netspanning zitten piekvormige pulsen genereren, die nogal wat netvervuiling veroorzaken (harmonischen).

SCHAKELINGEN VOOR HOGE VERMOGENS

Op het eerste gezicht verschillen de schakelingen voor hoge vermogens niet veel van de gangbare elektronische schakelingen. Er zijn een echter aantal significante verschillen:

- De stromen en de spanningen kunnen waarden aannemen in de orde van enkele kA's en enkele kV's. Hierdoor overtreffen de fysieke afmetingen van een schakeling voor hoge vermogens ruimschoots die van een elektronica-schakeling. Karakteristieke afmetingen liggen tussen de 0,1 en 1,0 meter in.
- De schakelflanken voor de gebruikte halfgeleiders hebben een steilheid in de orde van kV/ μ s en kA/ μ s. In lucht correspondeert dit met een karakteristieke golflengte in de orde van 0,3 m. Gelet op de afmetingen van de schakelingen is dan niet voldaan aan een belangrijke voorwaarde, waaronder het

algemeen gebruikte netwerkconcept geldig is: de grootste in de schakeling optredende lengte moet ruimschoots kleiner zijn dan de kleinste te verwachten golflengte. Bij schakelingen voor hoge vermogens kan derhalve niet volstaan worden met het gebruik van het netwerkconcept. Bij het ontwerpen dient dan ook gebruik gemaakt te worden van het veldconcept voor de beschrijving van de elektromagnetische verschijnselen²².

Voor de omzetter met een hoog vermogen zijn de verliezen van groot belang, omdat de stromen dermate groot zijn dat zelfs kleine procentuele verliezen een forse warmteontwikkeling tot gevolg hebben. Er moet rekening gehouden worden met verliezen in iedere situatie: tijdens de ‘aan’-stand vindt er een geringe dissipatie plaats ten gevolge van de voorwaartse spanningsval en tijdens de ‘uit’-stand vindt er een zeer geringe dissipatie plaats ten gevolge van de lekstroom. Bij het schakelen van de ene toestand naar de andere treedt het zogenaamde schakelverlies op.

Functies

De halfgeleiders, spoelen en condensatoren kunnen op verschillende manieren met elkaar verbonden worden. De verschillende configuraties die zo ontstaan kunnen verschillende functies realiseren. De werking en het rendement van een schakeling hangen mede af van de besturing van de halfgeleiders (voor zover het stuurbare halfgeleiders betreft).

Door steeds meer halfgeleiders te kiezen en de besturing uit te breiden, kan van een gelijkspanning wisselspanning gemaakt worden. Deze wisselspanning kan zowel eenfasig als drie- of meerfasig zijn. Met de driefasige wisselspanning kan bijvoorbeeld een asynchrone machine met een variabele frequentie bestuurd worden. Dit is de algemeen bekende frequentieregelaar.

Het is ook mogelijk de drie fasen beheerst om te zetten in gelijkspanning en deze vervolgens weer naar drie fasen met een andere fasevolgorde en of een andere frequentie te transformeren. Hiermee ontstaat de mogelijkheid openbare netten te koppelen met verschillende frequentie (bijv. 50 Hz en 60 Hz of 50 Hz en $16\frac{2}{3}$ Hz).

Kortom, vrijwel alle denkbare spanningsomzettingen zijn te realiseren. Om dat ook op het juiste spanningsniveau en of stroomniveau te doen, moeten de halfgeleiders in serie of parallel worden toegepast.

Eisen

Naast de elektrotechnische aspecten spelen mechanische en thermodynamische aspecten een belangrijke rol in de ontwikkeling van het vakgebied.

Voorbeelden hiervan zijn:

- Warmteafvoer. Het rendement van een frequentieomzetter is hoog, en ligt tussen 80% en 99%. Er moet voor een omzetter van ongeveer 5.000 kW toch

.....
²² Zie ook Deel 1, par. 1.6, Veldsynthese.

- nog ongeveer 2.500 W per halfgeleider afgevoerd worden, bij een klein temperatuurverschil.
- Montage. De kracht waarmee een grootvermogen IGCT ingeklemd wordt is 40.000 N. Deze kracht moet homogeen verdeeld worden over het halfgeleideroppervlak. Dit vergt speciale werktuigbouwkundige aandacht van de ontwerper.
 - Configuratie. Elektrotechnisch gezien is het gelet op de hoge spanningen gewenst de geleiders ver uit elkaar te leggen. Anderzijds is het om Elektro-Magnetische Interferentie (EMI) te voorkomen gewenst de geleiders zo dicht mogelijk op elkaar te leggen.

Bovenstaande eisen van warmteafvoer en krachtverdeling moeten tezamen met de elektrotechnische eisen gecombineerd worden in het elektrisch en mechanisch ontwerp van een vermogenselektronische omzetter. Het is duidelijk dat ervaring en goed vakmanschap hierbij een belangrijke rol spelen.

Trends

De ontwikkeling van omzeters voor hoge vermogens steunt heel sterk op de beschikbaarheid van componenten. Nadat de eerste thyristor gemaakt was, zijn er talloze configuraties gemaakt om de negatieve eigenschappen van de thyristor zoveel mogelijk te omzeilen. Dit leverde o.a. omzeters op die van een gelijkspanning een variabele (zowel in frequentie als amplitude) wisselspanning konden maken. Weliswaar was er een groot aantal componenten nodig, maar door een juiste besturing kon een betrouwbaar werkende frequentieregelaar gemaakt worden.

De introductie van de GTO, die extern zowel 'aan' als 'uit' gezet kan worden, leverde voor dezelfde functie een eenvoudiger configuratie en een eenvoudiger besturing op. De IGBT maakte het schakelen nog eenvoudiger en doordat er sneller geschakeld kon worden, werden de hulpcomponenten kleiner of konden ze zelfs geheel verdwijnen.

De introductie van de jongste telg aan de familie van de halfgeleiders, de IGCT, maakte het mogelijk halfgeleiders eenvoudig in serie en of parallel te schakelen. De IGCT lijkt het meest op een GTO. Met de IGCT is het mogelijk geworden reeds bekende omzetprincipes te gebruiken om hogere stroom- en spanningsniveaus te bereiken.

Algemeen is te zien dat de componenten steeds grotere stromen bij steeds grotere spanningen kunnen schakelen. Ook worden de componenten beter: ze kunnen met steeds minder hulpmiddelen in serie en parallel geschakeld worden. De vermogensniveaus zijn zo groot dat de introductie van vermogenselektronische schakelingen in het openbare net op alle niveaus mogelijk wordt. Ook hier willen we voor meer informatie verwijzen naar par. 1.4 in Deel 1, Trends in vermogenselektronica.

Toekomstperspectief

Vermogenselektronica maakt veel elektrische omzetprocessen transparant: de gebruiker merkt niet dat er een omvormer van de een of andere soort tussen hem en de opwekkenheid aanwezig is. Hierdoor zal het aantal toepassingsgebieden voor elektrische energie sterk toenemen. In het distributienetwerk van elektrische energie zullen vermogenselektronische omzetters een betere benutting van de elektrische infrastructuur mogelijk maken. Tevens kan het distributienet ingericht worden als een bidirectioneel bussysteem.

REFERENTIES

- Alford, personal communication with prof. Neil Alford, South Bank University, London (1998)
- Buckel, W., *Supraleitung, Grundlagen und Anwendungen*, Physik Verlag, ISBN 3-87664-014-8
- Buschow, K.H.J., (Ed.), *Handbook of magnetic materials*, Vol. **10**, Elsevier Science, Amsterdam (1997)
- Cambridge Display Technologies, *Light emitting polymers* - Technology backgrounder, (1998), www.cdtltd.co.uk/TechnologyBackgrounder.html
- Chalmers, B.J., e.a., *Supermagnets, hard magnetic materials*, Proceedings NATO-ASI, Kluwer Academic Publishers, pp. 703 (1991)
- Cigré, *Comparison of overhead lines and underground cables for electricity transmission*, Joint Working Group 21/22.01, CIGRE 96, paper 21/22-01 (1996)
- Cowie, J.M.G., *Polymers: chemistry and physics of modern materials*, Blackie Academic & Professional (1991)
- Croat, J.J., *Journal of Applied Physics*, Vol. **81**, p. 4804 (1997)
- Delalondre, C., e.a., *High current electric arcs*, Electricité de France (EDF) (1998), <http://www.edf.fr/der/html/produits/publications/cherener.en/art14-en.htm>
- ELECTRA, *SF₆ and the global atmosphere*, CIGRE WG23.10, Task Force 01, Electra No. **164**, pp. 121-131 (1996)
- Fraunhofer Institut Angewandte Festkörperphysik, *CVD diamond heat spreaders*, <http://www.iaf.fhg.de/diamond/thermics/heatspreaders.htm> (1998)
- Geurts, W.S.M., G.J. Meijer, E.F. Steennis, *Environmental life cycle analyses of MV cables in the Netherlands*, Jicable 95, paper A.10.1 (1995)
- Haken, B., ten, persoonlijke communicatie (1998)
- Hampton, N., *The use of space charge techniques in material development*, Cigré Colloquium on Advanced Materials, Bedford, USA, August 18 (1997)
- Hidaka, K., *Progress in Japan of space charge field measurement in gaseous dielectrics using a pockels sensor*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. **12**, No. 1, pp. 17-28 (1996)
- Howe, D., T.S. Birch, *Supermagnets, hard magnetic materials*, Proceedings NATO-ASI, Kluwer Academic Publishers, pp. 679 (1991)

- Ieda, M., Y. Suzuoki, *Space charge and solid insulating materials: in pursuit of space charge control by molecular design*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. **13**, No. 6, pp. 10-17 (1997)
- Jeroense, M.J.P., *Charges and discharges in HVDC cable*, proefschrift TU Delft, ISBN 90-407-1438-X, Delftse Universitaire Pers (1997)
- Kaner, R.B., A.G. MacDiarmid, *Plastics that conduct electricity*, Scientific American, February (1988)
- Magnet Sales & Manufacturing Inc., *Essentials of magnet design*, California, jaartal onbekend, www.magnetsales.com/design.html
- Morshuis, P.H.F., M.J.P. Jeroense, *Space charge measurements on impregnated paper: a review of the PEA method and a discussion of results*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. **13**, No. 3, pp. 26-35 (1997)
- NASA Lewis SiC Research Team, *SiC devices operate red-hot at 600 °C!*, <http://www.lerc.nasa.gov/www/sic/redhot.html> (1996)
- Neudeck, P.G., *Recent progress in silicon carbide semiconductor electronics technology*, NASA Lewis Research Center, <http://www.lerc.nasa.gov/www/sic/SiCReview.htm> (1995)
- Newhouse, V.L., *Applied superconductivity*, Vol. **I and II**, Academic Press, New York (1975)
- Niemeyer, L., *Gas insulated switchgear*, *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, to be published end of 1998/beginning of 1999
- Reed, C., *Polymer blends*, Cigré Colloquium on Advanced Materials, Bedford, USA, August 18 (1997)
- Salah Khalil, M., *International research and development trends and problems of HVDC cables with polymeric insulation*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. **13**, No. 6, pp. 35-47 (1997)
- Seiko, *The plastic television*, Technology Backgrounder, 16 February (1998), <http://www.cdtltd.co.uk/seikotvtech.html>
- Tanaka, T., *Polymer interfaces associated with electrical insulation systems*, Cigré Colloquium on Advanced Materials, Bedford, USA, August 18 (1997)
- Tomsic, M., A.K. Sarkar, *Is low cost BSCCO tape just around the corner?*, Superconductor Industry Magazine, Spring (1997), www.teameurus.com/presroom/article4.html
- ThermoMicroscopes, www.topometrix.com (1997), www.thermoMicroscopes.com (1999)
- Veringa, H.J., *Intrinsic stability of technical superconductors*, proefschrift, Energieonderzoek Centrum Nederland (1981)
- Willems, H.M.J., H.T.F. Geene, M.R. Vermeulen, *A new generation of HV and EHV extruded cable systems*, Jicable, June 26-28, Paris, paper A.1.6 (1995)
- Zundert, M. van, *Plastic elektronica*, *Natuur & Techniek*, jaargang **66**, nr. 4 (1998)

2

3 Opwekking

3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk zullen we een selectie van technologieën bespreken die een rol kunnen spelen in de toekomstige elektriciteitsopwekking. De omzettingstechnologieën zijn verdeeld in twee categorieën:

- de statische omzetters, waarbij elektriciteit opgewekt wordt zonder dat daarbij beweging nodig is.
- de dynamische omzetters, waarbij bewegingsenergie wordt omgezet in elektriciteit. Over het algemeen gebeurt de eigenlijke omzetting met een generator. We laten enige speciale ontwikkelingen van dynamische omzetters zien.

Over het algemeen is er een trend waarneembaar naar statische oplossingen, die meestal minder onderhoud nodig hebben en minder slijtage vertonen. Ook bij de dynamische omzetters is er een vermindering in het mechanische gehalte te zien; voorbeelden zijn de magnetische lagering voor windturbines, motoren en scheepsaandrijving (zie par 6.4) en de akoestische motor.

We zullen ook enige aandacht besteden aan technologieën, waarvan de toepassing veel verder in de toekomst ligt.

3.2 STATISCHE OPWEKKING

3.2.1 FOTOVOLTAÏSCHE OMZETTERS

OVERZICHT FOTOVOLTAÏSCHE OMZETTERS

prof.dr. W.C. Sinke¹

Zonnecellen op basis van kristallijn silicium in de vorm van gezaagde plakken worden al 40 jaar gebruikt voor elektriciteitsopwekking in (zeer) kleine en grote fotovoltaïsche (PV)-systemen. Modulen met daarin een aantal seriegeschakelde cellen hebben bewezen betrouwbaar te zijn en vormen ongeveer 80% van de huidige wereldmarkt voor PV (die in 1997 ruim 120 MWp² bedroeg). Een belangrijk en bijzonder kenmerk van PV is dat het een modulaire technologie is, dat wil onder meer zeggen dat de kosten per eenheid van kleine systemen vergelijkbaar zijn met die van grote systemen. Kleine autonome PV-systemen kunnen dan ook zelfs bij het huidige kostenniveau al vaak concurreren met andere kleine systemen voor elektriciteitsopwekking. Dat ligt anders bij netgekoppelde systemen, die direct moeten concurreren met elektriciteit uit het net. De kosten van opwekking met een netgekoppeld PV-systeem in Nederland bedragen momenteel f 1,- tot f 1,50 per kWh, ruwweg 4 tot 6 maal het kleingebruikerstarief en 10 tot 20 maal de brandstofkosten van conventionele opwekking. Het is de verwachting dat productieopscaling en technologieverbetering de kostprijs van kristallijn siliciummodulen nog ruwweg een factor 3 a 4 zullen kunnen reduceren. Modulekosten maken typisch 50 – 70% van de turn-key systeemkosten uit. Wanneer de overige systeemkosten, de zogenaamde Balance-Of-System (draagconstructie, bekabeling, inverter, installatie, enz.) evenredig dalen, komen de kWh-kosten dus in de buurt van de huidige elektriciteitstarieven. Uiteraard is verdere kostendaling gewenst en waarschijnlijk noodzakelijk voor zeer grootschalig gebruik van PV in concurrentie met andere vormen van opwekking. Bij kristallijn silicium vormen de materiaalkosten een beperkende factor voor een drastische reductie van de kosten en daarom gaat men er vrij algemeen van uit dat één of andere vorm van dunne-filmtechnologie noodzakelijk is om lagere opwekkosten dan f 0,25 per kWh te kunnen bereiken. Een voorwaarde daarbij is dat de betrouwbaarheid en levensduur van dunne-filmmodulen vergelijkbaar is met die van kristallijn siliciummodulen. Hoewel de fabricage van dunne-filmmodulen in sommige gevallen complex is en hoge investeringen vergt, zorgt het geringe gebruik van kostbare materialen bij grote productievolumes voor een kostenvoordeel ten opzichte van de huidige siliciumtechnologie. Het is enigszins misleidend dat in de discussie over PV vaak vooral aandacht wordt gegeven aan het rendement van modulen, terwijl dat zeker niet de belangrijkste parameter is als het gaat om de mogelijkheden van grootschalig gebruik. Ten eerste moet men zich realiseren dat modulen slechts een deel van een compleet netgekoppeld systeem vormen. Verder worden de kosten van

¹ ECN Duurzame Energie,
Postbus 1,
1755 ZG Petten,
sinke@ecn.nl

² Watt-piekvermogen.

opwekking niet alleen bepaald door de initiële investering, maar ook door de levensduur, de betrouwbaarheid en de kosten van onderhoud (van alle systeemcomponenten). Rendement is niettemin van belang voor de kWh-kosten omdat de BOS-kosten voor een deel gerelateerd zijn aan het oppervlak van de PV-installatie en daarmee aan het rendement van de modulen. Immers, een PV-systeem met een bepaald piekvermogen wordt compacter door het toepassen van modulen met een hoger rendement. Dit is echter slechts een gering effect, zeker wanneer de modulen optimaal worden geïntegreerd in andere constructies. Een andere reden om te streven naar een hoog rendement is het feit dat daarmee op een bepaald oppervlak meer elektriciteit kan worden opgewekt. Dat kan in een land met een beperkte beschikbare oppervlakte een belangrijk gegeven zijn.

Er zijn wereldwijd verschillende dunne-film PV-technologieën in ontwikkeling en deels al in (proef)productie. Hoewel er nogal verschillend wordt gedacht over de uiteindelijke kostprijs en de voorwaarden waaronder deze kan worden bereikt, is het algemene beeld dat er op dit moment nog geen 'winnaars' of 'verliezers' kunnen worden aangewezen. Er moet overigens onderscheid worden gemaakt tussen technologieën die reeds op dit moment in hoofdlijnen bekend zijn, en technologieën die uitsluitend in zeer vage termen zijn beschreven (zoals 'een dunne-film drievoudige tandemstructuur op een goedkoop substraat op basis van III-V halfgeleiders en met een rendement van 30%'). Hoewel het niet onmogelijk is dat dergelijke modulen ooit gemaakt kunnen worden, valt er maar heel weinig te zeggen over de termijn en de kosten. We beperken ons daarom hier tot iets concretere voorbeelden.

De volgende typen PV-cellen bieden allemaal uitzicht op kosten van minder dan 0,5 US\$ per Wp op modulenniveau:

- Amorf silicium/germanium (a-(Si,Ge):H). Dunne-film tandemstructuren die nu reeds commercieel beschikbaar zijn, maar waarvan de ervaring met en het volume van de productie nog in een vrij pril stadium verkeren. Het hoogste laboratoriumrendement is op dit moment iets minder dan 15% (initieel), commerciële modulen halen een gestabiliseerd rendement van ongeveer 6 - 9%.
- Koper-indium/gallium-diselenide (zgn. CIGS). Op diverse plaatsen worden in proefprojecten CIGS-modulen gemaakt. In het laboratorium halen kleine PV-cellen bijna 18%. Men verwacht dat commerciële modulen 7 - 10% zullen halen. Er zijn vrij veel verschillende productieroutes en er valt op dat gebied nog zeer veel te ontwikkelen en te verbeteren.
- Cadmium-telluride (CdTe). Met deze cellen vindt op diverse plaatsen productie in proefprojecten plaats. BP Solar zal naar verwachting in 1999 met de commerciële productie starten. Het hoogst behaalde laboratoriumrendement ligt rond de 16%, commerciële modulen zullen waarschijnlijk een rendement van 6 - 9% halen.

- Kleurstof-gesensibiliseerde zonnecellen (nc-TiO₂). Ook wel ‘organische cellen’ of ‘nanokristallijn TiO₂’ genoemd. Deze cellen zijn nog nergens op serieuze schaal in proefproductie, maar in ver gevorderde ontwikkeling voor toepassingen in huis. Op de langere termijn zijn deze cellen waarschijnlijk ook geschikt voor professioneel gebruik. Het hoogste rendement in een laboratorium was 11%. De productietechnologie en ontwerpvarianten zijn nog volop in ontwikkeling.
- Overige organische zonnecellen. Hieronder vallen ook de bulk heterojunctiecellen waarop de volgende paragraaf dieper zal ingaan.

Behalve de lijn van extrapolatie van bekende PV-technologie bestaan er ook zeer revolutionaire nieuwe ideeën. Het is op dit moment nog volstrekt onduidelijk wat de waarde daarvan is, maar het is belangrijk om niet uitsluitend door te lopen op de min of meer bekende weg. Een voorbeeld van een dergelijk revolutionair idee is dat van het ‘fotovoltaïsche beton’ dat verderop in deze paragraaf kort aan de orde zal komen.

ORGANISCHE ZONNECELLEN

*dr.ir. J. Buijs*³

Inleiding

De hiervoor beschreven ontwikkelingen op het gebied van anorganische cellen (de eerste drie genoemde typen) zullen ertoe leiden dat de kosten van PV-elektriciteit gestaag zullen dalen en op zijn vroegst rond 2020 concurrerend kunnen zijn met conventionele elektriciteit. Een echte doorbraak is met deze categorie cellen niet te verwachten.

Het is reeds lang bekend dat ook organische materialen een fotovoltaïsch effect kunnen vertonen. De natuur geeft immers zelf het voorbeeld met de fotosynthese. Tot aan 1990 echter bleven de bereikte conversierendementen (ver) beneden 1% [Wöhrlé, 1991], zodat dit onderzoek relatief weinig aandacht kreeg. Na 1990 zijn twee typen cellen ontwikkeld op basis van organische materialen die perspectief bieden voor praktische toepassing. Allereerst waren er de zogenaamde Grätzel-cellen, gebaseerd op nanokristallijn titaandioxide met een monolaag kleurstofmoleculen, waarmee in het laboratorium rendementen rond 10% behaald kunnen worden [O’Regan, 1991]. Recent zijn er cellen bijgekomen die zijn gebaseerd op een mengsel van p- en n-polymeër [Halls, 1995] of van p-polymeër met C₆₀ [Yu, 1995]. Deze laatste cellen bereiken voorlopig rendementen rond 2%, maar bieden nog zeer vele mogelijkheden om het fotovoltaïsche effect te optimaliseren. Het grote voordeel van organische en polymere cellen is dat de productieprocessen in principe veel goedkoper kunnen zijn dan die met anorganische materialen. Vandaar dat dergelijke cellen de nodige aandacht

.....
 3 TNO Industrie,
 Postbus 6235
 5600 HE Eindhoven
 J.Buijs@ind.tno.nl

verdienen en mogelijk op middellange termijn wel tot een doorbraak in PV-energie kunnen leiden.

Werking van organische cellen

De fotovoltaïsche omzetting van licht in elektrische energie is gebaseerd op het feit dat licht in een halfgeleidermateriaal zogenaamde excitonen kan creëren. Dit zijn paren van negatieve (elektronen) en positieve (gaten) ladingsdragers. Het exciton draagt pas bij aan de stroom, als elektron en gat in een elektrisch veld gescheiden worden. In een zogenaamde p-n cel gebeurt dit bij de overgang tussen een positief (p) en een negatief (n) gedoteerde laag halfgeleidermateriaal. Het is dus zaak dat het exciton niet recombineert, voordat het scheidingsvlak bereikt wordt. Anderzijds moet de halfgeleiderlaag dik genoeg zijn om voldoende licht te kunnen absorberen. Aan beide, min of meer conflicterende eisen is bij organische materialen moeilijk tegelijk te voldoen in een vlakke laaggeometrie. In de genoemde succesvolle cellen wordt dit probleem opgelost door de vlakke laag p-n opbouw in te ruilen voor een nanogestructureerde opbouw (Grätzel-cel) of een polymere cel.

Grätzel-cel

De opbouw van de Grätzel-cel is geschetst in fig. 3.2.1. Het hart van de cel is een ongeveer 10 μm dikke, poreuze halfgeleiderlaag bestaande uit nanokristallijne TiO_2 deeltjes. Op het oppervlak van deze deeltjes bevindt zich een monolaag van kleurstofmoleculen. De in de kleurstoflaag door licht gecreëerde excitonen worden aan de grens met het titaandioxide gescheiden. De elektronen worden afgevoerd via de transparante elektrode, waarop de TiO_2 -laag zich bevindt. Voor de regeneratie van de kleurstofmoleculen wordt gebruik gemaakt van een elektrolyt.

Fig. 3.2.1

Opbouw van de Grätzel-cel. De lagen van boven naar beneden: glas, een transparante geleidende laag (SnO_2), katalysatorlaag (Pt), elektrolyt, kleurstofmoleculen, TiO_2 , SnO_2 , glas.

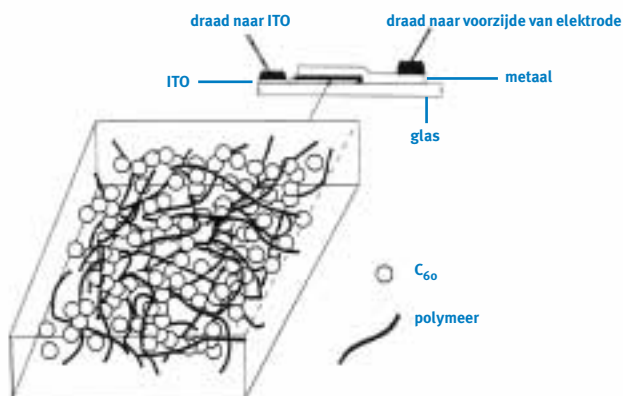


Als gevolg van de sterke vergroting van het oppervlak in de poreuze laag en de gereduceerde kans op recombinatie zijn in deze cellen rendementen behaald van 10 tot 12%. Het belangrijkste nadeel is nog het noodzakelijk gebruik van een elektrolyt, die de levensduur van een cel beperkt. Daarom wordt er veel onderzoek verricht om te komen tot een vaste-stofequivalent. Een mogelijkheid waaraan in Nederland wordt gewerkt is om de halfgeleiderlaag te voorzien van een geordende antennelaag. Deze antennelaag zorgt voor de lichtabsorptie en het transport van de excitatie-energie naar de interface met de halfgeleider. Ook regenereert de antennelaag het geëxciteerde molecuul via de zijketens van de antennelaagmoleculen. De noodzakelijke ordening kan verkregen worden met behulp van vloeibaar-kristallijne moleculen. Het gatentransport is mogelijk door een redox-koppel⁴ op te lossen in de zijketens, of door polymerisatie van diacetyleen zijgroepen tot geleidende ketens.

Bulkheterojunctie

In een cel op basis van een polymermengsel, ook wel bulkheterojunctie genoemd, wordt de combinatie van een vergroting van het oppervlak en een verkleining van de afstand tot de scheidingslaag verkregen door de p- en de n-componenten te mengen. Dit mengsel moet zodanig zijn dat beide componenten een continue fase blijven vormen. Dit wordt geïllustreerd in fig. 3.2.2 voor de cel gebaseerd op een mengsel van MEH-PPV, een p-type poly (para-fenyleenvinyleen), en een C₆₀-derivaat ('bucky balls'). Een analoge opbouw is te bereiken met een mengsel van een p- en een n-polymeer (bijv. MEH-PPV en CN-PPV). De excitongeneratie kan in beide componenten plaatsvinden, terwijl de ladingscheiding aan het grensvlak optreedt. Een juiste materiaalkeuze voor de elektroden (bijv. indium-tinoxide, 'ITO' en aluminium) zorgt ervoor dat de elektronen en gaten tegengestelde richtingen opgaan. Met dit principe zijn tot nu toe conversierendementen rond 2% gerealiseerd. De levensduur vormt ook hier nog een probleem.

Fig. 3.2.2
Opbouw van een polymere cel.



.....
4 Reductie- en oxidatiekoppel; voor deze toepassing: ionen die een reversibele toe- of afname van lading ondergaan. Een voorbeeld is het koppel Fe³⁺-Fe²⁺.

Vooruitzichten

Grätzel-cellen staan op het punt toegepast te worden in calculators, horloges en dergelijke. Voor grootschalige elektriciteitsopwekking dient de productiemethode verder ontwikkeld te worden en vooral de levensduur verlengd te worden. De aanpak met de antennelaag biedt voor dit laatste goede perspectieven. Polymeermengselcellen verkeren nog in een verkennend stadium; het rendement, de levensduur en de productiemethode voor grotere oppervlakken zijn nog verre van optimaal. Omdat polymeren veel mogelijkheden bieden voor een dergelijke optimalisatie, wordt de eerste toepassing pas over 5 à 10 jaar reëel geacht. Voor beide typen cellen geldt dat toekomstige productie met zeer efficiënte en grootschalige processen uit de grafische of coatingindustrie tot de mogelijkheden behoort. Op een termijn van 15 à 20 jaar zouden dan met organische materialen op zeer goedkope wijze flexibele zonnecellen geproduceerd kunnen worden met een rendement en een levensduur die vergelijkbaar is met die van de huidige siliciumcellen.

FOTOVOLTAÏSCH BETON

*G. Oudakker*⁵

Principe

Fotovoltaïsche zonnecellen geproduceerd volgens de huidige methoden zijn kostbaar en kunnen derhalve uitsluitend onder speciale omstandigheden economisch toegepast worden. Het uitrusten van boeien, afgelegen signaleringsborden en meetinstrumenten, en afgelegen waterpompen met PV-cellen is vaak goedkoper dan de kosten van de verbinding naar het net.

Aan de Oregon State University wordt – tot op dit moment op kosten van het Japanse Kamatsu – een methode ontwikkeld, waarin afvalkristallen van silicium worden toegepast, die niet meer gebruikt kunnen worden voor de fabricage van siliciumplakken voor chips. Deze afvalkristallen worden ingebed in een mengsel van glasparels en de speciale cementsoort MDFC (MacroDefect Free Cement) op een aluminiumlaag aan de onderzijde en een metaalgrid aan de bovenzijde. Men heeft op kleine schaal aangetoond dat met bovenstaande methode een rendement gehaald kan worden van 6,5% en men verwacht uiteindelijk op 10% uit te komen.

Toepassingsmogelijkheden

Daar waar de traditionele zonnecellen het domein zijn van de elektronische industrie die georiënteerd is op microniveau, kan deze methode toegepast worden door civiele bouwers, die in de cultuur van grootschalige afmetingen leven. De methode is een verfijnde manier om beton te storten. Er kan gedacht worden aan het winnen van energie uit infrastructuur door bijvoorbeeld op betonnen bruggen of andere kunstwerken deze vorm van betoncoating aan te brengen.

⁵ Van Hattum en Blankevoort,
Korenmolenlaan 2
3440 AM Woerden
oudakker@euronet.nl

Een andere toepassing is het integreren van deze methode in de dakpanproductie in de gestandaardiseerde afmetingen. Aldus wordt een modulair systeem verkregen, waarmee stapsgewijs bestaande daken aangepast kunnen worden en dat een individueel groeipad biedt door de uitbreiding met extra dakpannen. De oorspronkelijke ontwikkelaars denken ook aan toepassing in dwarsliggers voor spoorwegen, waarbij de stroom afgevoerd wordt via de rail. Een andere veelbelovende toepassing zouden de vluchtstroken van snelwegen kunnen zijn. Deze worden niet intensief bereden en daarvan zijn zeer grote oppervlakten beschikbaar.

Voor- en nadelen

Omdat het een toepassing van een afvalproduct betreft, verwacht men dat de prijs laag zal zijn als het systeem uitontwikkeld is. Het betreft een slijtvaste robuuste uitvoering, die in een grofstoffelijke omgeving toegepast kan worden en zich leent voor zeer grootschalige toepassing.

Het nadeel is dat het rendement in vergelijking met andere methoden van fotovoltaïsche omzetting gering is. Als de prijs per vierkante meter laag genoeg is, hoeft dat echter geen bezwaar te zijn.

3.2.2 HALFGELEIDER THERMO-ELEKTRISCHE ELEMENTEN VOOR OPWEKKING

*John C. Bass*⁶

Het thermo-elektrisch effect is ontdekt door de arts en wetenschapper Seebeck rond 1830. Deze techniek werd destijds benut als middel voor het meten van temperatuur. De lage thermische conversie-efficiëntie had tot gevolg dat deze techniek nauwelijks voor de elektriciteitsproductie of koeling gebruikt werd. Dit beeld veranderde snel toen de Russische wetenschapper Loffe rond 1950 opperde dat de conversie-efficiëntie significant kon verbeteren door halfgeleidermaterialen te gebruiken in plaats van de tot dan toe gebruikte metalen. Dit leidde tot een behoorlijke onderzoeksinspanning aan het eind van de jaren vijftig en het begin van de jaren zestig met als resultaat de ontwikkeling van legeringen, zoals bismuth-telluride, lood-telluride en silicium-germanium. Ieder van deze legeringen bezat een optimaal werkingsgebied: bismuth-telluride voldeed het beste voor lage temperaturen en koeltoepassingen, lood-telluride bij gematigde temperaturen en silicium-germanium bij hoge-temperatuurtoepassingen. De ontwikkelde halfgeleiderlegeringen konden gebruikt worden om warmte direct om te zetten in elektriciteit met een efficiency van 5 tot 10%, afhankelijk van de omstandigheden. Hoewel de conversie-efficiëntie van silicium-germanium laag was, werd dit materiaal gebruikt voor toepassingen in de ruimte, omdat het kon functioneren bij hoge temperaturen, resulterend in het hoogst haalbare

⁶ Hi-Z Technology Inc.,
7606 Miramar Road
Suite 7400
San Diego
CA 92126
USA
info@hi-z.com

specifieke vermogen (W/kg) dat nodig is voor gebruik in de ruimte. Ruimtesondes, zoals de Voyager, Viking en Galileo werden van elektriciteit voorzien door radio-isotope thermo-elektrische generators die gebruik maakten van silicium-germaniumlegeringen. Ook het commerciële gebruik van thermo-elektrische generators op aarde deed in deze periode zijn intrede.

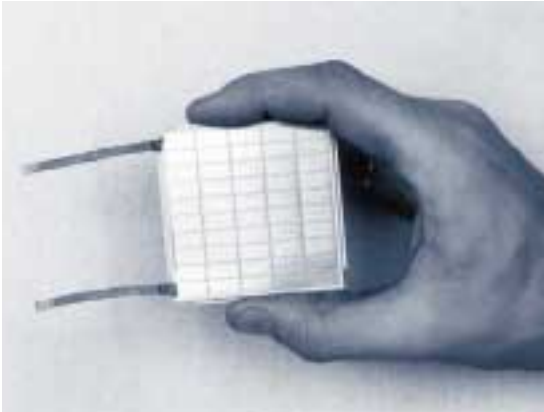


Fig. 3.2.3

[Links] Een modern thermo-elektrisch element met een vermogen van 16 Watt.



Fig. 3.2.4

[Rechts] Een 1.000 W thermo-elektrische generator op de uitlaatpijp van een truck.

In de jaren zeventig en tachtig werden slechts kleine verbeteringen in legeringen en prestaties bereikt. De introductie van de skuderiëten en de quantumputmaterialen door verschillende onderzoekers in de jaren negentig heeft een opleving in de thermo-elektriciteit teweeggebracht. De skuderiëten kunnen naar verwachting bij volledige ontwikkeling de conversie-efficiëntie verhogen van 7 naar 15%. De uitontwikkeling van de quantumputmaterialen ligt verder in de toekomst, maar zou kunnen leiden tot een thermische conversie-efficiëntie tussen 20 en 40%. Ook zouden deze materialen een C.O.P.⁷ voor koeling kunnen bereiken, die vergelijkbaar is met die van mechanische koeling.

De quantumputmaterialen verschillen in opbouw van de conventionele thermo-elektrische materialen, doordat zij bestaan uit extreem dunne elkaar afwisselende lagen van materialen met verschillende 'band gaps'. Een band gap kan gezien worden als een energiekloof op het grensvlak tussen twee materialen. Deze kloof veroorzaakt het meenemen of achterlaten van thermisch energie door de stroom die erdoorheen vloeit. De lagen hebben een dikte van enkele tienden nanometer (10^{-10} m). De films worden gemaakt door middel van elektro-nstraalepitaxie of vergelijkbare processen, en hebben een verbeterde mobiliteit van de elektronen, een betere Seebeck-coëfficiënt en een lagere thermische geleidbaarheid. Al deze veranderingen in eigenschappen zorgen samen voor een significante verbetering van de thermo-elektrische conversie-efficiëntie.

In het algemeen hebben de onderzoekers gezocht naar mogelijkheden voor het fabriceren van quantumputmaterialen in boron-carbidelegeringen en in de standaard thermo-elektrische materialen. Een interessante ontdekking was dat quantumputmaterialen van silicium-germanium zeer goed kunnen werken in

.....
7 Coefficient Of Performance, maat voor de efficiëntie van een koel- of verwarmingsinstallatie. Zie Deel 1, par. 2.5.2.

koeltoepassingen, maar niet – zoals verwacht werd – bij efficiënte hoge-temperatuur-opwekking van elektriciteit.

Boron-koolstoflegeringen, die geen rol spelen als conventioneel thermo-elektrisch materiaal lijken de basis te bieden voor de productie van een elektriciteitsproductiesysteem met hoge efficiëntie voor temperaturen tot 1.000 °C. Op dit moment kunnen deze legeringen echter alleen als p-type halfgeleider geproduceerd worden. Er wordt nog gezocht naar een goed hoge-temperatuur n-type quantumput-materiaal dat kan worden gebruikt in combinatie met de boron-koolstoflegering.

Een experimenteel filmpaar van quantumputmateriaal is inmiddels gemaakt en getest, maar op dit moment is er nog geen thermo-elektrisch element van dit materiaal operationeel. De verwachting is dat in de komende twee à drie jaar een dergelijk element gefabriceerd zal worden, wat een doorbraak zal betekenen op het gebied van de thermo-elektriciteit.

Bij verdere ontwikkeling van de quantumput thermo-elektriciteit zou deze techniek op basis van efficiëntie concurrerend kunnen zijn met andere momenteel beschikbare primaire elektriciteitsopwekkers. Tevens kunnen de thermo-elektrische elementen gebruikt worden in ‘bottoming cycles’ voor het omzetten van restwarmte van bestaande opwekkingssystemen naar elektriciteit. Ook is toepassing in zelfaangedreven huishoudelijke apparaten⁸, in zeer efficiënte koelkasten of in koelsystemen zonder bewegende delen mogelijk.

3.2.3 BRANDSTOFCELLEN

dr. H.J. Veringa⁹

Algemeen

Net als een batterij zet een brandstofcel chemische energie direct om in elektriciteit. Het verschil is dat in een batterij de chemische energie vooraf opgeslagen is, terwijl een brandstofcel pas werkt als de chemische energie uit een externe bron toegevoerd wordt.

De basisreactie voor de werking van een brandstofcel is de omgekeerde hydrolyse van water:



Om dit te bereiken bestaat een brandstofcel uit een anode, een elektrolyt en een kathode. Doorgaans worden deze afzonderlijke cellen gestapeld, zodat er tussen de anode van de ene cel en de kathode van de andere cel nog een zogenaamde separatorplaat nodig is. De namen voor de diverse typen cellen worden bepaald door het toegepaste elektrolytmateriaal. Zo hebben we de gesmolten carbonaatbrandstofcel (MCFC¹⁰) met een elektrolyt van gesmolten carbonaat,

.....
⁸ Bij Gastec wordt de toepassing van thermo-elektrische elementen in een CV-ketel onderzocht. De ketel kan dan de elektriciteit voor de ventilator en de pomp zelf opwekken.

⁹ ECN,
Postbus 1,
1755 ZG Petten,
veringa@ecn.nl

¹⁰ MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell; SOFC: Solid Oxide Fuel Cell; SPFC: Solid Polymer Fuel Cell (wordt ook wel PEM, Proton Exchange Membrane genoemd).

die is opgenomen in een poreuze keramische matrix. De vaste-stofbrandstofcel (SOFC) heeft ionengeleidend zirkoniumoxide als elektrolyt. De polymeerbrandstofcel (SPFC) heeft een protongeleidende polymeerelektrolyt. Daarnaast zijn er de fosforzure cellen (PAFC) en de alkalische cellen (AFC), die op dit moment minder in de belangstelling staan.

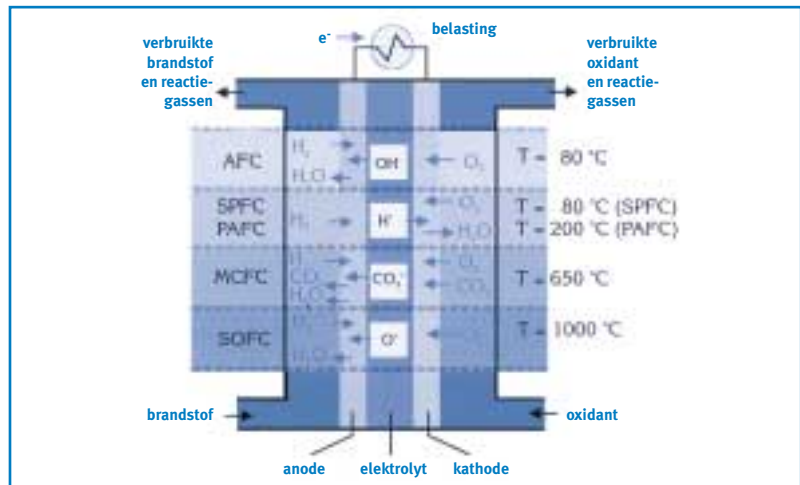
De separatorplaat zorgt voor het geleiden van de elektrische stroom van de ene cel naar de andere, en het toevoeren van waterstof aan de anode en zuurstof aan de kathode. Daarnaast functioneert deze plaat nog vaak als afdichting van de individuele cellen. Om deze reden is de separatorplaat voor wat betreft zijn materiaalkeuze en vormgeving een van de meest kritieke onderdelen van een celstapel (stack).

De katalytische oxidatie van waterstof aan de anode en de reductie van zuurstof aan de kathode veroorzaken een potentiaalverschil tussen deze elektroden. Dit potentiaalverschil kan gebruikt worden in een extern circuit, als een isolerende laag elektrolyt tussen anode en kathode alleen het transport van ionen en lading toestaat. Het resultaat van de reactie is dan water en elektriciteit, die vrijkomen uit de chemische energie. Voor het elektrolytische proces dient dus steeds lading overgedragen te worden van en naar de ladingsdrager in het elektrolyt en moet het aldus gevormde ion zich door diffusie door het elektrolyt kunnen voortbewegen. Zowel de ladingsoverdracht als de diffusie door het elektrolyt zijn processen met kinetische beperkingen, wat aanleiding geeft tot het vormen van inwendige potentiaalverschillen (polarisatie) en dus het maximale stroomvoerende vermogen van de cel beperkt. Daarnaast treden nog ohmse verliezen op door de inwendige weerstand van de cel en wordt derhalve een deel van de energie in de brandstoffen omgezet in warmte.

In principe bestaan brandstofcellen uit vijf subsystemen: de brandstofprocessor, de brandstofcel zelf, een koelsysteem, een elektrische vermogensomzetter

Fig. 3.2.5

Soorten brandstofcellen met de bijbehorende brandstoffen, het ionen-transport en de werkingstemperatuur. Naar: ECN Fuel Cells.



en een regel- en controlesysteem dat de gehele installatie bestuurt. Een vereenvoudiging is mogelijk als bijvoorbeeld waterstof als brandstof beschikbaar is of in de brandstofcel zelf gegenereerd kan worden. Ook het direct gebruiken van gelijkstroom (DC) maakt een vereenvoudiging mogelijk.

De gesmolten carbonaatbrandstofcel (MCFC)

In de MCFC zijn de elektroden gebaseerd op nikkel en bestaat het elektrolyt meestal uit een mengsel van lithium en kaliumcarbonaat. Dit gesmolten zout wordt door capillaire krachten in een poreuze 'tegel' van lithiaaluminaat vastgehouden. De bedrijfstemperatuur van circa 650 °C is een temperatuur, die overeenkomt met de temperatuur die nodig is voor het omzetten van aardgas in H₂. Dit wil zeggen dat aardgas in de cel omgezet kan worden.

De totale elektrische capaciteit van een celstapeling is bepaald door het stroomvoerende vermogen van een enkele cel. De spanning wordt bepaald door de celspanning van een enkele cel vermenigvuldigd met het aantal cellen in een stapeling. Daarnaast kunnen naar wens nog celstapelings in serie of parallel worden geschakeld, zowel wat betreft de stroomvoering als de toevoer van gasen. Met dit laatste is het mogelijk om het gebruik van brandstof van een cellensysteem in zijn specifieke toepassing te optimaliseren.

De voornaamste potentiële markt voor MCFC-systemen wordt gezien in warmte/kracht (w/k) -toepassingen waarbij hoogwaardige warmte wordt geproduceerd. De vermogens lopen van 0,2 tot 20 MW. Bij een gecombineerde w/k-toepassing is een totale efficiëntie van 90% mogelijk, waarbij meer dan 50% van de opgewekte energie elektrisch is.

De specifieke voordelen van dit type brandstofcel ten opzichte van conventionele w/k-installaties is dat deze cel goede deellastrendementen heeft en dat systemen modulair kunnen worden opgebouwd. Dat laatste wil zeggen dat een celsysteem kan meegroeien met een toenemende behoefte aan vermogen zonder dat dit meer hoeft te kosten dan de aanschafkosten van de uitbreiding.

De vaste-stofbrandstofcel (SOFC)

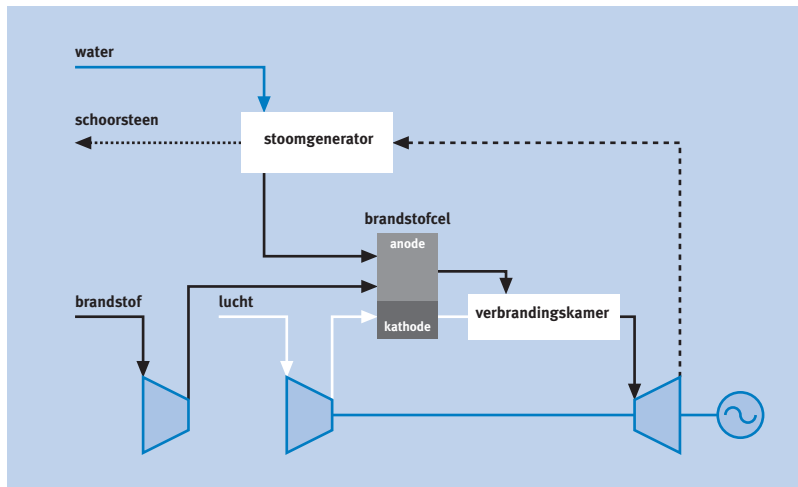
In de SOFC bestaat het elektrolyt uit een vaste-stofoxide. Op dit moment is het beste beschikbare materiaal zirkoonoxide (ZrO₂), gestabiliseerd met yttriumoxide (Y₂O₃). De kathode is vervaardigd uit perovskiet (La(Sr)MnO₃), de anode uit cermet, een mengsel van nikkel (Ni) en yttrium-gestabiliseerd zirkoniumoxide. Bij het samenvoegen van de cellen tot een stapel kan de bipolaire separatorplaat, het verbindende element, bestaan uit keramisch materiaal (gedoteerd LaCrO₃) of uit metaal, afhankelijk van het celtype.

Drie typen cellen worden wereldwijd onderzocht: het buisvormige, het monolithische en het dunne-plaatconcept. In Nederland houdt ECN zich bezig met het dunne-plaatconcept. De SOFC werkt bij hoge temperaturen rond de 1.000 °C.

In de afgelopen tien jaar is de interesse in hoge-temperatuurbrandstofcellen sterk toegenomen, omdat zij een aantrekkelijk middel zijn voor het genereren van elektrische energie (en warmte) uit een breed scala aan brandstoffen. Marktstudies voorspellen 100 MW geïnstalleerd vermogen aan het begin van de 21e eeuw, die vooral zullen bestaan uit 200 kW SOFC w/k-eenheden. Na 2020 verwacht men een markt voor SOFC-centrales op megawatt-schaal. Gecombineerde warmte- en elektriciteitsopwekking kan een rendement bereiken van 90% of meer. Een voor de opwekking van elektriciteit geoptimaliseerde brandstofcel met een geïntegreerde gasturbine kan een elektrisch rendement van meer dan 70% bereiken.

Fig. 3.2.6

Werking van de brandstofcel met een geïntegreerde gasturbine.



De elektrische eigenschappen van een SOFC wijken niet af van die van een gesmolten carbonaatbrandstofcelsysteem. Wel is het stroomvoerende vermogen in de elektrolyt per eenheid van oppervlakte hoger, zodat compactere systemen tot de mogelijkheden behoren. Door de hogere temperaturen kunnen ook de polarisatie-effecten minder zijn.

De polymeerbrandstofcel (SPFC)

In de SPFC bestaat het elektrolyt uit een protonengeleidend polymeer dat oorspronkelijk ontwikkeld was voor de chloorzoutindustrie. In natte toestand is het membraan in staat positief geladen ionen zoals Na^+ of H^+ te transporteren. De elektroden bestaan uit met teflon geïmpregneerd weefsel van koolstofvezels of uit grafietpapier bedekt met een op platina gebaseerd katalysatorlaagje. De werkt temperatuur ligt rond $80\text{ }^\circ\text{C}$.

Een enkele cel produceert $0,5$ tot 1 A/cm^2 bij een potentiaal van $0,5$ tot $0,7\text{ V}$. Om hogere voltages te bereiken, worden cellen in serie geplaatst met bipolaire separatorplaten van grafiet of metaal. De elektrische capaciteit van een SPFC is de hoogste van de hier behandelde typen. Daardoor is een zeer compact sys-

teem mogelijk. Ook de lage werkingstemperatuur is een voordeel. Een andere specifieke eigenschap is dat de cel relatief ongevoelig is voor variaties in belasting. Een nadeel van de lagere temperatuur is dat in de cel geen warmte van voldoende hoge temperatuur geproduceerd wordt om reforming van conventionele brandstoffen naar H_2 mogelijk te maken.

Om deze reden zijn extra maatregelen vereist om toch waterstof uit een koolwaterstof te bereiden. Dit laatste gaat uiteraard ten koste van het rendement van het systeem.

De SPFC heeft een behoorlijk marktpotentieel voor mobiele toepassingen, zoals verplaatsbare generatoren en elektrisch vervoer. Een andere veelbelovende toepassing is de kleine (stationaire) gecombineerde warmte- en elektriciteitsopwekking. De gebruikte materialen staan goedkope massaproductie toe. Reeds in 1995 werd gestart met het testen van voertuigen met SPFC-cellen. Voor een uitgebreide behandeling van de mobiele toepassingen van de SPFC-cel wordt verwezen naar Deel 1 (par. 4.5.7).

De SPFC-cel werkt het best met relatief zuivere H_2 . Dat is vaak een reden om deze brandstofcel te beschouwen als een technologie voor de verre toekomst, waarin waterstof een belangrijke rol zou kunnen spelen. Het verwerken, distribueren en opslaan van waterstof vraagt nu nog ingewikkelde en relatief dure technische oplossingen. Een goed alternatief is het ter plaatse produceren van waterstof door de conversie van koolwaterstoffen of alcoholen. Voor stationaire toepassingen ligt aardgas voor de hand, terwijl methanol erg aantrekkelijk is voor mobiele applicaties. Methanol kan tegen redelijke kosten in grote hoeveelheden geproduceerd worden uit fossiele bronnen, maar ook uit biomassa. Omdat het een vloeistof is, kan methanol op een vergelijkbare manier verwerkt, gedistribueerd en opgeslagen worden als benzine of diesel.

Tabel 3.2.1

Rendement van brandstofproductie en het omzettingsrendement naar waterstofproductie van verschillende basisbrandstoffen voor mobiel gebruik. Bron: [Buys, 1998].

	Omzettingsrendement	
	brandstofproductie	waterstofproductie
waterstof	63 - 72%	–
methanol	67 - 71%	78 - 85%
benzine	85 - 90%	75 - 83%

3.3 DYNAMISCHE OMZETTERS

3.3.1 INNOVATIEVE COMBINATIES VAN GENERATOR EN OMZETTER NIEUWE ONTWIKKELINGEN BIJ WINDTURBINES

*ir. S.W.H. de Haan*¹¹

Constant versus variabel toerental

Van de momenteel geïnstalleerde windturbines heeft meer dan 99% een asynchrone machine als generator, die direct met het wisselspanningsnet gekoppeld is. Bij deze turbines wordt het toerental van de generator (meestal ruim 1.500 rpm) vooral bepaald door de netfrequentie en is het toerental vrijwel onafhankelijk van de windsnelheid. Om 'ventilatorbedrijf' te voorkomen wordt de generator pas boven een bepaalde windsnelheid met het net gekoppeld.

Van de grote turbines die momenteel worden ontwikkeld is de helft om een aantal redenen van het variabel-toerentype. Ten eerste is bij variabel-toerenbedrijf de energieopbrengst op jaarbasis ca. 10% hoger dan bij constant-toerenbedrijf. Dit komt omdat de turbinesnelheid optimaal afgestemd kan worden op de windsnelheid. Een tweede belangrijke reden ligt in de beperking van het uitgestraalde geluid: bij energiewinning bij lage windsnelheden is het turbinetoerental lager, waardoor ook de geluidsproductie van de rotorbladen lager is; bij hoge windsnelheden wordt het turbinegeluid overstemd door het gebulder van de wind. Vooral in de buurt van bebouwing is dit een belangrijk punt. Het wellicht belangrijkste voordeel van variabel-toerenbedrijf is dat dit minder vermoeiingsbelasting op de mechanische constructie oplevert dan constant toerenbedrijf. Een hiermee samenhangend voordeel is dat het elektrisch vermogen minder sterk fluctueert dan bij constant-toerental, omdat bij een variërend windaanbod een deel van het windvermogen wordt geaccumuleerd in de vorm van rotatie-energie.

Een nadeel van variabel-toerentalsystemen is de noodzaak van een vermogens-elektronische interface, die de generatorspanning aanpast aan de netspanning. Door de daling van de prijzen van vermogenselektronica in de laatste 10 jaar (met een factor 5 tot 10) is dit belangrijke obstakel grotendeels weggenomen. Dit is dan ook een belangrijke reden waarom variabel-toerensystemen in toenemende mate worden toegepast.

In variabel-toerentalwindturbines worden zowel synchrone als asynchrone generatoren toegepast.

Vermogenselektronica

Om variabel-toerenbedrijf mogelijk te maken, bevindt zich tussen de generator en het net een vermogenselektronische omzetter, die de frequentie en de spanning van de generator aanpast aan die van het net. De omzeters in de oudere variabel-toerentalwindturbines zijn op thyristortechnologie gebaseerde syste-

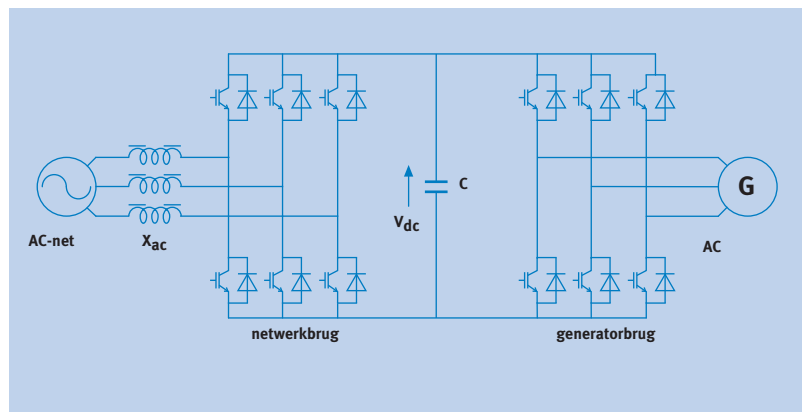
¹¹ TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek,
Vakgroep VEEM,
Postbus 5031
2600 GA Delft
S.W.H.deHaan@ET.TUdelft.NL

men met een tussenstap naar gelijkstroom. Deze omzetter worden gekenmerkt door het feit dat ze vermogen leveren bij een slechte arbeidsfactor (veel blindvermogen)¹² en een sterk harmonisch vervormde netstroom leveren. In de moderne variabel-toerentalwindturbines worden vrijwel uitsluitend omzetter toegepast, die gebaseerd zijn op IGBT-technologie (Insulated Gate Bipolar Transistor) met een gelijkspanningstussenkring. De IGBT-omzetter hebben betere eigenschappen met betrekking tot de arbeidsfactor en de harmonische vervorming. Bovendien bestaat in principe de mogelijkheid om het afgegeven blindvermogen te regelen.

De momenteel toegepaste omzetter¹³ bestaan in de regel uit een cascade van een gelijkrichter, die de generatorspanning omzet naar een gelijkspanning (tussen 500 en 1.500 V), en een spanningsbronomzetter, die de gelijkspanning weer omzet naar een wisselspanning, die compatibel is met de netspanning. De opbouw wordt aangegeven in fig. 3.3.1.

Fig. 3.3.1

Vier-kwadrantenomzetter voor een variabel-toerentalwindturbine [Jones, 1997]. G = generator.



Wanneer een diodegelijkrichter wordt toegepast, kan geen asynchrone machine worden gebruikt. Sommige fabrikanten passen tegenwoordig zogenaamde PBM-gelijkrichters (PulsBreedte geModuleerde gelijkrichter) toe, waardoor de goedkopere en robuustere asynchrone machines kunnen worden toegepast. De omzetter die momenteel worden toegepast vinden hun oorsprong in de regelbare aandrijftechniek en zijn nog niet goed aangepast aan specifieke toepassing voor windenergie. Zowel wat betreft uitvoering als vermogensregeling is er nog veel ruimte voor verbetering.

Versnellingskast en generator

Tussen de rotor van de turbine en de generator bevindt zich een versnellingskast om de toerentallen op elkaar af te stemmen. In constant-toerenturbines worden als regel standaard asynchrone machines toegepast. In variabel-toerentalturbines vindt men zowel asynchrone als synchrone generatoren, afhankelijk van het soort gelijkrichter dat wordt toegepast. Daarnaast komt men sporadisch

¹² Meer over blindvermogen in Deel 1, par. 2.6.1.

¹³ In par. 2.5 wordt dieper ingegaan op vermogenselektronische omzetter.

bijzondere systemen tegen zoals de oversynchrone cascade, die veelal toegepast worden om te besparen op de kosten van vermogenselektronica. De versnellingskast is een kostbare en onderhoudsgevoelige component, die regelmatig aanleiding geeft tot problemen. Om deze reden zijn een aantal windturbinefabrikanten ertoe overgegaan om zogenaamde direct gekoppelde ('direct drive') generatoren toe te passen. Dit zijn generatoren, waarvan de rotor direct gekoppeld is aan de turbine-as. Omdat deze generator een groot koppel moet verwerken, is de diameter groot (5 m bij een lengte van ca. 0,3 m voor een generator van 500 kW). De meeste direct gekoppelde generatoren die momenteel worden toegepast zijn synchrone generatoren. Daarnaast wordt door een aantal instituten onderzoek gedaan naar direct gekoppelde generatoren met permanente-magneetbekrachtiging. Naast een hoger rendement hebben deze generatoren het voordeel dat de afmetingen kleiner kunnen zijn dan die van de synchrone direct gekoppelde generatoren. Dit voordeel wordt belangrijker, naarmate het nominaal vermogen van windturbines groter wordt.

Grotere vermogens

De belangstelling voor offshore-windparken geeft een extra impuls aan de reeds bestaande trend van het vergroten van het vermogen per windturbine. Windturbines van 1 MW zijn reeds verkrijgbaar, en er wordt gewerkt aan machines met nog grotere vermogens. Voor offshore is het in 'vaste' opstellingen belangrijk om per pijler een zo groot mogelijk vermogen op te wekken. Daarmee worden de kosten voor de fundering en de pijler naar verhouding kleiner.

Vermogensregeling

In verband met de energieverdeling over de verschillende windsnelheidsklassen wordt het elektrisch systeem van een windturbine altijd voor een kleiner vermogen gedimensioneerd dan de windrotor van die turbine zou kunnen leveren. Bij hoge windsnelheden moet daarom het vermogen dat aan de turbine-as beschikbaar komt langs aerodynamische weg begrensd worden. De belangrijkste toegepaste methoden voor vermogensbegrenzing zijn de 'stall' (of overtrek)-regeling en de bladhoekregeling. Bij stall-regeling wordt gebruik gemaakt van de eigenschap dat boven een bepaalde verhouding tussen wind- en rotorsnelheid de luchtstroming los laat van het turbineblad, waardoor dit blad aerodynamisch veel minder efficiënt wordt, waardoor het asvermogen afneemt. Constant-toerentalwindturbines maken meestal gebruik van deze inherent robuuste regelmethode. Bij variabel-toerentalwindturbines wordt als regel bladhoekregeling toegepast; boven een bepaald toerental wordt de bladhoek zodanig aangepast dat deze als het ware minder wind vangt.

Elektrische infrastructuur in (off shore)-windparken

Een belangrijkste aspect van een off-shore-windpark is dat afhankelijk van de afstand tot de kust de elektrische energie over een min of meer grote afstand getransporteerd moet worden. Energietransport via een onderzeese kabel ligt hierbij voor de hand.

Naast de traditionele oplossingen, zoals direct aan het net gekoppelde asynchrone machines kunnen een aantal concepten bedacht worden waarbij gelijkstroom wordt toegepast.

Bij toepassing van onderzeese wisselspanningskabels kan namelijk – afhankelijk van de lengte – de spanningsstabiliteit onvoldoende zijn ten gevolge van het door de kabel gegenereerde blindvermogen. Bij energietransport via een gelijkstroomkabel treedt dit probleem niet op. Toepassing van DC-transport moet daarom overwogen worden. Omdat vooral bij variabel-toerentalmachines over het algemeen al gebruikt wordt gemaakt van een (interne) gelijkstroomverbinding, ligt het voor de hand om bij het inventariseren van concepten na te gaan of de gelijkstroomverbindingen niet gecombineerd kunnen worden.

GASTURBINE MET SNELROTTERENDE GENERATOR

*dr.ir. L.J.J. Offringa*¹⁴

De gasturbine met haar eenvoudige robuuste constructie, geringe afmetingen, laag gewicht, en een minimum aan bewegende delen is een aantrekkelijke optie voor de opwekking van elektrische energie. Dat geldt ook voor kleinere vermogens en voor decentrale energieopwekking. Ook bij de automobiellindustrie bestaat belangstelling voor een hybride aandrijving, bestaande uit een kleine gasturbine en een snelroterende generator. Er bestaan al enkele rijdende prototypen, die zijn uitgerust met een dergelijk aandrijfconcept.

De moderne gasturbine beschikt over een hoog rendement en een laag NO_x-gehalte in de uitlaatgassen. Turbines in de vermogensklasse van 1.000 tot 2.000 kW zijn behalve voor kleine decentrale opwekking ook inzetbaar voor de opwekking van grotere vermogens via verschillende, parallel werkende kleine eenheden. Ze zijn ook geschikt voor gebruik aan boord van schepen en andere mobiele toepassingen. De snelroterende generator met vermogenselektronische frequentieomzetter geeft een meerwaarde aan de gasturbine in de genoemde vermogensklasse. Hierbij zijn het geringe gewicht en de flexibiliteit van de snelroterende generator van betekenis. De kostprijs is nauwelijks hoger dan voor gebruikelijke systemen, terwijl de verhouding tussen prestatie en prijs minstens gelijk of beter is.

De gasturbines voor vermogens in de orde van 1.000 tot 2.000 kW werken over het algemeen bij een relatief hoog toerental van rond 20.000 omw. per minuut aan de uitgaande as. Deze turbines werden tot op heden uitgevoerd met een noodzakelijke tandwielreductie om het hoge toerental van de turbine aan te

.....
¹⁴ TU Eindhoven,
Postbus 513
5600 MB Eindhoven
L.J.J.Offringa@ele.tue.nl

passen aan de gebruikelijke 1.500 of 3.000 omw. per minuut van de elektrische generator. De conventionele generator, samen met de nodige tandwielreductie, heeft een relatief grote massa en volume in vergelijking met de kleine compacte gasturbine, terwijl de tandwielreductie ook bijdraagt aan het totale verlies. Behalve het rendement is voor veel toepassingen ook het gewicht en de compactheid van de totale combinatie van gasturbine en generator van belang.

Snelroterende elektrische generator

Een nieuwe ontwikkeling vormt de snelroterende elektrische generator [Offringa, 1996]. Deze kan direct met de uitgaande as van de turbine worden gekoppeld zonder tandwielreductie of met slechts een eenvoudige tandwielreductie. Een dergelijke generator vormt een optimale combinatie met een compacte sneldraaiende gasturbine met hoog rendement. De kleine snelroterende elektrische generator heeft ook een hoog rendement en een geringe massa, en wordt op eenvoudige wijze gekoppeld met de gasturbine, hetgeen resulteert in een compacte combinatie met een hoog totaalrendement.

De vernieuwing in het ontwerp van de snelroterende elektrische generator is mogelijk door het beschikbaar komen van nieuwe materialen, zoals permanentmagneetmateriaal. Dat bestaat uit legeringen met zogenaamde zeldzame-aarde-elementen (neodymium, samarium) met een hoge energiedichtheid, en koolstofvezelconstructiedelen, die bestand zijn tegen grote mechanische spanningen. De snelroterende elektrische generator is voorzien van deze permanente magneten, zodat er geen bekrachtigingsverliezen zijn. Hiermee is een compact ontwerp met hoog rendement te realiseren. De rotor van de generator is voorzien van koolstofvezelmateriaal voor het opvangen van grote centrifugaalkrachten bij hoge toerentallen.

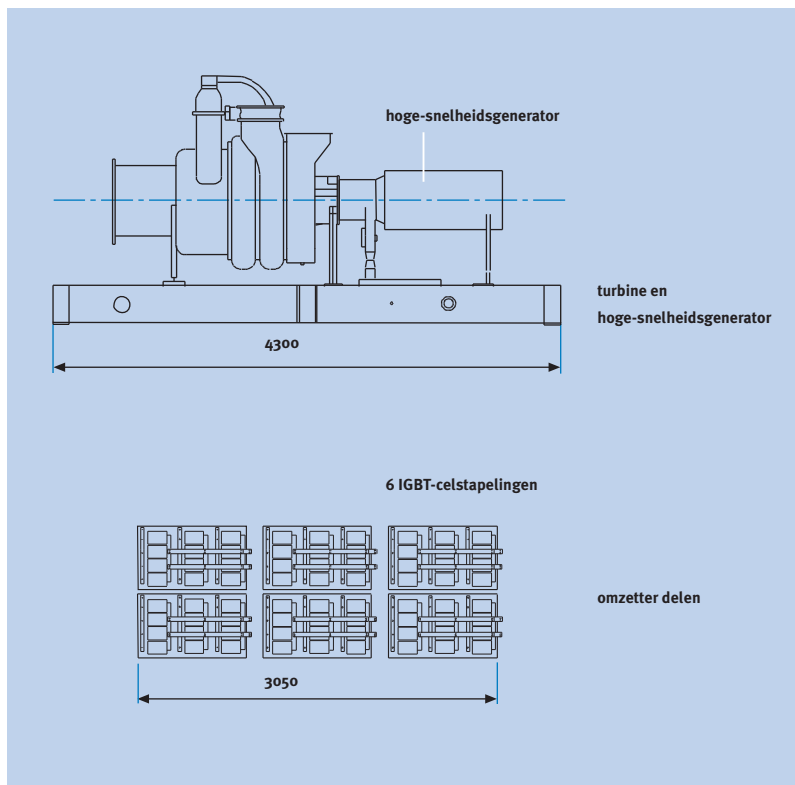
In het ontwerp van de snelroterende elektrische generator wordt bijzondere aandacht besteed aan de verliezen [Veen, 1997]. Het ontwerpen met een zo hoog mogelijk rendement is een geëigende ontwerpstrategie, maar ondanks de reeds geringe verliezen is de afvoer van deze verliezen toch nog bijzonder belangrijk voor de compacte snelroterende generatorconstructie. Door speciale constructietechnieken en het gebruik van moderne permanente-magneetmaterialen en koolstofvezelconstructiedelen kunnen de uiterste mogelijkheden in het ontwerp worden benut.

Omzetter

Een snelroterende generator genereert in verband met het hoge toerental ook een frequentie (600 Hz), die hoger is dan de gebruikelijke 50 Hz of 60 Hz van het elektriciteitsnet. Deze frequentie kan zeer efficiënt worden omgezet met behulp van een moderne pulsgemoduleerde vermogenselektronische omzetter. Een dergelijke omzetter heeft het bijzondere voordeel dat het synchroniseren van

Fig. 3.3.2

Voornaamste onderdelen van de snelroterende elektrische generator. Boven is de turbine-generatorcombinatie te zien. Daaronder staan zes IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)-celstapelingen voor de omzetting naar de netfrequentie.



het gasturbinetoerental met het elektriciteitsnet niet meer nodig is, terwijl de uitvoering van de generator onafhankelijk is van een gegeven netfrequentie. De goede regelbaarheid van een dergelijke omzetter – en daarmee van de complete combinatie van gasturbine en generator – levert nog een extra rendementsvoordeel op.

De huidige omzetter in het vermogensbereik van 1.000 tot 2.000 kW is uitgerust met moderne IGBT-halfgeleiders, waardoor een hoog rendement kan worden gerealiseerd. Hij is speciaal ontworpen om te worden gekoppeld aan een bestaand elektriciteitsnet. De installatie kan ook werken in volledig eilandbedrijf. Een bijzondere besturings- en regelstrategie, gerealiseerd met een digitale signaalprocessor, kan ervoor zorgen dat een eventuele vervorming van de netspanning tot het minimum wordt beperkt.

3.3.2 NIEUWE MOTOREN VOOR ELEKTRICITEITSOPWEKKING

STIRLINGOPWEKKERS

*dr. H.J. Veringa*¹⁵

Historie

De Stirling-machine is uitgevonden door Robert Stirling, een dominee in de Kerk van Schotland-Galston in 1815. Robert Stirling en zijn broer James, die een vooraanstaand ingenieur was, werkten al langere tijd aan regeneratieve krachtbronnen, vooral voor de mijnbouw. Zelf hebben zij enkele exemplaren van wat zij de 'hete-lucht' motor noemden gebouwd, maar het is ze niet gelukt om deze ook op commerciële basis te verkopen. In de 19e eeuw zijn er daarentegen zeer veel hete-luchtmachines gebouwd en verkocht. Het waren zeer grote en zware machines waarvan het vermogen meestal niet boven 4 kW uitkwam. De grootste was ongetwijfeld de machine van Ericsson in 1850, die bestond uit 4 cilinders van 4,5 m in diameter en met een slag van 1,8 m. Deze machine had een ontwerpvermogen van 300 kW, maar een rendement dat een factor twee hoger was dan de toenmalige stoommachines. Deze machine produceerde uiteindelijk 224 kW bij 9 omwentelingen per minuut en dreef een schip aan van 2.200 ton bij een snelheid van 8 knopen. Helaas is deze boot gekapseisd op haar eerste tocht in de haven van New York. De vroege machines werden gebruikt voor een veelheid van toepassingen, zoals het aandrijven van pompen en machines in werkplaatsen. Ondanks hun grootte en relatief laag vermogen, waren ze wel een stuk veiliger dan de stoommachines.

In de Eerste Wereldoorlog is er een einde gekomen aan de verdere ontwikkeling van deze machines door alternatieven, die goedkoper en compacter waren. Niettemin is de toepassing van Stirling-machines doorgegaan tot 1950 om bijvoorbeeld ventilatoren voor koeling van ruimten aan te drijven. Tot op de dag van vandaag worden ze voor deze toepassing nog aangetroffen.

Een revitalisatie van het concept vond plaats toen Philips zich ervoor ging interesseren. Deze ontwikkeling heeft veel toepassingsmogelijkheden opgeleverd, zoals mechanische aandrijving van auto's en boten, maar ook koeling, zelfs tot cryogene temperaturen.

In 1948 had Philips een V4 machine van 194 kW die is gelicenseerd aan onder andere General Motors. Deze licentie liep af in 1970. Uiteindelijk is ook deze ontwikkeling tot stilstand gekomen.

Technische aspecten

Op het punt van de ontwikkeling van machines is de belangstelling voor Stirling-machines altijd blijven bestaan. Dit is een gevolg van het feit dat het thermodynamisch rendement van de Stirling-cyclus gelijk is aan het Carnot¹⁶-rendement en het dus mogelijk is om een machine met een zeer hoog rendement te maken. Daarnaast is een externe warmtebron vereist, zodat alle warmte leverende proces-

¹⁵ ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
veringa@ecn.nl

¹⁶ Het Carnot-rendement is het maximale rendement dat met een compressie- en expansiecyclus te behalen is.

sen, die een voldoende hoge temperatuur geven in principe mogelijk zijn. Een zeer groot assortiment van brandstoffen kan worden toegepast, inclusief zonlicht. Het grote probleem van de Stirling-motor is dat warmte via geleiding door de cilinderkop naar het werkmedium moet worden overgedragen. Daarnaast moet de warmte door het werkgas worden opgenomen en vereffend. Dit zijn processen die relatief traag verlopen. Het feit dat warmte door de cilinderkop wordt overgedragen houdt in dat de warmtelevering toeneemt met de tweede macht van de grootte van de machine, terwijl het vermogen met de derde macht toeneemt. Bij een bepaalde grootte is dus de warmteoverdracht niet meer voldoende om het werkgas te verhitten en loopt het vermogen dus drastisch terug. Een methode om dit probleem enigszins te reduceren is een werkgas te nemen dat snelle warmte-uitwisseling mogelijk maakt. Dit is dus een gas met een zo laag mogelijke molecuulmassa, zoals waterstof of helium. Daarnaast is drukverhoging belangrijk, niet alleen voor het vermogen, maar ook voor de warmteoverdracht. Met het op druk brengen van het gas en het feit dat het gas een lage molecuulmassa moet hebben, ontstaat echter het probleem van het weglekken van gas. Waterstof kan door metalen heen weglekken, maar als het gas op druk gebracht is, kan het ook langs de asdoorvoeren verdwijnen. Deze problemen hebben eigenlijk de verdere ontwikkeling van de Stirling-machine verhinderd.

Actuele ontwikkelingen

De laatste jaren is er weer belangstelling voor de Stirling-technologie. Dit is een gevolg van de voortschrijdende miniaturisering van warmte/kracht¹⁷-koppeling en het feit dat de vraag naar mechanisch vermogen bij voorkeur door elektriciteit voorzien wordt. Ook biedt de Stirling-technologie goede mogelijkheden om op een goedkope wijze elektriciteit uit (direct) zonlicht te maken. De warmte voor het Stirling-proces wordt dan via spiegelconcentrators naar de motor gebracht.

Fig. 3.3.3

Stirling-generator op zonnewarmte. De makers van het systeem verwachten een prijs van 9 dollarcent per kWh. Het omzetterrendement is 24% en de getoonde machine heeft een vermogen van 25 kW [Stine, 1997].



¹⁷ Warmte/kracht-koppeling, gecombineerde elektriciteits- en warmteopwekking.

Met de eenheidsgrootte waarnaar op dit moment vraag is, komen we in het gebied waar Stirling goed toepasbaar is. De beschikbaarheid van hoge remanentie-magnetische materialen¹⁸ maakt dat de generator in de behuizing van de machine zelf kan worden opgenomen. We zien nu ook dat op verschillende plaatsen in de wereld concepten in ontwikkeling zijn met geïntegreerde elektriciteitsopwekking, die alle in de vermogensklasse van 100 W tot 5 kW liggen. Het werkgas is in de meeste gevallen helium en de druk bedraagt tussen 40 en 100 bar. Aan twee basisconcepten wordt nu gewerkt. De kinematische machine en de vrije zuigermachine.

Kinematische machine

Hier zitten de verplaatser en de zuiger star op de krukas. Hiermee wordt de beweging van de verplaatser gedwongen een optimaal faseverschil te hebben met de zuiger (d.w.z. 90°). Of dit faseverschil positief of negatief is, hangt af van de toepassing als krachtopwekking, koeling, of verwarming (warmtepomp). Door deze fixering van het faseverschil op 90° is het rendement optimaal. Dit is nog niet het Carnot-rendement, omdat er door de in benadering sinusvormige verplaatsing in de tijd geen ideale T-S-cyclus doorlopen wordt. Uiteraard zijn er ook parasitaire verliezen en werkt de regenerator niet altijd ideaal, zodat ook om andere redenen het Carnot-rendement niet gehaald kan worden.

Vrije-zuigermachine

Het ander concept is de vrije-zuiger Stirling-machine. Hier zijn zuiger en verplaatser opgehangen in een veersysteem dat tevens zorgdraagt voor positionering in de cilinder. De juiste keuze van de veerconstante in relatie tot de massa van de zuiger, respectievelijk verplaatser bepaalt de frequentie van de vrije oscillatie van deze componenten. Het faseverschil van de oscillatie wordt vastgelegd door een juiste balancering van de gasstromen in de machine. In de praktijk is gebleken dat zo een faseverschil van ongeveer 75° mogelijk is. Hiermee ontstaat een extra verliesfactor ten opzichte van de kinematische machine, maar daar staat tegenover dat het aantal bewegende delen is beperkt tot twee en dat een frequentie kan worden gekozen, die gelijk is aan die van het net. Door de juiste balancering met het net kan deze machine vermogen leveren aan of opnemen uit het net.

Bij zowel de kinematische machine als de vrije-zuigermachine treedt warmte in bij een temperatuur van 650°C tot 700°C en wordt aan de koude kant warmte op een lager temperatuurniveau geleverd. Deze warmte is zeer bruikbaar voor ruimteverwarming. Daarnaast produceert de machine direct elektrisch vermogen. Het deellastrendement van de Stirling-motor is zeer goed, maar het zodanig regelen van de machine dat deze het gewenste deellastvermogen levert, is lastiger. Dit is weer een gevolg van het feit dat warmteoverdracht naar het werkmEDIUM op basis van geleiding gebeurt.

.....
¹⁸ Zie par. 2.4, Permanente magneten en magneetmaterialen

Toepassing van Stirling-motoren op het niveau van 100 tot 5.000 W zal een elektrisch rendement tussen de 15 en 25% opleveren. De inzetbaarheid is dus het grootst in een omgeving waar de warmtevraag overheerst.

Verder is het toepassen van de Stirling-technologie aantrekkelijk voor koeling en als warmtepomp. Voor deze toepassing is het een voordeel dat de prestaties van de machine vlakker verlopen in het verwarmingstemperatuurgebied met de bijbehorende temperatuurverhoging dan in een condensatieverdampingsmachine. Een probleem voor de introductie is dat deze laatste machine al tegen lage kosten en in zeer grote aantallen geproduceerd wordt voor gebruik in koelkasten en dergelijke.

Werkingsprincipe

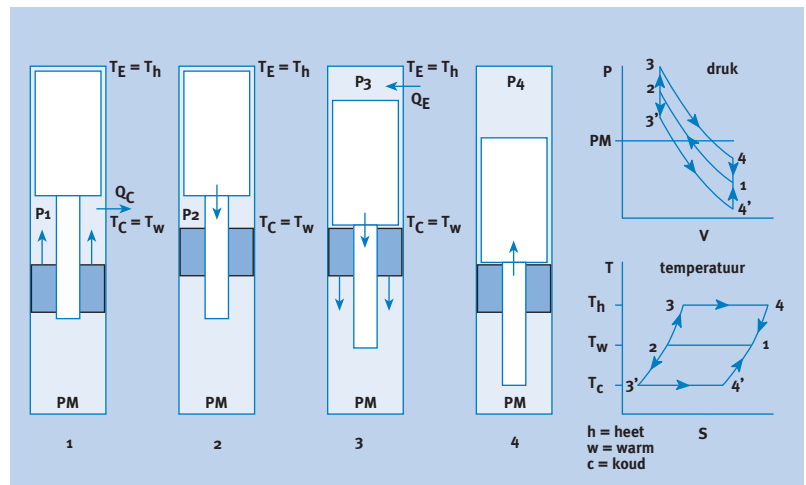
Fig. 3.3.4 toont het principe van de Stirling-cyclus. In positie 1 begint de zuiger zich naar de verplaatser te bewegen, die zich aan de hete kant in de cilinder bevindt. Er is hier sprake van isotherme compressie: de temperatuur van het werkgas blijft constant doordat warmte wordt afgegeven.

Als nu de zuiger zich in de hoogste positie bevindt, gaat de verplaatser omlaag en koud gas wordt in de warme ruimte gebracht. De inrichting is zodanig dat het gas hierbij door de regenerator stroomt en hierbij reeds een deel van de warmte opneemt. In situatie 2 wordt nu het gas verwarmd en loopt de druk op bij constant volume. Er wordt dus warmte bij hoge temperatuur opgenomen. In de volgende stap expandeert het gas en drijft het de zuiger naar beneden. In deze stap wordt de arbeid geleverd en bewegen zuiger en verplaatser zich gelijktijdig naar beneden.

In de volgende fase wordt de verplaatser omhoog bewogen en heet gas verplaatst zich via de regenerator naar beneden. In deze regenerator wordt nu de restwarmte opgenomen die in stap 2 weer wordt afgegeven.

Fig. 3.3.4

De Stirling-cyclus. Stappen 1, 2, 3, 4 horen bij het opwekken van mechanisch vermogen en 1, 2, 3, 4 bij koeling. De posities van zuiger en verplaatser corresponderen met de posities in de diagrammen. In dit geval loopt de staf waarop de verplaatser is gemonteerd door de zuiger.



In fig. 3.3.4 is niet aangegeven hoe zuiger en verplaatser onderling verbonden zijn. Voor de kinematische machine spreekt dit voor zich. Als de ruimte beneden de zuiger is afgesloten en er geen lekkage van gas optreedt tussen de aandrijf-staf van de verplaatser en het centrale gat in de zuiger, dan zijn de drukvariaties in de benedenruimte al voldoende om de verplaatser aan te drijven en een faseverschil te bewerken dat de 90° benadert.

THERMOAKOESTISCHE MOTOREN

*C.M. de Blok*¹⁹

Inleiding

Thermoakoestische (TA) motoren hebben een aantal unieke eigenschappen die ze tot een potentiële kandidaat voor kleinschalige opwekking van elektriciteit maken. In een TA-motor is de functie van zuiger en verdringer overgenomen door een krachtige akoestische golf. Een TA-motor bevat hierdoor in principe geen bewegende delen. De benodigde akoestische golf wordt opgewekt in een resonator.

TA-motoren voor het omzetten van warmte in mechanische of elektrische energie verkeren echter nog in de laboratoriumfase. Door de relatief lage (akoestische) drukamplitude in vergelijking met zuigermachines is de vermogensdichtheid in het algemeen geringer. Daar staat echter een winst in de afmetingen tegenover door de eenvoud en de vrijheidsgraden van constructie. Hierdoor zijn toepassingen mogelijk, die technisch of economisch niet met conventionele technieken kunnen worden gerealiseerd.

Algemene beschrijving TA-motor

Het 'hart' van een TA-motor wordt gevormd door een regenerator ingeklemd tussen twee warmtewisselaars. Door middel van deze warmtewisselaars wordt warmte aan het proces toe- en afgevoerd bij respectievelijk hoge en lage temperatuur. Het uitgangsvermogen is beschikbaar in de vorm van een krachtige sinusvormige drukvariatie (geluidsgolf) die op diverse manieren kan worden benut. Fig. 3.3.5 laat de schematische opbouw zien van een TA-motor.

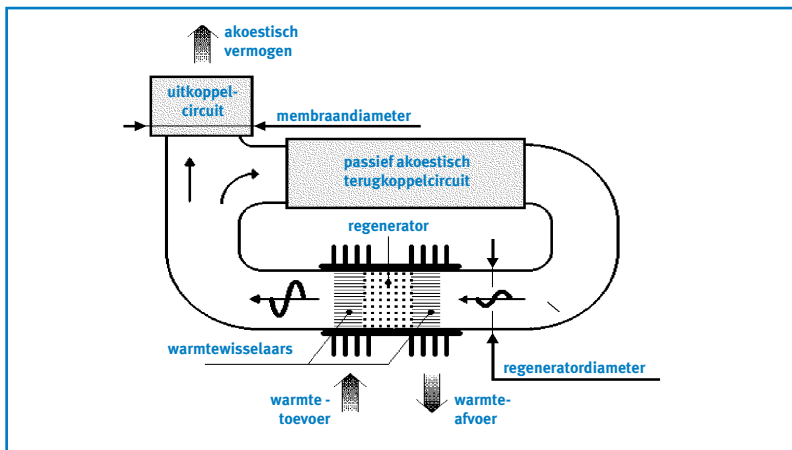
Werkingsprincipe

Thermoakoestische (TA) energieomzetting is de verzamelnaam voor thermodynamische kringprocessen, waarbij warmte en akoestische, dan wel mechanische energie in elkaar worden omgezet. De voor dit proces benodigde periodieke drukvariatie en gasverplaatsing vinden plaats in een gesloten systeem onder invloed van krachtige akoestische golven. De term 'akoestisch' is hierbij verwarrend, omdat de amplitude van deze golven in het gesloten systeem vele malen groter is dan gebruikelijk en wenselijk in de vrije ruimte.

.....
¹⁹ ASTER thermo acoustische systemen,
Melkweglaan 86
2394 NG Hazerswoude

Fig. 3.3-5

Voorbeeld van de opbouw van een thermoakoestische motor.



Een thermoakoestische warmtemotor volgens fig. 3.3.5 laat zich het best omschrijven als een door warmte aangedreven oscillator. Deze oscillator bestaat uit een deel (regenerator), waarin warmte wordt omgezet in akoestische energie en een akoestisch terugkoppelcircuit, waarmee het systeem in resonantie wordt gebracht. Dit terugkoppelcircuit is te vergelijken met een vliegwiel in een klassieke motor.

Door meer warmte aan het systeem toe te voeren dan nodig is om interne verliezen te compenseren en de oscillatie in stand te houden, kan dit overschot als nuttig (akoestisch) vermogen aan het systeem worden onttrokken.

Het deel waarin warmte wordt omgezet in een toename van het akoestisch vermogen bestaat uit een regenerator ingeklemd tussen twee warmtewisselaars, waarmee warmte aan het proces wordt toe- en afgevoerd (zie fig. 3.3.5).

Om te begrijpen hoe deze energie-omzetting in de regenerator tot stand komt, nemen we aan dat er volledige warmte-uitwisseling tussen regeneratormateriaal en gas (isotherme propagatie) is. Verder is er een positieve temperatuurgradiënt in de regenerator in de voortplantingsrichting (regeneratormateriaal warmer dan ingang) te zien, en propageert er een lopende (sinusvormige) golf door de regenerator.

We beschouwen nu gedurende een enkele periode (cyclus) de situatie voor een willekeurig pakket gas in de regenerator. Beginnend bij het moment van de laagste druk, zal het gas door de akoestische golf worden gecomprimeerd. De fysieke uitwijking van het gas ijlt hierbij (in een lopende golf) een kwart periode na op de druk. Door de uitwijking van het gas in de temperatuurgradiënt neemt de temperatuur toe, waardoor tijdens de compressie warmte aan het gas wordt toegevoerd. Overeenkomstig de ideale gaswet wordt deze temperatuurverhoging isobaar omgezet in een toename van het volume. Bij gelijkblijvend oppervlak en drukamplitude betekent dit dat de uitwijking en daarmee het akoestisch vermogen is toegenomen. In het tweede deel van de periode vindt het omge-

keerde plaats, waarbij het gas door de akoestische golf wordt geëxpandeerd terwijl warmte van het gas aan de regenerator wordt afgestaan. Een complete cyclus onder invloed van een lopende akoestische golf bestaat dus uit:

- compressie
- warmtetoevoer bij hoge temperatuur
- expansie
- warmteafvoer bij lage temperatuur.

Door dit proces ontstaat een warmtestroom door de regenerator tegengesteld gericht aan de propagatierichting van de akoestische golf. Het systeem heeft hierdoor de neiging het temperatuurverschil over de regenerator te verkleinen. Bij toenemend vermogen zal hierdoor evenredig meer warmte aan de warmte-wisselaars moeten worden toe- en af gevoerd om de werktemperatuur te handhaven. Anders gezegd, bij gelijkblijvende werktemperatuur is het opgewekte nuttig vermogen evenredig met de toegevoerde warmte.

Werktemperatuur en rendement

Door de lage inherente wrijving is een TA-motor al effectief (t.o.v. de Carnot-factor) vanaf ca. 150 K temperatuurverschil over de regenerator, en bij kleine vermogens. Zoals bij alle thermodynamische machines is het ook het rendement van een TA-motor een compromis tussen een groot aantal parameters. Een door ASTER gebouwd kleinschalig prototype met 10 W akoestisch uitgangsvermogen heeft een procesrendement gelijk aan een kwart van de Carnot-factor. Dit is in overeenstemming met simulatieresultaten. In principe (op basis van simulatie) is voor een grootschaliger geoptimaliseerde uitvoering van een regeneratieve TA-motor bijna de helft van de Carnot-factor haalbaar.

Toepassingsmogelijkheden

Het akoestisch uitgangsvermogen van een thermoakoestische motor kan op een aantal manieren worden benut.

- Om elektriciteit op te wekken wordt deze door middel van een membraan gekoppeld aan een lineaire generator. In dat geval zijn dit de enige bewegende delen in het systeem. Voor het omzetten van golfenergie in elektriciteit kan ook worden gedacht aan piëzo-elektrische elementen of combinaties met MHD²⁰ generatoren.
- Met de lineaire beweging van het membraan kan direct een pomp of ander mechanisch systeem worden aangedreven. Een veelbelovende uitvoeringsvorm is die waarbij het (akoestisch) uitgangsvermogen van een TA-motor direct wordt gebruikt voor de aandrijving van een TA-warmtepomp. Op deze wijze ontstaat een door warmte aangedreven warmtepomp zonder bewegende delen.

.....
20 Magneto-hydrodynamische generatoren wekken elektriciteit op uit een bewegende vloeistof- of gasstroom.

In het algemeen is het uitgangsvermogen van een TA-systeem geringer dan van zijn mechanische tegenhangers. Voor toepassing in combinatie met bijvoorbeeld zonne-energie ('solar dish' systeem) is dit op zich geen bezwaar, omdat voor een bepaald uitgangsvermogen altijd een minimum collectoroppervlak nodig is. Toepassingen van TA-motoren zullen in eerste instantie kleinschalig zijn met vermogens in de orde van enkele kilowatts. Dit is echter geen principiële bovengrens. Ander toepassingen van TA-energieomzetting liggen op het gebied van warmtepompen, uitlaatsystemen en actieve geluidsabsorptie. Meer literatuur is te vinden in [NASA, 1998; Swift, 1992a; Swift, 1992b; Wheatly, 1983; Wheatly, 1985; Ceperly, 1979; Ceperly, 1985].

3.3.3 PIËZO-ELEKTRISCHE ELEMENTEN

*G. Oudakker*²¹

Principe

Ocean Power Technologies Inc. uit Princeton (New Jersey) heeft gesteund door AMP, de wereldmarktleider op het gebied van connectoren, een methode ontwikkeld om beweging rechtstreeks om te zetten in elektrische energie. Deze methode is gebaseerd op het piëzo-elektrische effect van PDVF (Polyvinilideenfluoride). PDVF is een speciale, maar geen exotische polymeer die in grote hoeveelheden economisch geproduceerd kan worden.

Toepassingsmogelijkheden

Hoewel deze vorm van energieomzetting overal waar sprake is van een onregelmatige mechanische input met relatief lage frequentie toegepast kan worden, heeft Ocean Power zich geconcentreerd op golfenergie. Het basisonderzoek en het prototypeonderzoek van de componenten is afgesloten.

Prototypeonderzoek aan een boeigenerator is vanaf begin 1998 voor de kust van New Jersey aan de gang.

De ontwikkelde en in ontwikkeling zijnde techniek leent zich behalve voor golfenergie tevens voor andere toepassingen zoals kleine, direct aangedreven windgeneratoren. Men concentreert zich voorlopig echter op golfenergie totdat deze bedrijfsactiviteit rendabel is.

Voor- en nadelen

Men ontwikkelt de techniek in een modulair systeem van zelfstandig werkende boeien die elk op zich reeds economisch kunnen opereren, maar ook kunnen worden gecombineerd tot een multi-megawattcentrale.

Zoals bij veel andere soorten hernieuwbare energie is het nadeel dat het aanbod van energie niet noodzakelijkerwijs parallel loopt met de vraag. Het aanbod van golfenergie is wel relatief constant.

²¹ Van Hattum en Blankevoort,
Korenmolenaar 2
3440 AM Woerden
oudakker@euronet.nl

3.4 OPWEKKINGSMOGELIJKHEDEN VERDER IN DE TOEKOMST

3.4.1 PERSPECTIEVEN VAN KERNFUSIE

dr. J. Grin²²

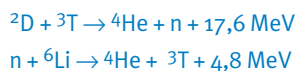
INLEIDING

Deze bijdrage gaat in op de perspectieven van kernfusie in technologisch en in maatschappelijk opzicht. Om na te gaan wat de technologische perspectieven zijn, zullen de huidige verwachtingen worden afgezet tegen wat het onderzoek en ontwikkelingswerk tot nu toe heeft opgeleverd en welke moeilijkheden zich hebben voorgedaan. Om de maatschappelijke perspectieven te kunnen schetsen, zullen die verwachtingen worden vergeleken met verschillende maatschappelijke visies.

DE TECHNOLOGISCHE PERSPECTIEVEN

Wetenschappelijke en technologische principes

Het principe van kernfusie is eenvoudig²³. Relatief lichte atoomkernen (isotopen van waterstof of helium) worden zodanig dicht bij elkaar gebracht dat ze fuseren. Daarbij komt energie vrij: veel energie, afhankelijk van de precieze reactie in de orde van 10 miljoen elektronvolt (MeV) een factor miljoen hoger dan uit een vergelijkbare massa bij chemische reacties vrijkomt. Het grootste principiële probleem is om ondanks de onderlinge elektrische afstoting de positief geladen kernen zo dicht bijeen te brengen dat fusie mogelijk wordt. De meest veelbelovende reactie vanuit deze optiek is de fusie tussen de twee zware waterstofisotopen deuterium (D, een proton met een neutron) en tritium (T, een proton met twee neutronen). Daaruit ontstaat behalve energie een heliumkern en een zeer snel neutron. De meeste pogingen tot nu toe berusten op deze reactie. Om ontsnappende neutronen zoveel mogelijk te benutten, wordt het eigenlijke reactiemedium vaak omringd met een lithium (Li)-mantel, waarin Li-kernen door vrijkomende neutronen worden gespleten in een helium- en een tritiumkern. Dat nieuwe tritium wordt vervolgens als ‘grondstof’ in het primaire reactiemedium gebracht. In formules:



Het principe mag dan eenvoudig zijn, de verwezenlijking is dat bepaald niet. Om de kernen voldoende dicht bij elkaar te brengen, is een zeer hoge temperatuur nodig. De meest gebruikte methode daarvoor berust op het feit dat een zeer sterke stroom (tot enkele miljoenen ampères) door een mengsel van D- en T-kernen en elektronen (een plasma) wordt gestuurd. Door de elektrische weerstand van het plasma ontstaan dan zeer hoge temperaturen.

.....
²² Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Politicologie, O.Z. Achterburgwal 237 1012 DL Amsterdam Grin@pscw.uva.nl

²³ Zie voor een eenvoudige inleiding in de grondprincipes bijvoorbeeld [Fast, 1980a]. Een meer kwantitatieve inleiding en een verwijzing naar de basisliteratuur geven [Boeker, 1995]. Een aardig overzicht van bestaande en recent afgesloten internationale inspanningen geeft [Barabaschi, 1997a].

Voor de genoemde reactie is een ontstekingstemperatuur in de orde van honderd miljoen graden noodzakelijk. Technologische verwachtingen omtrent kernfusie gaan derhalve uiteindelijk over de vraag hoe en wanneer het zal lukken om een grote hoeveelheid atoomkernen op ontstekingstemperatuur te brengen en te houden. Die verwachtingen (en de reeds behaalde resultaten) worden meestal uitgedrukt in twee daarmee corresponderende grootheden. De in een reactor gerealiseerde ionentemperatuur T_i is de natuurlijke maat voor het vermogen om de reactie op gang te brengen. Het *fusieproduct* wordt gebruikt als maat voor het vermogen om de reactie in stand te houden. Dit geeft aan in hoeverre het plasma in staat is om zijn eigen energie te handhaven door een zodanige opsluiting dat geen verliezen optreden via ontsnappende heliumkernen. Op basis van enkele elementaire beschouwingen kan worden aangetoond (zie bijv. [Boeker, 1995]) dat daarvoor het product van de ionentemperatuur en de 'gerealiseerde opsluiting' een bepaalde waarde nodig heeft. Met 'gerealiseerde opsluiting' wordt hier het product van de gerealiseerde opsluitingstijd τ_e met het aantal opgesloten deeltjes per volume-eenheid n bedoeld (die dichtheid n is uiteraard een maat voor de kans dat ze 'elkaar tegenkomen').

De zoektocht naar een werkende fusiereactor komt dus neer op de poging om gelijktijdig een ionentemperatuur T_i van ten minste 100 miljoen graden (de ontstekingstemperatuur) en de minimumwaarde van het fusieproduct $n \tau_e T_i$ te realiseren. Die minimumwaarde ligt rond $30 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$. Zelfs bij een ionentemperatuur van 100 - 200 miljoen graden (ofwel 10 - 20 keV) is bij een typische ionendichtheid n van $1 - 2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ dus een opsluitingstijd τ_e van ongeveer één seconde nodig. Om niet alleen de plasmaenergie te handhaven, maar ook netto-energie te produceren, moet die tijd ten minste enkele seconden bedragen.

Huidige resultaten en verwachtingen voor de toekomst

Tot nu toe is belangrijke vooruitgang geboekt bij het voldoen aan deze uitdaging, maar het op gang brengen en houden van de voor fusie vereiste combinatie van parameters is nog niet gerealiseerd. Fig. 3.4.1 geeft de combinaties van ionen, temperatuur en fusieproduct weer die tot nu toe zijn verwezenlijkt. Om de technologische perspectieven van kernfusie voor de toekomst te schetsen, worden hieronder de verwachtingen weergegeven uit het Fusieprogramma van de Europese Unie (FP-EU). Het is binnen het bestek van deze bijdrage zeker verantwoord om een schets van de huidige verwachtingen te baseren op de visies in het FP-EU. Niet alleen vormt dit programma de financiële en organisatorische context voor vrijwel al het relevante onderzoeks- en ontwikkelingswerk in de EU, ook hebben de verwachtingen in dit programma grotendeels betrekking op de *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)* die ook voor Japan, Rusland en de VS de voornaamste toekomstige (civiele) kernfusie-activiteit is: ITER moet tot stand komen en gaan werken in een samenwerkingsverband tussen de EU en deze drie landen²⁴.

.....
24 De samenwerking ging van start op 21 juli 1992 en liep in eerste instantie tot 21 juli 1998. Het ziet er op het moment van schrijven (zomer 1998) naar uit dat de samenwerking verder zal worden gecontinueerd, inclusief de daadwerkelijke ontwikkeling en bouw van ITER.

ITER vormt de kern van de strategie van het FP-EU [Barabaschi, 1997c; Barabaschi, 1997d]. Deze strategie richt zich op verdere ontwikkeling van het Tokamak-concept dat tot dusverre wereldwijd het kernfusieonderzoek heeft gedomineerd. In een Tokamak-reactor (zie fig. 3.4.2) resulteert de magnetische opsluiting van het plasma uit twee magneetvelden: één dat wordt geproduceerd door een reeks magneten die rondom het ringvormige plasma'vat' staan opgesteld, en één dat wordt veroorzaakt door de plasmastroom (die tevens de vereiste temperatuur levert). Tezamen leveren die velden een schroefvormig ('helisch') veld in en rondom het plasma dat voor de opsluiting zorgt. De plasmastroom ontstaat als in een transformator: het plasma vormt als het ware de (*i.c.* enkelvoudige) secundaire spoel in een transformator, waarin stroom wordt opgewekt als gevolg van een magneetveld dat door een primaire spoel wordt opgewekt.

Fig. 3.4.3

[links] *Principe van de stellarator-reactor. In tegenstelling tot de Tokamak is in deze reactor opsluiting vrijwel uitsluitend het gevolg van het veld van magneten rondom de plasmaring. Die magneten moeten daartoe wel een bijzondere geometrie hebben. Het ontbreken van een plasmastroom leidt tot minder inwendige vrije energie, en dus tot minder instabiliteiten in het plasma. Bron: [Barabaschi, 1997a].*

ITER is voor de EU de opvolger van het Joint European Torus (JET)-project dat in 1983 startte en in het begin van de 21e eeuw zal worden afgesloten. Met deze Tokamak-reactor zijn reeds goede resultaten geboekt [Schüller, 1991; Barabaschi, 1997e]. In 1991 is gedurende twee seconden een vermogen van gemiddeld 1 MW geproduceerd. Met JET is bovendien een fusieproduct gehaald dat binnen een factor 5 - 6 van de vereiste minimumwaarde ligt. Daarnaast heeft dit project waardevolle technologie opgeleverd, bijvoorbeeld voor de mantel om het plasma, de stroombron voor de magneet en systemen voor afstandsbehandeling van die onderdelen van de Tokamak die voor menselijke operators moeilijk te hanteren zijn. Verder is bijvoorbeeld kennis opgedaan in de vorm van schaalwetten.

ITER moet de met JET opgedane ervaring combineren met datgene dat Japan, de VS en Rusland in hun projecten hebben geleerd. Voor de bouw zal bestaande en bewezen technologie worden gebruikt, of technologie die binnen handbereik ligt. In de komende jaren zullen de volgende technologieën nog verder moeten worden ontwikkeld:

- Supergeleidende toroïdale magneten.
- De mantel (uit materiaal dat zo min mogelijk radioactief wordt als gevolg van de bombardementen met zeer snelle neutronen).
- Technologieën voor afstandsbediening en methoden en technieken om tritium (een radioactieve waterstofisotoop die gemakkelijk door het lichaam kan worden opgenomen) te scheiden en te verwerken.
- De tritiumproducerende delen.

Fig. 3.4.4

[links, onder] *Impressie van de Sun Tower (zonnatoren) van NASA. Bron: NASA.*

Daarnaast moet fundamenteel plasmafysisch onderzoek gecombineerd met plasmatechniek helpen om energieverliezen via uitgestraalde deeltjes beter onder controle te krijgen.

De verwachting is ²⁵ dat in ITER tussen 2000 en 2020 daadwerkelijk kernfusie

.....
25 Deze verwachting is te vinden in [Barabaschi, 1997a]. Deze verwachting laat echter jaartallen achterwege. De hier genoemde termijnen zijn ontleend aan [Selnes, 1995a] die zich baseert op [Knippel, 1994].

zal worden gerealiseerd. Men mikt op een quasi stationaire reactie die 1.500 MW aan vermogen levert in pulsen van ten minste 1.000 seconden (16,7 minuten) lang. De reactor is gedimensioneerd op 1.500 MW, omdat bij een dergelijke omvang volgens empirisch verkregen schaalwetten de verliezen door ontsnappende deeltjes gemakkelijker kunnen worden beperkt [Andriess, 1991; Schüller, 1991]. ITER krijgt om dit vermogen te kunnen realiseren veel grotere afmetingen dan JET: een plasmavolume van ongeveer 2.000 m³ (JET: 100 - 140 m³), en een binnen- en buitendiameter van respectievelijk 2,8 en 8,14 m (JET: 1,2 en 2,96 m). De plasmastroom zal met een factor 3 toenemen tot ca. 21 MA [Barabaschi, 1997f].

Als met ITER de technologische haalbaarheid van kernfusie is bewezen, zal naar verwachting in de volgende twee decennia – dus voor 2040 – op basis van de opgedane kennis en ervaring de eerste reactor worden gebouwd die daadwerkelijk elektriciteit zal gaan leveren. Deze zogenoemde DEMO-reactor die net als ITER op een productievermogen van ca. 1.500 MW zal worden gedimensioneerd, moet de commerciële haalbaarheid aantonen. Wanneer de DEMO-reactor succesvol blijkt, verwacht men dat in de tweede helft van de 21e eeuw kernfusie een belangrijk deel van de elektriciteit zal gaan leveren.

Hoe reëel zijn deze verwachtingen?

Over het realiteitsgehalte van verwachtingen omtrent kernfusie zijn twee verhalen te vertellen. Het ene gaat over de gestage vooruitgang die de laatste decennia is geboekt, en die in fig. 3.4.1 is samengevat. Wie de hiervoor geschetste moeilijkheden tot zich heeft laten doordringen kan niet anders dan onder de indruk zijn van de bereikte resultaten.

Het andere verhaal laat zich lezen uit tabel 3.4.1, gecompileerd door [Selnes, 1995b]. Het is het verhaal van resultaten die steeds weer achterblijven bij de – kennelijk overspannen – verwachtingen. Welke conclusies moeten nu worden getrokken uit beide verhalen?

Uit tabel 3.4.1 blijkt dat de termijn waarop een technologische en commerciële haalbaarheid worden verwacht in de loop der jaren toeneemt. Zo bezien is het verwonderlijk noch onverstandig dat het FP-EU kennelijk erg voorzichtig is geworden met het noemen van harde data, en bovendien op de echt lange termijn mikt. Overigens noemt [Selnes, 1995c] tevens deskundigen die eerder aan 2070 of 2100 dan aan 2040 denken als datum waarop een commerciële reactor werkt.

Er kan worden opgemerkt dat er tot nog toe een grote onbekende in het spel is: de oorsprong van energieverliezen door ontsnappende deeltjes (neutronen en heliumkernen). De processen die de opsluiting beperken zijn momenteel fysisch nog onvoldoende begrepen. Men vermoedt dat ze terug te voeren zijn op de variaties in de plasmabewegingen en de daaruit volgende onzekerheden

Bron	wetenschappelijke haalbaarheid	technologische haalbaarheid	commerciële reactor (in jaren)
1952: Princeton Research Division ²⁶	1955		1960 – 1965 (10 – 15)
1958: Geneefse Conferentie	1960 – 1964	1970	1978 (20)
1974: US Atomic Energy Commission	1978	1985 – 1990	2000 (20 – 25)
1986: US Office of Technology Assessment ²⁷	1990	2000 – 2005	2015 (30)
1991: US Department of Energy ²⁸	–	2025	2040 (40)

Tabel 3.4.1

Enkele verwachtingen uit de afgelopen decennia omtrent de haalbaarheid van kernfusie. Bron: [Selnes, 1995b].

in de magnetische veldlijnen. De hierdoor optredende energieverliezen zijn een belangrijke factor bij de moeilijkheden om een fusiereactie op gang te houden die bovendien netto-energie produceert. Het lijkt reëel om te concluderen dat de commerciële haalbaarheid in grote mate zal afhangen van de resultaten van het lange-termijnonderzoek uit het FP-EU naar de plasmafysische processen achter energieverliezen. Als dit tot nuttige resultaten leidt en als die te zijner tijd goed zijn te integreren met de in ITER beproefde en ontwikkelde technologie, dan zijn de vooruitzichten voor commerciële haalbaarheid rond 2050 wellicht reëel.

Alternatieve technologie

Naast het Tokamak-pad dat met ITER zal worden bewandeld zijn er nog andere ontwikkelingspaden. Hoewel die minder prioriteit krijgen bij de toedeling van middelen is het goed om ze hier aan te duiden. In de eerste plaats is daar een alternatieve manier van magnetische opsluiting: het stellarator-concept, ontwikkeld in Princeton (New Jersey). Hierin zorgt vooral het veld rondom het plasma voor de opsluiting; de plasmastroom levert geen beduidende bijdrage. Opsluiting is niettemin mogelijk door een complexe geometrie voor de magneten rondom het plasma te kiezen (fig. 3.4.3). Omdat het plasma minder inwendige vrije energie heeft, kent het minder instabiliteiten.



Fig. 3.4.3

Principe van de stellarator-reactor.

...

Zie pagina 398 voor een kleurenversie van figuur 3.4.3.

Hoewel deze technologie minder prioriteit heeft gekregen dan de Tokamak, kan niet worden uitgesloten dat de stellarator-technologie uiteindelijk superieur zal blijken aan de Tokamak. Het minder voorkomen van instabiliteiten maakt het wellicht ook eenvoudiger om de fysica van de energieverliezen te doorgronden en deze processen te beheersen. Het is al met al mogelijk dat het stellarator-concept uiteindelijk net zo snel of zelfs eerder tot commerciële toepassing leidt. Binnen het FP-EU lopen twee projecten rond dit ontwerp. Ook in Rusland, de VS en – nog meer – in Japan wordt aan stellarator-technologie gewerkt.

De derde optie voor magnetische opsluiting is het RFP-ontwerp. Deze Tokamak-variant werkt met een hogere plasmastroom en met een hogere graad van zelforganisatie van het plasma. De opsluiting lukt echter aanzienlijk minder goed dan in Tokamaks, en het lijkt niet reëel om te verwachten dat dit concept betere perspectieven biedt.

²⁶ [Bromberg, 1982].

²⁷ [OTA, 1987].

²⁸ [Weijnen, 1994].

In de tweede plaats zijn er naast magnetische opsluiting ook nog technologieën voor inertiaalopsluiting (ICF, Inertial Confinement Fusion). Daarbij wordt fusie bedreven op microschaal in ‘pellets’ waarin een D-T-mengsel onder zeer hoge druk tot fusie wordt gebracht. De voor die druk benodigde schokgolf wordt opgewekt met een laser of een ionenbundel. In indirect werkende systemen wordt de laserenergie eerst omgezet in röntgenstraling, die dan voor de temperatuur en druk in het pellet zorgt.

Aan deze technologie wordt al langere tijd gewerkt in de militaire nucleaire laboratoria in de VS (waar de technologie drie jaar na de introductie van de laser werd geboren) [De Ruiter, 1992a] en meer recent ook in Frankrijk. Veel van dit werk is dan ook niet openbaar²⁹. In Duitsland, Japan en Rusland lopen echter ook civiele programma's. Verder werken in elk geval ook Israël en Engeland aan ICF [Schaper, 1991; Schaper, 1992; Barabaschi, 1997].

Tot nu toe is het nog niet gelukt om met deze technologie fusie te realiseren. Er is geen reden om te verwachten dat ICF de magnetische opsluitingstechnologie zal inhalen [De Ruiter, 1992b]. De EU beperkt zich tot het volgen van deze ontwikkelingen [Barabaschi, 1997g].

MAATSCHAPPELIJKE PERSPECTIEVEN

In het FP-EU wordt de laatste jaren sterk benadrukt dat met het in zicht komen van de daadwerkelijke toepassing van kernfusie het vraagstuk van de publieke aanvaardbaarheid niet langer kan worden veronachtzaamd. In 1995 verscheen een beoordeling van de veiligheids- en milieuaspecten van kernfusie en in 1997 startte het SERF (Socio-Economic Research on Fusion)-programma. Uit de studie naar veiligheids- en milieuaspecten [Raeder, 1995] dat is toegespitst op twee denkbeeldige ITER-achtige Tokamak-reactoren kwam naar voren dat het meest lastige aspect is hoe om te gaan met het radioactief afval. Een fusiereactor produceert over de gehele levenscyclus net zoveel radioactief afval als een splijtingsreactor. Het verschil is dat het afval dat bij een fusiereactor vrijkomt voor 70% bestaat uit producten die na 50 jaar zodanig zijn vervallen dat ze – als ze van het overige afval gescheiden kunnen worden – gemakkelijk kunnen worden afgevoerd of verwerkt. Voor het overige materiaal moet een oplossing voor opslag voor de lange termijn worden gevonden. Verder stelt de studie dat het gebruik van laag-activerend materiaal en hergebruik van geactiveerd materiaal de problematiek kunnen verlichten.

Op andere aspecten is fusie volgens de studie nauwelijks problematisch.

Normaal bedrijf houdt geen beduidende risico's in, en ook bij ongelukken is vanwege de zeer geringe energie-inhoud van de plasmaring zoiets als het doorsmelten van de reactorkern ondenkbaar. Ook conventionele ongelukken kunnen niet tot grote gevaren leiden. Evenmin is er sprake van grote spanningen met afspraken ter beperking van nucleaire proliferatie. Bij dit laatste moet overigens worden aangetekend dat deze conclusie voor de in het rapport bestu-

.....
²⁹ Veel beschikbare gegevens uit deze programma's en verwijzingen naar literatuur over de principes van ICF zijn te vinden in [Schaper, 1991; Schaper, 1992]. Zie voor een beschouwing over de voorwaarden voor een commerciële reactor [De Ruiter, 1992b].

deerde Tokamak- centrales wordt gedeeld door proliferatiedeskundigen, die echter stellen dat technologieën voor inertiaalopsluiting wél zulke afspraken kunnen ondergraven [Schaper, 1991; Schaper, 1992].

In de loop van 1998 moet de eerste fase van het SERF-programma worden afgerond. Uit een werkconferentie van SERF kwam naar voren dat publiekparticipatie niet alleen betrekking moet hebben op de implicaties van kernfusie voor veiligheid en milieu, maar ook op de vraag voor welk probleem kernfusie precies een oplossing is, en hoe ze zich verhoudt tot andere oplossingen. Daarbij moet niet alleen worden gedacht aan hernieuwbare energiebronnen, maar ook aan energiebesparing. Er zal pas steun komen onder de mensen die besparing benadrukken, wanneer overtuigend duidelijk is dat serieuze besparing alleen onvoldoende is om in de toekomst het energievraagstuk op te lossen. Ook de schaalgrootte zal vermoedelijk een belangrijke kwestie zijn.

Uit de discussies die in de zomer van 1998 zijn gevoerd tussen FP-EU, de Raad van Ministers en het Europese Parlement is duidelijk dat dit programma de komende jaren in belang zal toenemen.

Agenda voor de toekomst

Vanuit het perspectief van technologische en commerciële haalbaarheid verdienen de volgende aspecten meer aandacht:

- Fysica van energieverliezen.
- Het stellarator-concept.

Vanuit het perspectief van maatschappelijke aanvaardbaarheid zou het accent meer moeten liggen op:

- Onderzoek naar laag-activerende materialen.
- Onderzoek naar hergebruik van geactiveerde materialen.
- Ontwikkeling en beproeving van minder grootschalige reactoren (dat is een reden te meer om de problematiek van energieverliezen beter te begrijpen).
- Energiebesparing.

De optie van inertiaalopsluiting zou vanwege zijn proliferatiegevoeligheid moeten worden opgegeven.

3.4.2 ZONNE-ENERGIE UIT DE RUIMTE

FOTOVOLTAÏSCHE CENTRALES IN DE RUIMTE

ir. P.T.M. Vaessen³⁰

Vanuit de strategische plannen van de ruimtevaartprogramma's werden ook de verkenning, ontwikkeling en demonstratie van zonne-energie uit de ruimte een punt van aandacht. Het is een (naar menselijke maatstaven) onuitputtelijke bron om op een duurzame wijze aan de groeiende energiebehoefte te voldoen.

In de jaren zeventig is het in 1968 gelanceerde idee van Peter Glaser van een zonne-energiecentrale in de ruimte (Solar Power Satellite, SPS) uitgebreid bestudeerd door onder andere NASA. De indertijd bestudeerde concepten waren zeer duur met het gevolg dat SPS-projecten in de ijskast werden gezet. Als gevolg van nieuwe inzichten heeft NASA in 1995 een nieuwe SPS-studie uitgevoerd ('fresh look study') waaruit blijkt dat zonne-energie uit de ruimte een unieke optie is voor het realiseren van grootschalige duurzame energieopwekking voor de 21e eeuw.



Fig. 3.4.4
Impressie van de Sun Tower (zonnetoren) van NASA.
Bron: NASA.



Zie pagina 398 voor een kleurenversie van figuur 3.4.4.

Draadloze energieoverdracht (Wireless Power Transmission, WPT) is een sleuteltechnologie om zonne-energie met behulp van een SPS te exploiteren. Hierover is meer te vinden in par. 4.4.2.

Alle concepten voor zonne-energie op aarde en in de ruimte vergen grote hoeveelheden ruimte vanwege de geringe energiedichtheid. In de ruimte is de gemiddelde intensiteit 1.400 W per m² (de zon schijnt in de ruimte 24 uur per dag), op aarde varieert dit met de locatie tussen 100 en 300 W per m². Voor de energievoorziening van 2.500 huizen met behulp van PV op daken (productie NL 800 kWh per kWpiek = 10 m² (opslag is essentieel) is een oppervlakte van 100.000 m² nodig, in de ruimte slechts 4.000 m².

De eerste SPS-concepten waren niet alleen groot in afmetingen maar ook arbeidsintensief. Het fundamentele SPS-bouwblok bestond uit een enorm platform van 5 x 10 x 0,5 km voor een systeem van 5.000 MW. Hierop werden de discrete elementen voor energieomzetting en -management, platformregel- en stabilisatiesystemen en elementen voor microgolfconversie en transmissie geplaatst. Er was een transportsysteem operationeel vanaf de aarde naar de ruimte (space shuttle) en honderden astronauten zouden hier tientallen jaren continu werken. De initiële investering – voordat er zelfs maar een kWh geleverd zou zijn – bedroeg volgens optimistische schattingen 600 miljard gulden (bij het prijspeil van 1998).

Uit de NASA 'fresh-look'-studie komt het concept van de Sun tower (zonnetoren) als zeer veelbelovend naar voren. Dit is een platform dat op 6.000 km hoogte in een baan om de aarde draait met een zeer hoge mate van modulariteit en

³⁰ KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
ptm.vaessen@mta10.kema.nl

zelfassemblerende (sub)systemen. Hierdoor kan eenvoudig gebruik worden gemaakt van bestaande en nog te ontwikkelen herbruikbare transportsystemen en er is weinig of geen infrastructureel werk van astronauten in de ruimte vereist. Een typische zonnetoren wekt 250 MW op (vergelijkbaar met het verbranden van 700.000 ton kolen per jaar). De initiële investering is 20 tot 30 miljard gulden, een factor 20 lager dan voor de eerste concepten. Het landgebruik (van de ontvangstantenne) is slechts 10 tot 25% van dat van een PV-centrale op aarde. De energiedichtheid van de bundel is gelimiteerd tot 230 W per m², dit is 20 tot 25% van de intensiteit van de zon. De waarde is zo laag gekozen om verhitting van mens en dier en problemen met interferentie te voorkomen (veiligheid van luchtverkeer). Voorzichtige indicaties in studies tonen aan dat 500 W per m² wellicht ook veilig is. Het profiel van de straal is klokvormig. Het voorgestelde systeem bestaat uit 250 elementen van 50 tot 60 meter diameter met een vermogen van 1 MW per element en een opbrengst van 1 kW per kg. Het totale systeem zou ca. 15 km lang (hoog) worden, en de zendantenne zou een diameter van 150 tot 250 meter hebben. De zendfrequentie zou 5,8 GHz zijn.

RUIMTESPIEGELS

ir. J.M. Meij

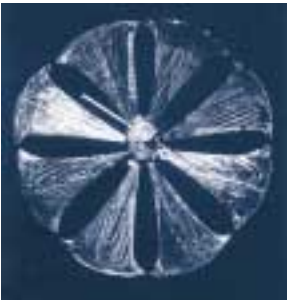


Fig. 3-4-5

Znamya-2 satelliet met dunne-film-spiegel. Bron [Space Regatta Consortium, 1998]. Voor een gefocuseerde straal zijn uiteraard veel vlakkere spiegels nodig. Bij een vlakke spiegel wordt ook de zichtbaarheid buiten het beschenen gebied minder.

In Rusland leven andere plannen: men wil daar spiegelende oppervlakten in de ruimte brengen en deze richten op steden, vooral in de donkere noordelijke streken. Het doel is de steden 's nachts van een beperkte hoeveelheid licht te voorzien. Vanwege de grote zichtbaarheid van dergelijke structuren aan de nachtelijke hemel stuit dit plan op veel protesten van astronomen.

Afgezien van dit nadeel is het op zich geen vreemde gedachte om de in de ruimte opgevangen zonne-energie als zonlicht naar de aarde te sturen. Een dergelijke ruimtespiegel zou veel goedkoper en lichter kunnen zijn dan een PV-centrale in de ruimte. Interessante vragen zouden bijvoorbeeld zijn:

- de maximaal toelaatbare intensiteit van de bundel
- de effecten op de atmosfeer
- de hinder door bewolking.

Elektromagnetische interferentie-effecten door zonlicht op vliegtuigen zijn in ieder geval niet te verwachten. Wellicht kan een bundel licht met een hoge intensiteit de wolken plaatselijk 'oplossen' of zijn er plaatsen nabij de polen met minimale bewolkingshinder. De uiteindelijke omzetting op aarde kan fotovoltaïsch of zon-thermisch plaatsvinden.

3.4.3 EXOTISCHE CONCEPTEN VOOR ELEKTRICITEITSOPWEKKING

ir. G. Peppink³¹

DE ACTIEVE GETIJDENCENTRALE

In 1996 hebben twee medewerkers van het Waterloopkundig Laboratorium, de heren K. Hulsbergen en R. Steijn, op persoonlijke titel de zogenaamde actieve getijdencentrale voorgesteld, die zou moeten worden ondergebracht in een lange dam loodrecht op de Noordzeekust. Uit hun voorstel volgt hier het volgende citaat.

In het zuidelijke deel van de Noordzee halverwege de afstand van 180 km tussen IJmuiden en Lowestoft bevindt zich een zogenaamd amphidromisch punt. De getijgolf (de variërende waterstand) draait hieromheen tegen de klok in als een schotel die na een duwtje rondkantelt op een vlakke tafel. De schotel stopt na een korte tijd, maar de getijgolf blijft rondgaan onder invloed van de aardrotatie en van het zwaartekrachtsveld van de maan en in mindere mate van de zon. Een dam haaks op de kust in de buurt van IJmuiden ter lengte van ongeveer 45 km (dus ongeveer tot halverwege het amphidromisch punt) zal deze getijgolf merkbaar beïnvloeden (en iets dergelijks geldt natuurlijk ook voor een eventuele dam bij de Engelse kust). Over deze dam ontstaat een variërend waterstandsverval van naar schatting 1 m tijdens doortijd en 2 m tijdens springtij. Door het toekomstig tracé van de dam stroomt normaliter, onder invloed van de getijgolf, een debiet van omstreeks (maximaal) een miljoen m³ water per seconde (dat zijn 500 'Rijnen'), afwisselend naar het noorden en naar het zuiden.

Door nu turbines met generatoren te plaatsen in een opening halverwege de dam, kan een interessante hoeveelheid elektrische energie worden gewonnen. In eerste benadering lijkt een vermogen in de orde van 1.500 MW mogelijk. Bovenop de dam kan nog eens circa 500 MW aan windturbines worden geplaatst. Deze ramingen van mogelijk winbare energieopbrengsten moeten nog verder worden onderbouwd³².

Dit voorstel wordt tot de exotische concepten gerekend vanwege de enorme omvang van het systeem en de grote gevolgen, die het systeem kan hebben op de waterbeweging in de Noordzee. Indien niet meer duidelijkheid over dit laatste punt wordt verschaft, is het niet waarschijnlijk dat een dergelijk systeem maatschappelijk zal worden aanvaard.

³¹ Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
PeppinkG@sep.nl

³² Inmiddels bestaat er een plan voor een combinatie met een luchthaven in zee.

MEGAPOWER

In 1995 heeft Hoogovens samen met enkele andere bedrijven het idee van de MegaPower gelanceerd. Het is een vorm van grootschalige, duurzame energieopwekking op basis van het temperatuurverschil tussen het aardoppervlak en de hogere luchtlagen.

De MegaPower bestaat uit een 5 (of zelfs 7) km hoge toren, die met zijn voet in

het zeewater staat. Onderin de toren wordt ammoniak verdampt onder invloed van het relatief warme zeewater. De ammoniak stijgt in de toren omhoog om vervolgens bovenin weer te condenseren door afkoeling in de 30 à 40 graden koudere lucht. De vloeibare ammoniak stroomt in een valbuis in de toren weer omlaag en drijft een vloeistofturbine aan, die is gekoppeld aan een elektrische generator. Op deze wijze zou naar schatting ca. 7.000 MW aan vermogen kunnen worden opgewekt.

Ook dit idee wordt vanwege de gigantische afmetingen tot de exotische concepten gerekend. Daarnaast wordt de grote inhoud aan ammoniak in de toren gezien als een potentieel gevaar voor mens en milieu.

REFERENTIES

- Andriesse, C.D., *Vragen bij de kernfusie*, Energiespectrum, p. 142, mei (1991)
- Barabaschi, S., e.a., *European Commission, DG XII. Fusion Programme Evaluation 1996*, EUR 17521, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (1997a)
- Barabaschi, S., e.a., *European Commission, DG XII. Fusion Programme Evaluation 1996*, p. 34, EUR 17521, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (1997b)
- Barabaschi, S., e.a., *European Commission, DG XII. Fusion Programme Evaluation 1996*, p. 22, EUR 17521, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (1997c)
- Barabaschi, S., e.a., *European Commission, DG XII. Fusion Programme Evaluation 1996*, pp. 47-49, EUR 17521, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (1997d)
- Barabaschi, S., e.a., *European Commission, DG XII. Fusion Programme Evaluation 1996*, p. 37, EUR 17521, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (1997e)
- Barabaschi, S., e.a., *European Commission, DG XII. Fusion Programme Evaluation 1996*, p. 60, EUR 17521, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (1997f)
- Barabaschi, S., e.a., *European Commission, DG XII. Fusion Programme Evaluation 1996*, pp. 54-58, EUR 17521, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (1997g)
- Boeker, E., R. van Grondelle, *Environmental physics*, pp. 166-167, John Wiley & Sons (1995)
- Bromberg, J.L., *Fusion-science, politics and the invention of a new energy source*, pp. 33-34 (1982)
- Buys, A., *Zuinige auto's hebben de toekomst*, Essoscope 2, jaargang 6 (1998)
- Ceperly, P.H., *A pistonless Stirling engine - The traveling wave heat engine*, J. Acoust. Soc. Am. 66, Vol. 5, November (1979)

- Ceperly, P.H., *Gain and efficiency of a short traveling wave heat engine*, J. Acoust. Soc. Am. **77**, No. 3, pp. 1239-1244, March (1985)
- CIEMAT (1998a), *Workshop on public acceptability of fusion power*, Summary of contributions and discussions, and conclusions, Madrid, 9-10 February (1998)
- CIEMAT (1998b), *Workshop on public acceptability of fusion power*, Contributions of the speakers, Madrid, 9-10 February (1998)
- Fast, J.D., *Energie uit atoomkernen*, Natuur & Techniek (1980a)
- Fast, J.D., *Energie uit atoomkernen*, Natuur & Techniek, p. 217 (1980b)
- Goldberg, S., Controlling basic research: The case of nuclear fusion, Georgetown Law Journal, Vol. **68**, pp. 683-725 (1980)
- Halls, J.J.M., e.a., *Nature* **376**, p. 498 (1995)
- Jones, R., *Power electronic converters for variable speed wind turbines*, Product Development, Cegelec Industrial Controls Ltd., England, IEE Colloquium on Power Electronics for Renewable Energy, Professional Group P6, Digest No. 1997/170, 16 June (1997)
- Klippel, H.T., *Nieuwe fase in onderzoek naar kernfusie*, Energie en Milieuspectrum, nr. 8, p. 14 (1994)
- NASA, Op het gebied van pulse tube refrigerators is de nodige informatie te vinden op de internet site van o.a. NASA:
http://ranier.oact.hq.nasa.gov/Sensors_page/Cryo/CryoPT/CryoPTHist.html
 l, en op <http://irtek.arc.nasa.gov/pulsetube.html>
- O'Regan, B., M. Grätzel, *Nature* **353**, pp.737-739 (1991)
- Offringa, L.J.J., e.a., *A high-speed 1400 kW permanent-magnet generator with rectifier*, ICEM 96, Vigo, Spain (1996)
- OTA, *Star power. The US and the international quest for fusion energy*, Office of Technology Assessment of the US Congress, Washington (1987)
- Raeder, J., e.a., *Safety and environmental assessment of fusion power*, European Commission, DG XII, Fusion Programme (1995)
- Ruiter, W. de, *De evolutie van de laser. Een systeemperspectief op wetenschap, technologie en samenleving*, pp. 75-78, academisch proefschrift, TU Eindhoven (1992a)
- Ruiter, W. de, *De evolutie van de laser. Een systeemperspectief op wetenschap, technologie en samenleving*, pp. 80-85, academisch proefschrift, TU Eindhoven (1992b)
- Schaper, A., *Arms control at the stage of research and development? - The case of inertial confinement fusion*, Science and Global Security, Vol. **2**, No. 4, p. 279-300 (1991)

- Schaper, A., e.a., New technological developments and the non-proliferation regime. Re-directing and constraining R&D: The case of laser fusion, laser isotope separation and the use of highly enriched uranium, in: H.G. Brauch, J. Grin, e.a. (eds.), *Controlling the development and spread of military technology. Lessons from the past and challenges for the 1990s*, VU University Press (1992)
- Schüller, F.C., *Kernfusie: een ander perspectief*, Energiespectrum, p. 204-205, juli/augustus (1991)
- Selnes, T.A., *Nuclear fusion research. Actors and expectations, the nature of support*, pp. 35-37, Wetenschapswinkel Erasmus Universiteit Rotterdam, rapportnr. 153 (1995a)
- Selnes, T.A., *Nuclear fusion research. Actors and expectations, the nature of support*, p. 54, Wetenschapswinkel Erasmus Universiteit Rotterdam, rapportnr. 153 (1995b)
- Selnes, T.A., *Nuclear fusion research. Actors and expectations, the nature of support*, p. 55, Wetenschapswinkel Erasmus Universiteit Rotterdam, rapportnr. 153 (1995c)
- *Space Regatta 2000*, Znamya experiment program, Solar Sailing, Light from Space, SRC-Space Regatta Consortium RSC, Korolev, Russia (1998)
- Stine, W.B., R.B. Diver, *A compendium of solar dish/Stirling technology* (1997), www.crest.org/renewables/dish-stirling/index.html
- Swift, *Analysis and performance of a large thermoacoustic engine*, J. Acoust. Soc. Am. **92**, Vol. 3, pp. 1551-1563, September (1992)
- Swift, *Thermoacoustic engines*, J. Acoust., Soc. Am. **92**, Vol. 6, pp. 1145-1180, December (1992)
- Veen, J.L.F. van der, e.a., *Minimising losses in high-speed high-power permanent magnet synchronous generators with rectifier load*, IEE Proceedings Electronic Power Applications, Vol. **144**, No. 5, September (1997)
- Weijnen, M.P.C., (red.), *Op weg naar een nieuwe (?) strategie voor energieonderzoek*, p. 6, Interduct, Delft (1994)
- Wheatly, J., e.a., *Experiments with an intrinsically irreversible acoustic heat engine*, Physical Review Letters, Vol. **50**, No. 7, pp. 499-502, February (1983)
- Wheatly, J., e.a., *Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines*, Am. J. Phys. **53**, Vol. 2, February pp. 147-162 (1985)
- Wöhrle, D., D. Meissner, *Advanced Materials* **3**, p. 129 (1991)
- Yu, G., e.a., *Science* **270**, p. 1789 (1995)

2

4 Transport en distributie

ir. J.M. Meij

Het veelvuldig toepassen van elektriciteit is voor een deel te danken aan het feit dat elektriciteit gemakkelijk beschikbaar is. Een fijnmazig net brengt de elektriciteit bij de afnemers onder handbereik.

In dit hoofdstuk worden nieuwe ontwikkelingen en hulpmiddelen op het gebied van transport en distributie van elektriciteit besproken. Omdat de opbouw van het transport- en distributienet al uitgebreid aan de orde is gekomen in Deel 1¹, zal de beschrijving hier kort zijn. We zullen ons hier vooral richten op de afweging tussen transport met wisselstroom (AC) of met gelijkstroom (DC), en op omzeters van en naar DC en andere vermogenselektronische hulpmiddelen voor transport en distributie. Het bewaken van de conditie van systemen in het elektriciteitsnet tijdens het gebruik komt aan de orde in de paragraaf 'online monitoring'. Daarna worden twee vormen van draadloze energieoverdracht besproken, namelijk de inductieve magnetische koppeling en de overdracht met microgolven.

¹ Zie Deel 1, par. 2.3 (Integratie en optimalisatie op wijkniveau), par. 2.6 (Het lokale elektriciteitsnet), par. 3.5 (Het nationale transportnet) en par. 3.6 (Transport van elektriciteit over de landsgrenzen heen).

4.1 TRANSPORT EN DISTRIBUTIE

4.1.1 NETTEN EN STATIONS

In een centrale wordt elektriciteit opgewekt. In een conventionele centrale gebeurt dit met generatoren die geregeld zijn in toerental, zodat de in Nederland gangbare frequentie van 50 Hz nauwkeurig aangehouden wordt. Deze elektriciteit wordt getransformeerd naar een hoog niveau om getransporteerd te worden over het hoogspanningsnet. Dit hoogspanningsnet werkt met spanningen van 380 kV en 220 kV en verbindt de belangrijkste productie- en verbruikscentra. Vanuit knooppunten in dit koppelnet wordt een fijner vertakt hoogspanningsnet op 150 of 110 kV niveau gevoed.

De verschillende spanningsniveaus onder het hoogspanningsnet zijn gekoppeld door een aantal soorten stations:

- Voedingsstations tussen het 150 of 110 kV hoogspannings- en het tussenspanningsnet (50 kV en 25 kV) of het middenspanningstransportnet (20 en 10 kV). Over het algemeen zijn de voedingsstations uitgevoerd met een reservetransformator, zodat bij een storing snel omgeschakeld kan worden. De voedingsstations zijn beveiligd door middel van vermogensschakelaars die de stroom onderbreken bij kortsluiting aan de vraagzijde.
- Verdeelstations tussen het middenspanningstransportnet en het middenspanningsdistributienet. De verdeelstations zijn niet voorzien van reserve-elementen, dus als hierin een storing optreedt zullen de omringende verdeelstations moeten bijspringen. Vaak zijn verdeelstations uitgerust met een (mechanisch geschakelde) regeltransformator ('tap changer').
- Netstations. De netstations zetten de middenspanning om in laagspanning en zijn enkelvoudig uitgevoerd, dus zonder reserve. De moderne netstations zijn voorzien van lastscheiders met een smeltveiligheid [EnergieNed, 1996].

Deze knooppunten en stations zijn de plaatsen waar de vermogens-elektronische hulpmiddelen uit par. 4.2 toegepast kunnen worden.

Een bijzonder vermogens-elektronisch hulpmiddel is een omzetter van wisselnaar gelijkstroom. Waarom het toepassen van gelijkstroom voor het transport van elektriciteit zinvol kan zijn, blijkt uit de volgende bijdrage.

4.1.2 WISSELSTROOM (AC) OF GELIJKSTROOM (DC)?

dr.ir. B. Gravendeel²

INLEIDING

Voor het transport van elektrische energie zijn twee manieren gangbaar, wisselstroom (AC) en gelijkstroom (DC). AC heeft in Nederland meestal een frequentie van 50 Hz.

.....
² HMA Power Systems,
Postbus 3007
2980 DA Ridderkerk
B.Gravendeel@hma.nl

Het grote voordeel van het transport met AC is het beschikbaar hebben van spanningstransformatoren, waardoor voor elke toepassing (van koppelnet tot huishouden) de juiste spanning beschikbaar is. Een ander voordeel is dat de stroom in een AC-systeem een natuurlijke nuldoorgang³ heeft, wat het uitschakelen van stroomvoerende delen van het transportsysteem relatief eenvoudig maakt. Dit transport van elektrische energie heeft in principe dan ook minder complexe technologie nodig. De technologie voor AC was daarom eerder ver genoeg ontwikkeld om betrouwbaar energietransport mogelijk te maken dan die voor DC.

Aan het AC-systeem kleven ook enkele nadelen: de transformatoren kunnen alleen met speciale (tot nu toe mechanische) hulpmiddelen (tap changers⁴) meedoen in het opvangen van spanningsvariaties in het systeem.

Ook het uitschakelen van de stroom kan door het ontwerp van het schakelmateriaal soms lang (10 ms) op zich laten wachten. In deze tijd kan een eventuele kortsluitstroom hoog oplopen. Alle onderdelen die deze stroom voeren, moeten mechanisch op de maximaal optredende werking van de Lorentzkracht gedimensioneerd worden. Een ander nadeel van een AC-systeem is dat de transportafstand via kabels beperkt is door de impedantie⁵ van de kabel of de lijn.

Fig. 4.1.1 geeft een vergelijking van de transportverliezen in AC- en DC-hoogspanningslijnen.

Fig. 4.1.1

Transportverliezen in AC- en DC-hoogspanningslijnen. De verliezen in de converter(omzetter)stations zijn hoger met DC, maar bij het transport met AC is het verlies per km groter. Bron: [ABB Power Systems, 1998].

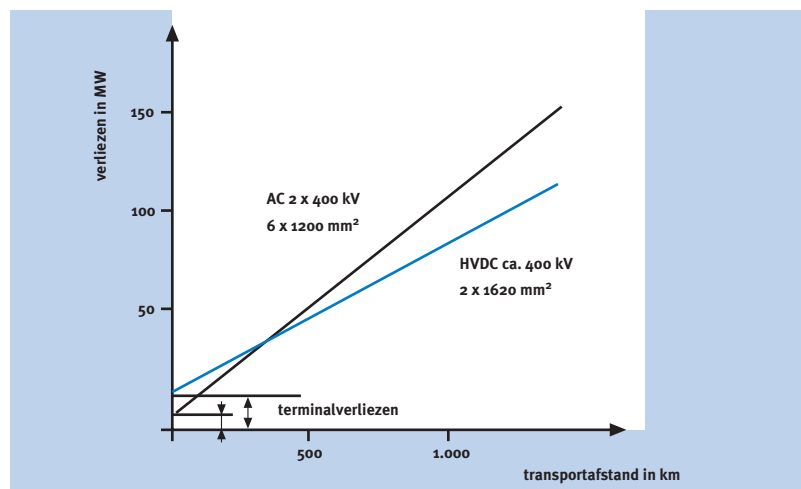


Fig. 4.1.1 geeft aan waarom transport met AC voor beperkte afstanden zeer gangbaar geworden is en waarom voor transport over grotere afstanden vooral DC-verbindingen worden gebruikt. Bij een vergelijking met (zee)kabelsystemen zijn de verschillen nog veel groter. Daar ligt het omslagpunt al beneden de 50 km [Loughran, 1997; Sáiz Chicarro, 1994].

3 De spanning en de stroom zijn aan het begin en halverwege de 50 Hz-cyclus even gelijk aan nul.

4 Deze mechanisch geschakelde regeltransformator schakelt naar een aftakking van de transformator met een iets hogere of lagere spanning.

5 Impedantie is de (frequentie-afhankelijke) tegenstand die wisselstroom ondervindt in een systeem.

Een DC-systeem heeft twee beperkingen:

- Er zijn nog geen standaard voorzieningen voor spanningstransformatie bij grote vermogens.
- Bij het afschakelen van een stroomvoerend gedeelte van een transportnet treedt nooit een natuurlijke nuldoorgang van de stroom op. De energie die in de stroomvoerende sectie opgeslagen is, moet beheerst worden afgevoerd. Afhankelijk van de frequentie waarmee geschakeld wordt, kan deze energie als warmte afgevoerd worden, of moet er een voorziening getroffen worden voor het terugvoeden in het net.

Wanneer we dieper in het transportsysteem kijken, doemen nog een aantal verschillen op tussen een transportsysteem met AC of met DC.

Voordat een AC-transportstelsel twee systemen met elk een eigen opwekking kan koppelen, dienen de systemen gesynchroniseerd te worden. Dat wil zeggen dat de frequentie en de fase van AC in beide systemen gelijk moeten zijn (zie Deel 1, par. 3.6, Transport van elektriciteit over de landsgrenzen heen).

Bij AC worden alle gebruikte isolatiematerialen belast met de topwaarde van de spanning, terwijl de transportcapaciteit te maken heeft met de effectieve waarde van de spanning. Verder wordt de spanningsverdeling van de isolatiematerialen vanwege de wisselspanning capaciteef bepaald. De polarisatie van het isolatiemateriaal is door de aangelegde wisselspanning ook wisselend van karakter. Dit heeft naast een aantal andere factoren invloed op de levensduur van het isolatiemateriaal.

Bij een DC-transportstelsel wordt de maximale spanningsbelasting van isolatiematerialen beter benut, omdat de topwaarde van de spanning tevens de effectieve waarde is (zie ook de volgende bijdrage). De spanningsverdeling in het isolatiemateriaal is afhankelijk van de weerstand van het materiaal en de polarisatie is constant in dezelfde richting. Afhankelijk van de soort bedrijfsvoering van het DC-systeem kan de spanning wel omkeren als de vermogensrichting omkeert.

TRANSPORTCAPACITEIT VAN EEN AC- VERSUS DC-KABEL

De transportcapaciteit van een kabel kan uitgedrukt worden in de isolatiespanning U_{iso} van de kabelisolatie en de effectieve waarde van de stroom I_{th} die per ader toelaatbaar is in verband met warmteontwikkeling. Voor een driefasige kabel geldt:

$$P = \sqrt{\frac{3}{2}} U_{iso} I_{th} \lambda$$

waarbij λ de arbeidsfactor is. De arbeidsfactor is een factor die aangeeft hoe doelmatig de kabel benut wordt⁶. In de praktijk heeft λ in een transportnet een waarde tussen ca. 0,8 en 1, afhankelijk van operationele omstandigheden.

6 Zie Deel 1, par. 2.6.1, Reëel en blindvermogen.

De factor $\sqrt{2}$ komt voort uit het feit dat de effectieve waarde van de spanning een factor $\sqrt{2}$ kleiner is dan de isolatiespanning. Voor een DC-kabel met hetzelfde isolatiesysteem als de AC-kabel en met dezelfde totale geleiderdoorsnede (individuele geleiders 1,5 maal zo dik als van de driefasige kabel) geldt:

$$P = \frac{3}{2} U_{iso} I$$

Een DC-kabel kan dus een factor $\sqrt{3/2} / \lambda$ meer vermogen overdragen dan een driefasige kabel. In de praktijk komt dat neer op ca. 25 tot 50% meer transportcapaciteit.

De formule voor de capaciteit van transport met driefasige kabels is in principe ook toepasbaar voor de meeste andere componenten in een elektriciteitsdistributiesysteem. Bij een gegeven systeem liggen U_{iso} en I_{th} vast, en kan de transportcapaciteit alleen nog verbeterd worden door de arbeidsfactor te verbeteren. De laatste tien jaar zijn veel DC-projecten gerealiseerd, waarbij het spanningsniveau en het te transporteren vermogen aanzienlijk zijn toegenomen. Bij HVDC-transport worden vrijwel uitsluitend papiergeïsoleerde kabels toegepast, die hun grote betrouwbaarheid hebben bewezen. Er vindt nog onderzoek plaats naar de oorzaken van het slecht functioneren van kunststof als isolatiemateriaal voor DC-kabels (zie par. 2.1, Materialen voor elektrische isolatie). Inmiddels is voor lagere DC-spanningen wel een kunststof kabel beschikbaar. Andere opties zoals oliedruk en gas komen bij lange afstanden niet in aanmerking vanwege het grote volume dat onder druk moet worden gehouden.

4.2 TOEPASSINGEN VAN VERMOGENSELEKTRONICA

4.2.1 OMZETTERS VOOR HOOGSPANNINGSGELIJKSTROOM (HVDC)

ir. P. Toussaint⁷, ir. J.M. Meij

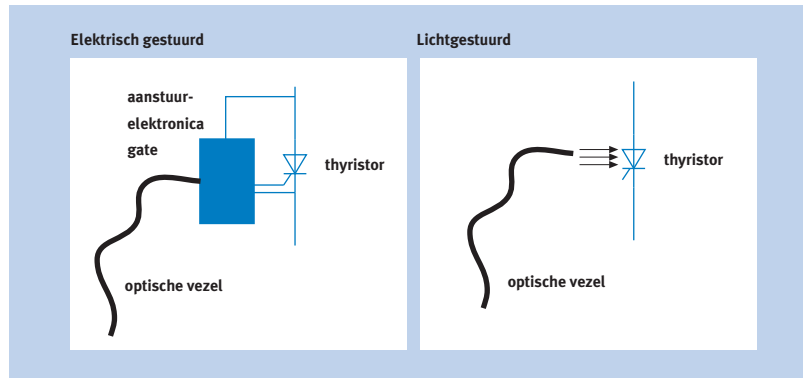
Het functioneren van moderne HVDC-verbindingen is afhankelijk van vermogens-elektronica. Deze technologie heeft de laatste jaren aanzienlijke vorderingen gemaakt. De vermogens-elektronische schakelaars functioneren betrouwbaar en worden voor steeds hogere vermogens gemaakt. Verdere verbeteringen op dit gebied zijn nog mogelijk en de kosten zullen nog verder worden teruggebracht.

Moderne HVDC-omzeters maken gebruik van thyristoren, die beschikbaar zijn tot spanningen van 8 kV. Momenteel wordt gewerkt aan een verhoging van het spanningsniveau naar 10 tot 12 kV. Het aantal elektronische circuits per thyristor wordt verminderd door lichtgestuurde thyristoren toe te passen, waarbij glasvezels voor de signaaloverdracht zorgen tot aan de thyristor zelf.

7 SEP,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
ToussaintP@sep.nl

Fig. 4.2.1

Elektrisch gestuurde (links) en lichtgestuurde thyristor ('light triggered thyristor'). Beide krijgen het schakel-sig-naal toegeleverd via een glas-vezel, maar de elektrisch gestuurde thyristor heeft nog een hulpschake-ling nodig. Bron: [Loughran, 1997].



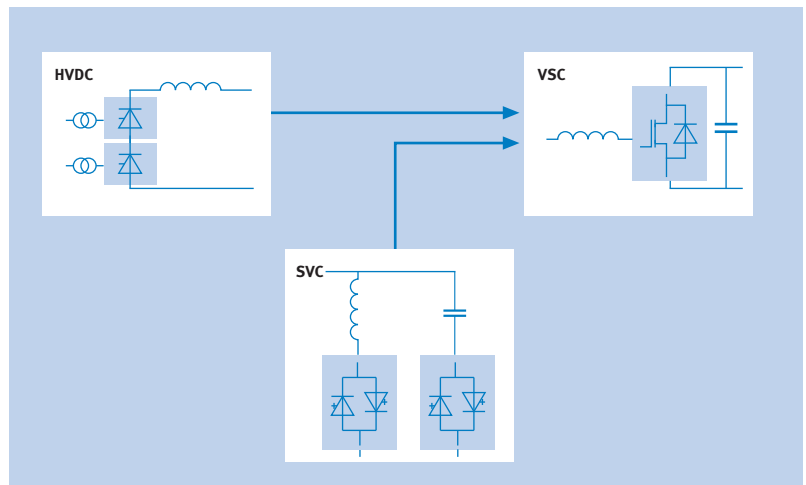
Nieuwe componenten zoals GTO⁸-thyristoren maken een hogere schakelfre-quentie mogelijk, waarmee harmonischen⁹ worden gereduceerd en de kwaliteit van de spanning wordt verbeterd. Tot nu toe zijn de kosten en de verliezen van deze thyristoren nog te hoog en is de capaciteit nog te laag om de thyristor in HVDC te verdringen.

De 'gewone' thyristoren worden ook verder ontwikkeld waarbij reeds diameters tot 15 cm zijn gerealiseerd.

De Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) wordt hoofdzakelijk gebruikt voor de lagere voltages (Medium Voltage DC). Er zijn IGBT's in ontwikkeling, waar-mee de GTO's en dioden die nu in HVDC worden toegepast vervangen kunnen worden. De IGBT's zijn niet alleen sneller, maar ook efficiënter dan de GTO's. De hierop gebaseerde omzetters zijn vanuit het oogpunt van kwaliteitscontrole geavanceerde apparaten die in staat zijn tegelijkertijd verschillende functies te vervullen, zoals het omzetten van DC naar AC (of omgekeerd), het compenseren van het blindvermogen en het filteren van harmonischen. Daarmee kan ook de aparte blindvermogenscompensatie met een Static Var Compensator, SVC (zie de volgende paragraaf) vervallen [Lescale, 1998].

Fig. 4.2.2

Bimodale omzetter op basis van IGBT's die de rol van de gelijkrichters en de vermogenscompensatie met een Static Var Compensator (SVC) kunnen overnemen. Bron: [ABB Power Systems, 1998].



8 Gate Turn Off thyristor.

9 Stroom of signalen afkomstig van wisselende spanning met een bepaalde frequentie in veelvoud van deze frequentie.

Fig. 4.2.3

Een 2.000 MW HVDC-converterstation nu en over tien jaar (groen gekleurd), wanneer de toepassing van bimodale omzetterz mogelijk is geworden, waardoor de Static Var Compensator (SVC) overbodig wordt. Actieve filtering komt in de plaats van de AC-filters.
Bron: [Loughran, 1997].



De verwachting is dat over ongeveer 10 jaar dergelijke schakelingen ook toegepast kunnen worden in het hoogspanningsnet, wat zal leiden tot een vereenvoudiging van de converterstations. Ook kan de oppervlakte van converterstations aanzienlijk worden gereduceerd, wat bijzonder belangrijk is bij offshore-toepassingen en in dichtbebouwde gebieden.

4.2.2 FACTS EN UNIFIED POWER CONDITIONERS

FACTS (Flexible AC Transmission Systems) worden tot op heden vrijwel uitsluitend toegepast in midden- en hoogspanningsnetten. Ze worden daarbij in de eerste plaats gebruikt voor het routeren of optimaliseren van het vermogens-transport door het aanpassen van één van de belangrijke parameters voor het AC-transport: het spanningsniveau, de fasehoek of de lijnimpedantie. Alle FACTS die momenteel beschikbaar zijn voor hoge spanningen kunnen echter zonder meer 'neergeschaald' worden voor toepassing op laagspanningsniveau. Daarnaast biedt de lage spanning juist de mogelijkheid om nieuwe FACTS te ontwikkelen om aan specifieke functies te voldoen, zoals een combinatie van een blindvermogencompensator en een interface voor supergeleidende magnetische energieopslag (SMES). Een dergelijk systeem kan een oplossing bieden voor problemen met de kwaliteit van de elektriciteit op laagspanningsniveau. We zullen de Static Var Compensator, de 'solid state tap changer', de 'dynamic voltage restorer' en het actieve filter bespreken. Unified Power Conditioners kunnen de functies van meerdere FACTS in zich verenigen. We bespreken de UPFC (Flow Controller) en de UPQC (Quality Conditioner).

STATIC VAR COMPENSATOR (SVC)

Een Static Var Compensator (SVC) is een apparaat dat vooral het grondharmonische blindvermogen (W-Reactief) in een net compenseert. De SVC wordt als regel parallel aan het net geschakeld, waarbij de SVC een stroom genereert die in tegenfase is met de te compenseren blindstroom. Het uiteindelijk effect is dat in het net de blindstroom sterk gereduceerd wordt.

De SVC maakt het vermogenstransport veel doelmatiger, terwijl de spanningsval over het netdeel tussen de centrale en de compensator geringer wordt doordat de grondharmonische blindstroom niet langer een spanningsval veroorzaakt. Omdat een SVC zelf nogal wat harmonischen veroorzaakt, wordt deze vaak in combinatie met zogenaamde zuigfilters toegepast die deze harmonischen elimineren.

SOLID STATE TAP CHANGER

Een 'tap changer' is een apparaat waarmee door het kiezen van een andere aftakking (Engels: tap) op een van de wikkelingen de omzettingsverhouding van deze mechanisch geschakelde regeltransformator kan worden gewijzigd. De tap changer wordt op grote schaal in midden- en hoogspanningsnetten toegepast om spanningen op het gewenste niveau te houden. Ze vragen veel onderhoud, hebben een beperkte levensduur en reageren relatief traag. De 'solid state tap changer' is de elektronische tegenhanger van de mechanische tap changer. De groep 'Vermogenselektronica en Elektrische machines' van de Technische Universiteit Delft heeft een elektronische tap changer voor distributietransformatoren (10 kV/230V) ontwikkeld [Bauer, 1997]. Zo'n tap changer is zeer geschikt om sterke spanningsfluctuaties te voorkomen in wijken, waarin veel energie op laagspanningsniveau wordt opgewekt.

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER

De 'dynamic voltage restorer' is een apparaat waarmee (plotselinge) spanningsdalingen gecompenseerd kunnen worden door bij de aanwezige spanning een extra spanning op te tellen. Dit wordt onder andere gedaan door in serie met de netlijn een injectietransformator op te nemen. Omdat in tegenstelling tot mechanische tap changers het apparaat snel kan reageren op plotselinge spanningsdalingen, wordt de toevoeging 'dynamic' vaak gebruikt. Langdurige spanningsdalingen worden als regel weggewerkt met (mechanische) tap changers. De functies van de dynamic voltage restorer en de solid state tap changer komen grotendeels overeen.

ACTIEVE FILTERS

Actieve filters zijn apparaten, die parallel of in serie met de netlijnen worden geschakeld en die tot taak hebben om harmonischen en andere blindvermogen producerende componenten te elimineren of te blokkeren. Bij toepassing van

snel schakelende halfgeleiders kan de regelbandbreedte van het apparaat zich uitstrekken tot in het kHz-gebied. Dit betekent dat het actieve filter problemen met EMC¹⁰ in het laagfrequente gebied kan oplossen. In verband met de beperkingen van de vereiste typen halfgeleiders zijn actieve filters anno 1998 alleen te realiseren voor laag- en middenspanningsniveaus. In principe zijn actieve filters ook in staat om grondharmonisch blindvermogen te compenseren, echter op een weinig kosteneffectieve wijze. Een actief filter kan een onderdeel vormen van de Unified Power Quality Conditioner, die ook in deze bijdrage wordt behandeld.

UPFC

Een Unified Power Flow Controller (UPFC) is een apparaat waarmee tegelijkertijd het spanningsniveau, de fasehoek en de lijnimpedantie kunnen worden ingesteld. UPFC's zijn bedoeld om de transportcapaciteit van midden- of hoogspanningsnetten te verbeteren en voor routing van het vermogen wanneer verschillende parallelle verbindingen bestaan. UPFC's bevinden zich nog in het stadium van ontwikkeling. Enkele prototypes zijn operationeel.

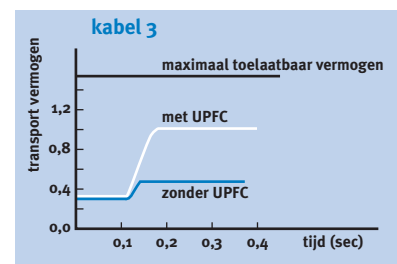
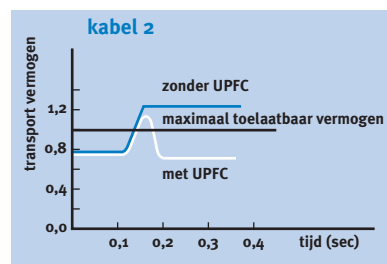
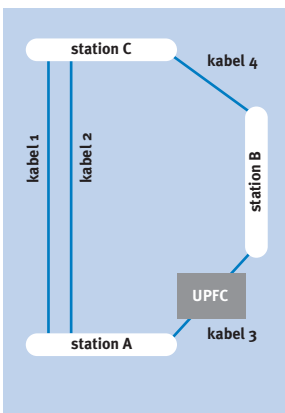


Fig. 4.2.4

Werking van een Unified Power Flow Controller (UPFC). Links een deel van een hoogspanningsnet.

Aangenomen wordt dat lijn 1 uitvalt als $t=0,1$ s. Zonder de UPFC zou de last verdeeld worden over de lijnen 2 en 3. Omdat lijn 2 in het voorbeeld een lagere belastbaarheid heeft, zou deze overbelast raken. Met de UPFC kan de stroom zo verdeeld worden dat de beide lijnen onder de toelaatbare belasting blijven. Zo kan de transportcapaciteit optimaal worden benut. Naar [Daniel, 1998].

UPQC

Een Unified Power Quality Conditioner (UPQC) is een apparaat dat in principe topologisch gelijk is aan de UPFC, maar de beoogde toepassing en de technologie verschillen. Met de UPQC kan tegelijkertijd blindvermogen gecompenseerd worden, en het spanningsniveau worden aangepast. Terwijl de UPFC een 'high power' apparaat is dat vooral geschikt is voor het compenseren van het grondharmonisch blindvermogen, is de UPQC daarnaast in staat om harmonischen te compenseren (echter op een lager spanningsniveau). Een UPQC combineert in feite de functies van een SVC, een actief filter en een dynamic voltage restorer. De UPQC is zeer geschikt om te worden toegepast in wijken om ter plaatse eventuele harmonischen te verwijderen en om de spanning op het gewenste niveau te houden. UPQC's zijn nog experimenteel.

Bij het schrijven van deze paragraaf zijn een aantal passages vrij vertaald overgenomen uit [Stahlkopf, 1997].

¹⁰ Zie par. 2.6.5 van Deel 1, Netvervuiling en ElektroMagnetische Compatibiliteit.

4.3 ONLINE MONITORING

dr.ir. P.H.F. Morshuis¹¹

In de toekomst zal het steeds belangrijker worden om de conditie van de componenten in het elektriciteitsnet op een betrouwbare manier vast te stellen. Steeds meer componenten in het Nederlandse elektriciteitsnet komen aan het einde van hun levensduur en het is belangrijk om tijdig vast te stellen in hoeverre componenten aan onderhoud of vervanging toe zijn. Misschien kunnen sommige componenten die aan het einde zijn gekomen van hun economische levensduur (ca. 40 jaar) nog wel enkele jaren in bedrijf blijven. Hier is het begrip *restlevensduur* van belang. Denk bijvoorbeeld aan het middenspanningsdistributienet in Nederland met vele duizenden kilometers GPL¹²-kabel. Het nog enkele jaren in bedrijf houden van delen van dit net kan grote kostenbesparingen met zich mee brengen. Ook het kostenaspect van *onderhoud* wordt steeds belangrijker. Periodiek onderhoud is kostbaar; denk bijvoorbeeld aan de kosten van het niet beschikbaar zijn van een generator, die voor periodiek onderhoud van het net is afgeschakeld.

De belangrijkste redenen voor het toepassen van ‘online monitoring’ van hoogspanningscomponenten zijn:

- Het reduceren van de kosten van onderhoud.
- Het optimaal gebruik maken van de levensduur van de oudere componenten in het net.
- Het verhogen van de betrouwbaarheid van de elektriciteitslevering.

Een van de technieken voor online monitoring die in veel gevallen een goed inzicht geeft in de veroudering en kwaliteit van isolatiesystemen is partiële ontladingsanalyse.

De ontwikkeling van nieuwe technologieën op het gebied van het detecteren van partiële ontladingen in het Mhz- en Ghz-gebied biedt de mogelijkheid om in bedrijf fouten in of veroudering van het isolatiemateriaal in een hoogspanningscomponent te detecteren. Hierdoor kan tijdig worden ingegrepen (preventief onderhoud), waardoor dure uitval van een component in een aantal gevallen kan worden voorkomen. Tevens kunnen ook hier kosten worden bespaard, omdat alleen dan onderhoud plaatsvindt wanneer dat echt nodig is.

Een goed voorbeeld van online monitoring vinden we bij generatoren. Hier hebben we te maken met de meest wijdverbreide toepassing van online analyse van partiële ontladingen. De kosten van online monitoring (enkele tienduizenden gulden per generator) moeten hier worden afgezet tegen de mogelijkheid om vroegtijdig in te grijpen, wanneer een storings situatie dreigt. De totale kosten van een niet geplande uitval van een generator bestaan uit gederfde inkomsten door het niet beschikbaar zijn, de reparatiekosten en mogelijke boetes voor het niet leveren van elektriciteit. Wanneer de uitval het gevolg is van een kapotte

¹¹ TU Delft,
Opleiding Elektrotechniek
Postbus 5031
2600 GA Delft
p.h.f.morshuis@et.tudelft.nl.

¹² Gepantserde Papier Lood Kabel.

statorwikkeling, kunnen de kosten in de miljoenen guldens lopen.

Wat zijn de eisen die aan zo'n online methode worden gesteld? Uit wat hiervoor staat beschreven blijkt dat het meten van ontladingen een effectieve methode dient te zijn om de meerderheid van de faalmechanismen in de statorwikkeling te detecteren. In afnemende volgorde van belangrijkheid dient deze methode [Stone, 1996]:

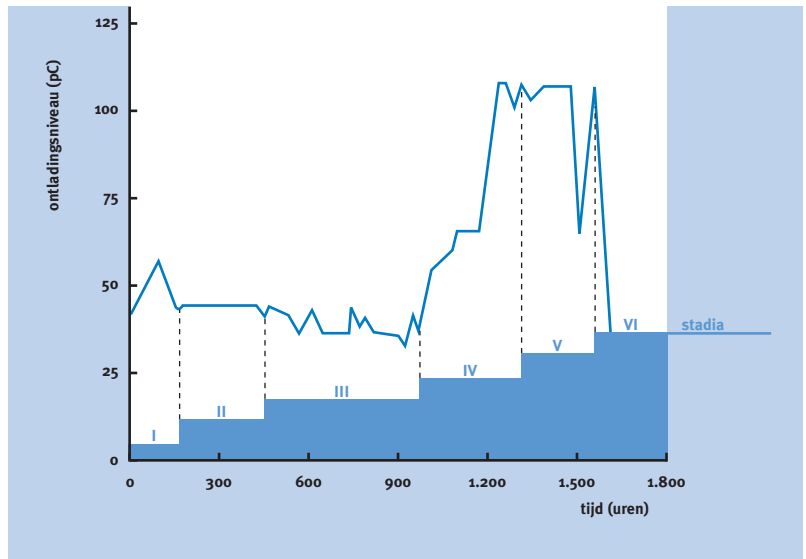
- Een waarschuwing te genereren dat er een grote kans bestaat op uitval van een wikkeling en dat de machine uit bedrijf genomen dient te worden, wanneer de gevolgen van een onverwachte uitval groot zijn.
- Een waarschuwing te genereren dat er een grote kans bestaat op uitval en dat ogenblikkelijk onderhoud vereist is om een onverwachte uitval te voorkomen.
- Een waarschuwing te genereren dat er significante veroudering optreedt, zodat reparatiewerkzaamheden kunnen worden gepland waardoor het niet beschikbaar zijn tot een minimum wordt beperkt.
- Wanneer een probleem wordt gedetecteerd de oorzaak van het probleem aan te geven, zodat de meest kosteneffectieve methode van reparatie kan worden gekozen.
- Een indicatie te geven welke machines in goede conditie zijn en nog geen onderhoud nodig hebben. Dit reduceert de onderhoudskosten.
- Een indicatie te geven welke oude machines nog in goede conditie zijn, zodat niet voortijdig een nieuwe statorwikkeling nodig is.
- Een absolute indicatie te geven van de conditie van de isolatie.

De voordelen van online monitoring mogen overduidelijk zijn, het online meten en analyseren van ontladingen in generatoren staat nog in de kinderschoenen. Met de ontwikkeling van statistische methoden om ontladingspatronen te analyseren is de laatste jaren wel een grote stap gezet op weg naar een meer groot-schalige invoering van online diagnose van partiële ontladingen.

De grote uitdaging bestaat enerzijds uit het meten in een praktijkomgeving vol storing en anderzijds het leggen van een verband tussen het gemeten ontladingspatroon en de mate van veroudering, of zelfs de resterende levensduur. In fig. 4.3.1 wordt getoond hoe in de gemeten ontladingspatronen clusters zijn te onderscheiden in een versneld verouderingsexperiment aan een epoxyhars isolator. Met de opgebouwde databank van ontladingspatronen is de restlevensduur te herkennen als een fysisch stadium in de levensloop. Het vijfde stadium zal in dit geval fungeren als een urgente waarschuwing voor de noodzaak tot onderhoud of vervanging.

Fig. 4.3.1

Herkenning van het ontladingspatroon geeft het stadium in de levensduur aan. Bron: [Smit, 1997].



In veel gevallen zullen echter nog modellen ontwikkeld moeten worden die een relatie leggen tussen (ontladings)meetwaarden en restlevensduur, waarbij de invloed van omgevingsparameters en de bedrijfscondities worden meegenomen in de analyse. Hierbij moet rekening worden gehouden met de complexe interactie tussen verschillende verouderingsprocessen (thermisch, elektrisch, chemisch).

4.4 DRAADLOZE OVERDRACHT VAN ENERGIE

4.4.1 DRAADLOZE INDUCTIEVE ENERGIEOVERDRACHT

*dr. W.A. van Kampen*¹³

Galvanische koppeling

Het tijdelijk verbinden van een gebruikstoestel met een bron voor elektrische energie wordt in het algemeen bewerkstelligd met een galvanische koppeling. Twee geleiders worden elektrisch met elkaar verbonden door mechanisch contact te maken.

Het onderbreken van een elektrische galvanische koppeling vormt een probleem als tijdens het verbreken elektrische stroom vloeit. Dan ontstaat er een vonk of een vlamboog, waarbij slijtage van de contacten optreedt. In hoogwaardige apparatuur worden circuitelementen toegevoegd die het optreden van vonken tussen de contacten beperken. In schakelaars voor hoog vermogen worden uitgebreide en uitgekiende constructies aangebracht, berustend op elektromagnetische verschijnselen en de eigenschappen¹⁴ van een plasma, waarbij de energie die vrijkomt in goede banen wordt geleid. Brand en ontploffingen kunnen het resultaat zijn van niet goed functionerende schakelaars voor hoog vermogen.

Ook als een verbinding tot stand wordt gebracht is een elektrisch contact een bron van problemen door vuil of oxiden op de contacten. Speciale constructies moeten ervoor zorgen dat een contact gereinigd wordt. Dit wordt bereikt door contacten bij het maken van een verbinding te laten schuiven, zodat door mechanische beweging vuil en oxiden worden verplaatst en een lage elektrische overgangswaarde tussen de contacten ontstaat. Connectoren voor professionele apparatuur worden gefabriceerd door enkele gerenommeerde bedrijven, die voor hun producten hoge bedragen in rekening brengen.

Bij het stopcontact voor huishoudelijk gebruik, de pantograaf van een trein of tram of het sleepcontact bij ondergrondse treinen vind men het principe terug dat contact wordt gemaakt door de contacten ten opzichte van elkaar te laten bewegen.

In principe is het uitschakelen van wisselstroom eenvoudiger dan van gelijkstroom, omdat periodiek de stroom nul wordt waardoor een vlamboog kan doven.

In alle gevallen kleven aan mechanische contacten bezwaren van vonkvorming of slijtage. Eén van de oplossingen om elektrische energie over te brengen zonder mechanische contacten toe te passen is de methode van inductieve magnetische koppeling.

¹³ Magnetics Enterprise,
Wolsteeg 2c
2311 TP Leiden
magnetics@worldaccess.nl

¹⁴ Bijvoorbeeld door een speciaal
isolatiegas, zoals SF₆ te gebruiken.

Inductieve magnetische koppeling

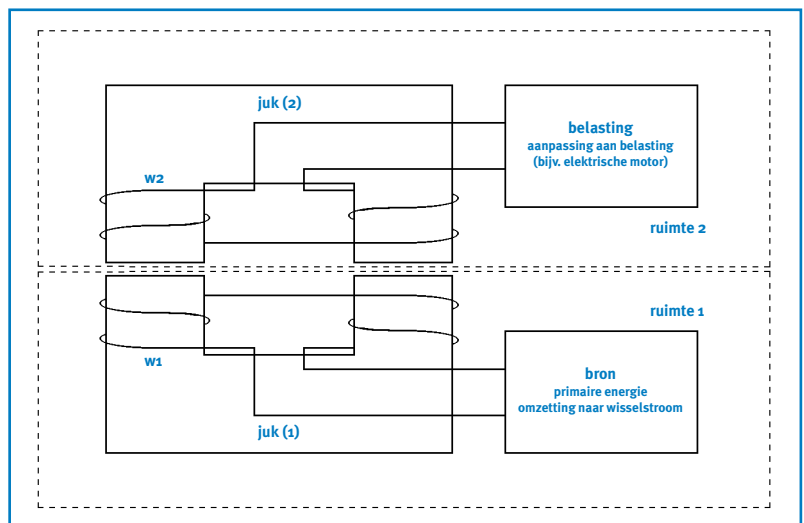
Wordt een magnetisch veld opgewekt met een spoel waar elektrische stroom doorheen gaat en wordt een deel van het veld omvat door een tweede spoel, dan bestaat inductieve magnetische koppeling. Energie toegevoerd aan het veld kan met de tweede spoel worden afgevoerd als het veld van grootte verandert. In de elektrische transformator wordt het principe van magnetische inductieve koppeling toegepast. Bij relatief lage frequenties tot in het audiogebied wordt een circuit van gelamelleerd ijzer gebruikt om het magnetische veld te concentreren. Het werkzame deel van het veld heeft dan de vorm van een gesloten circuit, waarin zich magnetische flux bevindt. Met het ijzercircuit, ook genoemd het juk of de kern, wordt bereikt dat de secundaire spoel de flux van de primaire spoel vrijwel geheel omvat, en dat de flux in de kern met relatief geringe magnetisatiestroom kan worden opgewekt.

Het elektrische vermogen dat een transformator kan overbrengen wordt bepaald door de grootte van het product van de maximale stroom door de spoelen en de maximale elektrische spanning over de spoelen. De maximale stroom in de spoelen wordt begrensd door de warmteontwikkeling in de geleiders van de spoelen. De maximale elektrische spanning over een spoel wordt begrensd door de maximale fluxdichtheid die in het ijzercircuit kan worden toegelaten, en de frequentie waarmee de flux bijvoorbeeld sinusvormig verandert.

Naarmate een transformator grotere afmetingen heeft, wordt het rendement gunstiger. Dit heeft in de energietechniek geleid tot het voortdurend vergroten van de afmetingen. Bovendien wordt de verhouding tussen gewicht en vermogen gunstiger: bij k keer grotere afmetingen wordt de massa k^3 keer zo groot, maar het vermogen ca. k^4 keer.

Door de frequentie waarbij de transformator wordt gebruikt te verhogen, wordt bij een λ keer zo grote frequentie het maximum vermogen circa λ keer zo groot.

Fig. 4.4.1
Inductieve koppeling.



Inductieve koppeling als middel tot mechanische scheiding

Door gebruik te maken van een magnetisch wisselend veld kunnen een bron van elektrische energie en een belasting mechanisch worden gescheiden. In tegenstelling tot een galvanisch contact hoeft er tijdens het overbrengen van energie geen mechanisch contact te bestaan.

Een bestaande praktische uitvoering van mechanische scheiding bestaat uit de toepassing van een deelbaar juk van een transformator, zie fig. 4.4.1. Het juk van de transformator is opgedeeld in twee delen, die zich in gescheiden ruimten kunnen bevinden. Eén deel van het juk met de primaire spoel w_1 bevindt zich in de eerste ruimte, het andere deel van het juk met de secundaire spoel w_2 bevindt zich in de tweede ruimte.

Voordelen van de inductieve magnetische koppeling

Een aantal voordelen van inductieve magnetische koppeling kunnen worden genoemd:

- Het aanraken van het juk van het primaire gedeelte – ook als dit nog is ingeschakeld – levert geen direct gevaar op.
- Een inductieve koppeling is betrouwbaar, slijtvast en vereist weinig onderhoud.
- Bij een elektrisch vermogen in orde van een megawatt of meer is de omvang van een goed ontworpen inductieve koppeling vergelijkbaar met een galvanische koppeling.
- In een inductieve magnetische koppeling treedt geen contactslijtage, contactverontreiniging en vonkvorming op. De bij vonkvorming optredende ozonproductie is afwezig.
- De constructie is niet brandgevaarlijk.
- De goede werking wordt niet belemmerd als het scheidingsoppervlak nat is of verontreinigd door olie.

Toepassing in een voertuig

Met een inductieve magnetische koppeling is een elektrisch aangedreven voertuig contactloos van energie te voorzien. Wordt in het voertuig een elektrische energiebuffer opgenomen, dan kan de energiebuffer worden opgeladen bij een halteplaats. Bij de huidige stand van de techniek biedt een vliegwiel voordelen. De inductieve magnetische koppeling kan voor hoog vermogen worden uitgevoerd. Een vliegwiel is geschikt om snel opgeladen te worden, en kan zeer veel laad- en ontladcycli zonder slijtage doorlopen. Berekening leert dat de oplaadtijd bij een halte niet meer dan een fractie van een minuut hoeft te duren.

4.4.2 ENERGIEOVERDRACHT MET MICROGOLVEN

ir. P.T.M. Vaessen¹⁵

Draadloze energieoverdracht met behulp van microgolven (Wireless Power Transmission, WPT) is bijvoorbeeld van belang om de energie van een zonne-energiecentrale in de ruimte te exploiteren. Al in 1888 demonstreerde Hertz gepulste draadloze energieoverdracht. De eerste WPT-demonstratie vond plaats in 1963 door de Raytheon Company met een totaalrendement van 13%. Dit werd in stappen opgevoerd en in 1975 werd een demonstratie gegeven bij de Goldstone Nevada Facility van het Jet Propulsion Lab. Er werd 30 kW over 1,5 km getransporteerd met een rendement van 54%. Het rendement van het systeem is gedefinieerd als de verhouding tussen DC-energie bij de ontvanger en de zender.



Fig. 4.4.2

Voorbeelden van draadloze energieoverdracht.

Links het Japanse Space Power SPS2000 (werkend model).

In het midden een zeppelin met draadloze energievoorziening.

Rechts het bijbehorende grondstation. Bron: [Sunsat].

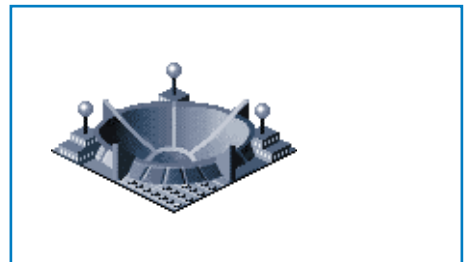
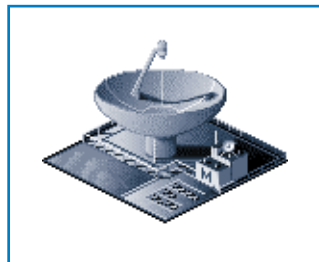
De microgolfttechnologie wordt algemeen gebruikt in huishoudens (o.a. magnetrons) en in de industrie.

Een compleet microgolfransmissiesysteem werkt in drie stappen, te weten:

- Conversie van DC-energie van de opwekeenheden naar microgolffenergie.
- Overdracht van de microgolffenergie met behulp van een zendantenne en opvang aan de ontvangstkant met een ontvangstantenne.
- Conversie van microgolffenergie naar DC-energie bij de ontvanger.

Fig. 4.4.3

Geconcentreerde stralenbundels voor energieoverdracht? Schotels uit het simulatiespel SimCity 2000.



De hiervoor getoonde concepten van microgolfontvangstsystemen zoals die worden gebruikt in het simulatiespel SimCity 2000 zouden een typische diameter hebben van 30 tot 50 meter voor een vermogen van 1.600 MW, wat neerkomt op een gemiddelde energiedichtheid van ca. 1 MW per m². Als bij een dergelijk systeem de bundel microgolven naast de ontvanger terechtkomt, verbrandt alles.

15 KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
ptm.vaessen@mta10.kema.nl

Daarom is bij de voorstellen voor microgolfsystemen de energiedichtheid van de bundel gelimiteerd tot 230 W per m², dit is 20 tot 25% van de zonintensiteit. De waarde is zo laag gekozen om verhitting van mens en dier en problemen met interferentie te voorkomen. Hierbij zou namelijk de veiligheid van vliegtuigen in gevaar komen. Voorzichtige indicaties in studies tonen aan dat 500 W per m² wellicht ook veilig is. Het profiel van de straal is klokvormig.

Bij een energiedichtheid van 230 W per m² kan op aarde 2 MW per hectare opgevangen worden. De antenne zou bijvoorbeeld gecombineerd kunnen worden met een kassencomplex. Effectief gezien wordt hiermee een kas een elektriciteitscentrale met een capaciteit van 2 MW per hectare. Een kasareaal van 10.000 ha is dan ruim voldoende om de gehele Nederlandse elektriciteitsbehoefte te dekken. Het kasareaal in Nederland bedroeg in 1996 ongeveer 20.000 ha.

Punten van aandacht voor draadloze energieoverdracht zijn:

- Het toewijzen van frequenties voor WPT.
- Een veilige bedrijfsvoering aan de zend- en aan de ontvangstkant.
- Het inpassen in het elektriciteitsnet.
- De locatie van ontvangstantennes op land en op zee.
- De economische aspecten.
- De ecologische en sociale aspecten.

Uiteraard dienen eerst de gezondheidsaspecten van WPT bij de voorgestelde frequenties grondig onderzocht te worden.

Vaak worden (zonne)energiecentrales in de ruimte en WPT als één concept gepresenteerd. Meer over zonne-energiecentrales in de ruimte in par. 3.4.2.

REFERENTIES

- ABB Power Systems, *Why HVDC? - Lower losses* (1998), <http://www.abb.se/pow/1123.htm>
- Asplund, G., e.a., *HVDC light, a tool for electric power transmission to distant loads*, ABB Power Systems AB, P.O. Box 703, S-771 80 Ludvika, Sweden (1998)
- Bauer, P., S.W.H. de Haan, G.C. Paap, *Electronic tap changer for 10 kV distribution transformer*; European Power Electronics Conference, pp. 3.1010-3.1015, September (1997)
- Daniel, D., e.a., *Power electronics enter the electricity network arena*, EDF (Electricité de France), <http://www.edf.fr/der/html/produits/publications/cherener.en/art13-en.htm> (1998)
- *Elektriciteitsdistributienetten*, EnergieNed (1996)

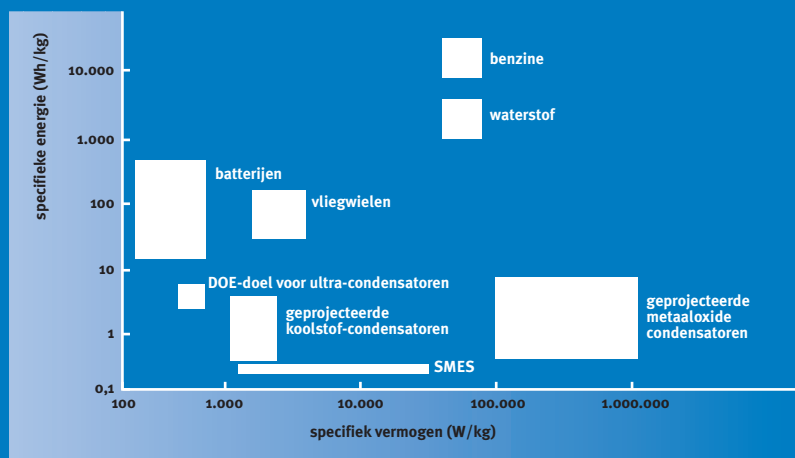
- Ewart, D.N., e.a., *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, scoping study, EPRI report EL-6943 (1990)
- Lescale, V.F., *Modern HVDC: State of the art and development trends*, ABB Power Systems AB, SE-771 80 Ludvika, Sweden (1998)
- Loughran, J., *Trends in HVDC developments*, GEC Alsthom T&D Power Electronic Systems Ltd, UK (1998)
- Sáiz Chicharro, A., *Comparison between AC and DC transmission systems*, CIGRE Study Committee 37, June (1994)
- Smit, J.J., *De levensduur van de elektrische infrastructuur*, intreedede Technische Universiteit Delft, ISBN 90-9010836-x, 28 mei (1997)
- Stahlkopf, K.E., M.R. Wilhelm, *Tighter controls for busier systems*, IEEE Spectrum, pp. 48-52, April (1997)
- Stone, G.C., *The use of partial discharge measurements to assess the condition of rotating machine insulation*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12, No. 4, pp. 23-27 (1996)
- Sunsat, <http://www.tier.net/sunsat/>

2

5 Opslag

Met de toename van ongeregelde en duurzame opwekeenheden van elektriciteit neemt ook in de 'vaste' netten de behoefte aan opslagmiddelen toe. Het palet van opslagmiddelen voor mobiele en stationaire toepassingen groeit. Fig. 5.o.1 geeft een overzicht van de specifieke energie en het specifieke vermogen van een aantal opslagmiddelen. In dit hoofdstuk worden geavanceerde batterijen, condensatoren, supercondensatoren en supergeleidende magnetische energieopslag (SMES) besproken. Ook enige systemen op basis van potentiële energie komen aan de orde.

Fig. 5.o.1
Vergelijking van de specifieke energie en het specifieke vermogen van verschillende opslagmiddelen. Bron: [HEV program NREL].



5.1 GEAVANCEERDE BATTERIJEN

*dr. H.J. Veringa*¹

In een batterij wordt energie opgeslagen in de vorm van chemische energie. Deze energie kan op ieder moment door een elektrochemische reactie worden omgezet in elektrische energie.

Men onderscheidt primaire en secundaire batterijen. Een primaire batterij is geschikt voor eenmalig gebruik. Daarentegen kan een secundaire batterij na afgifte van de opgeslagen energie met behulp van een externe stroombron opgeladen worden en in de oorspronkelijke toestand worden teruggebracht. Op die manier kan een groot aantal cycli van ont- en opladen worden doorlopen.

Een batterij bestaat uit één of meer cellen, die in serie en of parallel met elkaar zijn verbonden. Een cel is opgebouwd uit:

- de anode of negatieve elektrode, die elektronen afgeeft aan het externe circuit en ten gevolge van de elektrochemische reactie geoxideerd wordt;
- de kathode of positieve elektrode, die elektronen opneemt van het externe circuit en waar een reductiereactie plaatsvindt;
- de elektrolyt, die in de cel de geleiding van ionen tussen anode en kathode verzorgt.

De elektrolyt moet een goede en selectieve ionengeleider zijn en een slechte geleider voor elektronen. Bovendien moet de elektrolyt zowel chemisch als elektrochemisch stabiel zijn ten opzichte van de elektroden. In de meeste gevallen is de elektrolyt vloeibaar, bijvoorbeeld een alkalische oplossing. Ook worden vaste stoffen gebruikt als ionengeleiders, zoals beta-lumina en bepaalde polymeren.

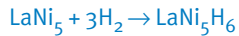
De beide elektroden – die goede elektrische geleiders zijn – worden mechanisch van elkaar gescheiden door een separator. Deze moet zelf doorlaatbaar zijn voor de elektrolyt in verband met de gewenste ionengeleiding.

Goede perspectieven voor grootschalige toepassing van secundaire batterijen worden geboden door de nikkel-metaalhydridebatterij en de lithiumbatterijen. De natrium-nikkelchloride en de metaal-luchtbatterijen bieden kansen voor specifieke toepassingen. De redoxflowbatterijen nemen een bijzondere plaats in voor stationaire toepassingen.

Van de genoemde batterijsoorten zullen de werkingsprincipes worden toegelicht. Voor een vergelijking van de specifieke energie en het specifieke vermogen van de batterijen verwijzen we naar par. 4.5.5 van Deel 1 van dit boek waarin de toepassing van batterijen in vervoer wordt behandeld.

¹ ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
veringa@ecn.nl

De kathode maakt 30% van de totale massa uit (incl. elektrolyt) van de batterij. Voor het gebruik van een waterstofabsorberende legering als kathode voor een batterij dient het materiaal grote hoeveelheden waterstof snel en vele malen te kunnen ab- en desorberen, zoals bij LaNi_5 :



Een belangrijke eis die gesteld wordt aan de kathode van een nikkel-metaalhydridebatterij is dus dat deze kathode snel veel waterstof kan ab- en desorberen. Twee typen metaalhydriden die dit goed kunnen zijn LaNi_5 en TiNi_4 . De opname-eigenschappen worden nog verbeterd door bij LaNi_5 een gedeelte van het Ni te vervangen door Co, en het La te vervangen door een metaal dat uit een mix van zeldzame aardmetalen bestaat, zoals Ce, Pr, Nd, La. Het nadeel van deze elementen is dat de capaciteit van de kathode niet voldoende is. Het gedeeltelijk vervangen van Ni door Al en Mn zorgt voor een verlaging van de absorptiedruk (die zorgt voor het opnemen van waterstof in de kathode) en een verhoging van de capaciteit.

Toevoegingen van B, Mo, Th, Ta of Zr verhogen de ontlaadkarakteristiek van de kathode. In de beginfase werd dezelfde anode van nikkel-cadmiumbatterijen gebruikt voor nikkel-metaalhydridebatterijen. In die nikkelanode is een klein beetje cadmium aangebracht om het verslechteren van de anode na iedere laad- en ontlaadcyclus tegen te gaan. Daarnaast zorgt cadmium voor een verhoging van de overpotentiaal van de zuurstof en een verbetering van de laadefficiëntie bij hogere temperaturen. Vanwege milieufactoren is er onderzoek verricht naar vervangende materialen zoals Zn en Co, die dezelfde prestaties en goede eigenschappen hebben als de anode met cadmium.

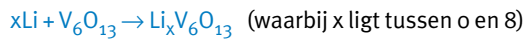
Op dit moment wordt een elektrolyt gebruikt die uit drie componenten bestaat, namelijk KOH, NaOH en LiOH. Deze elektrolyt wordt als de beste beschouwd bij een hoge ontlaadcapaciteit bij hoge temperaturen, bij een nikkel-hydroxidekathode en bij een Zn-Co-anode.

5.1.2 LITHIUM-IONBATTERIJ

Lithium lijkt een ideaal anodemateriaal. Het is het lichtste materiaal van alle vaste chemische elementen. Het heeft een hoge verhouding van elektrische lading tot zijn gewicht (3.680 Ah per kg), en staat van de alkalische metalen bovenaan de elektrochemische spanningsreeks. Een voordeel van lithiumbatterijen ten opzichte van nikkel-cadmiumbatterijen is de geringe zelfontlading. Daarnaast is lithium in voldoende mate aanwezig in de aardkorst en is het niet giftig. Toch is de lithiumbatterij nog niet echt doorgebroken. Hiervoor zijn verschillende oorzaken te vinden. Lithium reageert met de elektroden; hierbij ont-

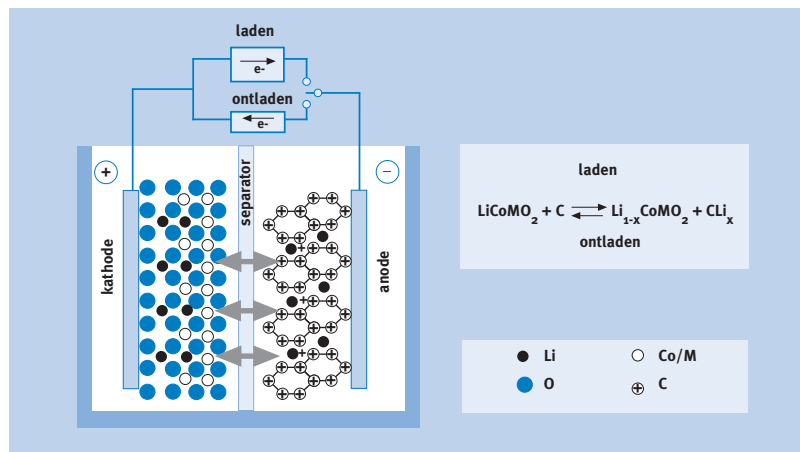
staan onoplosbare chemische verbindingen die een verdere reactie verhinderen. Daarnaast is een groot probleem dat lithium bij het laden van de batterij niet neerslaat op de lithiumelektrode als een dichte laag, maar dendrieten (fijnvertakt naar naaldvormig materiaal) vormt. Deze dendrieten kunnen voor kortsluiting tussen de anode en de kathode zorgen. Dat kan leiden tot het uitvallen van de batterij en tot gevaarlijke situaties door oververhitting en drukopbouw. Bij het ontladen breken de verbindingen tussen dendrieten en stroomcollector gemakkelijk en kunnen daardoor niet meer benut worden. Het verlies aan bruikbaar lithium per cyclus kan verminderd worden door de juiste keuze van de elektrolyt, een lage stroomdichtheid bij het laden en door een hoge druk. Een verlies van 1% per cyclus is onder gunstige omstandigheden haalbaar. Zelfs dan kan een overmaat aan lithium nodig zijn voor een levensduur van 500 cycli. Een ander nadeel van metallisch lithium is de reactiviteit en daaraan gekoppeld het veiligheidsrisico bij lekkage van de batterijbehuizing. De dendrietvorming vergroot het oppervlak en verergert daarmee het probleem.

Sony introduceerde de eerste commerciële secundaire lithium-ionbatterij in draagbare telefoons in 1991. Deze batterij bestaat uit een kobaltoxidekathode met een koolstofanode. Sindsdien zijn er veel verbeteringen en vernieuwingen aangebracht aan deze batterij. Veelbelovende secundaire lithium-ionbatterijen staan op dit moment sterk in de belangstelling. Een reactie van een lithium-ionbatterij op basis van bijvoorbeeld V_6O_{13} verloopt volgens:



Lithiumbatterijen leveren een hoge spanning en hebben een hoge energiedichtheid. De reductor, bijvoorbeeld metallisch lithium, vormt de negatieve pool of anode. Voor de positieve pool of kathode kan gekozen worden uit een groot aantal lithiumverbindingen, bijvoorbeeld een 3d overgangsmetaaloxide of sulfide zoals TiS_2 . Transport van ionen vindt plaats via een elektrolyt.

Fig. 5.1.2
Werking van de lithium-ionbatterij.



Voor de anode is materiaal nodig met een hoge energiedichtheid, zoals bij veel alkalische materialen het geval is. Lithium wordt gebruikt omdat het zeer licht is, goed verwerkbaar, en in vergelijking tot andere alkali-achtige materialen een hoge specifieke capaciteit heeft (3,86 Ah per g).

Anoden uit koolstofachtige componenten voldoen het beste. Deze koolstofelektroden kunnen lithium opnemen volgens:

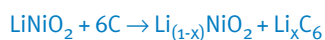


waarbij $0 < x < 1$, afhankelijk is van het gebruikte type koolstof. Voor het produceren van een elektrode bestaande uit koolstof, zoals Li_xC_6 dient er een binder toegevoegd te worden. De uiteindelijke elektrode wordt gemaakt door van koolstof, een binder en een oplosmiddel een slurry te maken die in een bepaalde vorm gegoten kan worden.

In de eerste generatie lithium-ionbatterijen werd metallisch lithium gebruikt als anode. De tweede generatie gebruikt een anode van petroleumcokes met een capaciteit van circa 180 Ah per kg, ongeveer de helft van de huidige grafietanode. De nieuwste anoden bestaan uit een hoge capaciteit koolstoffen, zoals LiC_6 . Het is nog niet helemaal bekend welk mechanisme ervoor zorgt dat deze materialen een hogere capaciteit hebben dan cokes- en grafietanoden. Momenteel wordt onderzoek verricht naar lithiumdiffusie in koolstofvezels. Daarnaast probeert men de capaciteit van koolstoffen te verhogen door dotering met fosfor, silicium en broom.

De kathode moet stabiel zijn ten opzichte van de elektrolyt en de lucht en moet snel reageren bij laden of ontladen. Ook moeten de laad en ontladreacties in hoge mate omkeerbaar zijn.

Voor de kathode kan gekozen worden uit een groot aantal lithiumverbindingen. De beste materialen voor deze toepassing zijn zogenaamde intercalatieverbindingen met de algemene formule LiMO_2 , waarbij M door nikkel, kobalt of mangaan vervangen kan worden. Deze materialen hebben een zeer open structuur en kunnen daardoor goed lithium-ionen accepteren en afgeven. Deze materialen worden geproduceerd door synthese van lithiumoxide met metaaloxiden bij hoge temperaturen. De reactie van de kathode verloopt volgens:



De meest gebruikte elektrolyt op dit moment die geschikt is voor snel transport van lithium-ionen is een zout in combinatie met een bijpassend oplosmiddel. Veel toegepaste zouten zijn lithium-hexafluorofosfaat (LiPF_6), lithium-hexafluorarsenate (LiAsF_6), lithium-bis(trifluormethylsulfide)imide ($\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$).

Veel gebruikte oplosmiddelen zijn ethyleencarbonaat (EC), 1,2 dimethoxyethaan (DME), propyleencarbonaat (PC), dimethylcarbonaat (DMC) en diethylcarbonaat (DEC) of een combinatie hiervan.

Aan vloeibare elektrolyten zijn nadelen verbonden wat betreft veiligheid, bedrijfszekerheid, corrosief gedrag en flexibiliteit van de constructie. Dit is de reden dat er gezocht wordt naar elektrolyten in een vaste of semivaste vorm.

Veelbelovende ontwikkelingen op dit gebied zijn elektrolytische membranen, waarbij de elektrolyt ingekapseld is in een kunststofmatrix. Dit is het geval in de lithium-polymeerbatterij, een veelbelovende techniek waaraan verschillende partijen werken. Men verwacht dat over vijf jaar de eerste lithium-polymeerbatterijen op de markt komen. De opbouw van zo'n batterij is aangegeven in fig. 5.1.3.

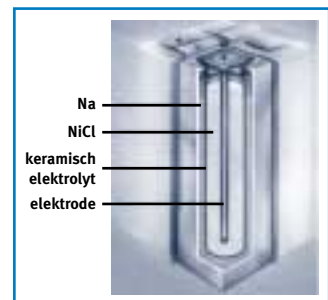
Fig. 5.1.3

Opbouw van een lithiumpolymeerbatterij. Bron: [3M].



Fig. 5.1.4

Doorsnede van een natrium-nikkelchloridebatterij. Bron: Daimler-Benz/Zebra [EV World, 1998].



5.1.3 NATRIUM-NIKKELCHLORIDEBATTERIJEN

De natrium-nikkelchloridebatterij bestaat uit een elektrode van nikkel en een elektrode van keukenzout, gescheiden door een keramisch elektrolyt. De laad- (van links naar rechts) en ontladreactie (van rechts naar links) verlopen volgens:



Deze batterijen zijn wat specifieke energie en specifiek vermogen betreft minder goed dan de nikkelmetaalhydride- en de lithiumbatterijen. Ook heeft de batterij het nadeel dat hij niet bij kamertemperatuur, maar bij ongeveer 315 °C functioneert. Het duurt ook enige dagen voordat de batterij deze temperatuur bereikt heeft. Daartegenover staat dat de prestatie van de batterij niet te leiden heeft van extreme buitentemperaturen, waarvoor de meeste andere batterijsystemen (die een zorgvuldig thermisch management verlangen) wel gevoelig zijn. Ook is het systeem bestand tegen wisselen en koppelen van modules, zonder dat deze speciaal op elkaar afgestemd moeten zijn.

De toepassing van deze batterij zal waarschijnlijk beperkt blijven tot niches, specifiek bij gebruikers in extreme klimaten (vooral kou) die de batterij veel of

continu laden en gebruiken. De batterij kan dan op temperatuur blijven tussen de gebruiksperiodes door [CARB, 1998].

5.1.4 METAAL-LUCHTBATTERIJEN

Metaal-luchtbatterijen zijn uniek in vergelijking met andere secundaire batterijen, omdat een van de elektroden een zuurstofhoudend gas is. In dit opzicht zijn ze te vergelijken met brandstofcellen.

Er zijn twee concepten:

- Conventionele secundaire batterijen die elektrisch geladen worden.
- Mechanisch herlaadbare batterijen, waarin de anode en de elektrolyt bij het laden geheel vervangen worden.

De specifieke voordelen van dit laatste concept zijn een hoge efficiëntie aan de anode en een herlaadtijd van slechts enkele minuten. Daarnaast is de zuurstofkathode alleen in werking tijdens het gebruik van de cel. Dit is van bijzonder belang vanwege de moeilijkheden bij het ontwikkelen van een luchtelektrode die bestand is tegen zuurstof (die altijd gevormd wordt bij het elektrisch laden van de cel). Het 'opwerken' van de anode moet centraal in een daarvoor ingerichte werkplaats plaatsvinden.

OPBOUW EN WERKING

Een cel bestaat uit een anode van metaaldeeltjes, vaak van gesinterde of geklonterde metalen bolletjes in een elektrolyt, vaak een kaliumhydroxideoplossing in water. De anode is verbonden met een extern elektrisch circuit. Deze anode is opgenomen in een behuizing die aan één zijde bestaat uit de luchtelektrode. Deze luchtelektrode is een hydrofoob poreus materiaal, waarin de elektrolyt dus niet kan binnendringen. Deze kathode is voorzien van een elektrisch geleidende fase en een katalysator op basis van een kobaltcomplexverbinding, die de zuurstof reduceert en doorgeeft aan een elektrolyt.

De celreactie luidt voor zink als volgt:



Lithium, aluminium, magnesium en ijzer vertonen dezelfde werking.

Vooralsnog is het zo dat de zink-luchtbatterij het verst ontwikkeld is. Het sys-

Fig. 5.1.5

Het Lawrence Livermore-ontwerp voor de zink-luchtbatterij.

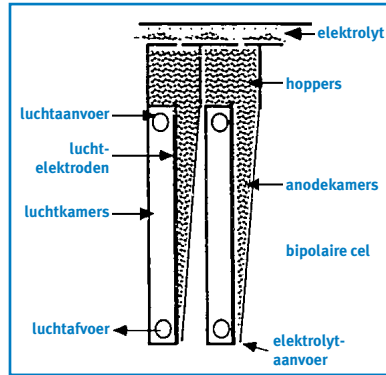
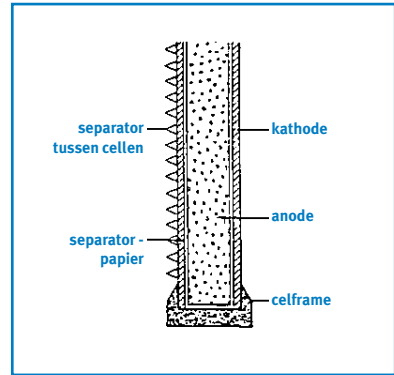


Fig. 5.1.6

Het concept voor de zink-luchtbatterij op basis van vaste elektroden.



teem lithium-lucht heeft vanzelfsprekend de hoogste elektrochemische potentiaal, maar heeft daarmee het probleem dat het in contact met water een beperkte chemische stabiliteit heeft. Een gunstig punt is wel dat de vorming van een oxidefilm op het oppervlak de corrosie tot op zekere hoogte tegengaat, maar geheel vrij van zelfontlading zijn de cellen niet.

Van bijzondere betekenis zijn de celontwerpen, waarbij het anodemateriaal met de elektrolyt continu vanuit een voorraadvat aan de cel wordt toegevoerd.

In het ontwerp van het Lawrence Livermore Laboratorium is iedere cel uitgevoerd als een kleine 'hopper' die op gezette tijden van bovenaf wordt gevuld.

Aan de onderzijde van de cel, dus waar de hopper-opening het kleinst is, gaat tijdens het gebruik de elektrolyt erin, stroomt omhoog en neemt het reactieproduct mee. Tevens wordt zo de reactiewarmte afgevoerd. Een schets hiervan is gegeven in fig. 5.1.5.

Tijdens het ontladen wordt in de buurt van de luchtelektrode het zink aangetaast, waardoor het anodemateriaal naar beneden schuift. Doordat de zinkdeeltjes (ook door de wijze van pakking) geen dichte stapeling kunnen krijgen, blijft de elektrolyt zeer goed toegankelijk in het zinkbed.

Als de elektrolyt geheel is verzadigd met reactieproduct, wordt het afgetapt en wordt ook het restant zink verwijderd. Nieuw elektrolyt en een nieuwe zinkvoorraad zijn in enkele minuten weer aangebracht. Dit bijzondere ontwerp is misschien wat volumineuzer dan dat van de concurrenten, maar heeft als voordeel dat tijdens het laden geen van de stationaire celcomponenten van zijn plaats hoeft te komen. De complexiteit van het systeem is een nadeel.

De verbruikte zink en de elektrolyt worden weer geschikt gemaakt voor gebruik (opgeladen) in een centrale faciliteit. Dit kan geautomatiseerd plaatsvinden.

De meeste andere concepten bestaan uit twee vaste kathoden die de elektrolyt en de zinkkorrels bevatten. Deze kathoden worden door een separator van elkaar gescheiden, zie fig. 5.1.6.

Deze separator is tevens de doorlaat voor de lucht. Het herladen van de cel vereist dat het hele pakket van de elektrolyt en de zinkkorrels of -platen daarin in één keer vervangen worden. Dit ontwerp laat een grote energiedichtheid toe,

maar vereist een goed contact tussen de anodeplaten en de luchtelektrode. Om deze reden zullen deze mechanisch op elkaar gedrukt moeten worden en is de maattolerantie een kritieke factor. Ook de warmteafvoer kan problematisch zijn. Daar staat tegenover dat het basiscelontwerp zeer simpel is en tijdens het gebruik geen bewegende delen zoals een pomp voor de elektrolyt nodig heeft. Het herladen van de elektrolyt gebeurt op analoge wijze als bij het ontwerp van Lawrence Livermore.

ONTWIKKELINGSSTATUS

Het grote probleem bij dit type batterij is vooralsnog de luchtelektrode. Luchtelektroden zijn ontworpen met een gemaximaliseerd specifiek katalysatoroppervlak om de kritieke stap van de zuurstofreductie te optimaliseren en tevens de elektrolyt in de cel te houden. Spectaculaire verbeteringen in dit concept zijn het gevolg van doorbraken in de fosforzure brandstofceltechnologie waar een soortgelijk probleem bestaat. De grootste aandacht gaat nu uit naar het overzetten van deze kennis naar de zink-luchtbatterijtechnologie. De kritieke stap is dus de chemische reactie aan de zuurstofelektrode. Het reduceren van de zuurstof zorgt voor een sterke polarisatie van de kathode. Een aantal interessante materialen en materiaalcombinaties zijn platina of platina op een koolstofdrager, zilver op een grafieltrager en niet-metallische materialen, zoals metaaloxiden of metaalpthalocyaniden. Een reductie van de kosten van de luchtelektrode wordt als de belangrijkste doelstelling gezien.

Een ander probleem is dat speciaal bij hoge stroomdichtheden een limiet voor de diffusie geldt. Vooral de aanwezigheid van stikstof in de lucht is een beperkende factor. Deze beperking manifesteert zich al bij stroomdichtheden van 50 mA per cm². De eisen die bij een elektrisch herlaadbare cel aan een lucht-elektrode worden gesteld zijn stringenter dan die bij een mechanisch herlaadbare cel.

Dit is een gevolg van de zuurstofproductie en de hoge anodepotentialaal tijdens het herladen. Er is geen goede katalysator beschikbaar die zuurstof reduceert en vrijmaakt. Bovendien zijn de meeste materialen instabiel bij de vereiste hoge elektrodepotentialen. Zelfs het platina blijkt op te lossen en verplaatst zich naar de negatieve elektrode. Er bestaan twee benaderingen voor de oplossing van dit probleem. De eerste is toepassing van een bifunctionele elektrode. Deze elektrode bevat een metaal voor het vrijmaken van de zuurstof, en een metaal voor de reductie op verschillende plaatsen in de poreuze hydrofobe matrix. Het alternatief is een derde elektrode die uitsluitend voor het laden van het systeem wordt gebruikt. Deze laatste oplossing voegt echter gewicht toe aan het totale concept. Niet in alle gevallen wordt een basische oplossing gebruikt. Ook een zure elektrolyt kan gebruikt worden, maar deze laat lagere stroomdichtheden toe. Een zure elektrolyt wordt gekozen, omdat deze minder gevoelig is voor kooldioxide uit de lucht.

ENKELE GETALLEN

In tabel 5.1.1 volgt een overzicht van de (intrinsieke) prestaties van verschillende metalen.

Tabel 5.1.1

Open celspanning en energiedichtheid van verschillende metalen.

Type cel	Open celspanning bij PO ₂ : 0,21 atm	Energiedichtheid Wh/kg
lithium	2,90	1.1148
aluminium	2,71	8.081
magnesium	3,09	6.813
ijzer	1,28	1.843
zink	1,62	1.330
cadmium	1,20	573

5.1.5 REDOXFLOWBATTERIJEN

ir. J.M. Meij

Op een aantal plaatsen wordt gewerkt aan redoxflowbatterijen. Deze batterijen hebben als bijzonderheid dat de energie opgeslagen wordt in een vloeistof, die naar behoeven opgeslagen en toegevoerd kan worden. Een voordeel daarvan is dat de maximale hoeveelheid opgeslagen energie eenvoudig vergroot kan worden door de opslagcapaciteit voor de vloeistoffen te vergroten. De huidige redoxflowsystemen zijn gebaseerd op reacties van het metaal Vanadium:



Bij het opladen verlopen de reacties van links naar rechts, bij het laden van rechts naar links. Een schematische weergave van een redoxflowsysteem is gegeven in fig. 5.1.7.

De energiedichtheid is 20 tot 30 Wh per liter, 1/4 tot 1/3 van de energiedichtheid van een loodaccu. Daarmee is de redoxflowbatterij voorlopig relatief groot en zwaar, een nadeel voor mobiele toepassingen. Het laad- en ontlaadrendement is relatief hoog (> 85%), en omdat de vloeistoffen apart worden opgeslagen is de zelfontlading zeer gering. Het systeem is daarmee interessant voor opslag van tijdelijke elektriciteitsoverschotten of voor 'peak shaving' (het wegwerken van pieken). De systemen verkeren nog in het ontwikkelingsstadium.

Fig. 5.1.7

Werking van een Vanadium redoxflowbatterij [Menictas, 1997; SEI, 1997].

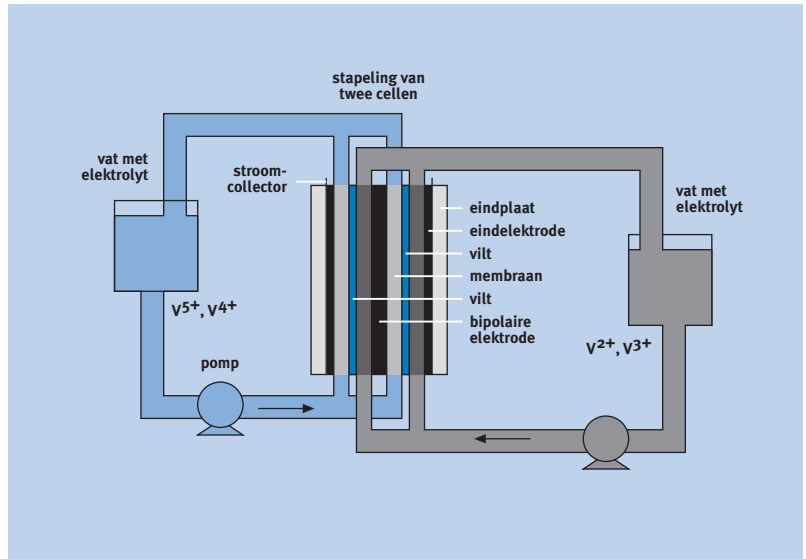
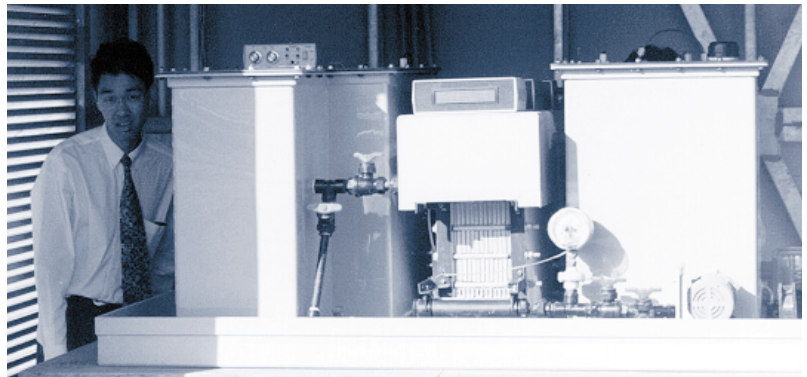


Fig. 5.1.8

Testopstelling van 13 kWh voor een PV-huis in Thailand [Menictas, 1997].



5.2 CONDENSATOREN EN SUPERCONDENSATOREN

5.2.1 CONDENSATOREN

prof.dr. J.A. Ferreira²

Deze bijdrage is gebaseerd op een verhandeling over de resultaten van een studie door Sarjeant en Staffiere [Sarjeant, 1997].

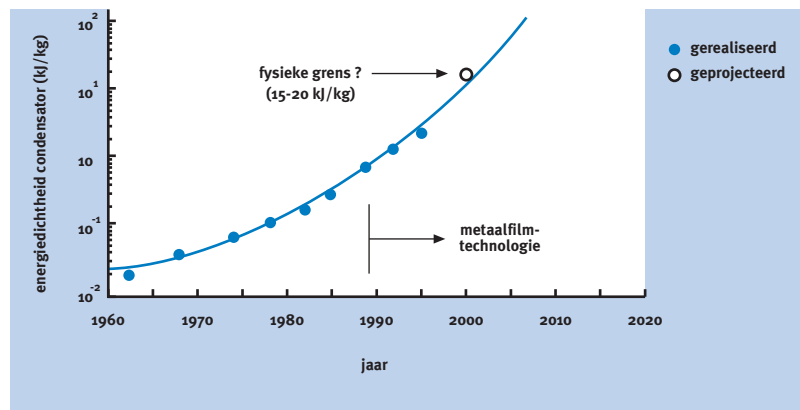
Een condensator is een element dat gebruikt wordt voor het opslaan van lading. Over het algemeen bestaat een condensator uit geleidende platen of folielagen van elkaar gescheiden door dunne lagen isolatiemateriaal. Wanneer de platen door een spanningsbron geladen worden, wordt er elektrische energie opgeslagen door de polarisatie van het isolatiemedium en de lading die zich op de oppervlakte van de folielagen bevindt. Belangrijke eigenschappen van een condensator zijn de hoeveelheid lading die de condensator kan opslaan in Farad (F) en de maximale bedrijfsspanning. Net als bij batterijen kunnen we van een bepaald type condensator een specifieke energie (in W/kg of J/kg) aangeven. Condensatoren worden gebruikt voor veel vermogenselektronische systemen, zoals:

- Filters in vermogenselektronische omzeters.
- Resonantieconverters.
- Hard schakelende voedingen.
- Pulsconverters voor energieontladingen.
- DC-ontkoppeling van hoge-frequentie AC-systemen.

De verwachting is dat vooral de vermogenselektronica in de toekomst sterk zal profiteren van de vooruitgang in condensatortechnologie. De waargenomen evolutionaire ontwikkeling van de condensatortechnologie ligt op ongeveer een factor 2 per tien jaar voor alle prestatiekenmerken, en het bereikte niveau ligt nog ver onder de fysieke grenswaarden. Uitgaande van deze evolutionaire ontwikkeling zou het nog 80 tot 90 jaar duren voordat deze grenzen benaderd

Fig. 5.2.1

Verwachte energiedichtheden voor geavanceerde condensatoren voor energieopslag.



² Technische Universiteit Delft, Faculteit ITS, Opleiding Elektrotechniek, Postbus 5031 2600 GA Delft J.A.Ferreira@ITS.TUdelft.NL

worden. De huidige onderzoeksinspanningen kunnen er echter toe leiden dat deze niveaus al in het komende decennium bereikt worden. Het meest indrukwekkend is de ontwikkeling van de condensatoren voor energieopslag, die getoond wordt in fig. 5.2.1.

De energiedichtheid van conventionele condensatoren zal toenemen met een factor 2 tot 10 per decennium. De grootste mogelijkheden voor verbetering in de metaalfilm-, keramische, mica- en elektrolytische condensatoren liggen in het (reactieve) vermogen. Dit vertaalt zich in de maximale stroom- en spanningswaarden als functie van de frequentie. Deze waarden kunnen verbeterd worden door de diëlektrische en lekstroomverliezen te verminderen en de warmteafvoer te verbeteren. Tabel 5.2.1 geeft de verwachte ontwikkelingen van de prestaties van condensatoren, en toont tevens voorbeelden van bepaalde typen geavanceerde condensatoren die door onderzoek en ontwikkeling tot praktische, zeer compacte systemen kunnen leiden. De verwachting is dat de kosten in hoge productievolumes vergelijkbaar zullen zijn met die van de huidige technieken.

Tabel 5.2.1

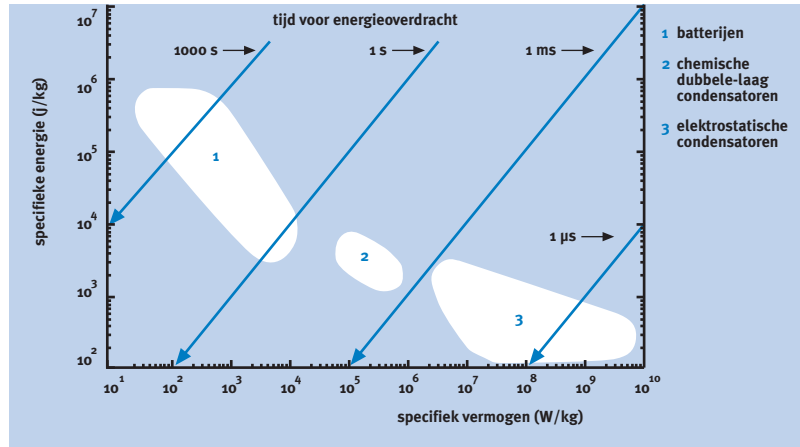
Verwachtingen voor verschillende condensatortypen. Ook de belangrijkste aandachtspunten bij de ontwikkeling worden aangegeven.

Condensatortype	Specifieke energie kJ/kg		Specifiek vermogen kWe/kg		Maximale herhalings- frequentie
	1997	2010	1997	2010	
polymeerfilm	0,4	20	5	2.000	> 100 Hz belangrijkste aandachtspunten: nieuwe polymeerfilms, impregneermiddelen, folies en geleiders, omkering spanning, pulsduur, herhalingsfrequentie, werkt temperatuur, > 100 °C, >> 1 kJ/condensator
keramisch	0,01	5	10	10.000	> 100 kHz belangrijkste aandachtspunten: samenstelling keramiek, elektroden, opschaling spanning, overbelastingsbeveiliging, > 200 °C
elektrolytisch	0,2	2	0,2	10.000	> 100 Hz belangrijkste aandachtspunten: elektrolyten, separators, vrijkomen van gassen, hermetische afdichting, omkering spanning, herhalingsfrequentie, > 200 °C, 1 kJ/condensator
mica	0,01	0,05	5	50.000	> 1 MHz belangrijkste aandachtspunten: elektroden, opschaling spanning, omkering spanning, materialen, impregneermiddelen, > 300 °C, 1 kJ/condensator

Wat is het verschil tussen een condensator en een batterij? In het verleden was het onderscheid duidelijk te maken, maar met de ontwikkeling van de zeer hoge-capaciteitscondensatoren (supercondensatoren, zie de volgende paragraaf) ligt het onderscheid niet meer zo voor de hand. Beide zijn in staat energie op te slaan en vermogen te leveren, wanneer ze ontladen worden. In een batterij kan een grote hoeveelheid energie opgeslagen worden, maar de ontlaadsnelheid is beperkt. Bij een condensator is het omgekeerde het geval. In fig. 5.2.2 is te zien hoe verschillende gebieden worden ingenomen door batterijen en con-

Fig. 5.2.2

Prestaties van batterijen en condensatoren.



ventionele condensatoren. De chemische dubbele-laagtechnologie evolueert om het belangrijke prestatiegat te vullen tussen batterijen en conventionele condensatoren. Op dit gebied wordt snelle vooruitgang verwacht; er zijn reeds nieuwe productfamilies in ontwikkeling.

5.2.2 SUPERCONDENSATOREN

dr.ir. L. Plomp³

INLEIDING

Supercondensatoren zijn componenten voor het opslaan van elektriciteit. Hun eigenschappen liggen tussen die van gewone diëlektrische (elektrostatische) condensatoren en secundaire batterijen in. Er is een breed scala aan potentiële toepassingen, al dan niet in combinatie met batterijen of brandstofcellen. De drijfveren voor ontwikkeling van de beoogde systemen zijn een betere functionaliteit, een hogere efficiëntie en lagere kosten.

PRINCIPE EN EIGENSCHAPPEN

Supercondensatoren zijn gebaseerd op Helmholtz dubbellaagcapaciteit, pseudocapaciteit of combinaties daarvan. Een Helmholtz dubbellaag ontstaat op het grensvlak van een elektronengeleider en een vloeibaar elektrolyt. In een supercondensator – bestaande uit twee elektroden gescheiden door een separator gevuld met elektrolyt – komen twee van dergelijke grensvlakken voor. Bij het laden treedt in de elektrolyt een ladingsscheiding op en ontstaat bij iedere elektrode een dubbellaag met zeer geringe dikte van ca. 1 nanometer. Dit resulteert in specifieke capaciteiten van ongeveer 10 μF per cm². Wanneer nu elektroden met een hoog specifiek oppervlak worden gebruikt, bijvoorbeeld koolstofmaterialen met $\geq 1.10^7$ cm² per g, zijn capaciteiten van 100 F per g en meer haalbaar. Supercondensatoren die zijn gebaseerd op dubbellaagcapaciteit verschillen

.....
³ ECN,
Brandstoffen, Conversie & Milieu,
Postbus 1
1755 ZG Petten
L.Plomp@ecn.nl

essentieel van herlaadbare batterijen. Omdat bij het laden en ontladen geen Faraday-processen optreden, zijn de responstijden kort en is de inwendige warmteontwikkeling gering. Dit laat zeer hoge specifieke vermogens toe. Het ontbreken van chemische reacties en fase- of vormverandering resulteert in een zeer lange levensduur in laad- en ontladcycli. Als gevolg van de puur fysische opslag is de specifieke energie echter laag. De toepassing van pseudocapaciteit waarbij elektrochemische redox-reacties in het elektrodemateriaal optreden, kan hierin verbetering brengen. Sommige van de genoemde voordelen gaan dan echter deels verloren. Tabel 5.2.2 geeft enkele eigenschappen van supercondensatoren in vergelijking met herlaadbare lithiumbatterijen die eveneens in ontwikkeling zijn. Een supercondensator is duidelijk een ‘peak-power device’.

Tabel 5.2.2

Enkele globale karakteristieken van supercondensatoren en lithiumbatterijen.

	(Wh/kg)	(W/kg)	aantal laad- en ontladcycli	zelfontlading
lithiumbatterijen	120	300	> 10.000	10/mnd
supercondensatoren	1	> 1.000	> 100.000	> 10%/dag

TOEPASSINGEN EN EISEN

Supercondensatoren kunnen worden gebruikt in zeer uiteenlopende toepassingen zoals ‘memory backup’, laptops, mobiele telefoons, locomotieven, hoogvermogeninstallaties, autostarters, enz. Bij mobiele telefoons bijvoorbeeld wordt de batterij geconfronteerd met een belasting die bestaat uit korte, hoge pulsen. Een dergelijke zware ‘duty cycle’ betekent extra verliezen, waardoor de batterij relatief snel moet worden herladen en de levensduur wordt bekort. Het reduceren van de duty cycle door parallel aan de batterij een supercondensator op te nemen, kan dan ook dubbel voordeel betekenen.

Opslagsystemen waarin supercondensatoren zijn opgenomen lijken van bijzonder belang voor de ontwikkeling van elektrische voertuigen, vooral voor de zogenaamde hybride-elektrische voertuigen waarin nog een verbrandingsmotor wordt toegepast of een brandstofcel⁴. De eisen aan het opslagsysteem ontwikkelen zich daar vooral naar een hoog specifiek vermogen. De toepassing van supercondensatoren kan dan zowel een aanzienlijke reductie van massa en volume van het opslagsysteem betekenen als de kosten verminderen en de efficiëntie van het systeem verbeteren. In dit specifieke geval kunnen ook de hoge energiepulsen van de terugwinning van remenergie (die over het algemeen slecht in een batterij zijn op te slaan en de levensduur bekorten) worden gebruikt om de supercondensator te laden.

Vanzelfsprekend stelt iedere toepassing specifieke eisen, die de ene of andere eigenschap van de supercondensator kunnen benadrukken. Voor een deel worden die eisen bepaald door het te leveren piekvermogen en de daarbij behorende tijdschaal. De specifieke energie die hieruit volgt ligt voor veel toepassingen boven de 10 Wh per kg; de huidige technologieën halen ca. 1 Wh per kg.

⁴ Meer over de toepassing van supercondensatoren in elektrisch vervoer in par. 4.5.6 van Deel 1.

ONTWIKKELINGEN

De supercondensatoren die op dit moment ontwikkeld worden gebruiken waterige elektrolyt en of oplossingen van zouten in organische vloeistoffen. Eerstgenoemde worden gecombineerd met koolstofelektroden of elektroden van keramische materialen zoals RuO_2 . Bij organische elektrolyten kunnen naast koolstof ook polymeren als elektrodemateriaal worden gebruikt. Met name de keuze van de elektrolyt is van zeer groot belang voor de uiteindelijke eigenschappen van de condensator. Waterige elektrolyten hebben in het algemeen een hogere ionenconcentratie, (waardoor minder elektrolytvolume nodig is) en een goed geleidingsvermogen dat hoge specifieke vermogens toelaat. De elektrochemische stabiliteit beperkt echter de toelaatbare spanning tot ca. 1 V, waardoor de specifieke energie laag is (immers: $E = 1/2CU^2$). De organische oplossingen zijn vanwege hun geringer geleidingsvermogen minder geschikt voor toepassingen in hoge specifieke vermogens en zijn ook duur. De hogere toelaatbare spanning van ca. 3 V betekent echter een groot voordeel voor de capaciteit, in het bijzonder voor de specifieke energie. Daar komt bij dat voor het vormen van modulen met hogere spanning minder cellen in serie geschakeld hoeven te worden, wat gunstig is voor een hoge capaciteit en een lage inwendige weerstand van het geheel. Voor alle elektrolyten geldt dat een hoge zuiverheid vereist is om statische zelfontlading door 'side-reactions' tot een minimum te beperken.

Bij de keuze en ontwikkeling van elektrodematerialen spelen ook de prijs en het optimaliseren van energie of vermogen een belangrijke rol. Cycleerbaarheid en levensduur zijn daarbij belangrijke voorwaarden. Voor koolstofelektroden wordt een variëteit aan materialen onderzocht, zoals geactiveerde poeders, fibers, aerogels⁵ en nanotubes⁶. Elektroden van p- of n-gedoopte polymeren maken hogere specifieke energieën mogelijk, maar hebben een beperkte cycleerbaarheid ten gevolge van vormveranderingen. Op het gebied van de keramische elektrodematerialen wordt gezocht naar goedkope alternatieven voor het dure RuO_2 .

CONCLUSIE

Supercondensatoren hebben potentieel veel toepassingsmogelijkheden. Daar iedere toepassing specifieke eisen stelt is het op maat maken van de supercondensatoreigenschappen een belangrijk onderwerp voor ontwikkeling en onderzoek. Het verhogen van de specifieke energie, het verminderen van zelfontlading en het verlagen van materiaal- en productiekosten zijn essentieel in veel toepassingen. In dit verband wordt veel materiaalonderzoek gedaan.

5 Een zeer lichte vorm van siliciumdioxide met een enorm inwendig oppervlak.

6 Zeer kleine buisjes van koolstofatomen.

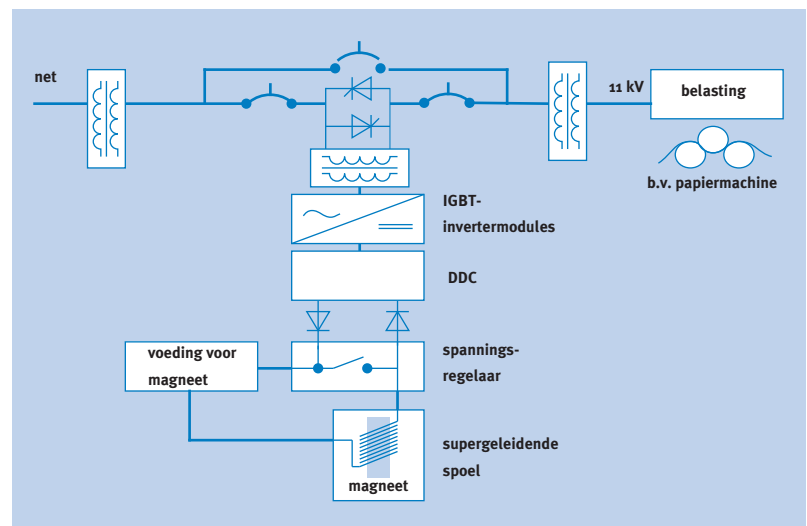
5.3 SUPERGELEIDENDE MAGNETISCHE ENERGIEOPSLAG (SMES)

dr.ir. B. ten Haken⁷

Vanaf het moment dat supergeleidende magneten in staat waren om sterke magnetische velden te genereren is er gedacht en gewerkt aan het ontwikkelen van magneten voor supergeleidende magnetische energieopslag (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage). De energie per volume-eenheid die is opgeslagen in een magnetisch veld is B^2 per $2\mu_0$. Bij een sterk magnetisch veld van $B = 10$ tesla komt dat overeen met 40 MJ per m^3 ($= 12 \text{ kWhr per m}^3$). Deze energiedichtheid is laag vergeleken bij die in een conventionele batterij of accu, maar beduidend hoger dan in een condensatorbank. Een belangrijk voordeel van een SMES-systeem is het hoge rendement. Tijdens het laden en ontladen wordt het rendement voornamelijk bepaald door de kwaliteit van de vermogenselektronica. Het vermogensverlies in de magneet zelf kan relatief eenvoudig tot praktisch nul gereduceerd worden ($< 1\%$ per jaar). Er is echter wel een zeker koelvermogen nodig om de magneet op een voldoende lage temperatuur te houden. Deze eigenschappen maken SMES-systemen minder geschikt voor zeer grootschalige energieopslag over langere tijd, zoals in een stuwmeer gebeurt. Daartegenover staan de grote flexibiliteit in de keuze van de laad- en ontladtijden en een lange verwachte levensduur als belangrijke voordelen van SMES.

In het verleden is er veel gestudeerd op het gebruik van SMES voor efficiënte langdurige en grootschalige energieopslag. De laatste jaren spitst het onderzoek naar het gebruik van SMES in het distributienet zich steeds meer toe op toepassingen voor het verbeteren van de kwaliteit en betrouwbaarheid, het opvangen van korte en middellange spanningsonderbrekingen, het voorkomen

Fig. 5.3.1
Principeschema van een micro-SMES-systeem [ASC, 1998].



7 Universiteit Twente,
Postbus 217
7500 AE Enschede
B.tenHaken@tn.utwente.nl

van spanningsoscillaties (met name over grote afstanden) en het leveren van piekvermogens voor het opstarten van generatoren en andere processen (micro-SMES). Een compleet SMES-systeem bevat een gesloten koelsysteem, een beveiligingssysteem, een halfgeleider AC-DC-omzetter en een conditioneringssysteem. Omdat met een SMES-systeem een zeer korte responstijd gerealiseerd kan worden (< 10 ms), kan er in een cyclus van 50 Hz al vermogen teruggeleverd worden.

Andere toepassingen buiten het distributienet zijn vooral te vinden in systemen waarin een zeer kort, maar krachtig piekvermogen wordt gevraagd. Mogelijke toepassingen voor dit soort zeer snelle SMES-systemen zijn pulslasersystemen voor militair gebruik, pulsvoorzieningen in deeltjesversnellers, maar ook het opstartproces van de kernfusiereactie in een fusiereactor. Een andere speciale toepassingsmogelijkheid zijn met zonnecellen uitgevoerde satellieten, waarin de tijd dat deze zich in de schaduw van de aarde bevinden, moet worden overbrugd. In deze gevallen zou een SMES-systeem vanwege de verwachte langere levensduur kunnen concurreren met de huidige batterijsystemen.

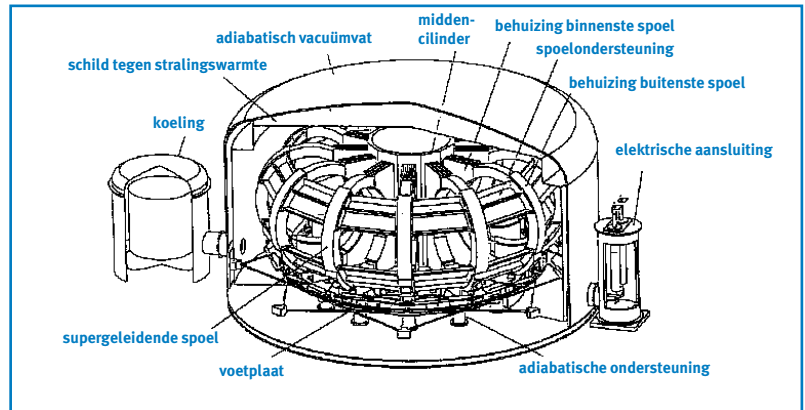
In de jaren zeventig en tachtig is er vooral in de VS en Japan veel onderzoek gedaan naar grote SMES-systemen die zijn gebaseerd op de goed beschikbare en betrouwbare NbTi-geleidertechniek. Diverse studies zijn gedaan naar systemen voor 1 - 1000 MWhr. Deze zeer grote systemen met magneetspoelen van honderden meters groot zijn allemaal tot ontwerpstudies beperkt gebleven. In de VS is in de jaren tachtig een 30 MJ-systeem ontwikkeld om laagfrequente oscillaties te dempen in een lange hoogspanningslijn aan de westkust van de VS. Deze ontwikkeling heeft geleid tot het wereldwijd grootste SMES-programma (50 miljoen US dollar). Door Babcock en Wilcox is recent een 500 kWh SMES-ontwerp ontwikkeld voor toepassing in het distributienet bij Anchorage. Deze SMES moet een vermogen tot 30 MW leveren gedurende ongeveer een minuut. De magneet van 7 meter diameter zal tot 1800 MJ energie opslaan [Kral, 1997]. In de VS zijn enkele bedrijven al een aantal jaren commercieel succesvol op de markt van de micro-SMES. Het voormalige SI (Superconducting Inc.) en de magnetenfabrikant IGC hebben diverse SMES-units met een opgeslagen energie van enkele MJ verkocht in de afgelopen jaren [Luongo, 1996; Juengst, 1998]. Hoewel deze magneetsystemen zijn gebaseerd op NbTi lage-temperatuursupergeleiders, is SI inmiddels overgenomen door 's werelds grootste fabrikant van hoge-temperatuursupergeleiders, ASC.

In Japan is in 1986 bij Hitachi een 5 MJ SMES-systeem gebouwd en getest op een 6,6 kV hoogspanningslijn. Enkele jaren later is samen met een lokale elektriciteitsmaatschappij een iets kleiner systeem ontwikkeld, getest en geconstrueerd, vooral om te bestuderen hoe een SMES-systeem de stabiliteit van een

distributienet kan verbeteren. In 1988 is het Japanse technologiecentrum voor supergeleiding (ISTEC) een programma gestart. Ook dit programma concentreerde zich nog op de toepassing van lage-temperatuursupergeleiders (NbTi en Nb₃Sn). In 1991 resulteerde dit in de constructie en test van een 100 kWh/20 MW proefproject (zie fig. 5.3.2). Daarnaast is er net zoals in de VS een studie gestart naar een zeer groot systeem van 480 MJ door ISTEC & MITI [Juengst, 1998].

Fig. 5.3.2

Ontwerpschets van de 100 kWh/20 MW SMES van ISTEC. Bron: [Satow, 1997].



In Duitsland is de laatste jaren gewerkt aan diverse SMES-systemen. Het Forschungs Zentrum-Karlsruhe heeft een systeem van 250 kJ ontwikkeld en geïnstalleerd bij een zaagfabriek. Dit systeem vangt de vermogenspieken op die nodig zijn om de grote motoren te starten. De Technische Universität München werkt aan een systeem van 1,4 MJ met een toroidale magneet om het strooiveld te beperken. Ook Siemens is al vele jaren actief in Duitsland en heeft enige jaren geleden een systeem van 2 MWhr/50 MW geleverd aan Pruessen Electra. Een zeer specialistische toepassing is gevonden in de DESY-deeltjesversneller waarin een SMES-systeem 10 GW pulsen van slechts 1 ms levert aan de RF-klystrons [Juengst, 1998].

Alle genoemde systemen zijn gebaseerd op de al jaren bestaande, maar steeds verder geoptimaliseerde lage-temperatuursupergeleiders die werken bij een temperatuur van -269 °C. De ontwikkelingen op het gebied van hoge-temperatuursupergeleiders geven echter ook een aantal interessante mogelijkheden. Deze relatief nieuwe supergeleiders zijn in principe bruikbaar bij relatief hoge temperaturen (bijv. op -196 °C bij vloeibare stikstof), maar de voor SMES benodigde sterke magneetvelden (> 1 tesla) zijn alleen te realiseren bij veel lagere temperaturen tot beneden de -230 °C. Dit temperatuurbereik is met vloeibaar helium of met koelmachines technisch goed haalbaar, maar vraagt net zoals bij het gebruik van lage-temperatuursupergeleiders wel een extra investering in koelvermogen. De hoge-temperatuursupergeleiders (HTS) kunnen voordelen

bieden vanwege de hogere werktemperatuur (minder kosten voor de koeling) of het gebruik in nog sterkere magneetvelden (bijv. in compactere systemen).

Op dit moment zijn de resultaten met HTS echter nog bescheiden. Magneten met een veld boven de 1 tesla worden alleen nog met zeer geringe afmetingen gemaakt en de energie-inhoud blijft daarom ook relatief beperkt. Illustratief is het eerste SMES-systeem met HTS dat recent is ontwikkeld op de Universiteit van Tampere (Finland) met een energie-inhoud van slechts 5 kJ [Mikkonen, 1998]. Echter ook de lage-temperatuursupergeleidende technologie bleek een zaak van lange adem. Ook die ontwikkeling is in de jaren zestig op deze kleine schaal begonnen en dat heeft tot op dit moment geleid tot de bouw van de magneet voor de ATLAS-detector voor de nieuwe deeltjesversneller bij CERN met een energie-inhoud van 1.300 MJ. De recente uitbreiding van het commercieel meest actieve HTS-bedrijf (ASC) met een op SMES georiënteerde afdeling (het voormalige SI) is een belangrijke indicatie van de goede toekomstkansen voor de combinatie van SMES en HTS.

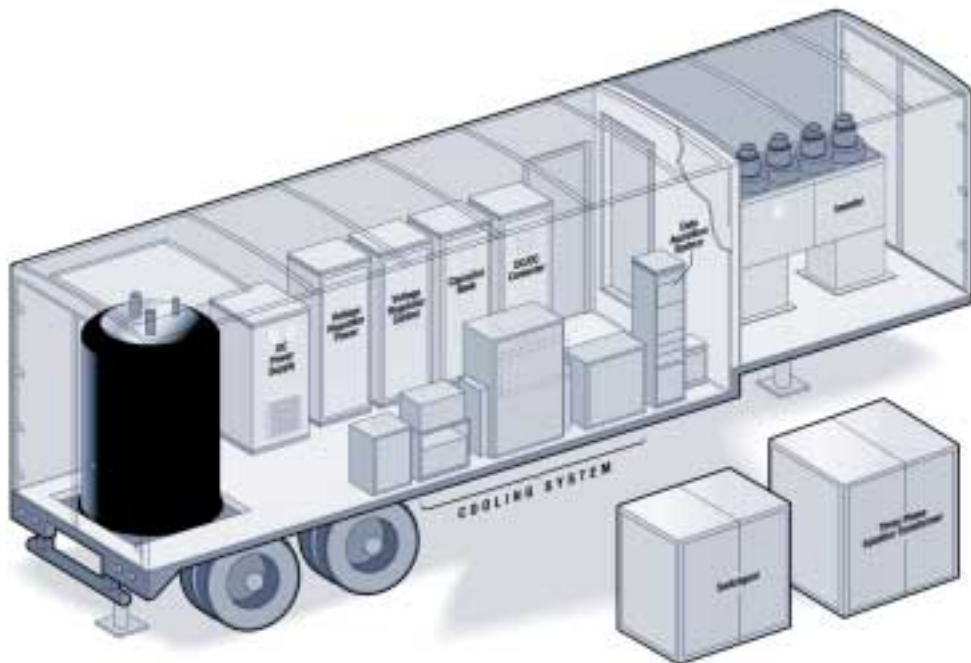


Fig. 5-3-3
Recente mobiele SMES-unit van ASC
[ASC, 1998].

5.4 ELEKTROMAGNETISCHE VLIEGWIELEN

dr. H.J. Veringa⁸

Het doel van energie-opslag is om elektrische energie op te slaan als dat ruim voorhanden of goedkoop is, en beschikbaar te hebben als er schaarste heerst. Het concept van opslag van elektrische energie in roterende vliegwielen is een aantrekkelijk alternatief voor opslag in batterijen, omdat energiedichtheden van ruwweg een factor 10 hoger mogelijk zijn. Voor het realiseren van dit ideaal dient echter een aantal kritieke technologieën ontwikkeld te worden, zoals het rotorontwerp, specifieke composietmaterialen, magnetische ophanging en lagering en hoog-rendementsmotoren en -generatoren.

Als we de toepassing in de ruimtevaart als voorbeeld nemen, is energie gedurende perioden van 60 minuten voorhanden en dient de opgeslagen energie beschikbaar te zijn gedurende perioden van 30 minuten. Als we ervan uitgaan dat de gebruiksduur 17 jaar is, dan dient het systeem 10^5 cycli te kunnen doorlopen. Een van de belangrijkste componenten in een vliegwielstelsel is de rotor zelf. De keuze van deze component bepaalt tevens de wijze waarop het stelsel gelagerd dient te worden en hoe de in- en uitkoppeling van energie plaatsvindt. Een typische prestatiefactor is gegeven door de specifieke energiedichtheid, SED:

$$SED = K_s \cdot \sigma / \rho$$

waarin K_s een dimensieloze vormfactor is, σ (sigma) de materiaalsterkte en ρ (rho) de massadichtheid van het toegepaste materiaal.

Voor de huidige materialen blijkt dat een stelsel uit een grafiet/epoxy matrix ($\sigma/\rho = 500$ Wh per kg) superieur is aan bijvoorbeeld staal (30 Wh per kg). De verwachting lijkt gerechtvaardigd dat met een vezel/matrixstelsel een waarde van 630 Wh per kg kan worden gehaald.

Het idee achter de verhoging van bovengenoemde factor met composieten is het verkrijgen van een uniforme mechanische spanning in de rotor. Dat houdt in dat op ieder punt in de rotor het materiaal zich bevindt in een spanningstoestand, die zowel in radiale als in tangentiële richting de maximale waarde nadert. Bij een composiet is een typische waarde voor de tangentiële sterkte 22.800 MPa en de radiële sterkte 70 MPa. De kunst is dus om een rotor zodanig te ontwerpen en te segmenteren dat deze spanningssituatie bij het maximum toerental bereikt wordt.

Een veel toegepaste uitvoeringsvorm is de dunwandige ring. Hier is de dimensieloze factor K_s gelijk aan 0,5. De radiële spanning is in dat geval verwaarloosbaar en de volledige tangentiële spanning kan worden benut.

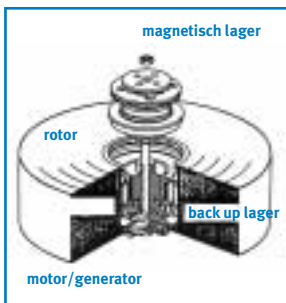
Er dient nog opgemerkt te worden dat de rotatiesnelheid niet expliciet in de vergelijking voorkomt, maar deze is verstopt in de materiaalsterkte.

.....
⁸ ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
veringa@ecn.nl

Rotatiesnelheden worden aangegeven met het Machgetal (aantal malen de geluidssnelheid) van de buitenomtrek. Deze liggen tussen 2 en 3. Deze hoge snelheden maken dat het systeem onder vacuümcondities bedreven dient te worden. De meest voorkomende uitvoeringsvormen zijn gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

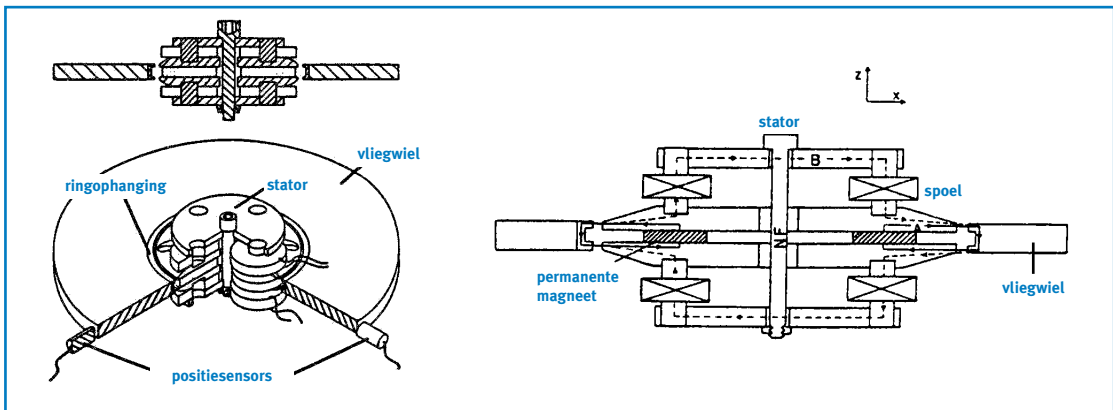
- Een cilindrische opbouw met een doorlopend gat in het centrum voor de lagering en het onderbrengen van de generator- en motoreenheid. Verder worden magnetische levitatie en rotoruitlijning toegepast.
- Omdat het geheel in vacuüm functioneert, kan alleen elektrische energie worden in- en uitgekoppeld.

Fig. 5.4.1
Vliegwielsysteem van de University of Maryland.



In fig. 5.4.1 is een vliegwielopslageenheid getoond zoals die is ontwikkeld op de University of Maryland. Hier is de rotor cilindrisch en gesegmenteerd in radiale richting. Deze segmentering is toegepast om over de gehele diameter de juiste balans tussen radiële en tangentiële spanning te krijgen. De segmenten zijn derhalve in voorgespannen toestand gemonteerd. De componenten in het centrale gat voor de lagering en in- en uitkoppeling van energie zijn voor de vliegwielerwerking 'dode gewichten' en leiden tot ongewenste spanningsconcentraties. Dit was onder andere de aanleiding om voor een vijfvoudige segmentering van de rotor te kiezen. Ook heeft deze segmentering tot gevolg dat de verhouding tussen binnen- en buitendiameter 0,45 bedraagt. Het bleek op deze wijze mogelijk om alle radiële spanningen op de overgangen van de segmenten zuiver compressief te houden. In het geval dat het systeem overbelast wordt, zal eerst de buitenste ring loskomen van de rest, wat in overeenstemming is met het 'fail safe' concept van het ontwerp. Een bijkomend voordeel is dat het maken van dunwandige cilindrische ringen eenvoudiger is dan het vervaardigen van dikwandige componenten uit een composietmateriaal.

Fig. 5.4.2
Actieve en passieve lagering van een vliegwielsysteem volgens een principe ontwikkeld aan de University of Maryland.



Twee magnetische lagerings- en uitlijningselementen zijn in de binnenruimte opgenomen. Behalve deze magnetische lagering is ook nog een back-up kogel-lagersysteem opgenomen. De eenheid voor in -en uitkoppeling is een borstelloze motor/generator met een hoog rendement. Een voorbeeld van een actief en passief lageringssysteem is gegeven in fig. 5.4.2.

Zo'n lagersegment bestaat uit twee ferromagnetische platen met daartussen hoog-remanente permanente magneten. Deze eenheden maken deel uit van het statische geheel. Op de rotor zitten elementen die de magnetische flux concentreren en doorgeleiden, waardoor het geheel de functie kan vervullen van dragend element. De geometrie is zodanig dat in eerste orde geen radiële krachten opgewekt worden. Een axiale verplaatsing van de rotor geeft aanleiding tot een verhoging van de aantrekkende kracht in opwaartse richting, zodat in ieder geval de rotor axiaal (in verticale richting dus) op zijn plaats gehouden wordt. De radiële positionering wordt dynamisch geregeld. Hiervoor bevinden zich acht magnetische spoelen in het lagerpakket die hun flux overdragen op de ferromagnetische platen. Deze flux wordt toegevoegd aan die van de permanente magneten. In deze uitvoering wordt bereikt dat de combinatie van de fluxen van de permanente magneten en de spoeltjes (die in partijen van vier in serie bekrachtigd worden) een netto radiële kracht opwekken die evenredig is met het product van de fluxen van de permanente magneten en de spoeltjes. Door de acht spoeltjes dus in groepen van vier stuks in serie (met een responstijd die lager is dan de rotatieperiode van de rotor) te bekrachtigen, is het mogelijk om in alle radiële richtingen een dynamische uitlijning te bewerken. Twee van deze magnetische lagerpakketten zijn in een rotorsysteem opgenomen. De aansturing van de spoeltjes gebeurt op basis van sensoren, die aan de buitenzijde van de rotor de radiële verplaatsing waarnemen.

Andere vormen van lagering zijn ook mogelijk op basis van hoge-temperatuursupergeleiding. In dit geval wordt gebruik gemaakt van het Meissner-effect. Een remanent magnetisch materiaal wordt nu gemonteerd op de rotor, die door een hoge-temperatuursupergeleider op afstand wordt gehouden. De permanente magneten wekken afschermstromen op in de supergeleider, die daarmee de vereiste dragende functie opwekken. Van belang voor het beperkt houden van de verliezen is dat de uitvoering rotatiesymmetrisch is. Het dragend vermogen kan op deze wijze ongeveer 100 kPa bedragen. Het is technisch mogelijk om de supergeleider op atmosferische druk te bedrijven, terwijl de rotor en de draagmagneet zelf in vacuüm zitten.

De belangrijkste toepassing die ons voor ogen staat is netstabilisatie. In een dergelijk geval is de optimale energie-inhoud ongeveer 5 MWh met een totaal vermogen van 1 MW. Als we dan bepalen wat technisch haalbaar is, dan moeten we uitgaan van 2.000 eenheden.

Om een dergelijk aantal vliegwielen te kunnen hanteren, moeten ze dus met een minimum aan menselijke interactie bedreven kunnen worden. Om die reden zullen intelligente regelsystemen moeten worden ontworpen.

In een voorgestelde configuratie wordt 80% van het totale opslagsysteem gebruikt voor oplading tussen middernacht en 5 uur in de ochtend, waarna het systeem tussen 1 uur 's middags en 6 uur 's avonds zijn energie weer afstaat. De overige 20% is voor het opvangen van piekbelastingen. Het opslagsysteem wordt bij voorkeur zo dicht mogelijk bij de elektriciteitsopwekking geplaatst om terugloop van energie door het net te verhinderen. De installatie kan hierdoor nauwkeurig en flexibel bedreven worden.

5.5 SYSTEMEN OP BASIS VAN POTENTIËLE ENERGIE

ir. G. Peppink⁹, ir. P. Toussaint¹⁰, ir. J.M. Meij

Zowel door de liberalisatie als door de introductie van duurzame energiebronnen zal het dynamische karakter van de elektriciteitsvoorziening geweldig toenemen. Welke rol elektriciteit in de toekomstige energievoorziening zal spelen, zal mede afhangen van de vraag of men in deze dynamiek voortdurend in staat zal zijn om het aanbod op de vraag af te stemmen.

De meeste bekende grootschalige systemen voor energieopslag zijn gebaseerd op tijdelijke omzetting van elektrische energie in potentiële energie, bijvoorbeeld door water in een boven- of ondergronds bekken op te pompen. Dergelijke systemen zijn uitvoerig beschreven en geëvalueerd in de jaren tachtig.

Naar aanleiding van het plan Lievense¹¹, heeft de Rijksoverheid studies geïnitieerd die hebben geleid tot op detailniveau uitgewerkte concepten van een Pomp Accumulatie Centrale (PAC), een Ondergrondse Pomp Accumulatie Centrale (OPAC), een Shell-Pomp Accumulatie Centrale (S-PAC), een Drukvlucht Accumulatie Gasturbinecentrale (DAG) en een Adiabatisch Perslucht Opslagsysteem (APO) [EZ, 1989]. Fig. 5.5.1 geeft een schematische weergave van de OPAC-, S-PAC- en DAG-concepten.

Deze concepten zijn integraal economisch doorgerekend, waarbij de investering van de DAG verreweg het laagste uit de bus kwam, maar toch qua exploitatie leidde tot dezelfde waarden als PAC, OPAC en S-PAC. Het concept APO is vanwege hoge investeringen en een relatief laag rendement verder buiten beschouwing gelaten.

Fig. 5.5.2 geeft een uit dit rapport afgeleide indicatie van de investeringskosten van de genoemde opslagmethoden.

⁹ Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
PeppinkG@sep.nl

¹⁰ SEP,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
ToussaintP@sep.nl

¹¹ Een combinatie van grootschalige windenergie en energieopslag

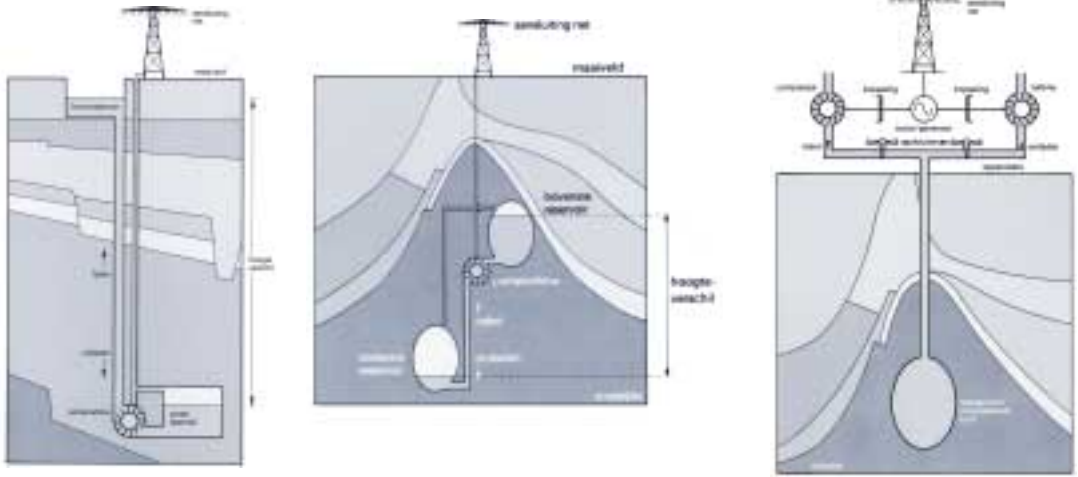
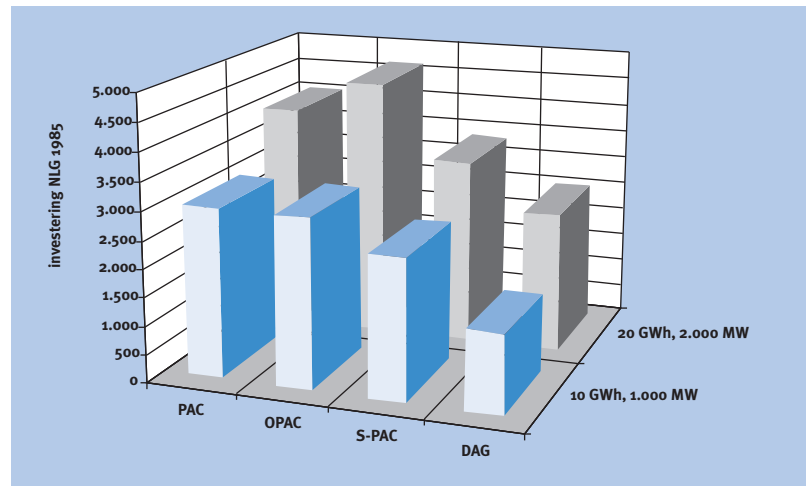


Fig. 5.5.1
Schematische weergave van de OPAC-, S-PAC- en DAG-concepten.

Grootschalige elektriciteitsopslag kan economisch haalbaar worden in situaties, waarbij bepaalde vormen van hernieuwbare energie geïsoleerd of grootschalig toegepast (gaan) worden. Opslagssystemen voor potentiële energie zijn dan noodzakelijk om het aanbod aan te passen aan de vraag. Het kan daarbij gaan om variaties in seizoenen, dag en nacht en om momentane variaties. De discussie over grootschalige energieopslag is opnieuw relevant door de plannen voor windparken op zee. Deze zouden gecombineerd kunnen worden met ‘negatieve’ PAC’s, waarbij een lager waterniveau gerealiseerd wordt binnen een ringdijk op zee.

Fig. 5.5.2
Indicatie van de investeringskosten van verschillende opslagmethoden op basis van potentiële energie [Sep, 1988].



5.6 CHEMISCHE OMZETTINGEN EN WARMTE

ir. G. Peppink¹², ir. P. Toussaint¹³, G. Oudakker¹⁵

WATERSTOF EN ZUURSTOF

Een andere mogelijkheid is om elektriciteit of thermische energie om te zetten in chemische energie. Bekend is dat elektriciteit kan worden gebruikt om water te splitsen in waterstof en zuurstof. Beide gassen kunnen later in een brandstofcel weer reageren tot water, waarbij met een hoog rendement weer elektriciteit kan worden geproduceerd.

WATERSTOF EN CO₂

Iets minder bekend is dat door elektriciteit een elektrochemische 'reforming'-reactie kan worden gestimuleerd, waarbij koolmonoxide en waterdamp worden omgezet in waterstof en kooldioxide. Aan het Imperial College te Londen wordt onderzoek gedaan aan de zogenaamde 'Solid Oxide Reformer' die bestemd is voor dit doel. De geproduceerde waterstof kan later weer worden benut voor de opwekking van elektriciteit.

TOLUEEN EN WATERSTOF

Ook kan warmte op relatief hoge temperatuur (300 à 500 °) worden gebruikt om een bepaalde chemische evenwichtsreactie te laten verlopen. Zo kan door warmte-toevoer methyl-cyclohexaan worden gesplitst in toluen en waterstof. Beide stoffen worden vervolgens gescheiden opgeslagen en weer bij elkaar gebracht, zodra de energie weer nodig is. De warmte die dan weer vrijkomt kan zo nodig op klassieke wijze via stoom in elektriciteit worden omgezet.

GROOTSCHALIGE OPSLAG VAN WARMTE

Het is mogelijk om zonne-energie ondergronds als warmte op te slaan. Dat kan bijvoorbeeld op 2.000 tot 3.000 m diepte waar in aquifers een natuurlijke omgevingstemperatuur heerst van 70 à 90 °C.

Aldus ontstaan geen warmteverliezen tijdens langdurige seizoensopslag. De warmte kan direct gebruikt worden voor verwarming, of met behulp van het omgekeerde koelkastprincipe (Organic Rankine Cycle) omgezet worden in elektrische energie. Hierdoor zou een grote en langdurige opslag van energie mogelijk worden zonder een groot beslag op de leefruimte en zonder grote veiligheidsrisico's. Als zonnewarmtecollector zou het wegdek gebruikt kunnen worden. Meer over deze methode van warmtewinning in par 3.4.2 in Deel 1.

¹² Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
PeppinkG@sep.nl

¹³ SEP,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
ToussaintP@sep.nl

¹⁴ Van Hattum en Blankevoort,
Korenmolenaar 2
3440 AM Woerden
oudakker@euronet.nl

REFERENTIES

- 3M *Lithium polymer battery performance*,
<http://www.lithiumpolymerbattery.com/perform.html> (1998)
- ASC American Superconductor, *Case study Sappi Ltd.*,
<http://www.amsuper.com/cases/sappistudy.html> (1998)
- ASC American Superconductor, *What is SMES?*,
<http://www.amsuper.com/application/power/whatsmes.html> (1998)
- Birkner, P.J., H.W. Lorenzen, R. Schöttler, e.a. *Testing plant with small fast superconducting energy storage at TU München*, IEEE Trans Appl. Superconductivity **3**(1), pp. 207-210 (1993)
- CARB, *Zero-emission vehicle biennial program review*, Staff Report 1998, July 6 (1998)
- EV World, <http://www.evworld.com/> (1998)
- EZ, *Opslag van elektriciteit in Nederland. Haalbaar en aanvaardbaar?*, Ministerie van Economische Zaken (1989)
- Juengst, K.P., *SMES progress*, Proceedings MT-15 Science Press, Beijing, China, pp. 18-23 (1998)
- Kral, e.a., *Alaska SMES: Form and function for the worlds largest magnet*, ICEC '97, Portland Oregon, USA (1997)
- Luongo, C.A., *Superconducting storage systems: An overview*, Trans. On Magnetics **32**, pp. 2214-2223 (1996)
- Menictas C., D.R. Hong, M. Kazacos, M. Skyllas-Kazacos, *Status of the Vanadium redox battery development plan*, University of New South Wales, Australia (1998)
- Menictas, C., D.R. Hong, M. Kazacos, M. Skyllas-Kazacos, *Vanadium battery solar demonstration house*, University of New South Wales, Australia (1997)
- Mikkonen, R., e.a., *Design considerations of a HTS μ -SMES*, (EUCAS-97), Inst. Phys. Conf. Ser. No. **158**, pp. 1483-1486 (1998)
- NREL *hybrid electric vehicle (HEV) program*, <http://www.hev.doe.gov/> (1997)
- Sarjeant, W.J., D.T. Staffiere, *Capacitors as an element in advanced power sources in power electronics systems*, IEEE (1997)
- Satow, T., e.a., *Present status of 480 MJ/40 MW SMES development project*, International Conference on Electrical Engineering'97, Matsue, Japan (1997)
- SEI news, *SEI begins field test of 500 kW class redox flow battery*, http://sei.co.jp/sn/97_07.html (1997)
- Sep, *Evaluatie van de toepassing van een energie-opslagsysteem voor de Nederlandse elektriciteitsvoorziening*, Sep identificatie PO 88-361 (1988)

2

6

Ontwikkelingen in gebruik

Dit hoofdstuk behandelt een aantal technieken voor het efficiënt toepassen van elektriciteit. Het is ingedeeld in paragrafen over licht, warmte, koude, kracht (inclusief voeding van elektronische apparatuur), scheiding en reiniging.

6.1 LICHT

6.1.1 VERLICHTINGSTECHNOLOGIE

prof.dr.ir. S.H.A. Begemann¹

INLEIDING

Het onderwerp verlichting en energie is in drie vragen te scheiden:

- Hoe efficiënt wordt het licht opgewekt?
- Hoe efficiënt komt het licht waar het nodig is?
- Wanneer is licht eigenlijk nodig?

Aan elk van deze onderdelen is een rendement toe te kennen:

- het lichtopwekkingsrendement
- het verlichtingsrendement
- een nuttig gebruiksrendement dat een maatstaf is voor de tijd waarin verlichting ‘onnodig’ aan is.

Bovendien is elk van de onderdelen vrij eenduidig te koppelen aan technologie:

- lamp + lampcircuit
- optiek, lamp geïntegreerd of onderdeel van het armatuur
- regel- en schakeltechnologie van lichtbronnen en installaties.

¹ Philips Lighting,
Postbus 80020
Gebouw E.E.C.2
5600 JM EINDHOVEN
ton.begemann@ehv.lighting

De grenzen en ontwikkelingen van deze technologische onderdelen zijn vrij nauwkeurig te voorspellen. Het is echter belangrijk zich te realiseren dat het technologisch besparingspotentieel een plafond is waar het praktisch realiseerbaar niveau ver onder zal blijven, vooral door kosten en overwegingen van gebruiksgemak.

LICHTOPWEKKINGSRENDEMENT

Conventionele lichtbronnen

Voor verlichtingsdoeleinden worden anno 1998 de volgende conventionele lichtbronnen gebruikt:

- standaard gloeilampen en halogeen gloeilampen
- gasontladingslampen, te onderscheiden in:
 - lage-drukgasontladingslampen, in Nederland bekend als TL, compacte fluorescentielampen (CFL) en lagedruk-natriumlampen (SOX)
 - hoge-drukgasontladingslampen, te weten hoge-drukkwik (HPL), hoge-druknatrium (SON) en metaalhalogenide lampen.

Bij alle conventionele lichtbronnen neemt binnen een familie het rendement toe bij een hoger wattage of hoog vermogen lichtstromen. Bovendien hebben de verschillende families vaak (sterk) verschillende kleureigenschappen, een verschillende levensduur, verschillende karakteristieken wat betreft ontsteking, opwarmtijd en herontsteking, en verschillende geometrische en helderheidsparameters. Hierdoor moet men zeer voorzichtig zijn met het onderling vergelijken van verschillende lichtbronnen. In de overzichtstabel van de verschillende families is weergegeven wat de huidige lamprendementen per familie zijn voor de meest gebruikelijke toepassingen, gekarakteriseerd met laag-hoogwaarden die globaal overeenkomen met een laag wattage en een laag vermogen lichtstroom, respectievelijk een hoog wattage en een hoog vermogen lichtstroom. Omdat gasontladingslampen een zogenaamd voorschakelapparaat nodig hebben, moeten voor het lichtopwekkingsrendement de verliezen in dit voorschakelapparaat meegenomen worden. Daarom wordt in tabel 6.1.1 een onderscheid gemaakt tussen lamprendement en lichtopwekkingsrendement (lamp + voorschakelapparatuur). Tevens wordt bij de natriumlampen onderscheid gemaakt tussen wit licht en geel licht in verband met de beperkte toepasbaarheid van de laatste voor bijvoorbeeld binnenverlichting.

De mogelijke rendementsverbeteringen voor de toekomst zijn weergegeven in percentages van de rendementen in 1998. Opgemerkt dient te worden dat de voorspelling voor 2015 vooral gebaseerd is op wat fysisch en materiaaltechnisch mogelijk kan zijn. Hierbij is slechts beperkt rekening gehouden met aspecten die te maken hebben met de verhouding tussen kosten en prestatie.

	Anno 1998		Anno 2005	Anno 2015
	Lamprendement	Lichtopwekkings- rendement	Procentuele verbetering	Procentuele verbetering
	Ol (lm/W)	Os (lm/W)	(%)	(%)
gloeilampen				
– standaard	10 - 14	10 - 14	0 - 5	5 - 10
– halogeen	15 - 25	13 - 21	10 - 25	25 - 35
gasontladingslampen (wit)				
– fluorescent (TL)	75 - 100	65 - 90	0	0 - 5
– compact fluorescent (CFL)	50 - 75	45 - 70	0	0
– metalhalide	70 - 100	60 - 90	10 - 20	20 - 35
– hoge-drukkwik	40 - 55	35 - 47	0	0
– hoge-druknatrium (wit)	37 - 48	32 - 41	0	0
– zwavellamp (1 kW!)*	160	95	0 - 15	15 - 30
gasontladingslampen (geel)				
– hoge-druknatrium	90 - 140	72 - 127	0 - 5	5 - 10
– lage-druknatrium (monochromatisch)	100 - 200	72 - 173	0	0

Tabel 6.1.1

Lamp- en lichtopwekkingsrendementen van conventionele lichtbronnen. Laag-hoogwaarden komen overeen met de meest gangbare (lage tot hoge) wattages. De procentuele verbetering is ten opzichte van 1998.

** De (inductie) zwavellamp is in de tabel opgenomen, omdat het een nieuwe technologie is die wit licht met een hoog rendement kan opwekken. De opgegeven getallen zijn echter niet representatief en vergelijkbaar met de rest van de tabel, omdat de enig verkrijgbare lamp een zeer hoog vermogen heeft (1 kW). Waarden voor lagere algemeen toepasbare vermogens zijn aanzienlijk ongunstiger.*

Ten slotte moet opgemerkt worden dat het energieverbruik van verlichting in belangrijke mate bepaald wordt door de lichtbronnen in bestaande lichtpunten. Nieuwe lichtpunten en vernieuwing van bestaande lichtpunten kan ongeveer op 5% van het bestaande aantal lichtpunten per jaar gesteld worden.

Markttechnisch gezien is van deze 5% niet meer dan de helft toegankelijk voor lichtbronnen met een significant hoger rendement. Deze lage penetratiegraad wordt echter enigszins gecompenseerd door het feit dat energiezuinige lampen de hogere aanschafprijs pas rechtvaardigen als ze toegepast worden in een lichtpunt met veel branduren en daardoor een hoger percentage gebruiksuren vertegenwoordigen. Ter illustratie: het gemiddelde Nederlandse huishouden heeft 33 lichtpunten. Ruim 15 jaar na de introductie van de gloeilamp vervangende spaarlamp (4x zuiniger), die ondersteund wordt met enorme reclame- en subsidiecampagnes heeft anno 1998 het gemiddelde huishouden 2 spaarlampen (6% van het aantal lichtpunten).

Niet conventionele lichtbronnen

Naast lichtopwekking via gloeiende materie of excitatie in gasontladingen, al dan niet in combinatie met fosforescentie, is lichtopwekking in vaste stoffen mogelijk. Twee verschillende technologieën zijn in ontwikkeling, namelijk elektroluminescentie en LED (Light Emitting Diode). Bij de laatste kan nog onderscheid gemaakt worden tussen organische en anorganische LED's.

Elektroluminescentie en organische LED's zullen geen bijdrage kunnen leveren aan energiebesparende vormen van ruimteverlichting, omdat naar verwachting

de rendementen in de komende 15 jaar niet significant boven die van de gloeilamp kunnen uitkomen. Bovendien wordt het licht opgewekt in grote vlakken met lage helderheden, waardoor toepassing in verlichting zeer beperkt wordt. Anorganische LED-technologie laat daarentegen spectaculaire rendementsverbeteringen zien. Twee verschillende materiaalsystemen zijn al beschikbaar om het hele spectrum in te 'vullen', namelijk AlInGaN voor het blauw-groene deel en AlInGaP voor het oranje-rode deel. LED's wekken licht op in een relatief nauwe spectrale band. Door verschillende 'gekleurde' LED's te combineren (Rood + Groen + Blauw) kan wit licht in alle mogelijke combinaties van kleurtemperatuur en kleurweergave gemaakt worden. Ook zijn al witte LED's beschikbaar die bestaan uit een blauwe LED, gecombineerd met fosforen die een deel van het blauw omzetten in groen en rood. Deze blauwe + fosfor LED's halen echter rendementen die meer dan 50% lager zijn dan de combinatie van Rood + Groen + Blauwe LED's. Omdat LED's gekleurd licht opwekken, waren ze vooral geschikt voor bijvoorbeeld laag-vermogensignalisatie. Inmiddels worden ze ook toegepast in verkeerslichten. Bestaande verkeerslichten zijn gebaseerd op gloeilampen die wit licht opwekken, waarvan vervolgens het grootste deel weggefilterd wordt om rood, groen of geel te krijgen. Met de meest recente LED-technologie kan anno 1998 bijvoorbeeld een 135 - 150 W rood verkeerslicht in de VS vervangen worden door een 15 W rode LED-unit.

Naar verwachting zal de LED-technologie in de periode 2000-2015 op grote schaal kunnen penetreren in verlichting. Dit zal tot 2010 vooral een verdringingseffect zijn met een geringe bijdrage tot energiebesparing. De verklaring hiervoor is dat LED's zich in een aantal eigenschappen onderscheiden van conventionele lichtbronnen, onder andere in hun extreem lange levensduur (60.000 - 100.000 uur). De overgang naar LED's wordt economisch aantrekkelijk als het energieverbruik vergelijkbaar wordt met de conventionele 'concurrent', zodat de lagere onderhoudskosten (geen lampvervanging meer) de balans in het voordeel van LED's kunnen laten doorslaan.

Fysisch en materiaaltechnisch gezien kunnen LED's op zeer lange termijn rendementen halen die boven de limieten van conventionele lichtbronnen uitkomen. De kans dat dit voor 2015 het geval zal zijn lijkt echter klein. Dit betekent dat voor het overgrote deel van de verlichtingstoepassingen LED-technologie slechts een minimale bijdrage zal leveren aan besparingsmogelijkheden gezien vanuit het lichtopwekkingsrendement.

VERLICHTINGSRENDEMENT

Het licht dat in de lamp opgewekt wordt moet met optische middelen in de lamp en of het armatuur op een bepaalde manier gestuurd en gebundeld worden, opdat zoveel mogelijk licht valt op die plaatsen waar het een nuttige bijdrage levert aan het gewenste verlichtingsresultaat. Twee factoren spelen hierbij een rol:

reflectie- en of transmissieverliezen in de optiek, en beperkte mogelijkheden van bundeling door de afmetingen en helderheden van het lichtgenererend lichaam. Dat laatste geldt vooral bij lichtbronnen die niet puntvormig zijn. Hierdoor kan licht in ruimtehoeken uitgestraald worden, waar het geen nuttige bijdrage aan het verlichtingsresultaat geeft. Dit is vooral het geval bij veel vormen van buitenverlichting (ook wel lichtvervuiling genoemd). Met nieuwe optische materialen kunnen reflectie- en of transmissieverliezen in de optiek met ongeveer 10% verminderd worden. Dit is onder andere mogelijk door zeer hoogwaardige reflectoren (99,9% reflectiefactor). Hiermee zijn dan wel de grenzen bereikt van verliesarme optische materialen.

Het verlichtingsrendement wordt gedefinieerd als het percentage in de lichtbron opgewekt licht dat uiteindelijk op de te verlichten vlakken of objecten valt. In binnenverlichting wordt via vloer, wanden, plafond en meubilair onvoldoende 'gebundeld' licht toch weer gedeeltelijk in 'nuttig' licht gereflecteerd, zodat de grootste bijdrage aan energiebesparing hier vooral komt van lichte vlakken met hoge reflectiefactoren (vooral wanden en plafonds). Bij lichte vlakken kan de winst in verlichtingsrendement zo'n 20 à 25% bedragen ten opzichte van donkere vlakken. Verlichtingsrendementen van 80% zijn dan haalbaar. Bij buitenverlichting zijn de verlichtingsrendementen veel lager, omdat verticale vlakken slechts beperkt aanwezig zijn en/of een lage reflectiefactor hebben en omdat alles wat naar het 'plafond' gaat in principe verdwijnt (wat via verstrooiing in de atmosfeer terugkomt is verwaarloosbaar). Als gevolg hiervan komen verlichtingsrendementen van 20 to 40% in buitenverlichting veel voor. Met de verdergaande miniaturisatie van lichtbronnen nemen de mogelijkheden voor het maken van betere lichtbundels toe. Op lange termijn is daarom voor buitenverlichting een verdubbeling van het verlichtingsrendement mogelijk met een afname van de lichtvervuiling als plezierig bijproduct. Ook hier geldt echter dat de effecten hiervan op het macro-energieverbruik pas merkbaar worden als voldoende nieuwe lichtinstallaties voorzien zijn van energiezuinige technologie. Aangezien lichtinstallaties als onderdeel van de bouwkundige structuur en infrastructuur worden beschouwd, zijn de hiervoor geldende investeringen en afschrijfcriteria in dominante mate bepalend voor de penetratiegraad van nieuwe technologieën. De economische levensduur van verlichtingsinstallaties wordt over het algemeen gesteld tussen 15 en 25 jaar. In de praktijk ligt het eerder bij 25 dan bij 15 jaar. Daarbij kan nog de kanttekening gemaakt worden dat naar schatting meer dan 70% van de investeringsbeslissingen die bij nieuwe of te renoveren verlichtingsinstallaties genomen worden resulteert in minimale initiële kosten, waarmee duurdere energiezuinige technologieën dus niet meer gekozen worden.

GEBRUIKSRENDEMENT

Het opwekkings- en het verlichtingsrendement zijn gerelateerd aan *het juiste licht op de juiste plaats*. Hieraan kan de dimensie tijd ofwel een gebruiksrendement *op de juiste tijd* worden toegevoegd.

Verlichting wordt in veel situaties gebruikt met geen of beperkte mogelijkheden om aangepast te worden aan de noodzaak en of behoefte. De regelmogelijkheden zijn dus minimaal. Er komen echter veelvuldig situaties voor waarbij met bijvoorbeeld minder of zelfs geen verlichting kan worden volstaan. Voor openbare verlichting wordt daarom in toenemende mate het zogenaamde 50% dimmen of zelfs uitschakelen na middernacht toegepast op grond van de overweging dat in het holst van de nacht het weggebruik en daarmee de verlichtingsbehoefte (sterk) afneemt.

In kantoren is vastgesteld dat meer dan 50% van de werkplekken niet bezet is. Met aanwezigheids- en gebruiksdetectie zou de verlichting aangepast kunnen worden. Dit vereist sensoren en regelelektronica in verlichtingsinstallaties die reeds op grote schaal aanwezig zijn. Regeling naar tijd en gebruik en daarmee het verhogen van het gebruiksrendement heeft technisch gezien het grootste besparingspotentieel. Schattingen lopen uiteen van 30 tot 60%. De reden waarom dit potentieel zich slechts heel langzaam ontwikkelt is dat investeringen in regelinstallaties een terugverdientijd hebben die langer is dan de steeds kortere normen die in een vrije markteconomie gehanteerd worden. Daarnaast heeft vooral het uitschakelen en dimmen van hoogefficiënte gasontladingslampen zowel technische als gebruikstechnische beperkingen met bovendien hogere installatiekosten.

De verdere penetratie van elektronische voorschakelapparaten zal hierin geleidelijk aan verbetering brengen. Van de hoogefficiënte gasontladingslampen zijn vooral de TL en de CFL elektronisch goed te ontsteken, regelen en herontsteken. Ook kunnen de kosten van de hiervoor geschikte elektronische voorschakelapparatuur omlaag. Van overheidswege wordt dimmen bij voldoende daglicht al geruime tijd sterk gestimuleerd. Hierbij wordt dimbare TL-verlichting in de raamzones toegepast die bij voldoende daglichtaanbod wordt gedimd. In de praktijk kan hiervoor weliswaar een besparing van zo'n 50% via de raamarmaturen worden bereikt, maar ca. 90% van de lichtpunten zit buiten de zones met voldoende daglichttoetreding. Bovendien heeft 75% van de raamplaatsen (alles behalve de noordzijde) naast het genot van het daglicht het alles overstralend probleem van toetreding van direct zonlicht, wat behalve zonwering ook controle van (te grote) helderheidsverschillen op werkplekken noodzakelijk maakt. Gezien het sterk fluctuerend daglicht en het aanbod van zonlicht in het Nederlandse klimaat en de daaruit voortvloeiende problemen met de sturing van het licht op de werkplek is het besparingspotentieel van daglicht omgekeerd evenredig met de propaganda die ervoor gemaakt wordt. Aanwezigheids-

en of gebruiksdetectie in combinatie met het dimmen en/of uitschakelen van lichtpunten daarentegen begint zowel technisch als prijstechnisch interessant te worden. Nieuwe technologische ontwikkelingen van lichtbronnen die op eenvoudige en goedkope wijze zijn te schakelen en dimmen zullen de toepassing van regelbare installaties bevorderen. Elektronica voor zowel de lamp als de installatiebesturing zal op steeds grotere schaal worden toegepast. Naar verwachting zal in de periode 2005 tot 2015 de intelligente verlichtingsinstallatie (die de verlichting in tijd en gebruik aanpast) algemeen toepasbaar worden. Hierdoor wordt een besparingspotentieel van ongeveer 50% toegankelijk. Hoe snel dit potentieel ontwikkeld zal worden, hangt vooral af van de ontwikkeling van de elektriciteitsprijzen en dwingende en of stimulerende overheidsmaatregelen.

CONCLUSIES

In de komende 20 jaar zijn geen spectaculaire verbeteringen in het lichtopwekkingsrendement van conventionele lichtbronnen (gloeilampen en gasontladinglampen) te verwachten. Energiebesparing bij de 'bron' moet dus komen van vervanging van minder efficiënte door efficiëntere lampen.

Nieuwe optische materialen en een betere sturing van de lichtbundel kunnen de verlichtingsrendementen in de binnenverlichting met 10 à 20% verbeteren. In buitenverlichting is het potentieel 20 à 40%, omdat het effect van een betere sturing van de lichtbundel, en dus minder lichtverspilling hier belangrijk is. De verdere miniaturisatie van conventionele lichtbronnen en de introductie van extreem compacte LED's voor verlichtingsdoeleinden zullen de technologische mogelijkheden voor het verhogen van het verlichtingsrendement stimuleren. Het grootste besparingspotentieel ($\pm 50\%$) ligt in de aanpassing van de verlichtingssterkte aan wisselende behoeften, in het bijzonder het verlagen (dimmen) of uitschakelen als omstandigheden en gebruik dit mogelijk maken. Deze regeling naar tijd en plaats wordt mogelijk door een verdergaande toepassing van elektronica in alle onderdelen van verlichtingsinstallaties. Flexibele, regelbare intelligente verlichting vermindert het onnodige energieverbruik en heeft het grootste besparingspotentieel op de lange termijn.

In het energie(besparings) beleid van overheden zijn de aandacht en stimuleringsmaatregelen hoofdzakelijk gericht op de verbetering van het opwekkingsrendement. Het verlichtings- en het gebruiksrendement – die een groter besparingspotentieel vertegenwoordigen – zijn dus 'onderbelicht'.

6.1.2 BEELDSCHERMEN

ir. J.M. Meij

In par. 2.5.2 van Deel 1 werd reeds genoemd dat de rol van LCD en TFT²-displays door de (met de productietechnologie samenhangende) hoge prijs beperkt zal blijven [ECN/Novem, 1995].

Om dus echt energie te kunnen besparen, zijn goedkope energiezuinige beeldschermen nodig. Een goede mogelijkheid voor het verlagen van de prijs van platte beeldschermen wordt geboden door de polymeerdisplays. Deze displays zijn gebaseerd op de in par. 2.2.3 behandelde geleidende kunststoffen, waarmee tevens polymeer-LED's gemaakt kunnen worden. Deze worden met een inkjettechniek in kleine puntjes op een doorzichtig substraat opgebracht. Een 50 mm monochroom beeldscherm met deze technologie is reeds gedemonstreerd met een volledige NTSC tv-resolutie. Momenteel wordt gewerkt aan kleurendisplays, waarbij kleur gegenereerd wordt door rode, groen en blauwe polymeerpuntjes naast elkaar te gebruiken. Een probleem wordt nog gevormd door de sterk uiteenlopende efficiëntie van de verschillende kleuren polymeer-LED's.

6.1.3 LASERSYSTEMEN VOOR ZICHTBAAR LICHT

dr. K.A.H. van Leeuwen³

Voor een aantal toepassingen zijn krachtige coherente (laser)lichtbundels in het zichtbare gebied (golflengte van 400 tot 700 nanometer, nm) of in het nabije infrarood (rond 1 micrometer) nodig. Sommige van deze toepassingen liggen op het gebied van de wetenschap. We kunnen hierbij bijvoorbeeld denken aan spectroscopie in de natuurkunde en scheikunde. Veel belangrijker in termen van marktomvang en energieverbruik zijn echter commerciële en industriële toepassingen. Voor zichtbaar licht liggen deze toepassingen bijvoorbeeld in de vermaakindustrie. 'Laserlichtshows' bij popconcerten en als reclameactiviteit zijn populair. Grootbeeld-projectiesystemen die werken met drie laserbundels (rood, groen en blauw) zijn nog experimenteel, maar zullen ongetwijfeld snel hun eigen toepassingen vinden.

Voor zichtbaar licht is het benodigde lichtvermogen meestal niet extreem hoog (met 20 W aan licht komt men al een heel eind). Toch zijn de gebruikte lasersystemen beslist niet triviaal. Zo worden de groene lichtbundels, die vaak zo karakteristiek zijn voor lichtshows meestal geproduceerd door argon-ionenlasers. Dit type laser, een soort grote 'broer van de helium-neonlaser', is groot (2 m lang), kwetsbaar en duur (ca. 2 ton voor een 20 W laser). De gebruikskosten zijn eveneens hoog. De oorzaak hiervan ligt in de beperkte levensduur van de plasma-buis die het hart van de laser vormt en de zeer lage elektrische efficiëntie.

Voor de productie van de vermelde 20 W aan licht, is maar liefst zo'n 50 kW aan

² Thin Film Transistor.

³ TU Eindhoven,
Postbus 513
5600 MB Eindhoven
K.A.H.v.Leeuwen@phys.tue.nl

elektrisch vermogen nodig! Voor rood licht worden krypton-ionenlasers gebruikt, met een nog hogere prijs en een nog lagere efficiëntie. Blauw licht is heel lastig te maken met voldoende vermogen. De best werkende conventionele oplossing gebruikt een twee-trapssysteem, waarbij een voor de productie van ultraviolet licht aangepaste argon-ionenlaser met zijn licht een tweede laser 'oppompt' (een zgn. kleurstoflaser). Deze kleurstoflaser wordt gevoed door het ultraviolette licht en produceert dan het blauwe licht. Het twee-trapssysteem drukt de efficiëntie nog verder naar beneden: een maximum van 1 Watt aan blauw laserlicht is al een optimistische schatting.

De laatste jaren komen er echter snel alternatieven in beeld. Deze alternatieven zijn te danken aan twee ontwikkelingen. Ten eerste zijn zeer krachtige halfgeleiderlasers ontwikkeld die infrarood licht produceren. Ten tweede is grote vooruitgang geboekt bij het ontwikkelen van lichtconversie in niet-lineaire optische kristallen.

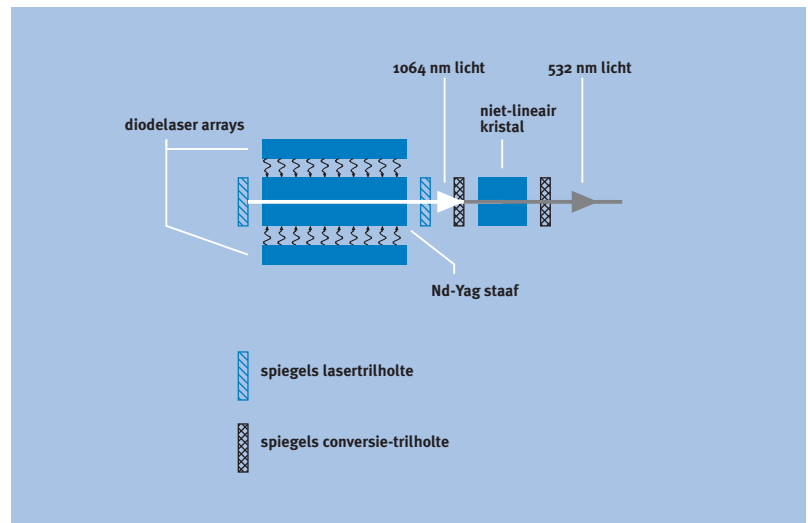
Halfgeleiderlasers of diodelasers bestaan in zeer veel verschillende soorten. Diodelasers zijn bijvoorbeeld te vinden in elke CD-speler. In die vorm leveren zij onzichtbaar infrarood licht met een golflengte van ongeveer 800 nm en een vermogen van een paar milliWatt. Niet bepaald direct nuttig voor een lichtshow. Wel heel aantrekkelijk aan deze diodelasers is hun eenvoud, compacte afmeting en grote elektrische efficiëntie. Een diodelaser is eenvoudig, omdat deze eigenlijk niets anders is dan een elektrische halfgeleiderdiode, waarbij het in een diode onvermijdelijke elektrische energieverlies deels in de vorm van coherent licht naar buiten komt. Dus elektriciteit erin, licht eruit: een monolithische lichtbron. De diodelaser is zeer compact, omdat de laser zelf niet groter is dan een halve millimeter. De efficiëntie bedraagt tientallen procenten. Vergelijk dit maar eens met de argon-ionenlaser!

Diodelasers zijn zeer goed op te schalen naar hogere uitgangsvermogens, zowel door ze wat groter te maken als door heel veel lasertjes in een chip te integreren ('diodelaser array'). Dit laatste is mogelijk, omdat ze met standaardtechnieken uit de IC-productie gemaakt worden. Jammer genoeg verliezen ze dan wel hun coherente echte 'lasergedrag', zodat dit soort arrays voor de meeste toepassingen weer niet direct geschikt zijn. Een alternatief is dan toch weer een twee-trapssysteem. Het licht van een of meer arrays wordt dan gebruikt om een andere laser te voeden. Die andere laser kan bijvoorbeeld een zogenaamde neodymium-YAG-laser zijn, een oud werkpaard in de laserwereld. Deze laser gebruikt als actief medium een yttrium-aluminiumgranaatkristal met wat neodymium erin. Hij is eigenlijk sterk verwant aan de allereerste laser, waarbij een robijnkristal gebruikt werd. YAG-lasers kunnen als ze gevoed worden door diodelasers een nette laserbundel met een uitgangsvermogen tot een paar honderd Watt produceren, waarbij een efficiënte omzetting van diodelaserlicht naar YAG-laserlicht van ongeveer 50% mogelijk is. De golflengte van het geproduceerde licht is 1.064 nm.

Om nu zichtbaar licht te krijgen, komt de niet-lineaire lichtconversie te hulp. Het principe daarvan is niet nieuw. Sommige optische kristallen hebben de eigenschap dat als er zeer intens licht doorheen valt de kleursamenstelling van het licht kan veranderen. Zo kan uit (infra)rood licht blauw licht gemaakt worden met een golflengte die precies de helft van de oorspronkelijke golflengte is. Ook het omgekeerde is mogelijk. Uit blauw licht kan licht met een langere golflengte geproduceerd worden. In dat laatste geval zien we meestal geen licht met precies de dubbele golflengte, maar twee nieuwe kleuren licht waarbij de golflengte van de ene kleur korter, en van de andere kleur langer dan deze verwachte waarde is. Bij niet-lineaire conversie blijft de coherentie van het oorspronkelijke licht bewaard. Met andere woorden, de resulterende lichtbundel met een andere golflengte gedraagt zich ook als een nette laserbundel. Deze verschijnselen zijn al tientallen jaren bekend en verklaard. De grote vooruitgang van de laatste jaren is de ontwikkeling van nieuwe kristallen en optische systemen die het mogelijk maken om deze omzettingprocessen heel efficiënt te laten verlopen. Waar vroeger (althans voor niet-gepulste lasers) een omzettingsefficiëntie van 1% al mooi meegenomen was, is tegenwoordig (afhankelijk van golflengte en initieel lichtvermogen) een efficiëntie tot 50% haalbaar. Hierdoor wordt niet-lineaire conversie aantrekkelijk voor de productie van coherent licht met een gewenste golflengte op basis van een bestaande, efficiënte en krachtige laser bij een 'onbruikbare' golflengte.

Fig. 6.1.1

Voorbeeld van een drie-trapslaser-systeem voor coherent groen licht. Een aantal diodelaser arrays voeden een neodymium-YAG-laser, waarvan het infrarode licht met een golflengte van 1.064 nm door een niet-lineair kristal omgezet wordt in licht met de halve golflengte (532 nm, groen).



Een typisch systeem voor de productie van groen licht bijvoorbeeld kan nu als drie-trapsysteem ontworpen worden (zie de schematische weergave in fig. 6.1.1). Een aantal diodelaser arrays voeden een neodymium-YAG-laser, waarvan het infrarode licht met een golflengte van 1.064 nm door een niet-lineair kristal omgezet wordt in licht met de halve golflengte (532 nm, groen).

Dergelijke systemen worden sinds kort commercieel geleverd als complete eenheid, zij het dat in plaats van een neodymium-YAG een aanverwante laser (neodymium-YVO₄-laser) gebruikt wordt. De systemen kunnen momenteel een maximum uitgangsvermogen van 10 W groen licht geven.

Het elektrische vermogen dat hiervoor nodig is bedraagt zo'n 1,5 kW. Door het drie-trapssysteem is de totale efficiëntie nog steeds vrij laag. We moeten het benodigde vermogen echter wel vergelijken met de 25 kW aan elektrisch vermogen die nodig is om dezelfde hoeveelheid groen licht te produceren met een argon-ionenlaser!

De ontwikkeling van dit soort systemen gaat momenteel heel snel. De doelstellingen hierbij zijn het verkrijgen van grotere uitgangsvermogens en andere kleuren licht (vooral rood en blauw). De flexibiliteit van de niet-lineaire lichtconversie laat hiertoe alle ruimte, hoewel de systemen wat ingewikkelder kunnen worden. In ieder geval is de verwachting dat op korte termijn argon-ionenlasers en aanverwante lasers uit het beeld verdwijnen. De productie van hoogvermogen coherent zichtbaar licht zal als regel een systeem gebruiken, waarbij de eerste stap in de conversie van elektrische energie naar het gewenste licht bestaat uit de productie van infrarood licht door hoogvermogen laserdioden. Hierbij wordt het energieverbruik met een factor 10 tot 100 gereduceerd.

Een ontwikkeling met consequenties op de wat langere termijn is de rechtstreekse productie van zichtbaar licht door halfgeleiderlasers. Ook hier gaan de ontwikkelingen snel. Zowel diodelasers die rood, groen als blauw licht produceren zijn in het laboratorium gedemonstreerd. Momenteel bestaan de enige commerciële producten uit lasers die maximaal enkele tientallen milliwatts aan rood licht produceren (o.a. gebruikt in 'aanwijspennen'). Het zal echter niet lang meer duren voordat ook groene en blauwe lasers op de markt komen. Indien het opschalen van deze lasers naar grotere uitgangsvermogens (met behoud van coherentie) realiseerbaar blijkt, zijn de besproken meertrapssystemen op hun beurt weer verouderd. Maar dat zal naar schatting nog minimaal een jaar of vijf duren.

6.2 WARMTE⁴

6.2.1 INLEIDING

*ir. W.J.L. Jansen*⁵

Er zijn veel elektrische technieken die in de procestechnologie gebruikt worden voor het genereren en toepassen van warmte. De technieken hebben gemeen dat de hoeveelheid warmte en de plaats waar deze vrijkomt goed beheerst kunnen worden. De specifieke eigenschappen van een techniek en de proceskosten bepalen in welke sector van de industrie en in welk deelproces elektrische warmtetechnologie kan worden toegepast [Boone, 1989; EPRI, 1986].

Wanneer geprobeerd wordt een inventarisatie te maken van het gebruik van elektriciteit in industriële processen, komen in eerste instantie de volgende technieken aan de orde:

- weerstandsverwarming (indirect en direct)
- inductieve verwarming
- diëlektrische verwarming (radiofrequent en microgolf)
- infrarood- en ultravioletverwarming
- boogverwarming
- plasmaverwarming
- laser
- mechanische dampcompressie
- warmtepompen.

Het luchtmes kan in bepaalde gevallen de toepassing van warmte overbodig maken. Het luchtmes wordt behandeld in par. 6.4.2.

Elektrische warmtetechnologie wordt in de industrie toegepast, omdat met deze technologie kosten kunnen worden bespaard en de kwaliteit van producten kan worden verbeterd. Ook kunnen hoge energiedichtheden in materialen worden bereikt zonder nadelige gevolgen voor het product. Daardoor kunnen processen aanzienlijk worden versneld. Als gevolg daarvan kunnen in veel gevallen batchprocessen worden vervangen door continue processen, die ver- gaand geautomatiseerd kunnen worden. Dit leidt tot een hogere productiviteit. Verder zijn de installaties compact, waardoor minder ruimte nodig is en investe- ringskosten kunnen worden verlaagd. In [UIE, 1992a] worden voorbeelden gegeven van kostenbesparingen die met elektrische warmtetechnologie kun- nen worden bereikt. In een aantal gevallen wordt de kostenbesparing bereikt doordat er op energie wordt bespaard. In [UIE, 1996a] en [Jansen, 1994a] wor- den daarvan voorbeelden gegeven. Met elektrische warmtetechnologie zijn

⁴ Een deel van deze paragraaf is een geactualiseerde versie van de paragraaf 'Elektrotechnologie in de industrie' uit de STT-studie *Elektriciteit in perspectief* [Engelen, 1992].

⁵ KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
w.j.l.jansen@kema.nl

nieuwe processen en producten mogelijk die met conventionele technieken niet of slecht realiseerbaar zijn. Dit leidt tot proces- en productinnovatie. Voorbeelden zijn pasteurisatie en sterilisatie van voeding in de verpakking en volledig hergebruik van oud asfalt voor het produceren van nieuw asfalt.

In warmte/kracht-centrales wordt primaire brandstof uiterst efficiënt (met energierendementen hoger dan 80%) omgezet in elektriciteit en warmte. Door de warmtevraag van industrie, huishoudens en kantoren om te zetten in een elektriciteitsvraag, kan in specifieke situaties een optimale verhouding warmte/elektriciteit worden bereikt. Vooral met behulp van warmtepompen, mechanische dampcompressie en luchtmessen kan een warmtevraag uiterst efficiënt worden omgezet in een elektriciteitsvraag. Zie hiervoor par. 6.2.10 en par. 6.4.2.

In de volgende paragrafen zal een aantal praktische toepassingen van verschillende vormen van elektrische warmtetechnologie worden beschreven. Helaas worden deze volwassen technieken door onbekendheid en vooroordeel in Nederland nog te weinig gebruikt en gewaardeerd in de industrie, ondanks de voordelen die deze technieken bieden. Op gebieden waar voordelen evident zijn worden ze volop toegepast, bijvoorbeeld weerstands- en inductieve verwarming in de metaalindustrie, radiofrequent lassen van kunststof folie in de kunststofindustrie, radiofrequent lijmen van houten latten tot panelen in de meubelindustrie, drogen en indampen met mechanische dampcompressie in de zuivelindustrie en in de chemie. In andere sectoren blijven de toepassingen echter achter.

6.2.2 WEERSTANDSVERWARMING

Principe

Bij weerstandsverwarming wordt elektrische energie via een weerstand omgezet in warmte. Er zijn twee typen weerstandsverwarming, indirect en direct. Bij indirecte weerstandsverwarming wordt de weerstand gevormd door een weerstandselement in bijvoorbeeld een oven, of in de vorm van een dompelaar. De warmte wordt via geleiding, convectie en straling naar het te verwarmen product overgebracht. De weerstand kan ook gevormd worden door het te verwarmen materiaal zelf; in dat geval spreken we van directe verwarming.

Warmteoverdracht is dan niet noodzakelijk, het warmteverlies is gering en er kunnen hoge vermogensdichtheden worden bereikt tot in de orde van grootte van 1.000 kW per m² [Rudolph, 1989].

Indirecte weerstandsverwarming

Er zijn ovens voor zowel batchgewijze productie als voor continue productie via een lopende band [Rudolph, 1989; Mühlbauer, 1992]. De elektrische oven munt vooral uit door een goede regelbaarheid en lage stilstandsverliezen. Vooral een wandbekleding met een vuurvaste stof van een lage warmtecapaciteit leidt tot zeer lage stilstands- en opstartverliezen. De elektrische oven kan in intermitterend bedrijf een belangrijke energiebesparing leveren ten opzichte van een conventioneel gestookte oven. Het feit dat de warmte elektrisch wordt opgewekt maakt onder normale atmosferische omstandigheden ook verwarming mogelijk in een andere omgeving dan lucht, bijvoorbeeld om oxidatie te voorkomen. Als warmte-overdrachtmedia worden in ovens naast lucht onder andere stikstof, waterstof, koolmonoxide, methaan of mengsels van deze gassen gebruikt.

De indirecte elektrische oven is eenvoudig van constructie en wordt alom toegepast [Mühlbauer, 1992]. Elektrische ovens zijn er in vele vormen en maten, zowel voor continue als voor batchgewijze productie met vermogens die kunnen variëren van enkele watt tot meer megawatt. Ze worden voor uiteenlopende processen ingezet, bijvoorbeeld voor het smelten van aluminium, het bakken van aardewerk en het harden van isolatielakken in elektrotechnische apparatuur [UIE, 1992a, Rudolph, 1989].

Directe weerstandsverwarming

Deze techniek wordt in diverse industrietakken gebruikt. De meeste toepassingen vindt men in de metaalindustrie. Gezien de goede stroomgeleiding van metalen ligt dit voor de hand. Een belangrijke toepassing is het voorverwarmen van metalen voor het vormen, verder wordt de techniek gebruikt voor smelten en lassen. Directe weerstandsverwarming wordt ook toegepast in de voedselindustrie, in de bouwsector bij het uitharden van beton, in de glasindustrie voor

het smelten en zuiveren van glas en in de chemische industrie voor het bereiden van materialen. Hierna volgt uit drie sectoren een voorbeeld.

Metaalindustrie

In de metaalindustrie wordt directe weerstandsverwarming toegepast bij het vormen van stalen staven en platen. De materialen moeten daarvoor tot rond 1.250 °C worden verwarmd. Op de plaat of de staaf worden contactklemmen aangebracht. Het aantal contacten hangt af van de vereiste stroomsterkte. De maximum stroomsterkte per contact ligt in de orde van 10 kA. Het spreekt voor zich dat deze grote stroomsterkte hoge eisen aan het contact stelt.

Waterkoeling van het contact wordt toegepast om te sterke verhitting van het contact te vermijden. De energie wordt in de meeste gevallen bij de netfrequentie toegevoerd, meestal via het laagspanningsnet (lager dan 1 kV) en een transformator (10 - 25 V bij 10 - 30 kA). Bij de vermogensregeling wordt gebruik gemaakt van thyristorsturing (fase-aansnijding van de spanning) [Rudolph, 1989; Mühlbauer 1992].

Voedselindustrie

In de voedselindustrie wordt directe weerstandsverwarming gebruikt voor het pasteuriseren en steriliseren van hoofdzakelijk vloeibare voedingsmiddelen. De verhitting vindt plaats in een afgesloten buis. Snel afkoelen na sterilisatie en meteen steriel verpakken betekent een sterke verbetering van de houdbaarheid zonder dat het product diepgevroren, chemisch geconserveerd of ingeblikt hoeft te worden. De constructie van de elektrode die de stroom in het materiaal brengt, is van belang voor een goede werking. Producten die op deze manier kunnen worden gesteriliseerd zijn onder andere sauzen, soepen, chili-concarne en mayonaise [UIE, 1996b].

Glassmelterij

Bij hoge temperaturen is glas sterk geleidend. In glassmeltprocessen wordt de temperatuur van het glas eerst met primaire brandstoffen verhoogd tot 700 à 800 C; daarna wordt het glas met elektrische weerstandsverwarming verwarmd tot het glas smelt bij temperaturen van 1.000 tot 1.400 C. De elektrische energie wordt overgebracht via elektroden die in het glas steken. De voordelen van elektrisch smelten van glas zijn een betere kwaliteit glas, minder schadelijke emissies, een homogener glas, een lager energieverbruik en een betere controle van het proces [Metaxas, 1996].

6.2.3 INDUCTIEVE VERWARMING

Principe

Een wisselend magnetisch veld in een geleidend materiaal wekt kringstromen in dat materiaal op. De energie van magnetische veld wordt via deze kringstromen door de weerstand van het materiaal omgezet in warmte. Inductieve verwarming is dus een bijzondere vorm van directe weerstandsverwarming. Bij magnetische materialen leveren ook de hysteresisverliezen een kleine bijdrage aan de warmteontwikkeling.

Omdat de energieoverdracht geschiedt via een magnetisch veld, vertoont het verwarmingscircuit voor inductieve verwarming grote gelijkenis met een transformatorcircuit. Er is een primaire wikkeling die aangesloten wordt op de spanningsbron. De secundaire wikkeling wordt gevormd door het te verwarmen materiaal zelf. Uiteraard kan de inductieve techniek alleen worden toegepast voor het verwarmen van geleidende materialen [UIE, 1992b]. Hierna volgen vier voorbeelden van toepassingen van inductief verwarmen.

Verwarmen

Net als weerstandsverwarmen wordt inductief verwarmen gebruikt voor het verhitten van metalen om ze te vervormen, bijvoorbeeld door walsen, stampen, smeden of extruderen. In deze gevallen zal een keuze moeten worden gemaakt tussen weerstands- of inductieve verwarming. Inductief verwarmen is relatief duur, vooral voor grotere installaties. Het energieverbruik komt in de regel echter gunstiger uit bij inductieve dan bij weerstandsverwarming. Inductief verwarmen wordt meestal toegepast als weerstandsverwarming niet mogelijk is of als grote aantallen eenvoudige stukken moeten worden verwarmd. Omdat elektrische contacten ontbreken, kan inductief verwarmen eenvoudiger worden geautomatiseerd, hetgeen bij grote productieaantallen voordelen oplevert.

Bij verwarmen ten behoeve van vervormen zal een homogene verwarming worden nagestreefd. In de meeste gevallen zal daartoe middenfrequent inductief worden verwarmd. Een warmtebehandeling is ook nodig om de mechanische eigenschappen van het materiaal te verbeteren, bijvoorbeeld harden, ontlaten, temperen en spanningsvrij gloeien. Het gaat hier vaak om oppervlaktebehandelingen, bijvoorbeeld het harden van tandwielen en aslagers. Het toepassen van een hoge frequentie is dan gunstig vanwege de kleine indringdiepte ('skin'-effect). De bulk van het materiaal wordt dan niet verwarmd, maar alleen een relatief dunne oppervlaktelaag. Dit betekent dat het energieverbruik drastisch wordt verminderd [Rudolph, 1989; Conrad, 1994].

Fig. 6.2.1

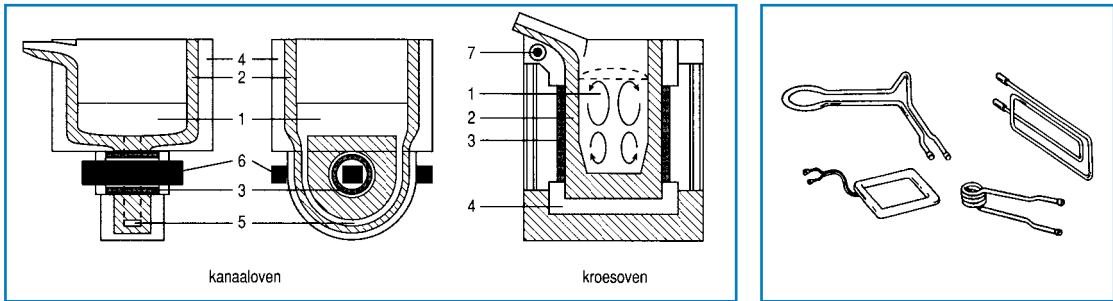
Laagfrequente inductiesmeltoven met gesloten ijzerkern.

Fig. 6.2.2

Voorbeelden van spoelvormen voor solderen of lassen naar [UIE, 1992b; Conrad, 1994].

Smelten

Een belangrijke toepassing van inductieve verwarming is het smelten van metalen en metaallegeringen. Inductieve ovens worden ook gebruikt voor het warm houden van gesmolten metalen tussen verschillende processtappen. Voor het smelten worden zowel laagfrequente (50 tot 100 Hz) als middenfrequente (0,15 tot 10 kHz) ovens toegepast [Rudolph, 1989]. De constructie verschilt en is mede afhankelijk van de metaalsoort. Fig. 6.2.1 geeft een laagfrequente inductiesmeltoven met gesloten ijzerkern weer. Dit type oven wordt toegepast voor het smel-

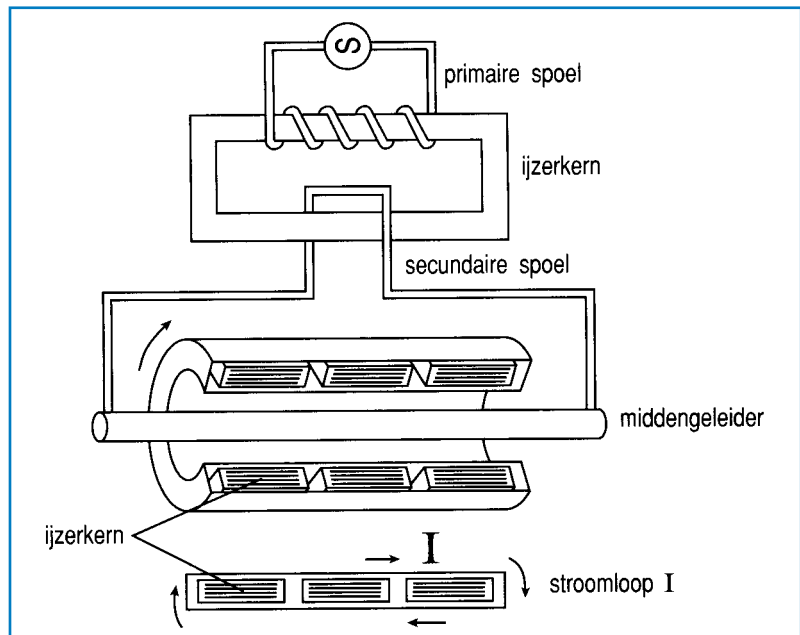


ten van non-ferro-metalen, zoals koper en aluminium. Elk type metaal vraagt om een eigen ovenconstructie vanwege de verschillen in geleidbaarheid en in chemische eigenschappen. De laagfrequente oven met ijzerkern wordt ook gebruikt voor het warm houden van gesmolten metalen, bijvoorbeeld tussen het smelten en het gieten in.

Voor het smelten wordt ook de zogenaamde kroesoven toegepast. Inductieve

Fig. 6.2.3

Inductief verwarmde trommeldroger naar [Metaxas, 1996].



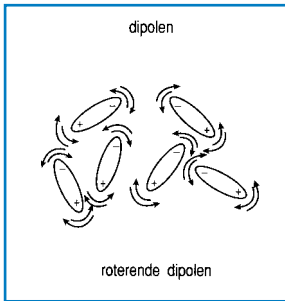
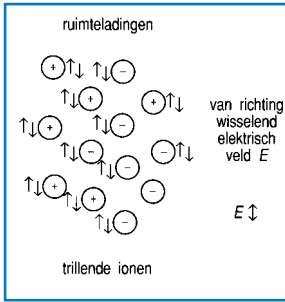


Fig. 6.2.4

- a** Opwarming door beweging van ionen.
b Opwarming door beweging van dipolen (moleculen met een positieve en een negatieve zijde).

ovens voor verwarmen en smelten hebben vaak een groot vermogen en worden in de zware metaalindustrie gebruikt. Het elektriciteitsverbruik ligt afhankelijk van de frequentie tussen 500 en 600 kWh per ton [Mühlbauer, 1992; UIE, 1992b; CADDET, 1993].

Solderen en lassen

Inductieve technieken voor solderen en lassen worden minder in de zware metaalindustrie, maar vooral in andere industrietakken toegepast. Midden (0,15 tot 10 kHz) of hoge (10 tot 3.000 kHz) frequenties worden gebruikt [Rudolph, 1989]. Voor zacht solderen lopen de vermogens van 0,5 tot 5 kW, voor hard solderen van 3 tot 30 kW en voor lassen van 60 tot 700 kW. De vorm van de spoel wordt speciaal aangepast aan het te solderen of te lassen product. Fig. 6.2.2 geeft enkele voorbeelden van spoelvormen voor solderen of lassen. De fietsenfabrikant Gazelle past dit soort technieken toe voor het fabriceren van fietsframes.

Indirect inductief verwarmen

In een aantal gevallen wordt inductief verwarmen toegepast bij niet metalen producten. Deze bevinden zich dan in een metalen houder die inductief wordt verwarmd. De warmte wordt via geleiding overgedragen op het product. Zo worden bijvoorbeeld lakken op blinken gedroogd door het blink te verwarmen, het vochtprofiel in papier gehomogeniseerd en de papierdikte geregeld door de papierwals te verwarmen, omeletten gebakken door de pan te verwarmen, en afval verdicht door de pers te verwarmen [UIE, 1992b]. Een karakteristieke toepassing is een trommeldroger waarvan de wand inductief wordt verwarmd (zie fig. 6.2.3).

6.2.4 DIËLEKTRISCHE VERWARMING

Principe

Bij diëlektrische verwarming wordt elektrische energie via een hoogfrequent elektrisch veld in een materiaal omgezet in warmte. Ook bij deze techniek vindt de warmteontwikkeling in het materiaal zelf plaats. De warmte kan daardoor zeer snel en efficiënt in het materiaal worden gebracht met hoge vermogens. Er is geen warmteoverdrachtmedium nodig; het elektrische veld fungeert als zodanig. Een product kan alleen diëlektrisch worden verwarmd als het een relatief slechte geleider is [UIE, 1988; Metaxas, 1983]. Dit in tegenstelling tot inductief verwarmen dat alleen mogelijk is bij geleidende materialen. De geschiktheid voor diëlektrisch verwarmen wordt bepaald door twee grootheden, namelijk de diëlektrische constante en de verliesfactor van het materiaal. De waarde van de diëlektrische constante wordt bepaald door het aantal elektrische dipolen per volume-eenheid in het materiaal (zie fig. 6.2.4). De mate waarin de dipolen hun

	Temperatuur (°C)	27 Mhz (RF)		2.450 Mhz (MG)	
		ϵ^1	ϵ^{11}	ϵ^1	ϵ^{11}
teflon	22	2,1	0,0003	2,1	0,0003
polyethyleen	24	2,3	0,0004	2,3	0,0007
pyrex	25	4,8	0,015	4,8	0,025
ijs (zuiver)	-12	3,7	0,07	3,2	0,003
water (zuiver)	25	78	0,4	77	12
water	25	78	100	75	18
aardappel (ongekookt)	25	80	48	54	16
biefstuk	25	50	1.300	40	120

Tabel 6.2.1

Diëlektrische constante ϵ^1 en de verliesfactor ϵ^{11} van een aantal materialen bij twee frequenties, respectievelijk RF en MG.

bewegingsenergie overdragen (de mate van warmteontwikkeling in het materiaal) wordt aangegeven door de verliesfactor. De verliesfactor bevat eveneens de bijdrage van de warmteontwikkeling als gevolg van eventuele vrije ladingdragers in het materiaal (zie fig. 6.2.4). In feite treedt hier een vorm van weerstandsverwarming op. Dit kan het geval zijn, omdat het materiaal bijvoorbeeld water bevat.

De in de praktijk gebruikte frequenties zijn 13, 27, 896/915 en 2.450 MHz. In de diëlektrische techniek wordt tot 300 MHz gesproken van radiogolffrequenties (RF), daarboven van microgolffrequenties (MG). In het algemeen wordt voor grote objecten met kleine gewenste vermogensdichtheden RF toegepast; voor kleine objecten met hoge gewenste vermogensdichtheden wordt meestal MG gekozen. Tabel 6.2.1 geeft de diëlektrische constante en de verliesfactor van een aantal materialen voor deze twee frequenties.

Diëlektrisch drogen

Bij droogprocessen kan diëlektrisch verwarmen vaak met succes in de laatste droogfase worden toegepast [CADET, 1994]. Het verloop van een droogproces wordt gegeven in fig. 6.2.5. Na het verwijderen van vocht tot een bepaalde lage vochtigheid (op mechanische of thermische wijze) neemt de droogtijd bij verdere droging van het materiaal snel toe en vraagt onevenredig veel energie. Diëlektrisch verwarmen leidt in een dergelijke situatie tot een efficiënter gebruik van energie, omdat de warmte precies daar waar het nodig is wordt opgewekt, namelijk in het vocht. Door diëlektrische verwarming te combineren met de toevoer van droge lucht voor de afvoer van vocht kan de droogtijd met een factor 2 - 10 worden bekort. Er wordt op kosten bespaard als gevolg van de kortere procestijd en de compactere apparatuur, daarnaast kan in veel gevallen op energie worden bespaard. Gelet op de benodigde investeringen ligt het voor de hand diëlektrische droging daar toe te passen waar de conventionele methoden ontoereikend zijn [CADET, 1994].

De nu volgende vier voorbeelden van diëlektrisch drogen zijn afkomstig uit de textiel-, de voedingsmiddelen- en de aardewerkindustrie. Diëlektrische drogers

worden echter ook op vele andere plaatsen met succes toegepast, bijvoorbeeld in de houtindustrie en bij lederwaren, farmaceutica, bouwmaterialen en papier [UIE, 1992c].

Wol

Voor bepaalde toepassingen moet wol worden verstevigd door haar te vervilten. Dit gebeurt in een proces waarbij de wollen draden zich onder water bevinden. Vóór het verpakken moet de wol weer worden gedroogd. In de Leidsche Wolspinnerij gebeurde dit vroeger in een aparte bewerking in een batchoven. De wol werd verpakt in netten, in de oven gehangen, gedroogd met hete lucht en na het drogen verpakt. Met gebruikmaking van microgolft technieken is een systeem ontwikkeld waarbij het gehele proces van vervilten, drogen en verpakken in één procesgang wordt uitgevoerd waardoor op bedrijfskosten kon worden bespaard.

Gebakvormen

Een te hoog vochtgehalte in bakkerijproducten leidt snel tot schimmel. Een laag vochtgehalte (5%) is dus gewenst. Een van de deelprocessen na het bakken is dan ook het drogen. In de praktijk blijkt het toepassen van een radiofrequente droger economisch aantrekkelijk vanwege de lagere investeringen, de lage energiekosten en de kleine afmetingen van de oven.

Aardewerk

Een van de gebruikelijke deelprocessen bij het produceren van aardewerk is drogen voor lossen. Aardewerk wordt uit klei gevormd met behulp van gipsen mallen. Door het drogen van het samenstel (gipsen mal en kleiproduct) krimpt

Fig. 6.2.5

Verloop van het droogproces bij conventioneel drogen en diëlektrisch drogen.

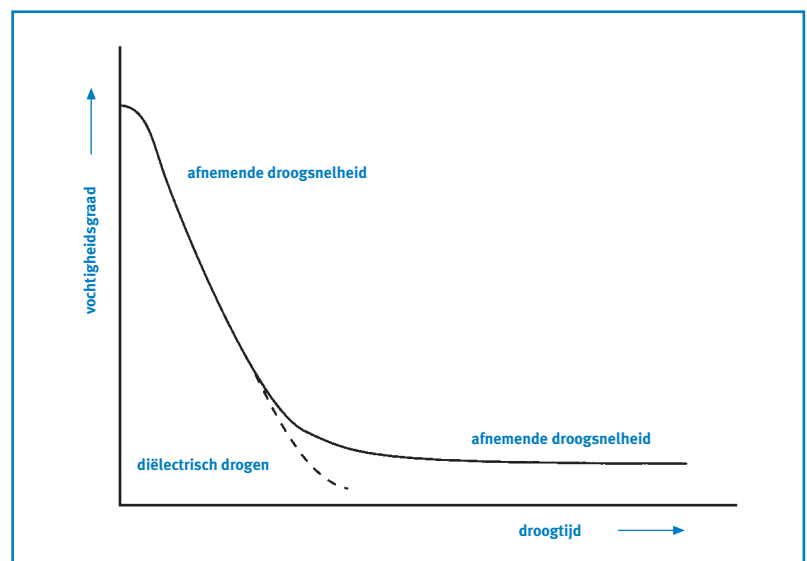


Fig. 6.2.6

Microgolfdroger zoals die wordt gebruikt door Potterie Cor Unum voor het lossen en drogen van aardewerk voorafgaand aan het bakken [Jansen in Klei, Glas, Keramiek].



de klei; het product kan daarna worden gelost uit de vorm. Vergeleken met de huidige droogmethoden neemt de lostijd met een factor 5 tot 40 af. Dit heeft aanzienlijke economische voordelen, omdat nu dezelfde productie kan worden gemaakt met een derde van de mallen; de verblijftijd van de mal in het proces is immers veel korter geworden. Daardoor hoeven er minder mallen te worden gemaakt, het ruimtebeslag in de fabriek neemt drastisch af en de hoeveelheid af te voeren gipsafval vermindert. Een voorbeeld wordt gegeven in fig. 6.2.6.

Polyester garens

Bij het drogen van polyester garens moet een kwart liter water per kilogram product worden verwijderd. Dit proces vond plaats in een 25 kW elektrische hete-luchtoven. Door het toepassen van een radiofrequente droger is de droogtijd tot 40% gereduceerd en is een energiebesparing van 50% behaald. Bovendien is de kwaliteit verbeterd, omdat het resterende vocht homogeen over de draadspool is verdeeld.

Diëlektrisch verwarmen

Na de genoemde toepassingen van diëlektrisch drogen volgen nu vier voorbeelden van diëlektrisch verwarmen. Van deze voorbeelden zijn het lassen van plastics en het uitharden van gelijmde houten panelen de meest verspreide toepassingen van diëlektrisch verwarmen. In Nederland staan enkele honderden radiofrequente installaties die voor deze processen worden toegepast.

Lassen van plastics

Producten die met plastic lassen worden gefabriceerd zijn bijvoorbeeld te vinden in de medische sector (infuus- en bloedzakken), in kantoorbenodigdheden (plastic mappen) en in de scheepvaart (polyurethaan reddingsgordels en boten). Deze producten worden gemaakt door twee lagen plastic tussen twee

RF-elektroden te brengen. De RF-warmte die meestal wordt opgewekt bij 27 Mhz doet het plastic op de gewenste plaats smelten en daardoor hechten. De kunststoffen dienen een hoge verliesfactor te hebben; PVC is voor deze toepassing zeer geschikt [UIE, 1992c].

Uitharden van lijmen

Een energiebesparende toepassing van diëlektrisch verwarmen is het uitharden van de lijmverbinding tussen houten latten. De warmte wordt slechts opgewekt in de lijm; het hout wordt nauwelijks verwarmd. Daardoor heeft deze methode het uitharden met hete lucht bijna geheel verdrongen. De voordelen zijn een veel kortere droogtijd en een aanzienlijke energiebesparing [UIE, 1992c].

Blancheren, pasteuriseren en steriliseren

Blancheren, pasteuriseren en steriliseren zijn warmtebehandelingen met een stijgende graad van intensiteit die als doel hebben bacteriën, schimmels en andere micro-organismen in voeding te vernietigen. Microgolfverwarming biedt de mogelijkheid dit proces uit te voeren, nadat de voedingsmiddelen zijn verpakt. Deze productievолgorde biedt een essentieel voordeel ten opzichte van conventionele methoden, omdat na behandeling geen besmetting meer kan optreden. De voeding is lang houdbaar zonder dat er conserveermiddelen hoeven te worden toegevoegd [UIE, 1992c].

Vulcaniseren van rubber

Meer dan de helft van alle industriële microgolftoepassingen betreft het vulcaniseren van rubber. Dit is een chemisch proces dat onder toevoer van warmte plaats vindt en dat de materiaaleigenschappen van rubber aanzienlijk verbetert. Omdat rubber de warmte slecht geleidt, biedt toepassing van diëlektrische warmte hier een duidelijk voordeel. Met microgolfverwarming kan de vulcanisatie aanzienlijk worden versneld. De voordelen zijn een kortere procestijd, korte lijnen en minder energieverbruik [UIE, 1992c, Jansen, 1994b].

6.2.5 VERWARMING MET INFRAROOD, ULTRAVIOLET OF ELEKTRONENSTRALEN

Principe

Infrarood- (IR) en ultraviolet (UV)-verwarming zijn bijzondere vormen van weerstandsverwarming. De warmte die opgewekt wordt in de gloeidraad van een elektrische lamp of buis wordt via straling overgedragen op het te verwarmen product. De straling is een elektromagnetische golf met een zeer hoge frequentie. De straling wordt gericht op het te verwarmen product; dit absorbeert een deel van de stralingsenergie en deze energie wordt omgezet in warmte. Het principe van verwarming is in feite hetzelfde als bij verwarming door zonlicht.

Infraroodtype	Bron	Maximale temperatuur (°C)	Golflengte met maximale radiantie (µm)	Maximale stralingsintensiteit (kW/m ²)	Onderbreking tot 10% energie-uitstraling	Levensduur	Lekwarmte door product	Doordringing van de straling	Geschikt voor
kortgolvig	lamp	2.000	1,4	10	1 sec	3.000 u	veel, isolatie is vereist	goed	homogene verwarming van dikke producten (enkele mm)
	kwartsbuis	2.200	1,2	300	1 sec	5.000 u	weinig	goed	
middengolvig	kwartsbuis	1.050	2,2	70	30 sec	5.000 - 10.000 u	weinig	middel	relatief oppervlakkige verwarming en vochtige producten
	straalpaneel metalen	650	3,5	25	2 min	jaren	weinig	middel	
	stralings-element	750	2,8	40	2 min	jaren	weinig	middel	
langgolvig	straalpaneel pyrex	350	4,6	15	5 min	jaren	weinig	klein	oppervlakkige verwarming dunne producten
	keramisch element	300 - 700	3 - 5	40	5 min	jaren	weinig	klein	

Tabel 6.2.2

Verschillende infraroodstralers en hun belangrijkste eigenschappen.

Naast overdracht door straling vindt er ook nog enige overdracht van energie door convectie plaats [Metaxas, 1996].

Infraroodverwarming

Bij infraroodverwarming zijn drie golflengtegebieden te onderscheiden:

- langgolelige stralers (4 - 10 µm)
- middengolelige stralers (2 - 4 µm)
- kortgolelige stralers (0,76 - 2 µm)).

De voornaamste eigenschappen van de stralers zijn samengevat in tabel 6.2.2.

Infraroodverwarming kan worden toegepast in infraroodovens of met open stralers [Metaxas, 1996; Conrad, 1994]. In beide gevallen wordt een aantal lampen tot een of meer stralingspanelen gecombineerd. Het voordeel van een oven is

<p>Metaal</p> <ul style="list-style-type: none"> – bakken van verf – verwarmen van assen – drogen van gewassen stukken – drogen van vernis – drogen van glazuur – verwarmen voor het zandstralen 	<p>Textiel</p> <ul style="list-style-type: none"> – drogen van stof en lijn – polymerisatie van harsen – drogen van drukinkt – thermofixatie van latexschuim tapijtrug 	<p>Kunststof</p> <ul style="list-style-type: none"> – verwarmen voor vacuümvormen – drogen van korrels – drogen van gewassen plaatmateriaal – verwarmen van buizen voor het buigen – polymerisatie van kunststoffen 	<p>Voeding</p> <ul style="list-style-type: none"> – bakken van koekjes – drogen van beschuiten – opwarmen van voedingsmiddelen – roosteren van vlees – bakken van korst op leverpastei – pasteuriseren en steriliseren van melk en vruchtensap
<p>Glas</p> <ul style="list-style-type: none"> – voorverwarmen van flessen – voorverwarmen van gelaagd glas – drogen van glazuur – drogen van spiegels en van de beschermende vernislaag hiervoor 	<p>Drukkerij</p> <ul style="list-style-type: none"> – drogen van inkt – drogen van zeefdrukken – drogen van behangpapier – verwarmen van inkt 	<p>Papier</p> <ul style="list-style-type: none"> – drogen van papier – drogen van lak – polymerisatie van additieven 	<p>Overigen</p> <ul style="list-style-type: none"> – drogen van houten panelen – drogen van tabak – smelten van was – verwarmen van krimpfolie

Tabel 6.2.3

Toepassingsvoorbeelden van infraroodverwarming.

dat gereflecteerde straling in de oven blijft en het proces beter is te controleren (in geval van drogen kan de oven worden belucht om dampen te verwijderen). Door de hoge frequentie van de straling dringt de golf niet diep in het te verwarmen product door. Infraroodstraling is dan ook vooral geschikt voor oppervlakteverwarming (waaronder drogen). Vergeleken met conventionele convectieverwarming kunnen hogere vermogensdichtheden worden bereikt. De thermische inertie van infrarode straling is laag vergeleken met conventionele verwarming. Gezien de eenvoudige techniek zijn ook de investeringskosten van infraroodverwarming gering. Daarnaast zijn de bekende voordelen van elektrotechnologie van toepassing, zoals goede regel- en doseerbaarheid en de mogelijkheid tot automatisering.

Toepassingen van infraroodverwarming

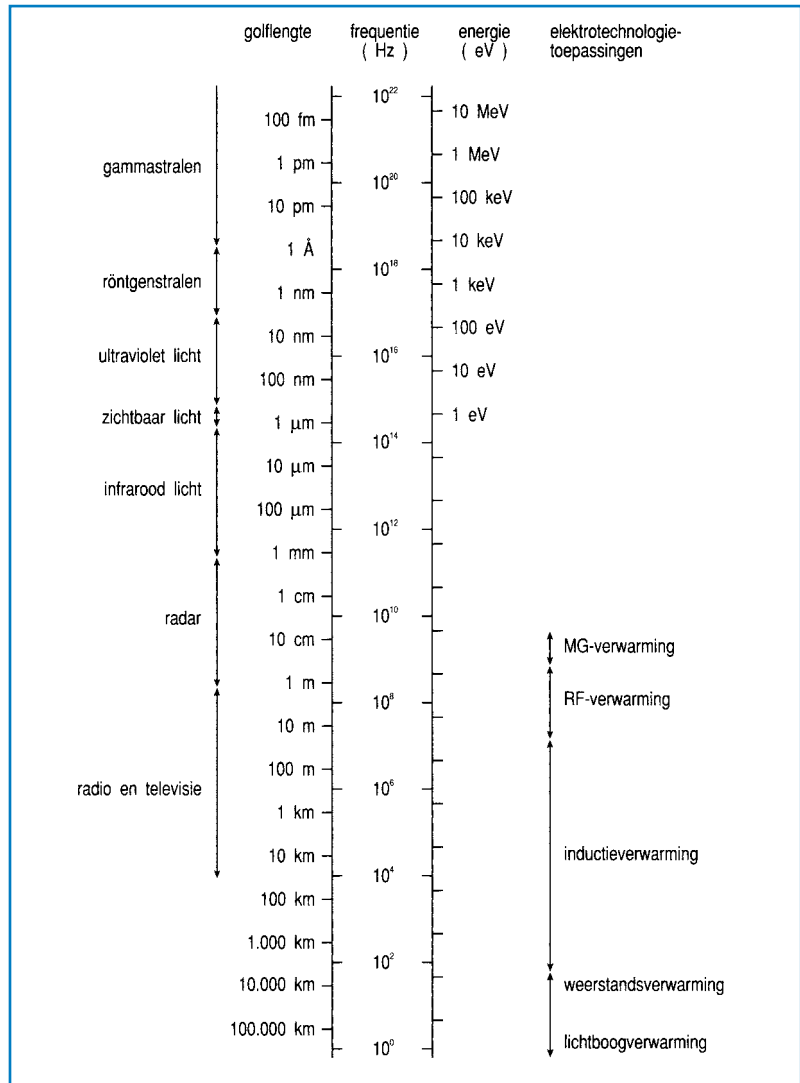
Infraroodverwarming wordt onder andere toegepast in de automobielsector (het drogen van spuitwerk, vooral na plaatwerkreparaties), het drogen van bedrukt papier en textiel. Tabel 6.2.3 geeft voorbeelden van toepassingen in verschillende industriesectoren.

Ultravioletverwarming en elektronenstraalverwarming

Ultravioletverwarming (UV) en elektronenstraalverwarming (EB, ook wel elektronenbombardement genoemd) zijn twee totaal verschillende technieken. Toch

Fig. 6.2.7

Frequentiespectrum met de plaats van de beschreven technieken.



worden ze hier gezamenlijk behandeld omdat ze deels op eenzelfde toepassing zijn gericht: het vernetten en uitharden van polymere coatings.

In beide technieken is de energie van de straling hoog. Voor UV-licht blijkt dit uit fig. 6.2.7. De energie ligt in dezelfde orde van grootte of is hoger dan de chemische bindingsenergie. Moleculaire chemische bindingen kunnen zowel door UV-licht als door een elektronenbombardement worden aangetast. Deze typen straling worden dan ook aangeduid als ioniserende straling.

De ultravioletbron lijkt in uitvoering op de besproken infraroodbron; beide zijn uitgevoerd als een lamp of buis. Bij de ultravioletlamp wordt het licht echter opgewekt door een gasontlading. Meestal worden daarvoor kwikdampampen

gebruikt. Ultravioletlampen zenden behalve ultraviolet licht ook zichtbaar, en ten dele ook infrarood licht uit. Een nieuwe ontwikkeling op dit gebied is de ultraviolet-laserlamp die licht van één specifieke golflengte uitstraalt.

Elektronenstraalverwarming werkt met een bundel elektronen uit een versnel-
ler. De elektronen worden vrijgemaakt uit een kathode. Deze bestaat vaak uit
een metalen draad die tot zeer hoge temperatuur wordt verhit. De uit de katho-
de tredende elektronen worden met behulp van een hoge spanning versneld.
De bundel elektronen wordt op het product gericht.

Toepassingen van UV- en EB-verwarming

Al eerder is opgemerkt dat beide technieken gericht zijn op het uitharden of
polymeriseren van coatings. Wil UV-licht echter in het polymeer doordringen,
dan moet het materiaal in enige mate transparant zijn voor UV-licht.

Elektronenstralen dringen goed in het materiaal door. Uitharden met een elek-
tronenbombardement verloopt sneller dan met UV-straling. Voor uitharding met
behulp van UV-licht moeten foto-initiatoren in de coating aanwezig zijn. Het uit-
harden met behulp van UV- en EB-technieken heeft enkele belangrijke voorde-
len boven conventionele coatingtechnieken. Het uitharden gaat snel en er is
geen warmtebehandeling nodig. Zo kunnen ook temperatuurgevoelige materia-
len gecoat worden. De coating hoeft niet gedroogd te worden. De apparatuur is
compact en er kan een grote variëteit aan coatings worden behandeld.

UV- en EB-technieken kunnen ook worden gebruikt voor het uitharden van lak-
ken op metaal, het drogen van hout, papier, inkt en lijm, voor textielveredeling
en laminaten (zoals in melkkartons). Daarnaast kunnen UV- en EB-technieken
worden toegepast bij de productie van magneetbanden, compact discs, glasve-
zels en printplaten. UV licht wordt in combinatie met ozon gebruikt voor het rei-
nigen van gassen en water. EB wordt eveneens gebruikt voor het steriliseren
van medische apparatuur en van voedsel, zoals dat ook geschiedt met gamma-
straling. Daarnaast wordt EB gebruikt voor kwalitatief hoogwaardig lassen. De
kostprijs van een EB-installatie is 10 - 20 maal hoger dan van een UV-installatie.
Het energiegebruik van een EB-installatie is daarentegen weer lager [Metaxas,
1996].

6.2.6 BOOGVERWARMING

Principe

In de boogoven wordt de elektrische energie via een boogontlading omgezet in warmte. De warmte wordt gebruikt voor het smelten en lassen van metalen. De boogelektroden bevinden zich in de smeltzone zelf, de boogenergie wordt daarvoor rechtstreeks voor het smeltproces gebruikt. Er kunnen hoge temperaturen worden bereikt. De warmteontwikkeling vindt plaats in een relatief klein volume, hetgeen leidt tot zeer hoge energiedichtheden [Rudolph, 1989; Mühlbauer, 1992].

Toepassingen

Hierna volgen vier voorbeelden van toepassingen van boogverwarming.

Wisselstroomboogoven

In de boogoven zijn drie elektroden aanwezig (drie-fasensysteem). De elektroden bevinden zich op enige afstand boven een bad met gesmolten metaal. Het metaal bevindt zich in een metalen vat dat aan de binnenzijde is geïsoleerd met vuurvast materiaal. Voor kleine vermogens worden elektroden uit amorfe koolstof toegepast, grotere vermogens vragen om grafitelektroden. Deze elektroden kunnen stroomdichtheden tot 30 A per cm² verdragen, met de grootste elektroden zijn stroomsterkten tot 80 kA te bereiken. De boog tussen de elektroden en het gesmolten metaalbad wordt gevoed via een transformator. Normaal gesproken is de transformator aangesloten op het 10 of 20 kV distributienet, maar installaties van groter vermogen zijn op hogere distributiespanningen aangesloten.

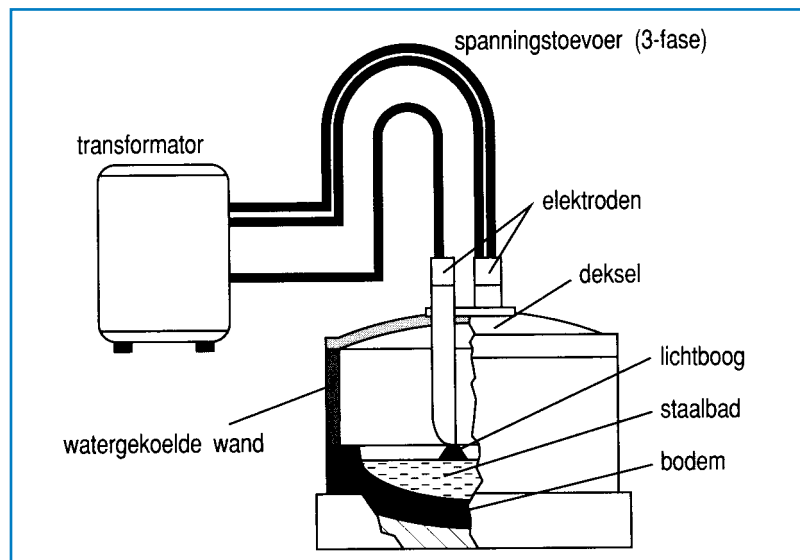


Fig. 6.2.8
Schematische weergave van een wisselstroomboogoven.

De wisselstroomboogoven (zie fig. 6.2.8) wordt het meest toegepast. Deze oven wordt onder andere gebruikt voor het smelten van ijzer en staal en voor de productie van staal uit staalschroot. Moderne ovens bevatten 100 tot 120 ton metaal bij een diameter tussen de 6 à 7 meter en bij een aangesloten vermogen van 500 - 700 kVA per ton. Het totale energiegebruik voor het smelten en voor opvolgende metallurgische bewerkingen ligt tussen de 500 en 700 kWh per ton. Het rendement van de oven ligt rond de 70 - 75%. De wisselstroomboogoven wordt voorts toegepast voor de productie van allerlei ijzer- en staallegeringen zoals ijzersilicium, chroomstaal, mangaanstaal, en voor de productie van silicium, calciumcarbide en fosfor [Rudolph, 1989; Mühlbauer, 1992; Conrad, 1994].

Gelijkstroomboogoven

Gelijkstroomboogovens worden eveneens gebruikt voor het smelten van ijzer en staal. Ze hebben als voordeel dat de stroom in de elektrode zich gelijkmatig verdeelt over de doorsnede van de elektrode, doordat het skin- en 'proximity'-effect ontbreken (beide effecten hebben tot gevolg dat de stroom voornamelijk langs het oppervlak van de geleider vloeit; deze effecten doen zich bij gelijkstroom niet voor). Bij toepassing van de grootst mogelijke elektrode kunnen stroomsterkten tot 100 kA worden toegelaten. Het rendement van de oven is ongeveer gelijk aan dat van de wisselstroomboogoven. Economisch gezien ligt het voordeel vooral in het geringere verbruik van grafietelektroden.

Daartegenover staat dat de investeringskosten van de gelijkstroomboogoven hoger liggen. Het energiegebruik van de oven ligt voor het smelten van staal rond de 400 - 550 kWh per ton staal. Voor de nakomende metallurgische handelingen moet per ton edelstaal op een energiegebruik van 100 - 250 kWh worden gerekend [Rudolph, 1989; Mühlbauer, 1992; Conrad, 1994].

Vacuümboogoven

De vacuümboogoven wordt gebruikt voor het reinigen, ontgassen en homogeniseren van staal of andere metalen. De oven werkt als een gelijkstroomboogoven. Boogspanningen liggen in de orde van grootte van 30 - 45 V bij stromen van 25 - 35 kA. Met de vacuüm gelijkstroomboogoven kunnen naast edelstaal en andere ijzer- en staallegeringen zeer zuivere metalen als tantaal, titaan, zirkoon, molybdeen, niobium, hafnium en wolfram worden geproduceerd [Rudolph, 1989; Conrad, 1994].

Vonkerosie

Een zeer bekende toepassing van de elektrische boog is het lassen van metalen. Een meer bijzondere en ook interessante toepassing is vonkerosie (een vorm van metaalbewerking). De voedingsbron is in plaats van een gelijkstroom- of wisselstroombron een impulsgenerator, die bestaat uit een capaciteit die voortdurend wordt opgeladen en ontladen. Met deze generator worden hoge span-

ningsimpulsen opgewekt met als gevolg doorslag tussen een elektrode en het werkstuk. Door de intense boog wordt plaatselijk het materiaal bij iedere puls een beetje weggebrand. Op deze manier zijn 'verspaningen' van verschillende duizenden mm³ per minuut te bereiken, wat een grote bewerkingssnelheid betekent. De ruwheid van het oppervlak ligt tussen 1 en 500 µm; dit wordt gezien als een goede afwerking van het bewerkte oppervlak. Omdat de boog aangrijpt op het dichtstbijzijnde punt, wordt een natuurlijke egaliteit van het oppervlak verkregen [Rudolph, 1989].

6.2.7 PLASMAVERWARMING

Principe

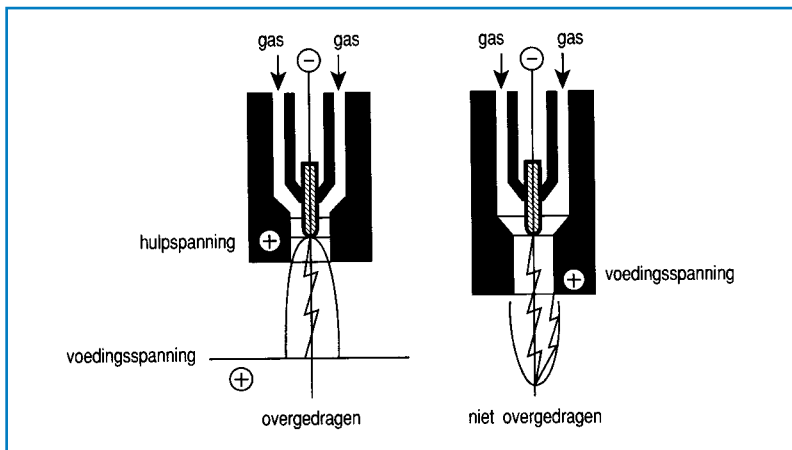
Bij plasmaverwarming wordt elektrische energie via een boogontlading omgezet in een plasmastroom. Een plasma is een zeer heet geïoniseerd gas, bestaande uit positieve ionen en negatieve elektronen met een hoge energiedichtheid. Plasmaverwarming vindt plaats met behulp van een plasmatoorts. Plasmaverwarming wordt toegepast in industriële processen waar hoge temperaturen vereist zijn. De temperaturen in het plasma variëren tussen 3.000 en 20.000 °C [Rudolph, 1989; UIE, 1957].

Er worden twee typen plasmabogen onderscheiden: de overgedragen en de niet overgedragen boog. Fig. 6.2.9 toont het principe van de plasmatoorts. De toorts bestaat uit twee elektroden, waartussen een hoge spanning wordt aangelegd. Tussen de elektroden wordt een gas geblazen. De spanning tussen de elektroden is dermate hoog dat doorslag in het gas optreedt. Het gas wordt in de boog geïoniseerd, waardoor een plasma met een hoge temperatuur naar buiten treedt. Indien het werkstuk de (meestal) positieve hoogspanningselektrode vormt, wordt gesproken van een overgedragen boog. Als het werkstuk geen deel uitmaakt van het elektrodensysteem, wordt gesproken van een niet overgedragen boog. In het eerste geval komt de stroom gas versneld op het werkstuk; in het tweede geval komt het gas vrij uit de elektrodeopening [Rudolph, 1989; Metaxas, 1996; UIE, 1957].

Zoals gezegd kunnen met de plasmatoorts zeer hoge temperaturen worden bereikt. Meestal wordt de plasmatoorts bij temperaturen rond 12.000 °C gebruikt. Afhankelijk van de aard van de toepassing kan de gasdruk variëren van laag vacuüm tot 20 atmosfeer. De eigenschappen van de plasmatoorts worden beïnvloed door de aard van het gas dat door de boog wordt geblazen.

Fig. 6.2.9

Principe van de overgedragen en de niet overgedragen plasmatoorts.



Toepassingen

Veel toepassingen van plasmaverwarming liggen in de staalindustrie. De plasmatoorts wordt gebruikt om bestaande technieken te verbeteren. De productie van ijzer uit erts is gebaseerd op reductie van ijzeroxyden. In conventionele technieken wordt gas gebruikt als energiebron voor verwarming en als reductiemiddel. Met een plasmatoorts kan de functie van warmtebron en reducerend middel worden gescheiden, waardoor het proces beter regelbaar is.

Plasmatoortsen worden gebruikt voor het produceren van ijzer en staal uit schroot. Het gebruik van argon als toortsgas leidt onder meer tot hogere opbrengsten, omdat het staal dan wordt geproduceerd in een atmosfeer van inert gas. De plasmatoorts wordt eveneens gebruikt in de productie van diverse ijzerlegeringen zoals ijzerchroom, ijzermangaan en ijzersilicium. Ook wordt de plasmatoorts gebruikt om non-ferrometalen zoals zink, lood, chroom, nikkel en molybdeen uit metaalafval terug te winnen. In de metaalverwerkende industrie wordt de plasmatoorts gebruikt voor het lassen van 'moeilijke' metalen zoals chroomnikkelstaal [Conrad, 1994].

De hoge temperaturen in een plasmatoorts en de keuze van het ioniserende gas hebben geleid tot toepassing in de chemische industrie. Met de plasmatoorts worden onder andere titaniumdioxide en acetyleen geproduceerd. De plasmatoorts wordt eveneens toegepast in de cement- en papierindustrie. Ook in de geavanceerde coatingtechnologie vindt de plasmatoorts een toepassing, namelijk in thermisch spuiten. Met deze techniek kunnen in motoren en gasturbines keramische lagen worden aangebracht, waardoor het rendement stijgt en de slijtage vermindert. Ook kunnen laagwaardige materialen van hoogwaardige oppervlaktelagen worden voorzien [Rudolph, 1989; UIE, 1957].

Belangrijke toepassingen van de plasmatoorts liggen op milieugebied: vernietigen van chemisch afval zoals gechloreerde koolwaterstoffen (PCB's), fenolen,

cyaniden, ziekenhuis- en fabrieksafval. De hoge temperatuur in de plasma-toorts gecombineerd met een aangepast geïoniseerd medium verhoogt de reactiesnelheid, waardoor ook moeilijk afbreekbare en zeer stabiele stoffen snel kunnen worden omgezet in milieuvriendelijker stoffen. Een aantal processen voor het vernietigen van chemisch afval is in ontwikkeling. Twee proefinstallaties zijn gebouwd voor het verwerken van PCB's. Beide claimen een vernietigingsrendement van 99,9999%. Als gevolg van de afwezigheid van zuurstof wordt gesteld dat er geen dioxinen worden gevormd [Rudolph, 1989; UIE, 1957]. In par. 6.5 (Scheiding en reiniging) komen de gepulste corona en de plasmareiniging als reinigingstechnieken aan de orde.

6.2.8 LASER

Principe

In een laser wordt elektriciteit omgezet in een zeer geconcentreerde lichtbundel van hoog vermogen. Het woord laser is van oorsprong een afkorting: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Een laser is dus een lichtversterker. Hij creëert een stroom fotonen die een identieke frequentie (monochromatisch) en in fase (coherent) zijn en dezelfde richting hebben. Bij gestimuleerde emissie moeten atomen in aangeslagen energietoestand verkeren. Een atoom is aangeslagen, wanneer een of meer elektronen een hogere baan beschrijft. Zo'n aangeslagen atoom kan dan vervolgens in een lagere, stabilere energietoestand terugvallen onder uitzending van een foton; het elektron 'valt' in de oorspronkelijke lagere baan terug. Het uitgezonden foton kan een ander nog niet aangeslagen atoom in de aangeslagen toestand brengen. Dit atoom kan ook weer terugvallen onder uitzending van een foton: het gestimuleerde foton. Het uitgezonden en het gestimuleerde foton hebben dezelfde frequentie, fase, richting en polarisatie. Om een laserbundel te krijgen, is het nodig de kans op gestimuleerde emissie groter te maken dan de kans op spontane emissie en absorptie. Met behulp van een gasontlading wordt daarom een toestand gecreëerd, waarin meer atomen in de aangeslagen toestand verkeren dan in de grondtoestand [Rudolph, 1989; Conrad, 1994].

Een laser moet worden gekoeld. De energie-efficiëntie van 'conventionele' lasers is zeer slecht, maar de ontwikkelingen in halfgeleiderlasers hebben enorme verbeteringen gebracht op dit punt (zie de bijdrage 'Hoogvermogen-halfgeleiderinfraroodlasers' verderop in deze paragraaf).

Enkele belangrijke voordelen van lasers in de industrie zijn:

- Op kleine oppervlakken zijn zeer grote vermogensdichtheden realiseerbaar.
- Instelling kan met zeer grote nauwkeurigheid geschieden.

Toepassingen

Toepassingen zijn vooral te vinden bij geavanceerde technieken zoals micro-elektronica en micromechanica. De in deze vakgebieden gebruikte nieuwe materialen zijn vaak zeer bros en moeilijk te bewerken (waaronder lassen en snijden). Een ander probleem waarvoor de lasertechniek uitkomst biedt is de steeds verder toenemende schaalverkleining. Bewerkingen die op dit gebied met lasers kunnen worden uitgevoerd zijn markeren en graveren, microbewerkingen zoals boren, wegsmelten en vastzetten (bijv. het oognetvlies) en het uitvoeren van warmtebehandelingen (oppervlaktehardening op moeilijk te bereiken plaatsen). CO₂-lasers worden veel gebruikt voor het snijden van allerlei materiaal (staal, weefsels, plastic, papier) [Mühlbauer, 1992; Metaxas, 1996].

Fig. 6.2.10

[links] Opbouw van een laserdiode. De lengte van het diode-element is bepalend voor de golflengte van het uitgestraalde licht. [Bron: Photonics, 1998].

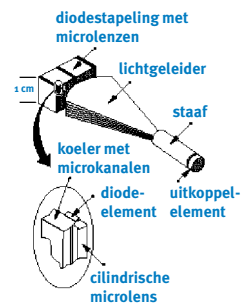
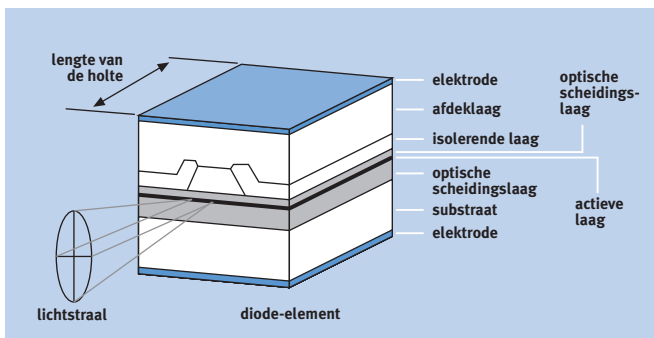
Fig. 6.2.11

[midden] Een stapeling van diodelasers, in dit geval 10 strips met ieder 20 diodelasers voor 150 W bij 795 nm. Bron: [Princeton University/Opto Power, 1998].
[rechts] Een inkoppelingssysteem van Lawrence Livermore National Laboratory [LLNL, 1998].

HOOGVERMOGEN-HALFGELEIDERINFRAROODLASERS

dr. K.A.H. van Leeuwen⁶

Voor intens licht in het infrarode gebied bestaat vooral een grote markt in de materiaalbewerking (lassen en snijden). Afhankelijk van de toepassing wordt ver infrarood licht gebruikt dat afkomstig is van een CO₂ laser (golflengte 10 micrometer), of nabij infrarood licht (1.064 nanometer, nm) van een YAG⁷- of aanverwante laser. In het algemeen is de kortere golflengte meer geschikt voor precisiewerk en wint de YAG-laser daarom snel aan populariteit. De markt valt verder uiteen in die voor 'micromachining', waarbij het gaat om kleine puntlassen en het zeer nauwkeurig snijden van kleine werkstukken, en om precisie-bulkmateriaalbewerking (plaatssnijden enz.). Voor de eerste toepassing worden



⁶ TU Eindhoven,
Postbus 513
5600 MB Eindhoven
K.A.H.v.Leeuwen@phys.tue.nl

⁷ Yttrium-AluminiumGranaat,
het materiaal van het kristal waar de
bundel in wordt genereerd

YAG-lasersystemen gebruikt met lichtvermogens tot zo'n 200 W, voor de tweede toepassing gaat het om systemen met vermogens tot 10 kW. Traditioneel worden deze lasers gevoed door het licht van conventionele hoog-vermogenlampen. De efficiëntie is hierbij laag, hetgeen vooral veroorzaakt wordt door het brede spectrum (grote kleurberейk) van het licht van conventionele lampen.

Als alternatief kan het licht van diodelasers gebruikt worden om op een veel efficiëntere wijze een YAG-laser 'op te pompen'. Momenteel zijn met een diode

opgepompte YAG-lasers met een uitgangsvermogen tot zo'n 200 W commercieel verkrijgbaar. De 'stopcontactefficiëntie' is hierbij ongeveer 6%, en dat is tenminste een factor 10 beter dan conventioneel gepompte systemen.

De ontwikkeling van met een diode opgepompte systemen met hoger vermogen gaat snel. Deze ontwikkeling wordt voornamelijk getrokken door het PLM- (Precision Laser Machining) consortium in de VS. Dit consortium, waarin zowel industrieën zoals Boeing, Caterpillar en General Motors als universiteiten deelnemen ontwikkelt met overheidssteun onder andere een 6 kW-systeem voor materiaalbewerking. Ook hier ligt een toekomstperspectief voor de hand, namelijk het rechtstreeks gebruiken van diodelasers voor materiaalbewerking. De grote belemmering wordt gevormd door het feit dat hoog-vermogendiodelasers of diodelaser arrays van nature geen keurig coherent licht produceren. Dit leidt tot een slechte kwaliteit laserbundel, onbruikbaar voor precisie-materiaalbewerking. Voor het oppompen van een YAG-laser vormt de bundelkwaliteit geen bezwaar; vandaar het twee-trapssysteem. Er bestaan echter technieken om diodelaser arrays in een coherent keurslijf te dwingen. Deze technieken worden tot nu toe alleen in laboratoria toegepast op systemen tot een paar Watt uitgangsvermogen. Het ligt echter in de verwachting dat het opschalen naar hogere vermogens en commerciële toepassing niet lang op zich zal laten wachten.

6.2.9 MECHANISCHE DAMPCOMPRESSIE

*ir. W.J.L. Jansen*⁸

Bij mechanische dampcompressie wordt elektrische energie gebruikt om bij droogprocessen de verdampingswarmte van damp (meestal waterdamp) terug te winnen. Bij droog- of indampprocessen wordt de damp aan het proces onttrokken en vervolgens door middel van een elektrisch aangedreven compressor in druk en temperatuur verhoogd. Bij een hogere druk ligt de condensatietemperatuur hoger. De damp wordt vervolgens naar een warmtewisselaar gevoerd (zie fig. 6.2.12). In een warmtewisselaar condenseert de damp, de vrijkomende warmte wordt afgedragen aan het droog-, dan wel indampproces. De verdampingswarmte wordt daarbij voor een groot deel hergebruikt. Er is een relatief geringe hoeveelheid elektrische energie voor de aandrijving van de compressor nodig. Mechanische dampcompressie is dus een interessant alternatief voor allerhande droogprocessen en met name voor thermische dampcompressie bij indampinstallaties [UIE, 1988; Wekken, 1990].

In de praktijk is voor het voorverwarmen van het product en voor het opvangen van de procesvariëaties een kleine hoeveelheid stoom nodig. De voor de compressie benodigde energie is een factor 10 tot 20 kleiner dan de warmte-inhoud van de onttrokken damp.

⁸ KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
w.j.l.jansen@kema.nl

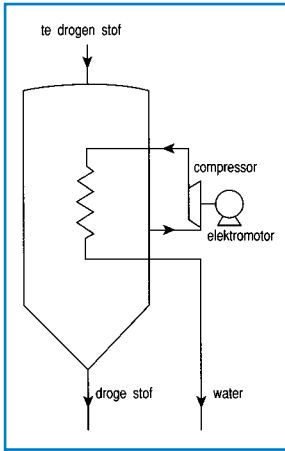


Fig. 6.2.12
Principe van mechanische dampcompressie.

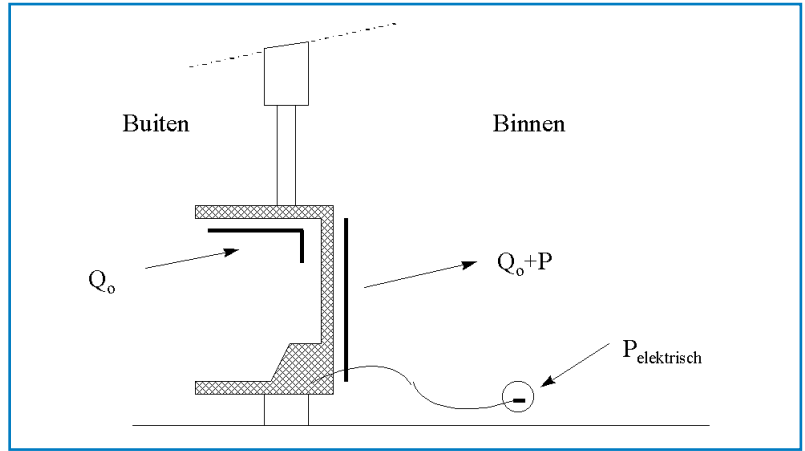


Fig. 6.2.13
Werkingsprincipe van de warmtepomp: de koelkast als warmtepomp.

In principe kunnen we de indamper met mechanische dampcompressie vergelijken met een warmtepomp, waarbij het werkmiddel wordt gevormd door het te verwarmen medium. Mechanische dampcompressie wordt toegepast bij het concentreren van vloeistoffen, voornamelijk in de chemische en voedingsmiddelenindustrie. Voorbeelden zijn het indikken van melk en wei, het drogen van dierlijk afval, de destillatie van alcohol en het scheiden van propeen en propaan. Belangrijke voordelen van deze techniek zijn het lage energiegebruik, waardoor de energiekosten lager zijn dan bij conventionele processen [UIE, 1992a; 1996a; 1988; Wekken, 1990].

6.2.10 DE WARMTEPOMP

ir. P.A. Oostendorp⁹

Werkingsprincipe

Het valt buiten het kader van dit boek om uitvoerig op de werking van warmtepompen in te gaan. Een eenvoudige illustratie van het principe wordt in fig. 6.2.13 gegeven. Een koelkast is zodanig in een opening in de muur van een woning aangebracht dat de (open) deur zich aan de buitenkant bevindt. De koelkast koelt dus de omgeving. Deze aan de omgeving onttrokken warmte (Q_0) wordt via de warmtewisselaar aan de achterzijde van de koelkast afgestaan aan de woning. Het thermisch equivalent van de aandrijfenergie P (elektriciteit) komt eveneens aan de achterzijde van de koelkast beschikbaar.

In fig. 6.2.13 is te zien dat de warmteopbrengst ($Q_0 + P$) groter is dan de aandrijfenergie P . Het in eerste instantie wonderlijke effect van een rendement dat boven 100 % ligt is hiermee verklaard.

Voor verdere details wordt de lezer verwezen naar de literatuur, zie onder meer [Engelen, 1992; WEKA, 1998].

⁹ TNO-MEP,
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

Warmtepompen zijn op hun plaats waar behoefte bestaat aan lage-temperatuur-warmte en dat geldt des te meer naarmate de temperatuur van die warmte lager is. Dit volgt direct uit een exergiebeschuwing. Het exergiegehalte E van warmte Q met een temperatuur T (in Kelvin) is namelijk:

$$\frac{E(T)}{Q(T)} = \frac{T - T_0}{T} \quad (1)$$

Exergie staat voor de theoretisch maximale hoeveelheid arbeid (of elektriciteit) die uit warmte met een temperatuur T winbaar is, wanneer die warmtestroom thermodynamisch verliesvrij (dat wil zeggen reversibel) in evenwicht met een omgeving met een temperatuur T_0 wordt gebracht. Het exergiegehalte van warmte is dus lager, naarmate de temperatuur van die warmte lager is. We herkennen in uitdrukking (1) het theoretisch rendement van krachtopwekking. Het resterende deel van de warmte noemen we anergie. Het anergiedeel A van warmte is:

$$\frac{A(T)}{Q(T)} = \frac{T_0}{T} \quad (2)$$

Warmte met omgevingstemperatuur is dus 100% anergie: er kan geen arbeid uit die warmte gewonnen worden. Uit het voorgaande volgt ook:

$$E(T) + A(T) = Q(T) \quad (3)$$

Bij conventionele warmte-opwekking wordt hoogwaardige brandstof, bijvoorbeeld aardgas (bijna 100% exergie) gedegradeerd tot laagwaardige warmte van bijvoorbeeld 70 °C. *Energetisch* kan dat met een hoog rendement (tot dicht bij 100% bij een HR-ketel). Omdat echter het exergie-gehalte van de geproduceerde warmte slechts 13% bedraagt¹⁰ (87% is kennelijk anergie) is het exergetisch rendement slechts 13%. De hoge *kwaliteit* van het aardgas wordt dus slecht benut. Voor elektrische weerstandsverwarming geldt eenzelfde redenatie: elektriciteit is 100% exergie en als een elektrische boiler warm water van 70 °C produceert, heeft ook die een *exergetisch* rendement van slechts 13%.

Het energiebesparingspotentieel van de warmtepomp ontstaat doordat de warmtepomp het hoge exergiegehalte van elektriciteit beter gebruikt. Het wezenlijke van de warmtepomp is dat die in staat is om warmte van de gewenste ‘mengverhouding’ tussen exergie en anergie te produceren door de anergie uit de omgeving (gratis warmtebron) te halen en de exergie uit de aandrijfenergie (bijv. elektriciteit). Hoe lager de temperatuur van de gevraagde warmte is (en des te lager de gewenste exergie-inhoud dus is), des te minder aandrijfenergie is er nodig. De theoretisch maximaal haalbare waarde van het rendement van de warmtepomp, meestal aangeduid met COP_{th} (Coefficient Of Performance) is daarmee gelijk aan het omgekeerde van uitdrukking (1):

¹⁰ Onder de aanname dat $T_0 = 25 \text{ °C}$ (298 K).

$$COP_{th} = \frac{T}{T - T_o} \quad (4)$$

Aan deze uitdrukking is te zien dat de COP *altijd groter is dan 1* en stijgt naarmate de *temperatuurlift* (dit is $T - T_o$, dus het verschil in temperatuur van geleverde warmte en bronwarmte) kleiner is. Het is dus voor een hoge COP van warmtepompen van belang om de warmte op een zo laag mogelijke temperatuur op te wekken en een bron met een zo hoog mogelijke temperatuur beschikbaar te hebben. In de praktijk bereiken warmtepompen COP-waarden die ongeveer 50% van COP_{th} bedragen.

Toepassingen en toepassingsmogelijkheden

In woningen worden warmtepompen toegepast voor ruimteverwarming en warm tapwater. Het is dan van belang dat die woningen worden uitgerust met een lage-temperatuurverwarmingssysteem.

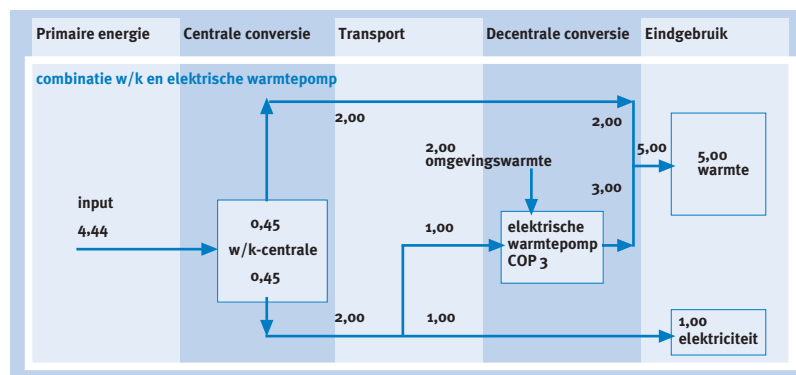
Zeer op zijn plaats is de warmtepomp bij een gecombineerde vraag naar verwarming en koeling: met één investering worden dan twee functies vervuld. Dit komt vooral voor in de utiliteitssector (bijv. kantoren) en in de industrie, wanneer door *procesintegratie* restwarmte teruggevoerd moet worden in het proces en daartoe in temperatuur verhoogd moet worden. Heel succesvol in dit kader zijn warmtepompen die gekoppeld zijn aan indampprocessen (mechanische dampcompressie).

Systeemintegratie

Warmtepompen zijn uitermate geschikt om de verhouding waarin warmte en kracht door gecombineerde warmte/kracht (w/k)-systemen wordt geleverd aan de verhouding tussen vraag en aanbod aan te passen. In fig. 6.2.14 is te zien dat een w/k-installatie onder de gekozen uitgangspunten evenveel warmte als kracht levert, terwijl de eindgebruiker vijf maal meer warmte dan kracht vraagt. Dit is een situatie die zeer veel voorkomt. Door een deel van de geproduceerde elektriciteit via een elektrische warmtepomp voor warmteopwekking te gebruiken, worden vraag en aanbod heel flexibel op elkaar afgestemd en wordt 40%

Fig. 6.2.14

Warmte/kracht (w/k) in combinatie met een elektrische warmtepomp.



primaire energie bespaard ten opzichte van gescheiden opwekking. Terwijl w/k-koppeling 'solo' beperkt inzetbaar is doordat daarmee overschotten aan elektriciteit worden gegenereerd, kan door de combinatie met elektrische warmtepompen voorkomen worden dat elektriciteit over de systeemgrenzen heen geëxporteerd hoeft te worden. Dit is een zeer fundamenteel voordeel van warmtepompen.

Voordelen ten opzicht van concurrerende technieken

Warmtepompen zijn de enige techniek, waarmee thermische rendementen boven 100% gehaald kunnen worden. Zij vertegenwoordigen dus een enorm energiebesparingspotentieel.

Warmtepompen kunnen in combinatie met w/k-koppeling zorgen voor een flexibele aanpassing van de verhouding waarin warmte en kracht gevraagd worden. Met een warmtepomp kan tegelijkertijd warmte en koude geproduceerd worden. Daarmee wordt de bereikbare energiebesparing nog groter en kan tevens een investeringsvoordeel worden bereikt.

Soorten warmtepompen

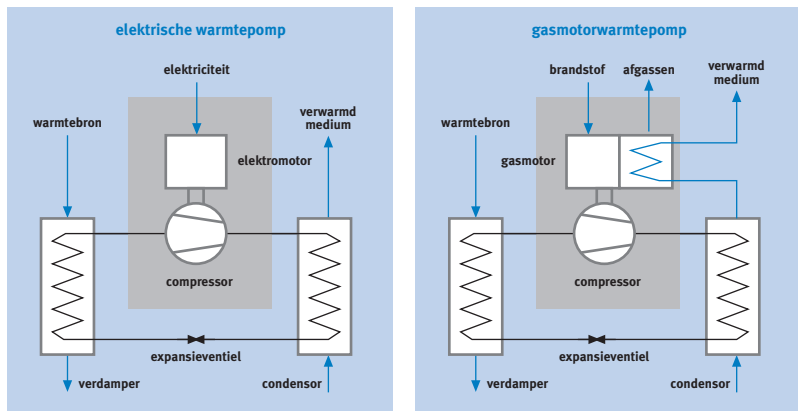
De meest bekende warmtepomp is de elektrische compressiewarmtepomp. Veruit de meeste huishoudkoelkasten zijn op dat principe gebaseerd (zie fig. 6.2.15). Van alle soorten warmtepompen is de compressiewarmtepomp het verst ontwikkeld. Deze pomp is in een hele brede range van capaciteiten te koop (3 kW - 3 MW). Hij begint op het ogenblik door te dringen op de huishoudelijke markt, vooral in nieuwbouwwijken voor zowel de ruimteverwarming als de warm-tapwatervoorziening. Ook (top)koeling in de zomer wordt in toenemende mate als een optie gezien. In de utiliteitssector is de compressiewarmtepomp al jaren gangbaar voor airconditioning (dan heet hij dus koelmachine), waarbij tegenwoordig steeds meer de verwarmings- en koelfunctie geïntegreerd worden in een enkele machine, vooral vanwege het hiervoor reeds genoemde investeringsvoordeel dat daarmee ontstaat.

Fig. 6.2.15

Elektrische compressiewarmtepomp.

Fig. 6.2.16

Gasmotorwarmtepomp.

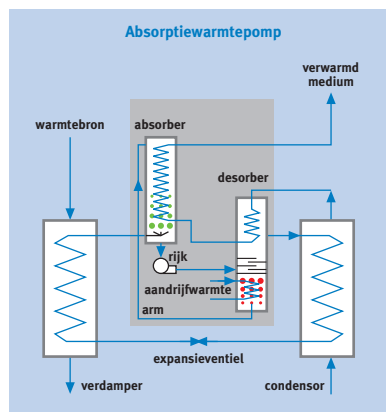


In de industrie vindt de compressiewarmtepomp toepassing bij procesintegratie, dus waar tegelijkertijd een vraag naar warmte en koude bestaat. Verreweg het meest frequent toegepast is de zogenaamde mechanische dampcompressiewarmtepomp (zie par. 6.2.9).

Er bestaan ook gasgestookte warmtepompen. Fig. 6.2.16 geeft het schema van een gasmotorwarmtepomp. Te zien is dat de compressor nu door een gasmotor wordt aangedreven. Extra voordeel is dat de restwarmte die in de gasmotor vrijkomt (koelwater en uitlaatgassen) ook nuttig gebruikt wordt. Tegenwoordig ziet men vooral systemen, waarbij de mechanische koppeling tussen gasmotor en compressor is vervangen door een elektrische. Men combineert dan een w/k-systeem met een elektrische warmtepomp. Het voordeel van deze ook reeds in fig. 6.2.14 geschetste benadering is dat er een grotere flexibiliteit ontstaat: enerzijds kan ook elektriciteit geleverd worden, en anderzijds behoeft de warmtepomp niet uitsluitend via de gasmotor te worden aangedreven.

Fig. 6.2.17 geeft het basisschema van de absorptiewarmtepomp. Deze pomp wordt met warmte aangedreven (meestal uit aardgas), maar ook industriële restwarmte en zonne-energie zijn mogelijk. Het voordeel is dat er nauwelijks mechanische componenten zijn. Dat leidt tot een in principe geluidloze werking en weinig slijtage, dus een lange levensduur. Tot nu toe wordt het principe vrijwel uitsluitend toegepast in grote capaciteiten (> 250 kW) voor airconditioning in gebouwen. Er zijn ontwikkelingen gaande naar zeer kleine capaciteiten (tot 5 kW) voor ruimteverwarming, waarbij vaak toepassing in de bestaande bouw wordt genoemd. Voordelen zijn de geruisloze werking en een goede aansluiting op bestaande gasinfrastructuren. Absorptiekoelmachines kunnen in principe met warmte uit zonnecollectoren worden aangedreven. Het voordeel is dan natuurlijk gelegen in de gelijktijdigheid van beschikbare zonne-energie en dat deel van de koelvraag dat wordt veroorzaakt door zonneshijn.

Fig. 6.2.17
Absorptiewarmtepomp.



Carnot rendement Watt/Watt

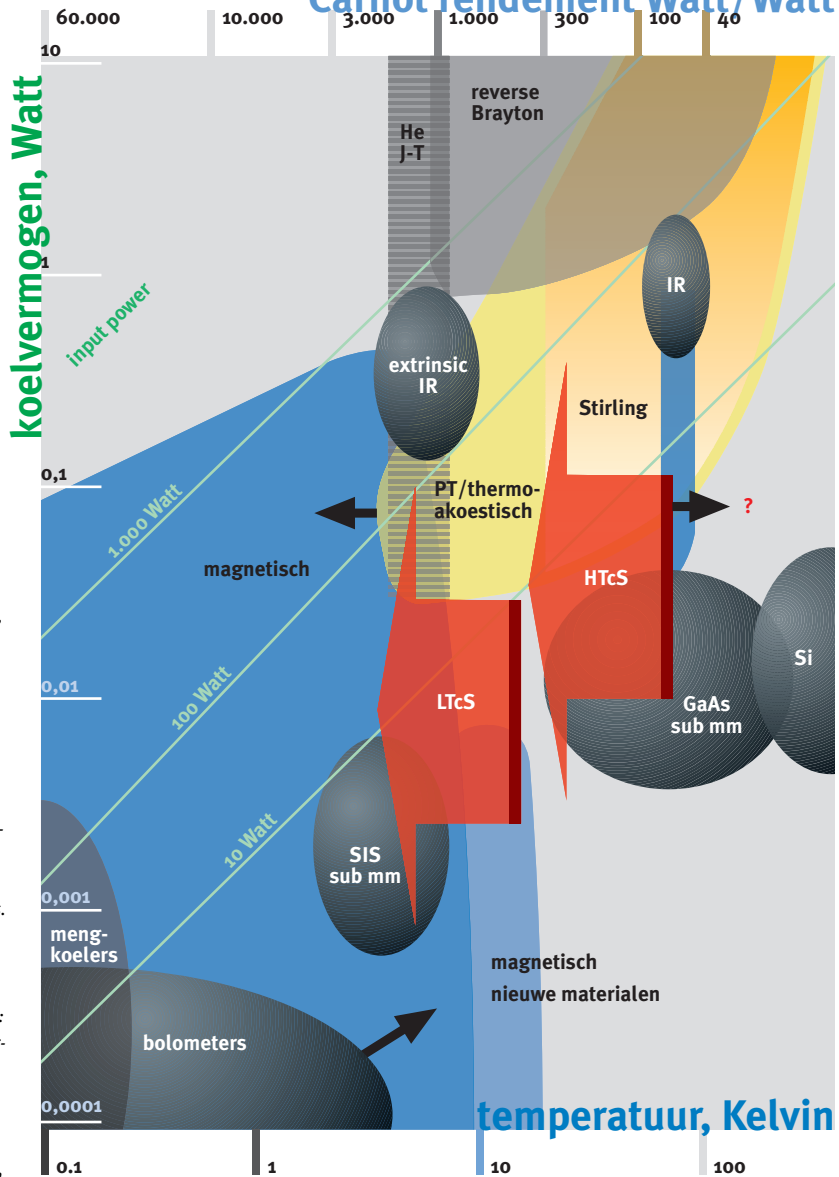


Fig. 6.3.1
 Verschillende koeltechnieken en de bijbehorende temperatuurtrajecten, input en koelvermogen.
 Op de verticale as: koelvermogen in Watt, op de horizontale as: het Carnot-rendement (maximaal theoretisch rendement per techniek), de hoeveelheid elektrische energie die nodig is voor één Watt warmte-onttrekking bij verschillende temperaturen.
 De schuine lijnen vertegenwoordigen verschillende 'input' vermogens. Afkortingen van de getoonde koeltechnieken: He J-T: Joule-Thompson expansie.
 Getoonde toepassingen: LTcS, HTcS: lage-, resp. hoge-temperatuursupergeleiding.
 De andere toepassingen: IR: infrarood, SIS: Supergeleider-Isolator Supergeleider, Si: silicium, GaAs: galliumarsenide. De bolometers zijn detectoren en meetinstrumenten die gebruikt worden in de plasmafysica, materiaalkunde, spectroscopie en astrofysica. De figuur is onder andere gebaseerd op gegevens van het Jet Propulsion Laboratory, USA en de Universiteit Twente.

6.3 KOUDE

6.3.1 KOELING ALS POORT NAAR NIEUWE MOGELIJKHEDEN

dr. C.C. Kranenburg¹¹

INLEIDING

Het woord 'koeling' wordt vaak geassocieerd met warmteoverschot. Veel toepassingen van koelmethode zijn er inderdaad op gericht om bij temperaturen iets boven of onder de gemiddelde kamertemperatuur de warmte, die bij een toepassing vrijkomt, te transporteren naar een plaats en een vorm die voor de toepassing verder geen kwaad kan. In het gunstigste geval wordt de warmte vervolgens elders nuttig gebruikt, hetgeen een duidelijke tendens is die kennelijk niet alleen door economische, maar ook door milieutechnische argumenten wordt gevoed.

Het realiseren van de optimale werktemperatuur van materialen speelt wat minder op de voorgrond, maar is minstens even belangrijk. Een omgevingstemperatuur die enige honderden graden boven de ons vertrouwde kamertemperatuur ligt of juist zeer lage (cryogene) temperaturen kunnen toegang geven tot een technologie die een hoge efficiëntie biedt of andere voordelen vanuit energetisch en of milieutechnisch oogpunt. Koeltechnologie is hierbij een faciliterende technologie. Zoals in par. 2.2.2 is aangegeven zijn er voor het nuttig gebruik van de zogeheten hoge-temperatuursupergeleiders nog erg lage temperaturen nodig. De technisch-economische haalbaarheid van toepassingen hangt dus direct samen met de technisch-economische haalbaarheid van geschikte koelapparaten.

Het is niet eenvoudig decennia vooruit te kijken en een enigszins betrouwbare uitspraak te doen over de rol van koeling in de hiervoor vermelde toepassingen. Er is echter veel in beweging op het gebied van koeltechnologie. Hierdoor wordt ook dit temperatuurgebied en zelfs het werkgebied van conventionele supergeleiders voor maatschappelijk gebruik toegankelijk, zonder dat daarvoor al te veel exotische infrastructuur nodig is.

ONTWIKKELINGEN IN KOELTECHNOLOGIE

Trends in de ontwikkeling

Voor supergeleiding blijft nog steeds een lage temperatuur nodig, en dus een bruikbare koelmethode. Juist voor lage temperaturen zou een praktische koelmethode gewenst zijn, bij voorkeur een apparaat zonder al te hoge eisen aan de gebruiker. Op het gebied van lage-temperatuurkoelmachines is er de laatste jaren veel gebeurd. Fig. 6.3.1 illustreert de toegankelijkheid van verschillende temperatuurgebieden door middel van diverse koeltechnieken.

.....
¹¹ Overmars Organisatie Adviseurs,
Postbus 3282
3502 GG Utrecht
kranenburg@overmars.nl

In de grafiek zijn zowel werkgebieden van toepassingen als koeltechnieken weergegeven in het perspectief van koelvermogen versus temperatuur. Vooral recente ontwikkelingen op het gebied van thermoakoestische koeling en puls-buiskoeling, maar ook de Kleemenco-cyclus, het gebruik van gasmengsels voor Joule-Thompson (J-T) expansie en de Gifford-McMahon machines kunnen zeer bemoedigend worden genoemd. De werkingsprincipes van laatstgenoemde drie technieken worden uitgebreid beschreven in standaardliteratuur. Voor de Stirlingkoeling wordt verwezen naar de beschrijving van de Stirlingmotor in par. 3.3.2 'Stirlingopwekkers'. In het kader van dit hoofdstuk zal daarom niet op al deze technieken worden ingegaan. Voor thermoakoestische koeling en puls-buiskoeling wordt een uitzondering gemaakt. Het akoestisch koelen is in de belangstelling komen te staan, omdat deze koeler geen bewegende delen heeft in het koude gedeelte. In die zin is hij vergelijkbaar met de pulsbus, maar die werkt bij frequenties van 1 tot 50 Hz, terwijl voor thermoakoestische koeling in het algemeen sprake is van 50 tot 100 Hz of nog hoger. Akoestisch koelen is relatief nieuw en momenteel nog wat verder verwijderd van toepassing. Zuiver beschouwd is pulsbuiskoeling een vorm van thermoakoestisch koelen, maar vanwege de bijzondere werktemperaturen van pulsbuiskoeling zullen ze steeds apart worden genoemd.

De mondiale inspanning op het gebied van thermoakoestische koeling en puls-buiskoeling is indrukwekkend. Juist bij deze technieken is te verwachten dat er praktisch bruikbare en onderhoudsarme koelmachines op de markt kunnen worden gezet met redelijke koelvermogens bij cryogene temperaturen. Temperaturen ruim beneden $2,5^\circ$ Kelvin worden reeds gehaald in laboratoria. Koelers met grote koelvermogens bij interessante temperatuurgebieden zijn op diverse plaatsen in ontwikkeling.

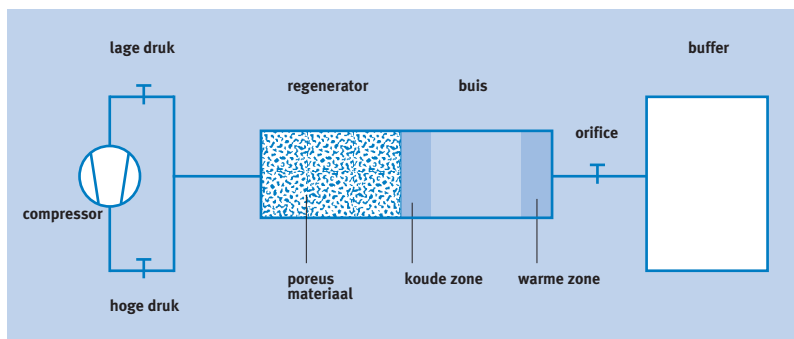
Kwaliteitskenmerken en kostenaspecten

Betrouwbaarheid, beschikbaarheid, onderhoud en veiligheid van technologie zijn de sleutelbegrippen in moderne technologieontwikkelingen. Met name de elementen in het koude gedeelte moeten gedurende de levensduur van het omhullende systeem betrouwbaar en bij voorkeur vrij van onderhoud zijn. Van alle nu bekende koelmethoden voor cryogene temperaturen hebben de thermo-akoestische koeling en pulsbuiskoeling wat deze aspecten betreft het grootste potentieel.

Een koelervariant die geheel op het thermoakoestische effect is gebaseerd is de TADOPTR. Hierbij wordt de benodigde akoestische golf door verhitting opgewekt (TAD, Thermo Acoustic Driven). Deze akoestische golf zorgt vervolgens voor de 'aandrijving' van een pulsbus (OPTR, Orifice Pulse Tube Refrigerator). Dit is een variant die erg interessant is voor het vloeibaar maken van aardgas, al baart bij reële toepassingen het transport van de enorme vermogens aan beide zijden de materiaaldeskundigen zorgen.

Fig. 6.3.2

Schema van de pulsbus. De druk die de compressor levert heeft aan de hoge-drukkant een typische waarde van 15 bar en aan de lage-drukkant ongeveer de helft daarvan. Door de kranen beurtelings open en dicht te zetten, wordt een drukgolf in de pulsbus gerealiseerd. Het werkgas is in het algemeen helium. Bron: [De Waele, TU Eindhoven].



Hoewel een pulsbus minder efficiënt is dan bijvoorbeeld de Stirling-koeler, maakt de afwezigheid van bewegende delen in het koude gedeelte hem uit praktisch oogpunt bezien interessant. Het meer onderhoudsgevoelige compressor gedeelte kan bij de pulsbus in principe in zeer korte tijd worden verwisseld, wat bij technisch-economische overwegingen op systeemniveau doorslaggevend kan zijn. Natuurlijk is een pulsbuskoeler niet voor elke toepassing de beste oplossing.

In de volgende paragraaf zal de werking van de thermoakoestische koeler in twee varianten worden toegelicht.

De werking van de pulsbus

Er zijn vele varianten van pulsbuizen. Ook worden diverse pulsbuizen voor verschillende werktemperaturen vaak gecombineerd tot twee- en drietraps pulsbuizen. Hier zal de zogenaamde 'single-orifice' pulsbus worden besproken, die bestaat uit een compressor- en een koelsectie. De koelsectie bestaat uit een regenerator (poreus materiaal met een hoge warmtecapaciteit) en een lege buis die via een kraantje (orifice) is verbonden met een buffervolume. De hoge- en de lage-drukkant van de compressor staan elk via een kraan in verbinding met de warme kant van de regenerator. De pulsbus wordt zo bedreven dat koeling optreedt op het punt waar de regenerator overgaat in het buisgedeelte.

De cyclus in de pulsbus kan worden onderverdeeld in vier stappen:

- kraan hoge druk open; kraan lage druk dicht; orifice dicht
- beide kranen naar compressor dicht; orifice open
- kraan hoge druk dicht; kraan lage druk open; orifice dicht
- beide kranen naar compressor dicht; orifice open.

Doordat de kranen beurtelings open en dicht worden gezet, ontstaat een drukvariatie in de koeler. Als gas zonder warmte af te voeren wordt gecomprimeerd, stijgt de temperatuur. Bij expansie daalt de temperatuur. Tijdens stap 2 en 3 expandeert het gas in de buis en daalt in temperatuur. Een deel van het gas stroomt langs de warme warmtewisselaar met een temperatuur die hoger is dan

de temperatuur van de warmtewisselaar en staat daar warmte af. Tijdens de stappen 3 en 4 stroomt koud gas langs de koude warmtewisselaar en geeft daar de gewenste koeling. In werkelijkheid wordt het orifice niet open en dicht gezet, maar afgesteld op een zodanige vaste waarde dat de koeling optimaal is.

Het bijzondere van de pulsbus

Veel koelmachines berusten in wezen op de Stirling- of verwante thermodynamische cycli. Hierbij wordt steeds gas in een holte verplaatst en op een geschikte plaats geëxpandeerd. Bij conventionele koelers als Stirling en McMahon wordt voor het verplaatsen van het gas een (metalen) verdringer gebruikt die heen en weer wordt bewogen. Deze verdringer die zich gedeeltelijk op lage temperatuur bevindt (in het koude gedeelte) geeft aanleiding tot slijtage, trillingen, hinderlijke geluiden, elektromagnetische storingen en dergelijke. Door deze slijtage heeft de koeler een beperkte levensduur en moet in veel gevallen de constructie van de cryogene opstelling zodanig worden uitgevoerd dat service mogelijk is en onderdelen kunnen worden vervangen. Door de scherpe eisen aan de tolerantie van de verdringer is de fabricage duur.

Het bijzondere van de pulsbus is nu dat *het gas zelf* voor de gewenste verplaatsing zorgt, waardoor de verdringer achterwege kan blijven.

THERMOAKOESTISCHE KOELING

We zijn gewend om geluidsgolven te zien als drukgolven. Bij de drukgolf hoort echter ook een temperatuurgolf. Bij de wisselwerking van deze temperatuurgolf met vaste oppervlakken ontstaat een rijke variëteit aan thermoakoestische effecten. Een bekend fenomeen is de productie van een luide toon als er een hoog temperatuurverschil wordt aangebracht in een bus die op een bepaalde manier is geconstrueerd. In dit geval wordt warmte omgezet in geluidsenergie. Het omgekeerde proces bestaat ook. In dat proces wordt geluid gebruikt om koeling te produceren. Het koelprincipe is geïllustreerd in fig. 6.3.3.

Als mechanisme (vergelijkbaar met de compressor bij de pulsbus) voor het opwekken van het geluid worden luidsprekers gebruikt, maar een interessante optie is om het geluid óók via het thermoakoestisch effect op te wekken. In dat geval zijn er in het geheel geen bewegende delen, dus zelfs niet bij de *productie* van de geluidsgolf.

In tegenstelling tot de pulsbus wordt naar verwachting het rendement niet laag in de buurt van de gemiddelde kamertemperatuur, zodat thermoakoestische koelers wel eens een beter alternatief zouden kunnen zijn voor huishoudelijke koeltoepassingen dan de pulsbus. Beide technieken zijn echter nog volop in ontwikkeling.

De thermoakoestische koeler bestaat uit een cilinder met gas die aan één kant is afgesloten door een vaste wand en aan de andere kant door een zuiger.

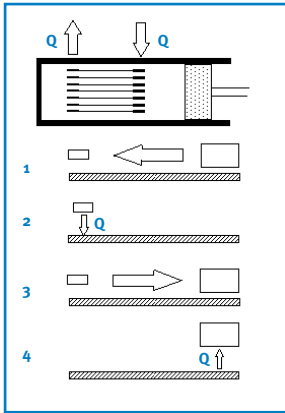


Fig. 6.3.3

Werkingsprincipe van de thermo-akoestische koeler.

Ongeveer halverwege bevindt zich een stapel plaatjes. Als de zuiger naar links beweegt, verplaatst het gas in het systeem zich eveneens naar links en warmt op. In deze naar links verschoven positie staat het warmte (Q) af aan de plaatjes en de linker warmtewisselaar. Als de zuiger naar rechts beweegt, koelt het gas af en neemt warmte op. Dan treedt de koeling op.

De koelcyclus kan ingedeeld worden in vier stappen:

- 1 De zuiger beweegt naar links, het gas eveneens; druk en temperatuur lopen op. De temperatuur van het gas wordt hoger dan die van de wand.
- 2 Het gas staat warmte af aan de wand.
- 3 De zuiger beweegt naar rechts, het gas eveneens; druk en temperatuur nemen af. De temperatuur van het gas wordt lager dan die van de wand.
- 4 Het gas neemt warmte op van de wand.
Er is nu nettowarmte van rechts naar links getransporteerd.

EEN VOORBEELD: DE THERMOAKOESTISCHE WARMTEPOMP

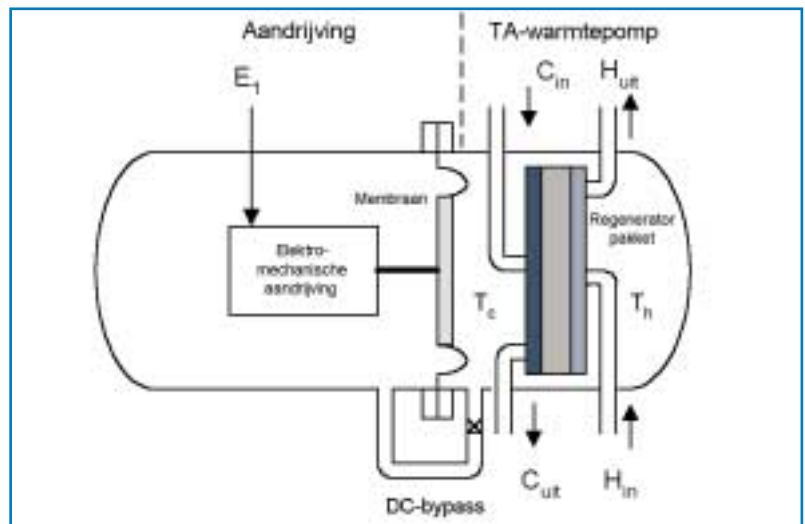
C.M. de Blok¹²

Thermoakoestische (TA) warmtepompen hebben een aantal eigenschappen die ze tot een potentiële kandidaat maken voor alternatieve verwarming en koeling. Door de inherent lage interne wrijving zijn TA-warmtepompen al effectief bij relatief lage temperatuurverschillen ($\Delta T < 30$ K) en bij kleinere vermogens vanaf enkele tientallen watts.

Door de relatief lage (akoestische) drukamplitude is in vergelijking met zuiger- machines de verwachte vermogensdichtheid een factor 2 tot 3 geringer. Daar staat echter een winst qua afmetingen tegenover door de eenvoud en de vrijheidsgraden van constructie. Hierdoor zijn toepassingen mogelijk die technisch of economisch niet met conventionele technieken kunnen worden gerealiseerd.

Fig. 6.3.4

Schema van de thermoakoestische warmtepomp.



12 ASTER thermo acoustische systemen, Melkweglaan 86 2394 NG Hazerswoude

KENMERKEN VAN EEN THERMOAKOESTISCHE WARMTEPOMP

- Minimum aan bewegende delen.
- Grote vrijheid van implementatie
- Groot temperatuurbereik.
- Hoog rendement (Op basis van simulatieresultaten waarbij is uitgegaan van realistische waarden voor warmte-uitwisseling en stromingsweerstand is 50% van het Carnot-rendement haalbaar. Het is nog niet duidelijk of dit een absolute bovengrens is).
- Lage productie- en onderhoudskosten.
- Het koudemiddel is niet brandbaar, giftig of schadelijk voor de ozonlaag.
- Geen smering nodig.

De toepassingen voor thermoakoestische warmtepompen zijn in principe dezelfde als waarvoor de huidige warmtepompen worden toegepast, zoals koelkasten en airconditioning. Op korte termijn kan vooral de toepassing van de thermoakoestische warmtepomp voor de verwarming van woningen economisch aantrekkelijk worden door de verwachte lage productiekosten. Voor meer informatie over de werking van de thermoakoestische warmtepomp verwijzen we naar de bijdrage over thermoakoestische motoren in par. 3.3.2.

6.3.2 KOELING DOOR MIDDEL VAN HALFGELEIDERELEMENTEN

*dr. H. Lyon jr.*¹³

‘Verplaatsing van warmte is elektriciteit’ en ‘verplaatsing van elektriciteit is warmte’ zijn twee uitspraken uit de negentiende eeuwse verhandeling van Lord Kelvin over de wetten van de thermodynamica. Alle materialen demonstreren deze effecten, maar alleen de materialen met eigenschappen die geoptimaliseerd zijn voor koeling of het opwekken van elektriciteit worden thermo-elektrische materialen genoemd.

WERKINGSPRINCIPE

Onderling verschillende materialen zullen – wanneer zij gecombineerd worden in een elektrisch circuit – een energie‘kloof’ op hun raakvlak hebben. Als een elektrische stroom gedwongen wordt door dit grensvlak te vloeien, wordt thermische energie opgepikt of losgelaten door de stroom. Dit verschijnsel wordt het ‘Peltier-effect’ genoemd. Een circuit kan ontworpen worden om dit effect te benutten, waarbij warmte wordt meegenomen van een ‘koelelement’ aan de koude kant en weer wordt afgegeven aan de warme kant. Op deze wijze is een thermo-elektrische koeler gecreëerd.

Bij een dergelijke koeler is het noodzakelijk dat het thermo-elektrische materiaal in fysiek contact is met zowel de warme als de koude kant van het apparaat. De daardoor op een natuurlijke wijze ontstane stroom energie van de warme

¹³ Marlow Industries Inc.,
DALLAS TX 75238-1645, USA
hylon@marlow.com

naar de koude kant werkt het Peltier-effect tegen. In de meeste materialen is deze natuurlijke energiestroom vele malen groter dan het Peltier-effect. De thermo-elektrische materialen vormen hierop een uitzondering.

Ook de opwarming door de weerstand die de stroom ondervindt doet afbreuk aan het Peltier-effect.

Deze factoren kunnen in een formule worden ondergebracht en vervolgens kan nagegaan worden welke eigenschappen resulteren in de beste materialen.

Wanneer dat gebeurd is, realiseren we ons dat de intrinsieke materiaaleigenschappen de efficiëntie van het materiaal bepalen. Ook volgt hieruit dat het ontwerp van de fysieke afmetingen en de onderlinge verbindingen de prijs, de prestatie en de capaciteit van het systeem bepalen.

De vergelijking van de geoptimaliseerde relatie luidt:

$$ZT = \frac{\pi^2}{\rho \times \lambda \times T}$$

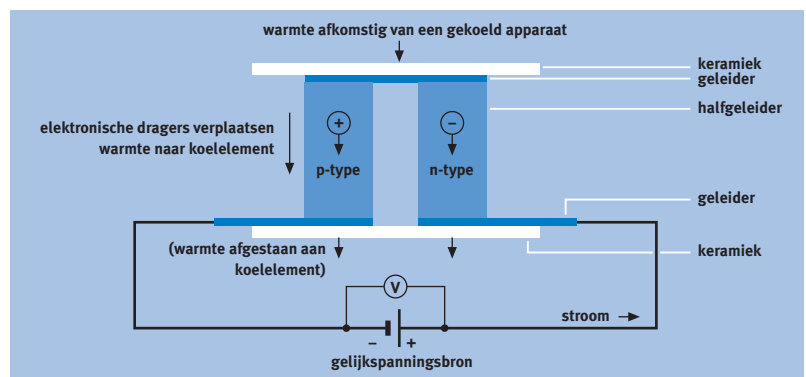
waarbij π staat voor de Peltier-coëfficiënt, ρ voor de soortelijke weerstand en λ voor de thermische geleidbaarheid.

De kwaliteitsaanduiding voor het vergelijken van thermo-elektrische apparaten is ZT , en deze is in dertig jaar niet substantieel gewijzigd. De eigenschappen van de beste materialen leiden tot een waarde van bijna 1,0. De reden dat we geen brede toepassing van thermo-elektrische apparaten hebben gezien, ligt in deze waarde ZT en de daaruitvolgende efficiëntie. Deze eigenschappen leiden tot prestaties van maximaal een vierde van die van de dampcompressiekoelers die als de werkpaarden voor koeling en airconditioning overal ter wereld worden ingezet.

Voor koelelementen kan een enkel stuk thermo-elektrisch materiaal warmte van nuttige hoeveelheden wegpompen, ware het niet dat de stroom zo hoog zou worden dat de voeding voor het element meer zou kosten dan de koeler die erdoor aangedreven werd. Om deze beperking te overwinnen, worden een aantal stukken materiaal dusdanig in een circuit geplaatst dat zij in elektrisch opzicht in serie staan en in thermisch opzicht parallel, zoals getoond in fig. 6.3.5.

Fig. 6.3.5

Een p- en n-type halfgeleider: in thermisch opzicht parallel, in elektrisch opzicht in serie.



In fig. 6.3.5 hebben we p-type en n-type halfgeleiders geïntroduceerd. In een p-type materiaal neemt de temperatuurgradiënt toe in de richting van elektrische stroom, voor het n-type materiaal is dit tegenovergesteld aan de stroomrichting. Het nettoresultaat van deze eigenschappen is een brede reeks van ontwerpen voor thermo-elektrische koelelementen. Deze elementen verpompen warmte in het gebied tussen het vriespunt van water en kamertemperatuur. Wanneer alle mechanische ontwerpvereisten worden meeberekend, presteren thermo-elektrische koelelementen met COP's¹⁴ tussen de 0,6 en 1,0. Thermo-elektrische elementen die op de hiervoor beschreven wijze vervaardigd zijn vertonen een aantal positieve eigenschappen. Ze zijn vrij van broeikasgasen of gassen die de ozonlaag aantasten, veroorzaken geen vibraties of geluid, hebben een zeer lange levensduur, vragen geen onderhoud en werken onafhankelijk van de oriëntatie van het element in de ruimte. Helaas is de efficiëntie – die een belangrijke factor is in de levensduurkosten en de kosten van aanschaf – zoals reeds werd opgemerkt, laag. Dit is een van de redenen dat thermo-elektrische koelers alleen gebruikt worden waar mechanisch bestendige, modulaire (schaalbare) koelers vereist zijn. Natuurkundigen, scheikundigen en materiaal-kundigen zijn kort geleden volgens een nieuwe benadering¹⁵ op zoek gegaan naar materialen die de beperkingen van de huidige materialen kunnen overwinnen en optimaliseren. Wanneer zij daarin slagen, zullen de toepassingen van thermo-elektrische een grote vlucht nemen.

.....
¹⁴ Coefficient Of Performance, maat voor de efficiëntie van een koel- of verwarmingsinstallatie.

¹⁵ De zoektocht is gericht op de quantumputmaterialen, zie hiervoor par. 3.2.2.

6.4 KRACHT EN VOEDING VOOR ELEKTRONISCHE APPARATEN

6.4.1 DE ELEKTROMOTOR EN DE ELEKTRISCHE GENERATOR

*dr. W.A. van Kampen*¹⁶

KRACHTWERKING

De krachtwerking in het elektromagnetische veld berust op het feit dat stroomvoerende geleiders en ferromagnetische materialen de positie zoeken die overeenkomt met de laagste energie in het veld. Dit kan worden vergeleken met het zwaartekrachtveld waarin een kogeltje in een kom naar het laagste punt rolt. Toen men in de negentiende eeuw trachtte een draaiende elektrische motor te bouwen, stond als bron van elektrische energie gelijkstroom ter beschikking. Wordt met gelijkstroom een elektromagneet bekrachtigd die een anker aantrekt, dan komt het anker tot stilstand in de positie met de laagste energie. Op dezelfde wijze zal een draaibaar opgestelde elektromagneet die wordt aange-trokken door een stilstaand magnetisch veld draaien, totdat de positie van de laagste energie bereikt is.

DE GELIJKSTROOMMOTOR

Om een voortgaande draaiende beweging te bewerkstelligen, wordt op de rotor¹⁷ een roterende schakelaar gebouwd, de collector of commutator, die bij draaiing van de rotor opeenvolgende secties van elektromagneten van de rotor inschakelt. Als een volgende sectie is ingeschakeld, draait de as naar een positie van lagere energie. Na het inschakelen van een sectie wordt elektrische energie omgezet in magnetische veldenergie. Bij het draaien van de rotor wordt magnetische veldenergie omgezet in mechanische energie die door de rotoras wordt afgevoerd.

Als ook het magnetische veld van de stator wordt opgewekt door een elektromagneet, kan de motor worden gebruikt voor wisselstroom door stroom van de bron door de windingen van de rotor en van de stator te laten vloeien. Verandert de stroom van richting, dan veranderen de polariteit van het magnetische veld van de rotor en van de stator, zodat de richting van de aandrijfkraft dezelfde blijft. De beschreven motor wordt als type aangeduid met gelijkstroommotor, ook als hij zoals bij een stofzuigermotor wordt bekrachtigd met wisselstroom.

DRAAISTROOM MET VASTE FREQUENTIE

Wordt een rotor voorzien van vaste noord- en zuidpolen, dan wordt in de windingen van een stator wisselspanning opgewekt. De fietsdynamo werkt op deze wijze. Gelijkstroom kan met een dynamo worden opgewekt door een collector met borstels toe te voegen, waardoor eenzelfde machine als de gelijkstroommotor ontstaat. Het is dus eenvoudiger om met een draaiende machine wisselstroom op te wekken dan gelijkstroom¹⁸.

¹⁶ Magnetics Enterprise,
Wolsteeg 2c
2311 TP Leiden
mgnetics@worldaccess.nl

¹⁷ Het draaiend gedeelte van de machine wordt hierna rotor genoemd, het stilstaande stator. Voor sommige motortypen zijn andere aanduidingen zoals 'anker', 'veldmagneten' in gebruik.

¹⁸ Nu halfgeleiderdioden ter beschikking staan kan de wisselstroom worden gelijkgericht, dit gebeurt in de 'wisselstroom'-dynamo van een auto die gelijkstroom aan de accu levert.

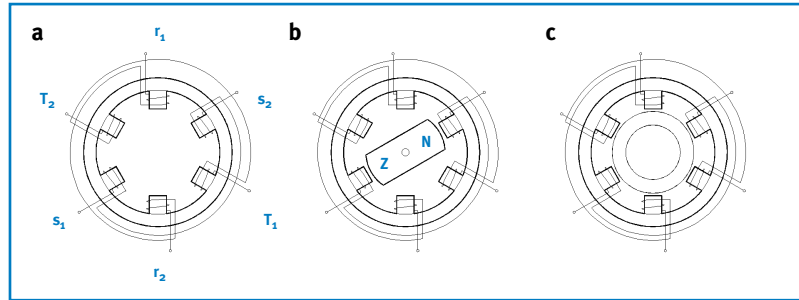
Fig. 6.4.1

Dwarsdoorsnede door

a een draaistroomstator,

b een synchrone motor,

c een asynchrone motor.



In de negentiende eeuw is een ingenieus systeem tot ontwikkeling gekomen om wisselstroom zowel voor opwekking als voor aandrijving toe te passen: de draaistroom. In de stator van een machine zijn drie paren tegenover elkaar liggende elektromagneten aangebracht (zie fig. 6.4.1a). In deze draaistroomstator draait een rotor met vaste noord- en zuidpool (zie fig. 6.4.1b). In de paren elektromagneten worden wisselspanningen opgewekt, die in grootte en richting verschoven zijn in de tijd, overeenkomend met $1/3$ omwenteling van de as. Worden de paren elektromagneten belast zodat elektrische stroom gaat vloeien, dan blijkt dat als de stromen sinusvormig zijn en van gelijke grootte, de som van de stromen op ieder moment nul is. In dat geval zijn drie draden voldoende om de elektrische energie te transporteren. Een vierde draad wordt toegevoegd om kleine verschillen op te vangen.

MOTOREN VOOR DRAAISTROOM

Worden in een draaistroomstator de drie paren elektromagneten aangesloten op draaistroom¹⁹, dan wordt in de ruimte tussen de polen een draaiend magneetveld opgewekt dat synchroon meedraait met de rotor van de machine die de draaistroom opwekt.

Het opgewekte draaiende magneetveld kan worden gebruikt om een motor zonder collector met borstels te bouwen.

In de synchrone motor wordt als rotor een permanente magneet of een staafvormige magnetiseerbare kern geplaatst (zie fig. 6.4.1b). De opbouw is dus gelijk aan een generator voor draaistroom. Brengt men de rotor op gang zodat hij synchroon loopt met het draaiende veld, dan blijft de rotor dit veld volgen (een bijzonder probleem is dat de rotor in het veld een schommelbeweging kan maken).

In de asynchrone motor worden in de rotor elektrisch geleidende windingen opgenomen (zie fig. 6.4.1c). De wervelstromen in de rotor leveren een magnetisch veld, waardoor de rotor door het draaiveld wordt meegetrokken totdat een evenwicht is bereikt met het koppel dat de rotor moet leveren (in de praktijk is dat als de rotor enkele procenten langzamer draait dan het veld). Dit langzamer draaien heet de slip. De rotor draait dus asynchroon met het statorveld.

¹⁹ Een dergelijke proef dient met een sterk verlaagde spanning plaats te vinden.

REGELING VAN TOERENTAL DOOR VERMOGENSELEKTRONICA

De beschreven motortypen van de synchrone en asynchrone motor zijn ontwikkeld, toen wisselstroom werd toegepast bij een vaste frequentie. De frequentie werd bepaald door de draaisnelheid van de generator die de stroom opwekte. Het regelen van een toerental van een motor die wordt gevoed door draaistroom met vaste frequentie vormt een probleem. Het draaiende veld in de stator heeft het toerental van de generator (of door bijvoorbeeld groepen elektromagneten te nemen het halve of een derde van het toerental). Is een variabel toerental vereist, dan waren voorheen kostbare technieken zoals toepassing van de gelijkstroommotor voor wisselstroom, het variëren van de slip van de asynchrone motor, of het opwekken van een variërend toerental met een hulpgenerator nodig.

Wordt met vermogenselektronica draaistroom opgewekt, dan is de frequentie van de draaistroom instelbaar en snel te variëren.

Wordt een synchrone motor gevoed met een variabele frequentie, dan wordt gestart met stromen door de statorwikkelingen die de rotor in de startpositie houden. Door de statorstromen te variëren zodat het statorveld gaat draaien, wordt de rotor meegenomen naar het gewenste toerental.

Bij de asynchrone motor bepaalt het verschil in toerental tussen stator en rotor hoe groot het koppel is dat de rotor levert, onafhankelijk van het toerental van de rotor (de rotor krijgt steeds duwtjes). Is het koppel dat de rotor levert groter dan wat de rotor aan de belasting levert, dan gaat de rotor sneller draaien²⁰.

ONTWIKKELING VAN DE SYNCHRONE MOTOR

Terwijl voorheen de synchrone machine door zijn vaste toerental in het nadeel was, is door het wegnemen van de belemmering van de vaste frequentie van een bron de synchrone machine aantrekkelijk geworden. Redenen hiervoor zijn:

- De synchrone motor met een rotor met vaste polen is eenvoudig.
- Moderne permanente magneetmaterialen leveren een magnetisch veld met een fluxdichtheid die van dezelfde orde van grootte is als het magnetische veld in een motor opgewekt met elektromagneten.
- Moderne magneetmaterialen zijn toepasbaar in magnetische circuits met een grote luchtspleet en ontmagnetiseren daarbij niet.
- Regeling van het toerental volgt direct uit de frequentie van de voedende spanning. Een complicatie wordt gevormd door het schommelen van de rotor om een evenwichtspositie. Dit probleem kan worden opgelost met een regelsysteem dat reageert op het verschil tussen de voorgeschreven hoekstand en de werkelijke hoekstand van de as.
- De synchrone motor is relatief eenvoudig aan te passen aan een elektrische bron.

De combinatie van de genoemde punten heeft geleid tot de toepassing van een type motor waarin de magnetische flux parallel loopt met de as van de motor, de axiale fluxmotor²¹.

²⁰ Meer over de asynchrone motor in de paragrafen 4.5.3 en 4.5.4 van Deel 1.

²¹ Deze motor wordt ook wel trans-versale fluxmotor genoemd.

Fig. 6.4.2
Tweefasen axiale fluxmotor.

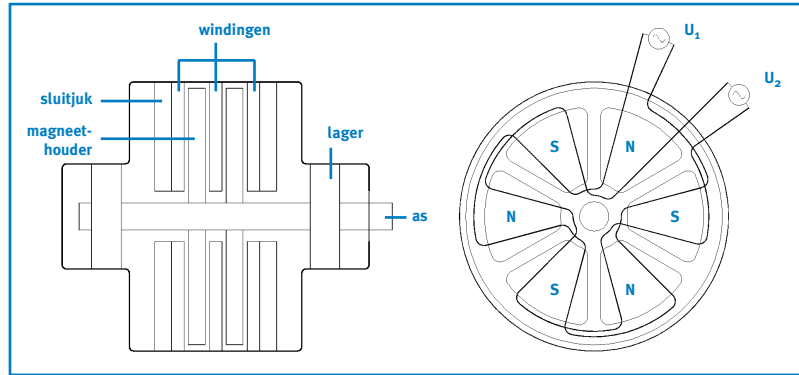


Fig. 6.4.2 toont het principe van de axiale fluxmotor. Op de rotoras zijn op een vaste straal permanente magneten aangebracht, die zo zijn gemagnetiseerd dat de magnetisatie in een magneet evenwijdig aan de rotoras is. De magneten zijn afwisselend met de noord- en zuidpool naar boven (zie de rechter tekening) gemonteerd. Tussen de magneten bevinden zich de geleiders van de stator. In de getekende uitvoering voor twee fasen worden de twee wikkelingen gevoed met de spanningen U_1 en U_2 die 90° in de tijd na elkaar komen. Deze configuratie leidt tot een constructie met hoge vermogensdichtheid. Axiale fluxmotoren zijn in en buiten Nederland in ontwikkeling, onder andere voor de aandrijving van schepen. Een bijkomend voordeel is dat dit type motor zich goed leent om zonder tussenschakeling van een tandwielkast de propeller van een schip aan te drijven.

TOEKOMSTIGE ONTWIKKELING

De axiale fluxmotor is een sprekend voorbeeld van nieuwe mogelijkheden die de uitbreiding van technologie biedt. Ogenscheinlijk was de elektrische motor volledig uitontwikkeld. Nieuwe technologie heeft het gebied van de elektrische aandrijvingen in snelle beweging gebracht.

De ontwikkeling van aandrijfsystemen zal in de toekomst vooral gericht zijn op constructies die zijn toegesneden op een bepaalde toepassing ten koste van samenbouwen van standaardonderdelen. Dit loopt parallel met de moderne ontwerptechniek, waarbij een team van beperkte omvang een constructie op maat kan realiseren. Met behulp van computersystemen kunnen een deel van het ontwerp, de berekeningen en het testen worden uitgevoerd, voordat het apparaat wordt gebouwd.

Bij het ontwerpen van een aandrijving dienen de motor, de vermogenselektronica en de belasting op elkaar afgestemd te worden. Dit omvat zowel de interne vormgeving van de motor, de vermogenselektronica en de belasting.

Deze vraagstukken behoren typisch tot het gebied van de elektromagnetische vermogenstechniek. Bij deze ontwikkeling is een hoge graad van integratie van kennis vereist. Het is daarom waarschijnlijk dat in industrie en wetenschap

behoefte zal ontstaan aan hoog opgeleide generalisten die een breed gebied overzien en daarin werkzaam kunnen zijn.

6.4.2 LUCHTDRUK VOOR DROGEN EN SCHEIDEN

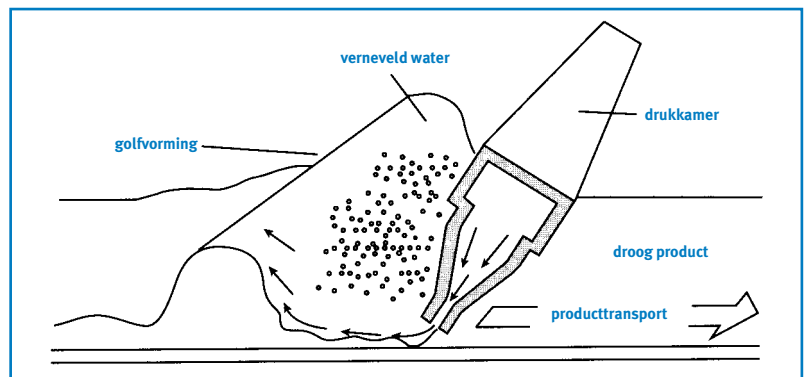
ir. W.J.L. Jansen²²

PRINCIPE

Bij het luchtmes wordt elektriciteit gebruikt om via een 'blower' een luchtstroom met een hoge snelheid te krijgen. Een luchtmessysteem bestaat uit een elektromotor, ventilator, drukkamer en spuitmond. De spuitmond kan worden aangepast aan het te drogen object. De luchtsnelheid bij de spuitopeningen kan oplopen tot 960 km per uur, de overdruk in de drukkamer tot ongeveer 70 kPa (= 0,7 bar). In de spuitmond wordt de overdruk omgezet in kinetische energie. Natte oppervlakken van producten met uiteenlopende geometrieën kunnen zeer effectief worden gedroogd met het luchtmes. De oppervlakken van de producten worden gedroogd door de luchtstraal met hoge snelheid over het vochtige oppervlak te blazen. Door de luchtstraal wordt de vloeistoffilm opgebroken, de vloeistof wordt voor het grootste deel verneveld en de rest van het vocht verdampft. Het proces is energetisch gezien zeer efficiënt, omdat het vernevelen (mechanisch drogen) zeer weinig energie vraagt vergeleken met het verdampen van water [Metaxas, 1996; UIE, 1988].

Fig. 6.4.3

Principe van vochtverwijdering van een luchtmessysteem.



TOEPASSINGEN

De techniek wordt gebruikt voor het drogen van allerlei mechanisch relatief sterke materialen zoals blik, auto's in de wasstraat, plastic kratten, tv-buizen, metaalplaten, tapijten, bloembollen en fruit. De investeringskosten zijn relatief laag. Andere voordelen zijn dat de installaties over het algemeen weinig ruimte vragen; het luchtmes is eenvoudig in bestaande processen in te passen. Met het luchtmes kan een aanzienlijk energiebesparing worden verkregen vergeleken met thermische droogprocessen [UIE, 1996; UIE, 1988].

.....
²² KEMA Nederland B.V.,
Postbus 9035
6800 ET Arnhem
w.j.l.jansen@kema.nl

6.4.3 MAGNETISCHE LAGERS

dr. W.A. van Kampen²³

STABILITEIT

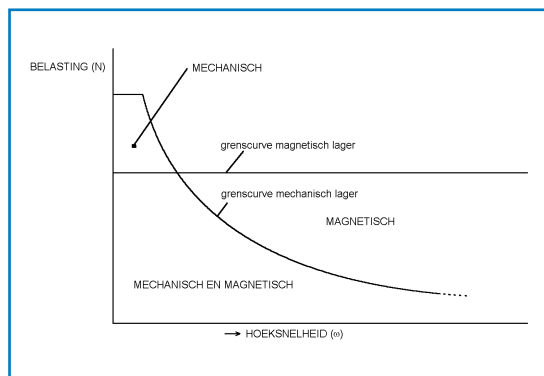
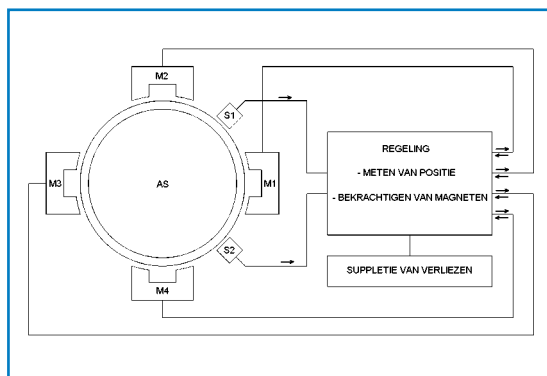
Volgens het theorema van Earnshaw is het niet mogelijk een constant magnetisch veld te construeren, waarin een (para)magnetisch voorwerp stabiel zonder mechanische aanraking zweeft. In een actief magnetisch roterend lager wordt dit opgelost met elektromagneten die zijn opgenomen in een regelsysteem. De elektromagneten leveren alleen een aantrekkende kracht. Het regelsysteem reageert op de grootte en de verandering van de luchtspleet van de elektromagneten. In fig. 6.4.4 is een magnetisch lager afgebeeld met vier elektromagneten. De sensoren S1 en S2 meten de positie van de as ten opzichte van de magneten. De regeling bepaalt welke kracht de elektromagneten moeten leveren om de as in een gewenste positie te houden. Tijdens dit proces stroomt elektrische energie naar de elektromagneten of van de elektromagneten terug naar de regeling. Het hierbij optredende verlies dient van buiten aangevoerd te worden. Het magnetisch lager biedt een oplossing voor problemen die met een mechanisch lager moeilijk of niet zijn op te lossen. Wij zullen een aantal eigenschappen behandelen waarin het magnetisch lager zich onderscheidt van het mechanisch lager.

Fig. 6.4.4

[links] Magnetisch lager met vier elektromagneten.

Fig. 6.4.5

[rechts] Hoeksnelheid en belasting van mechanische en magnetische lagers. Het magnetisch lager kan bij hogere hoeksnelheden functioneren, maar staat bij lage hoeksnelheden een lagere maximale belasting toe.



²³ Magnetics Enterprise, Wolsteeg 2c, 2311 TP Leiden, magnetics@worldaccess.nl

een dergelijke beperking niet. De grenscurve van de toelaatbare kracht loopt praktisch horizontaal en wordt bepaald door de maximum kracht die het lager kan opnemen. Dissipatie ten gevolge van het draaien van de as is verwaarloos-

baar. Het toerental wordt daardoor niet begrensd door het lager, maar door mechanische spanningen in de rotorconstructie. Er bestaan dus toepassingen, waar het magnetisch lager kan worden toegepast en het mechanisch lager niet.

KRACHT EN VERPLAATSING

Er kan een wezenlijk onderscheid gemaakt worden tussen de lagering van een as door middel van een mechanisch lager of door middel van een magnetisch veld. In een mechanisch lager wordt de plaats van de as voorgeschreven, onafhankelijk van de kracht die wordt uitgeoefend op de as. In een magnetisch lager kan de kracht worden voorgeschreven, onafhankelijk van de momentane plaats van de as. Dit onderscheid is te vergelijken met de begrippen elektrische spanningsbron en elektrische stroombron. In de werktuigbouw zou men van een verplaatsingsbron en een krachtbron kunnen spreken.

Krachten die worden uitgeoefend met een magnetisch veld kunnen het karakter van een krachtbron zeer dicht benaderen. Daarmee kan een lichaam zo gelaagd worden dat trillingen van de omgeving geen versnellingskrachten op het roterende lichaam uitoefenen.

UITBALANCEREN

Als een roterend lichaam is uitgebalanceerd, valt de rotatieas samen met de hoofdtraagheidsas die voor de draaiing is gekozen. Er is sprake van onbalans als de rotatieas en de hoofdtraagheidsas niet samenvallen. Onbalans kan worden vertaald als de aanwezigheid van niet uitgebalanceerde massa. Hele kleine hoeveelheden niet uitgebalanceerde massa veroorzaken al een grote kracht. Vergelijken we de 'middelpuntvliedende' kracht $F = m\omega^2 r$ met de zwaartekracht $F = mg$ (m : massa, g : versnelling, ω : hoeksnelheid en r : straal), dan volgt voor de verhouding van die krachten $\omega^2 r / g$. Als voorbeeld: bij 3.000 toeren per minuut en op 10 cm straal is de middelpuntvliedende kracht 10.000 keer zo groot als de zwaartekracht.

Het balanceren van een lichaam kan tijdens bedrijf verloren gaan door vormverandering ten gevolge van inwendige spanningen of verandering van de temperatuur. Bij een starre lagering waarin de as van draaiing niet kan veranderen moet het lager de krachten leveren die het gevolg zijn van de onbalans.

In het magnetisch lager heeft de rotor bewegingsruimte. Bij het ontwerpen van het lager kan de grootte van de bewegingsruimte gekozen worden. Bij het ontstaan van onbalans verschuiven de hoofdtraagheidsassen in het lichaam. Zolang deze verschuiving niet te groot is, blijft het lichaam om de gekozen hoofdtraagheidsas draaien. Onbalans heeft dan geen lagerkrachten tot gevolg, maar betekent slechts dat de hoofdtraagheidsas die bij de draaiing hoort niet meer samenvalt met de oorspronkelijk in de constructie gekozen as van draaiing. Normaal is een zeer kleine verschuiving van de draaiingsas voldoende om de onbalans te doen verdwijnen.

GELUIDSOVERDRACHT

De directe mechanische koppeling van een mechanisch gelagerde as brengt met zich mee dat geluid van as naar omgeving en andersom wordt overgedragen. Als in een magnetisch lager de spectra van geluid en regelsignalen zijn te scheiden, is akoestische ont koppeling te realiseren.

TOEPASSING IN MOEILIJKE OMSTANDIGHEDEN

Magnetische lagers in vacuüm worden gebruikt voor rotoren die in een mechanisch volledig gescheiden ruimte draaien, bijvoorbeeld om agressieve vloeistoffen te verpompen.

BENODIGD ELEKTRISCH VERMOGEN

Bij elektrisch vermogen dient onderscheid gemaakt te worden tussen het elektrisch vermogen dat nodig is om de gemiddelde lagerkracht in stand te houden, en de elektrische energie die heen en weer stroomt tussen vermogenselektronica en lager om de op het lager uitgeoefende variërende krachten te compenseren. Energie gaat verloren als ohmse verliezen in de wikkeling van het lager en als conversieverliezen in de vermogenselektronica.

Uit studies en in gerealiseerde systemen voor kracht opwekking met magnetische velden is gebleken dat bij asvermogens van 1 kW tot 100 MW een magnetisch lager een vermogen van enkele procenten of minder vraagt. Zoals hiervoor is aangegeven, wordt het verliesvermogen lager als de lagerkracht minder varieert. Gemiddelde lagerkracht kan met verwaarloosbare verliezen worden opgewekt met permanente magneten.

DYNAMISCHE REGELING VAN DE ASPOSITIE

In het algemeen kan de positie van een magnetisch gelagerde as worden ingesteld met de nauwkeurigheid waarmee de aspositie wordt gemeten. Er zijn constructies bekend, waar de aspositie met een laser wordt uitgelezen. Door optische faseverschuiving toe te passen is het dan mogelijk met een fractie van de optische golflengte de aspositie te regelen.

Een andere mogelijkheid is variatie van de aspositie door een variërende referentie in te voeren. Dit is toepasbaar in bijvoorbeeld gereedschapsmachines die een verspanende bewerking uitvoeren, zoals frezen en slijpen.

TECHNOLOGIE VAN HET MAGNETISCHE LAGER

De elektromechanische uitvoering van een magnetisch lager is in veel gevallen eenvoudiger dan van een mechanisch lager. Wordt een vliegwiel gelagerd met een magnetisch lager, dan vervallen een groot aantal constructieve problemen die verband houden met het uitbalanceren en het bewaken van de levensduur. Elektromagneten zijn in principe niet kostbaar, en van vermogenselektronica blijft de prijs nog dalen.

Wat een magnetisch lager gecompliceerd maakt, is de regeling. Op dit moment (1998) zijn op veel plaatsen magnetische lagers ontwikkeld en gebouwd, maar theorie en techniek zijn geen gemeengoed, onder andere omdat de kennis niet wordt vrijgegeven.

Een probleem wordt gevormd door het feit dat een elektromechanische oplossing voor klassiek geschoolde werktuigbouwkundigen onbekend gebied is. In de toekomst zullen magnetische lagers industrieel steeds meer worden toegepast. Verwerven van kennis en kunde op dit gebied is van belang voor de industrie.

6.4.4 ASLOZE PROPELLERAANDRIJVING

DE KLASSIEKE SCHEEPSAANDRIJVING

De vormgeving van de klassieke scheepsaandrijving werd bepaald door de aandrijvingen die indertijd ter beschikking stonden. Dat was in de eerste plaats de stoommachine, waarvoor karakteristiek is dat hij relatief langzaam draait en daarbij een groot koppel levert. Dezelfde karakteristiek komt voor bij de scheepsdiesel, zodat de door een as aangedreven propeller een voor de hand liggende oplossing is. De aandrijving van de propeller met een centrale as is zeker niet zonder problemen. De ophanging van de as aan het schip veroorzaakt een pulserende voortstuwingskracht die zich door het gehele schip voortplant, en die een pulserende akoestische golf in het water veroorzaakt, terwijl de asophanging in het schip geluidstrillingen op de romp overbrengt, die eveneens naar het water worden overgebracht.

Mechanisch ontstaat een probleem bij het overbrengen van het askoppel naar de propellerbladen. Hierdoor wordt een grens gesteld aan het maximum koppel dat kan worden overgebracht door de as. Wil men dit maximum koppel verhogen, dan kan dit maar tot aan de grens die bepaald wordt door de acceptabele afmetingen in het centrum van de propeller.

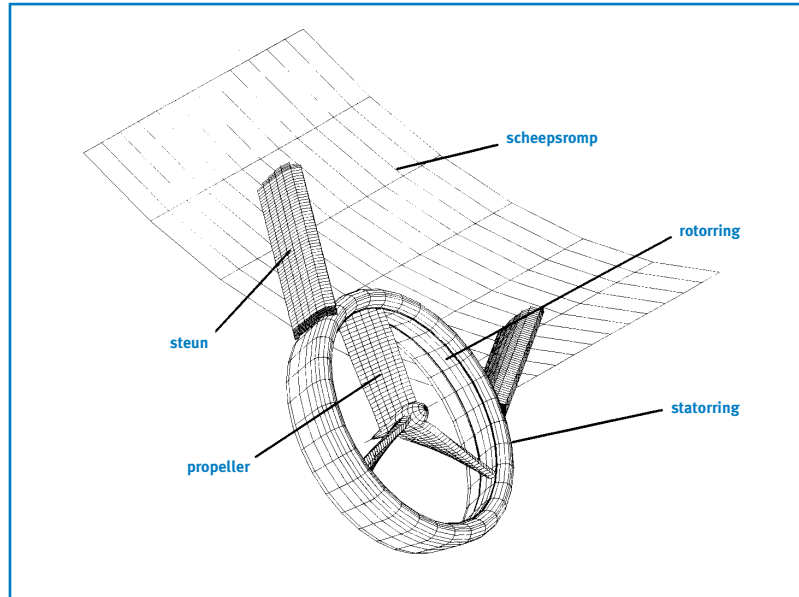
De afmetingen van een scheepsaandrijving worden vooral bepaald door de benodigde lengte voor de scheepsmotor, de aandrijf-as en de schroef, rekening houdend met de vereiste hydrodynamische vorm van de achterkant van het schip. Toen sneldraaiende aandrijvingen zoals de gasturbine of de elektrische motor ter beschikking kwamen, heeft men de bestaande configuratie van de langzaam lopende propeller gehandhaafd, en tussen aandrijfmotor en propelleras een reductiebak geplaatst. Hierdoor blijven de eerdergenoemde problemen van de klassieke configuratie bestaan.

DE ASLOZE PROPELLERAANDRIJVING

Bij de asloze propelleraandrijving, de ShaftLess Propeller Drive (SLPD), is gebruikt gemaakt van de mogelijkheden die door de eigentijdse ontwikkeling in de elektromechanica zijn ontstaan.

Fig. 6.4.6

Asloze propelleraandrijving (SLPD).



In de eerste plaats is er de vermogenselektronica, waarmee de toe- en afvoer van elektrische energie snel en haast verliesvrij kan worden geregeld. Functies die hierdoor zijn begunstigd zijn de regeling van het motortoerental in motoren van eenvoudige elektromechanische constructie, de snelle bekrachtiging van elektromagneten en vele andere functies die bij een SLPD van minder belang zijn. De voor vermogenselektronica essentiële halfgeleiders, zoals transistoren voor groot vermogen zijn klein van omvang, zodat de vermogenselektronica tussen een energiebron van elektrische energie en de belasting (in dit geval de aandrijfmotor) compact kunnen worden gebouwd.

Parallel met de ontwikkeling van de vermogenselektronica en daarmee verwant loopt de ontwikkeling van magnetische en werktuigbouwkundige materialen. Op het gebied van permanente magneten hebben zulke grote ontwikkelingen plaatsgevonden, dat nu in grote aandrijfmotoren, (bijvoorbeeld voor schepen) wereldwijd nieuwe typen worden ontwikkeld en gebouwd.

Composietmaterialen en materialen zoals titanium leiden tot compacte constructies met een hoge standtijd. In de SLPD is de propeller gemonteerd in een ring die magnetisch is gelagerd in een eveneens ringvormige ondersteuning (zie fig. 6.4.6). De ring waarin de propeller is gemonteerd (de rotorring) bevat behalve de elementen van de magnetische lagering het rotorgedeelte van de elektrische aandrijfmotor. De ondersteunende ring (de statorring) is vast verbonden met het schip en bevat de stator van de aandrijfmotor. In een SLPD komt nog slechts één draaiend deel voor, namelijk de rotorring. De magnetische lagering positioneert de rotorring contactloos ten opzichte van de statorring. Hierdoor is de mechanische slijtage minimaal.

Eigenschappen van de SLPD

Een SLPD bezit eigenschappen die hem in hoge mate onderscheiden van de klassieke propelleraandrijving, zoals:

- Geen as naar binnen.
- Een compacte constructie, in het bijzonder in de lengterichting van een schip.
- Een gelijkmatige waterstroom, niet verstoord door het passeren van de propellerbladen langs de ophanging.
- Trillingsvrij en stil.
- Alleen geschikt voor schepen die volledig zijn geëlektrificeerd.
- Hoge tolerantie voor overbelasting van de schroef, omdat de krachten aan de omtrek aangrijpen.
- Hoge tolerantie voor overbelasting van de aandrijving, inherent aan elektrische motoren.
- Een hoge standtijd.
- Gemakkelijke uitwisselbaarheid, onder andere door het ontbreken van stelproblemen.

Toepassingen

De SLPD kan aan het schip worden gebouwd, zoals in fig. 6.4.6 is aangegeven. In dat geval ontstaat een zeer compacte installatie. Zoals bij alle elektrische aandrijvingen hoeft de machine die de elektrische energie levert niet direct naast de aandrijving te worden opgesteld.

Een andere opstelling van een SLPD is in een tunnel in het schip, waardoor een waterjet-systeem ontstaat. Door het ontbreken van de as door de tunnelwand is de efficiëntie van asvermogen naar aandrijfvermogen aanzienlijk hoger.

Toepassingen van een SLPD zijn niet beperkt tot scheepsaandrijvingen. Hetzelfde principe kan worden gebruikt in de procesindustrie om pompen te construeren die moeten werken met gevaarlijke stoffen of onder extreem hoge druk. Door het ontbreken van afdichtingen voor een roterende as bestaan hier grote operationele voordelen.

6.4.5 ELEKTROMAGNETISCHE VERDICHTING

ir. J.M. Meij

Voor het in sterke mate verdichten van materialen of mengsels kunnen explosieven gebruikt worden. De materialen worden dan opgesloten in een vorm, en vervolgens blootgesteld aan de hoge druk die door de explosie wordt opgewekt. Een schokgolf in het materiaal zorgt ervoor dat de verdichting plaatsvindt tot ca. 99% van de theoretische dichtheid. Deze verdichting wordt gebruikt bij het compacteren van poeders, voor onder andere ferrietkernen en lagermaterialen,

maar ook voor het samenpersen van gelaagde batterijen of voor onderdelen van condensatoren.

Het doel van de verdichting bij batterijen is het verhogen van de energiedichtheid. Dit wordt bereikt door het vergroten van de soortelijke massa en het verkleinen van de elektrodenafstand.

Om verschillende redenen is explosieverdichten echter niet geschikt voor toepassing in grote series. Een geschikt alternatief is het elektromagnetisch verdichten. Hierbij worden met zeer hoge magneetvelden poeders, materialen of composieten verdicht. De magnetische kracht kan direct op een magnetisch materiaal werken, maar kan ook via een 'magnetisch stempel' worden overgebracht. De aard van de verdichting kan in hoge mate worden bepaald door de vorm (in de driedimensionale ruimte) en het amplitudeverloop in de tijd van de magnetische puls onder controle te houden.

Gebruikelijk zijn magneetvelden van 20 tot 50 Tesla. De gebruikte pulsduur ligt tussen microseconden en enige tientallen milliseconden. Om dergelijke magneetvelden op te wekken zijn een aantal technieken van belang.

Voor het opwekken van deze magneetvelden met spoelen moet men gedurende een korte tijd de beschikking hebben over zeer grote stromen in de orde van miljoenen ampères. De daarvoor benodigde energie (tientallen MJ) dient dus beschikbaar te zijn in een opslag- of buffereenheid. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van snelontlaadbare batterijen in combinatie met een puls-transformator, een condensatorbank of een compulsator (een soort vliegwiel). Daarnaast dienen deze grote stromen onder controle te worden gehouden, en snel en nauwkeurig aan- en uitgezet, en begrensd te worden.

Vermogenselektronica speelt hier een grote rol. Schakeltechnologie voor dergelijke grote stromen is nog volop in ontwikkeling. TNO heeft momenteel een onderbrekingsschakeling voor 400 kA. Een studie voor een uit modulen opgebouwde 2 MA-schakelaar loopt nog.

Een speciale toepassing is het elektromagnetisch verdichten van magneten. Samariumkobaltmagnetten worden vaak gesinterd. Elektromagnetische verdichting zou niet alleen hogere dichtheden mogelijk maken, maar kan ook zorgen voor de magnetisatie van het materiaal.

De voordelen ten opzichte van explosieverdichting zijn:

- De methode is beter geschikt voor serieproductie.
- De verdichting en verdeling van de verdichting zijn beter beheersbaar.
- Er is minder geluidsoverlast.

In Rusland wordt onderzoek gedaan naar het verdichten van metallische en keramische poeders; in de VS wordt vooral gewerkt aan metallische poeders. De Technische Universiteit Delft onderzoekt verdichting van gelaagde lithium-batterijen. Hoewel de techniek interessante mogelijkheden biedt, zijn er op dit moment nog geen toepassingen buiten het laboratorium bekend. De uiteindelijk-

ke toepassing van de techniek zal vooral afhangen van de vraag naar de specifieke eindproducten die ermee gemaakt kunnen worden.

Deze paragraaf is gedeeltelijk gebaseerd op een vraaggesprek met dr. W.J. Kolkert²⁴.

6.4.6 VOEDING VAN ELEKTRONISCHE APPARATUUR EN STAND-BY VERBRUIK

*dr. H.A.C. Meinders*²⁵

ALGEMEEN

Het energiegebruik van elektronische apparatuur bij particulieren is slechts een bescheiden deel van het totale elektriciteitsgebruik (ca. 12 % van de 3.100 kWh per jaar in een gemiddelde huishouding (Novem, 1995). Hierbij komt uiteraard het gebruik in de professionele sfeer, wat echter geheel in het niet valt bij het overige energiegebruik in de industrie.

Niettemin vormt dit energiegebruik ca. 70 tot 80% van de milieubelasting over de totale levensduur van deze apparatuur, indien het wordt gemeten met behulp van de Eco-Indicator-meetmethode. Het ligt dus voor de hand hierin mogelijke productverbeteringen te zoeken.

Een marktstimulans zou gevonden kunnen worden door de beschouwing over de levensduur door te trekken naar de kosten voor de levensduur ('cost-of-ownership'). Echter, de relatief lage energieprijs vormt geen aansprekend argument ondanks de voortschrijdende erosie in de aanschafprijs van (consumenten-)elektronica. De argumenten moeten dus meer in de totaal kwaliteit van de producten worden gezocht, waarvan de zorg voor ons leefmilieu een onlosmakelijk deel uitmaakt.

OPERATIONEEL GEBRUIK

De snelle ontwikkeling van de gebruikte technologie in de laatste decennia heeft geleid tot een aanzienlijke besparing in de energieconsumptie tijdens de gebruiksfase, waarbij vooral de miniaturisatie en integratie van componenten een belangrijke rol hebben gespeeld. Als voorbeeld kan de prototypestudie van 'Philips Compact Green TV' genoemd worden, waarbij milieugerichte productontwikkeling als uitgangspunt is genomen. Het lagere hoogspanningsvoltage, de efficiëntere plaatsing van de (kleinere) luidspreker en het nauwkeuriger afstemmen van de overige elektronica leidde tot 30% reductie tijdens het gebruik en tot 98% reductie in de stand-by fase bij een overeenkomstige referentie. De verbeteringen van dit prototype die werden getoond tijdens de Internationale Funkausstellung Berlin in 1995 zijn en worden ingevoerd in de huidige markttypen.

Hier staan echter een aantal markttrends tegenover die potentieel tot een hoger energiegebruik kunnen leiden, waarbij de (kwaliteits)wens tot een betere func-

.....
²⁴ TNO/Prins Mauritslaboratorium,
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

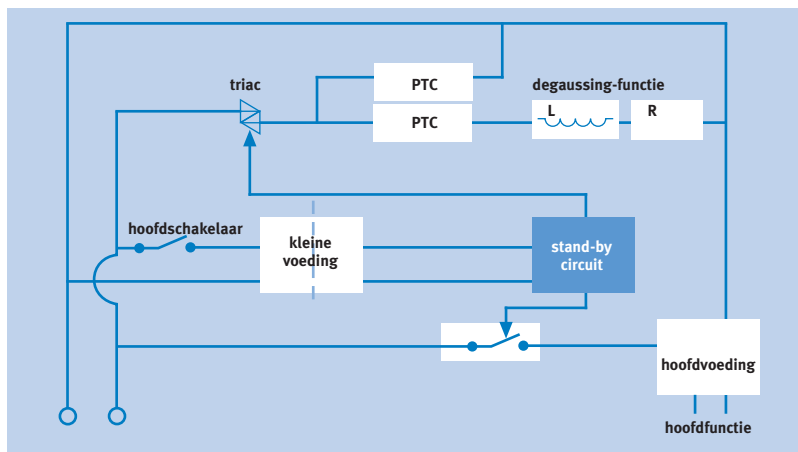
²⁵ Philips,
Gebouw SAN 5,
Postbus 218
5600 MD Eindhoven

tionele prestatie en of meer gebruiksgemak de drijvende krachten vormen. De volgende trends kunnen hierbij als voorbeelden gezien worden:

- Een groter en helderder beeld van tv's en monitoren. Een groter beeld vergt meer energie, doordat een groter lichtvlak gerealiseerd moet worden, maar ook omdat de elektronenstralen die het beeld 'optekenen' in de beeldbuis sterker afgebogen moeten worden. Een helderder beeld kan men vergelijken met een sterkere lamp: meer lichtsterkte opwekken dus. Dit alles leidt tot meer energiegebruik.
- Meer muziekvermogen van audiosets. Een belangrijk aankoopcriterium is het aantal Watts muziekvermogen, waarmee impliciet het hogere benodigde energiegebruik al aan de klant wordt duidelijk gemaakt. Technisch draagt de efficiëntie van de versterker en de boxen hieraan bij, waarbij de eisen aan de geluidskwaliteit uiteraard ook een rol spelen.
- Snellere computers met meer opslagcapaciteit. Een groter toepassingsgemak bij pc's is gebaseerd op een toenemende omvang en complexiteit van de besturings- en toepassingsprogramma's. Deze kunnen alleen 'draaien' op een computer met voldoende capaciteit in termen van een snellere processor, een groter werkgeheugen, meer opslagcapaciteit, enz. Dit zou tot een sterke stijging van de energiebehoefte leiden, indien de miniaturisatie in dit productensegment niet extreem zou zijn doorgevoerd.
- Meer apparaten. Het aantal en de verscheidenheid van elektronische apparaten neemt nog steeds toe, waarbij meer tv's en audiosets per huishouden in gebruik zijn en de penetratiegraad van computers, mobiele telefoons, antwoordapparaten, faxen en dergelijke continu stijgt.
- Toenemende functionaliteit. Behalve typische toegevoegde 'features' zoals afstandsbediening en stand-by stand die een additioneel energieverbruik opleveren, wordt de gebruiksintensiteit van diverse apparaten verhoogd door meer beeldschermgebonden mogelijkheden zoals Internet, Teletext of de Digital Versatile Disc (DVD)-speler.

Fig. 6.4-7

Voorbeeld van een verliesarme stand-by schakeling voor een tv.



STAND-BY VERBRUIK

Het stand-by gebruik neemt een bijzondere plaats in, veroorzaakt door het invoeren van de slaapstandoptie in steeds meer apparaten. De tv, video, fax, computer en mobiele telefoon worden niet volledig uitgeschakeld, maar staan paraat om snel functioneel te worden ingezet op het gewenste tijdstip. Technologisch is een zeker energiegebruik nodig om de functie van paraatheid uit te voeren, waarbij het zenderafstemgeheugen in tact blijft, de klok/datum werkt, het lijncontact met de tv-kabel of telefoon actief in stand blijft, of de computerprogramma's operationeel blijven in het werkgeheugen. Het stand-by energiegebruik dat totaal in Europa het vermogen van verschillende energiecentrales vergt, is recentelijk in diverse media-artikelen (o.a. in de VS en Zweden) weer onder de aandacht gebracht. Met behulp van convenanten en wetgeving probeert de overheid dit minder functionele gebruik te beperken. Hierin hebben de producenten al veel bereikt: het gemiddelde stand-by verbruik van tv's is bijvoorbeeld gedaald van 10 tot 12 W (met uitschieters boven 20 W) tot 5 tot 6 W nu (met goede voorbeelden beneden 2 - 3 W).

Het streven is een stand-by vermogen kleiner dan 1 W, waarbij alleen de noodzakelijke microprocessor – die zelf geen slaapstand kent – gevoed wordt. Hiervoor is een extra hoeveelheid componenten nodig, wat uiteraard prijsverhogend werkt. Een gebruikelijke methode is het afschakelen van de hoofdvoeding met een relais, en het ingeschakeld houden van een (extra, veel kleinere) van het net gescheiden stand-by voeding. De energiedissipatie in 'blind vermogen' van de grote transformator wordt dan vermeden. Fig. 6.4.7 geeft een voorbeeld van een dergelijke schakeling.

Een nadeel van deze oplossing is het slechter rendement van kleinere voedingen, waarmee het bruto-energiegebruik duidelijk meer is dan strikt functioneel noodzakelijk zou zijn.

Het relais is inactief in de stand-by stand, waarmee het energieverbruik op dat punt wordt vermeden; de keerzijde is natuurlijk een additioneel energieverbruik in de operationele fase, wanneer de (grotere) hoofdvoeding met een actief relais ingeschakeld wordt gehouden, maar dit weegt niet op tegen de besparingen. Verder wordt de 'degaussing'-activiteit die tijdens het gebruik nodig is om het achtergebleven magnetisme in het beeldscherm te compenseren, actief uitgeschakeld met een elektronische triac-schakeling. Bij het herstarten van de actieve fase wordt de schakeling weer hersteld, waarmee de beoogde beeldfoutcorrectie weer actief is, voordat het beeld op sterkte is gekomen. Zo wordt de hiermee verband houdende energiebehoefte in de stand-by fase vermeden.

Het is duidelijk, dat het stand-by energiegebruik technologisch goed onder het niveau van 1 W gebracht kan worden, waarmee het verbruik aanvaardbaar klein geworden is ten opzichte van het actieve functionele gebruik. De benodigde

extra voorzieningen brengen echter een kostprijsverhoging met zich mee, die in een door de prijs gedomineerde markt moeilijk te commercialiseren is. Een nog geringer energieverbruik (in de orde van 0,1 W) vergt nog geavanceerdere voorzieningen, waarmee de kosten sterk stijgen en specifieke versies voor diverse netvoltagegebieden ontwikkeld moeten worden. Nieuwe technologische doorbraken in de halfgeleidertechnologie ('green chips') bieden hierin wellicht betere kansen voor de toekomst.

6.4.7 ELEKTRONISCHE TRANSFORMATOREN VOOR KLEINE VERMOGENS

*dr. H.A.C. Meinders*²⁶

De elektronicatrends miniaturisatie en integratie in 'chips' en 'portable' toepassingen leiden tot een vraag naar gelijkspanningsvoedingen met een laag voltage en een laag vermogen. Dit is dus zeer afwijkend van de door de energiebedrijven geleverde wisselspanning van 220 V, waardoor er een toenemende inzet van transformatoren en gelijkrichters ontstaat. Deze voedingen zijn in een aantal apparaten reeds geïntegreerd (zoals in tv's en computers), of worden separaat bijgeleverd als de bekende veelal zwarte kastjes in het stopcontact (bijv. bij telefoons, modems en laptopcomputers). Een alternatief is het toepassen van batterijen. Om milieu- en kostenredenen worden veel oplaadbare batterijen gebruikt; het opladen aan het lichtnet vereist dan weer een voeding.

De conventionele transformatoren met een ijzeren kern en koperdraadwikkelingen hebben een beperkte efficiëntie en een aanzienlijk deel van de ingevoerde energie gaat als warmte verloren. Ca. 30 tot 50% van het vollastvermogen wordt bij de 'no last' situatie verbruikt. Geschakelde transformatoren, waarbij in de netfrequentie de elektrische pulsen zo gunstig mogelijk worden doorgelaten, verminderen dit verlies tot ca. 10%, en in de nabije toekomst wellicht tot beneden 3%. Voor het schakelen is elektronica nodig, maar de totale voeding wordt lichter.

Een extra voordeel kan gehaald worden uit het gemeenschappelijk voeden van een aantal apparaten uit één grotere voeding, waarmee de efficiëntie verder geoptimaliseerd kan worden. Het is denkbaar om een extra lokaal net per gebouw of aantal woningen te installeren, waaruit een geschikte laagvoltage-gelijkspanning geleverd wordt. Hiervoor moet uiteraard wel een nadere standaardisatie uitgevoerd worden bij de toeleveranciers, waardoor de diverse elektronica met aanvullende elektronische DC/DC-aanpassing rechtstreeks gekoppeld kan worden. Een voltage van 40 tot 50 V lijkt geschikt om de transportverliezen in een dergelijk mini-net te beperken en een hoge mate van veiligheid te garanderen, waardoor de installatiekosten redelijk gering zijn. Het is bovendien mogelijk om alternatieve vormen van (locale) energieopwekking hieraan te koppelen, zoals de gelijkstroom leverende zonnecellen of brandstof-

.....
²⁶ Philips,
Gebouw SAN 5,
Postbus 218
5600 MD Eindhoven

cellen. Het is duidelijk, dat in de komende decennia het nodige onderzoek aan deze nieuwe technologieën en de comfortabele toepassing in massa-elektronica gewenst zal zijn. (In par. 2.2.2 van Deel 1 wordt dieper ingegaan op de toepassing van gelijkstroom in de woning.)

Overigens is een relativerende opmerking in dit verband op zijn plaats. Indien het energieverlies in stand-by en voedingen inderdaad tot de hiervoor beschreven geringe waarden is teruggebracht, loont het wellicht meer om extra elektronica in te zetten om de overige energieverbruikers efficiënter af te regelen. In dit verband kan er veel energie bespaard worden in bijvoorbeeld koeling, verwarming, airconditioning en voedselbereiding.

6.5 SCHEIDING EN REINIGING

6.5.1 INLEIDING

*dr. H.J. Veringa*²⁷

De scheidings- en reinigingstechnologie is een zeer breed gebied.

Veeluldig wordt gebruik gemaakt van technieken zoals membranen en katalytische processen, die niet primair gebaseerd zijn op elektromagnetische effecten. Indirect zijn ze dat natuurlijk wel, omdat randapparatuur zoals pompen elektrisch worden aangedreven.

Er is echter een zeer divers veld waar wel gebruik wordt gemaakt van elektromagnetische verschijnselen. Een selectie:

- magnetische scheiding
- elektrostatische gasreiniging
- elektrolyse
- capacitieve deïonisatie
- gepulste corona
- plasmareiniging
- elektromagnetische sterilisatie.

Op de eerste drie methoden zullen we slechts kort ingaan, de rest zal uitvoeriger aan de orde komen in par. 6.5.2 t/m 6.5.5.

Magnetische scheiding leek een nieuwe technologie, waarvan veel verwacht werd en waarbij het idee bestond dat daarin de supergeleidende magneten zouden doorbreken. Helaas is dit niet gebeurd. Daar waar het wordt toegepast kunnen ook normaal geleidende magneten worden toegepast. Zowel vloeistoffen als gassen komen voor zuivering in aanmerking.

Elektrostatische gasreiniging of stofverwijdering in uitlaatgassen van kolencentrales is een technologie waarin bij uitstek gebruik wordt gemaakt van elektrostatische eigenschappen van materialen. In het geval van kolencentrales van de vliegde die vrijkomt in het verbrandingsproces. Het is een zeer effectieve methode wat betreft het economische rendement van verwijdering. In vrijwel alle kolencentrales in het westen wordt het toegepast als voorscheiding voor het doek- of kaarsenfilter voor verdere zuivering.

Elektrolyse wordt toegepast voor bijvoorbeeld de zuivering van bloed van dialysepatienten met een defecte nierfunctie. De methode van elektrolyse berust op het stimuleren van een iontransport in een vloeistof onder invloed van een elektrisch veld en vervolgens de afsplitsing ervan. Er bestaan zeer veel uitvoeringsvormen, al dan niet in combinatie met membraanfiltratie. Maar in feite is steeds migratie van ionen het voornaamste reinigingsmechanisme.

²⁷ ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
veringa@ecn.nl

6.5.2 CAPACITIEVE DEÏONISATIE

*dr. G. van der Lee*²⁸

Lawrence Livermore National Laboratories in Californië heeft op laboratoriumschaal een nieuw proces (capacitive deionization) ontwikkeld voor de verwijdering van ionogene verbindingen uit water. De kern van deze techniek is een elektrochemisch proces, waarbij gebruik gemaakt wordt van zogenaamde aerogel-koolstofelektroden. Deze elektroden onderscheiden zich van andere elektrodesystemen door de combinatie van een zeer hoog specifiek oppervlak (400 - 1.100 m² per g) met een zeer lage elektrische weerstand. Ionogene verbindingen worden uit de waterige oplossing verwijderd via elektrosorptie (bijv. alkalizouten) of elektrodepositie (zware metalen).

Het proces wordt gekenmerkt door een laag energieverbruik. Daarnaast worden er bij reiniging van de elektroden slechts zeer geringe hoeveelheden afvalwater gegenereerd.

Door Lawrence Livermore National Laboratories zijn voor toepassing van dit proces een aantal verschillende opties geïdentificeerd, zoals:

- Ontzilting van (zee)water, voor zowel huishoudelijke, industriële als agrarische toepassingen.
- De zuivering van anorganische afvalwaterstromen, waaronder radioactief afvalwater.
- De bereiding van zuiver water, zoals ketelvoedingwater en water voor de halfgeleiderindustrie.
- Onthardingsinstallaties voor huishoudelijk gebruik.
- Zuivering van bloed.

Gelet op de specifieke voordelen van het proces en de brede inzetbaarheid lijkt deze techniek veelbelovend.

6.5.3 GEPULSTE CORONA

*dr.ir. E.J.M. van Heesch*²⁹

Inleiding

De Vakgroep Hoogspanningstechniek en EHC van de Technische Universiteit Eindhoven heeft de resultaten van haar 'pulsed power' en corona-onderzoek samengebracht in de ontwikkeling van een grote gepulste corona-reactor (1995) voor de verwijdering van vluchtige chemische bestanddelen uit rook- en afvalgassen. In duurtesten is aangetoond dat NO, styreen en toluen goed afgebroken worden. Geurstoffen, gechlloreerde koolwaterstoffen en dioxinen zijn kandidaten voor verder onderzoek.

28 Sep,
Postbus 575
6800 AN Arnhem
Leevd@sep.nl

29 TU Eindhoven,
Vakgroep EHC,
Postbus 513
5600 MB Eindhoven
E.J.M.Vanheesch@ele.tue.nl

Fig. 6.5.1

Geopende pulsbron met 1 m lange actieve corona-cylinder. In definitieve versie is de actieve corona 3 m lang.

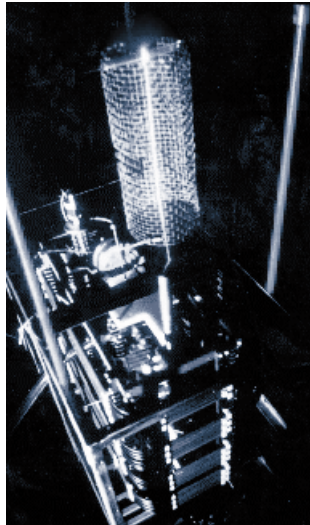
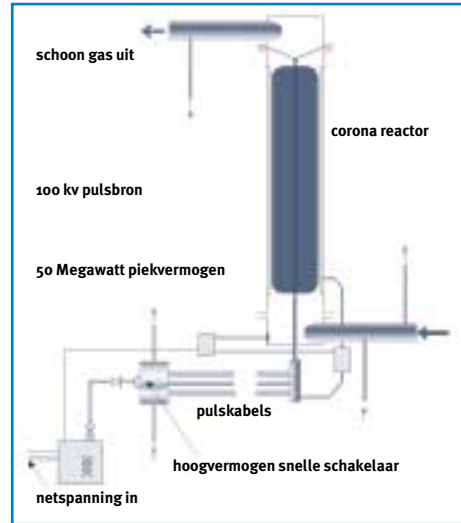


Fig. 6.5.2

Overzicht van de gepulste corona-bron met reactor.



In een groot Europees Joule-project wordt vanaf begin 1998 gewerkt aan biogas-reiniging met gepulste corona. Daarnaast wordt in 1998 samen met NIZO en de vakgroep TCP de reiniging van vloeistoffen onderzocht.

De huidige status van het werk geeft Nederland internationaal gezien een technologische voorsprong. In de afgelopen jaren is veel bereikt op het gebied van efficiënte, betrouwbare en makkelijk hanteerbare pulsbronnen. Daarnaast zijn de in eerste instantie ontstane grote EMC³⁰-problemen die samengaan met gepulste hoogspanning opgelost.

Het principe van gepulste corona

Gepulste corona is een intense gasontlading die in atmosferische gassen efficiënt elektronen en radicalen kan maken. Met zo'n duizend pulsen per seconde wordt een stroom afvalgas bewerkt. In dit gas ontstaan intense elektrische ont-ladingen die de gehele luchtstroom bestrijken. Dit elektrisch verschijnsel wordt gepulste corona genoemd. In de huidige reactor ziet de gepulste corona eruit als een lange paars oplichtende ragebol, zie fig. 6.5.1.

Het ontladingstype is uitermate goed te gebruiken om allerlei schadelijke chemische bestanddelen uit afvallucht (zoals NO, ethyleen, styreen, toluen, pentaan en geurcomponenten) om te zetten in beter hanteerbare componenten (NO₂, CO₂ en H₂O). Ook is het mogelijk om vloeistoffen met de hoogspannings-pulsen te behandelen.

Bij elke gepulste ontlading ontstaat een wolk van chemisch actieve deeltjes in de lucht. Deze actieve deeltjes, radicalen, ontstaan na aanhechting van elek-tronen uit de ontlading. De radicalen zijn zeer actief in het omzetten van de schadelijke componenten. Met de extreme elektrische velden worden micro-organismen gedecimeerd (toepassingen op het gebied van pasteurisatie en sterilisatie).

³⁰ ElektroMagnetische
Compatibiliteit.

Fig. 6.5.2 geeft de corona-reactor weer. Het is een 3,5 m lange buis van 25 cm diameter met op de as een hoogspanningsdraad en op de wand een bekleding van gaas en naalden. Tussen de draad en wand worden intense corona-ontladingen gemaakt met hoogspanningspulsen uit de pulsvoeding (tijdens de puls 50 MW elektrisch vermogen). Met een frequentie van 1.000 pulsen per seconde van 100.000 volt wordt gemiddeld 1,5 kW elektrisch vermogen continu op het afvalgas overgebracht. Elektrische apparatuur in de omgeving wordt niet beïnvloed door het elektromagnetisch veld door toepassing van speciale EMC-technieken.

Toepassingen en toepassingsmogelijkheden

Voorbeelden van toepassingen waarmee gunstige experimentele ervaring is opgedaan:

- NO-verwijdering uit rookgas van gasmotor voor warmte/kracht-koppeling.
- Styreen- en toluenverwijdering uit luchtstroom.
- Kiemdoding in water.

Verwacht wordt dat gepulste corona industrieel goed toepasbaar wordt voor de:

- Kunststoffindustrie (afbraak van styreen).
- Afval- en houtverbranding (verwijdering schadelijke bestanddelen uit rookgassen).
- Biogasinstallaties (Joule-project TU Eindhoven en EHC-Groep: zuivering van biogas).
- Afvalverwerkende industrie (geurbestrijding).

Andere geschikte toepassingsgebieden zijn:

- Afval- en drinkwaterreiniging.
- Koude pasteurisatie van melk en vruchtensappen.
- Gasreiniging bij zeer hoge temperaturen.

Voor- en nadelen ten opzichte van concurrerende technieken

Voordelen van gepulste corona ten opzichte van conventionele technieken zijn:

- Verschillende schadelijke componenten kunnen tegelijkertijd worden afgebroken.
- Er zijn geen toevoegingen nodig en er ontstaan geen gevaarlijke restproducten.
- De corona-reactor is goed controleerbaar en bijzonder veilig.
- De methode is energiezuinig.
- De corona-reactor werkt bij hoge (meer dan 800 °C) en lage temperaturen.
- De installatie is simpel te bedienen en vergt weinig onderhoud.
- De installatie is compact en eenvoudig te installeren.
- Een relatief simpele installatie die uitstekend past in de concepten van CO₂ recycling (biogasreiniging), energiebesparing (reiniging zonder temperatuurconditionering).

	Investeringskosten per 1.000 m ³ /h afvallucht of per kg/h afvalstof	Operationele kosten (in f)	Effec- tiviteit	Selec- tiviteit	Problemen	Voordelen
gepulste corona	100 kf - 500 kf per 1.000 m ³ /h of kg/h	~ 1 - 5 per 1.000 m ³ of kg	++	breed	moet zich nog bewijzen, kosten verlagen, optimalisatie nodig	niet kwetsbaar, breed bereik, eenvoudig te installeren, weinig onder- houd, kan kleinschalig, geen toevoeging/restpro- ducten, milieusparend
naverbrander	25 kf - 100 kf per 1.000 m ³ /h	3 - 15 per 1.000 m ³	+++	breed	alle afvallucht naar 800 °C, warmteterug- winning nodig, extra CO ₂ productie	breed toepassingsgebied, duurder bij lagere concentraties, grootschalig
gasabsorptie	10 kf - 100 kf per 1.000 m ³ /h	1 - 10 per 1.000 m ³ /h	+/-		restproducten, voor veel stoffen (o.a. NO) niet effectief	bewezen, eenvoudige techniek
koolabsorptie	20 kf - 100 kf per 1.000 m ³ /h	1,5 - 10 per 1.000 m ³			regeneratie van koolstof, vergiftiging, restproducten	betrouwbaar, eventueel terugwinning mogelijk
biofilter	10 kf - 50 kf per 1.000 m ³ /h	0,5 - 5 per 1.000 m ³		+/-	ruimtebeslag, gevoe- lig en kwetsbaar voor temperatuur en hoge concentraties en vochtgehalte (broei)	milieusparend, soms goedkoop
selectieve katalytische reductie	100 kf - 200 kf per 1.000 m ³ /h of kg/h	1 - 3 per 1.000 m ³ /h of kg	++	specifiek	duur door katalysator (en vervanging), kata- lyerator kan vergiftigd worden	bewezen technologie, grootschalig

Tabel 6.5.1
Vergelijking van een
gepulste corona met
enkele conventionele
reinigingstechnieken.

Tabel 6.5.1 geeft een vergelijking met enkele conventionele reinigingstechnieken.

6.5.4 PLASMAREINIGING

dr. H.J. Veringa³¹

Ook plasma's kunnen toegepast worden voor het reinigen van gasstromen. De werking berust op het in een plasma creëren van een stroom van deeltjes die dissociatie of verbranding van de verontreiniging veroorzaken als ze gericht worden op een te reinigen gas in aanwezigheid van reagentia zoals zuurstof. De deeltjes zijn aangeslagen moleculen of radicalen, de verontreiniging kan bestaan uit koolwaterstoffen.

31 ECN,
Postbus 1
1755 ZG Petten
veringa@ecn.nl

Het is een technologie die potentie heeft in de afvalverbranding en de biomassavergassing. In het geval van biomassavergassing worden er meestal ongewenste teerfracties gevormd die niet alleen schadelijk zijn voor de gezondheid, maar ook desastreus uitwerken op de betrouwbaarheid van nageschakelde systemen, zoals gasmotoren of -turbines. Als men een stroom van radicalen met hoge snelheid inschiet in een synthesesgas, blijkt dat veel van de teerachtige componenten op effectieve wijze verwijderd kunnen worden.

Deze methode wordt voor zover bekend nog niet commercieel toegepast. Een extrapolatie van dit concept is het dissociëren van methaan in een plasmareactor. Hierin wordt een plasma gemaakt waardoor methaan stroomt. Dit plasma ontleedt methaan tot zuiver waterstofgas en een zeer zuiver koolstof. Het waterstof is nuttig in de chemische industrie of bij de energieopwekking, terwijl het zuivere koolstof een hoge waarde heeft in de metallurgie (bijv. voor zuivering van materialen).

Een andere mogelijkheid is een plasma te gebruiken voor terugwinning van kostbare metalen uit afvalstromen. Het werkingsprincipe is experimenteel aangetoond, doch het proces is nog niet zover ontwikkeld dat het ook commercieel op de markt kan worden gebracht.

6.5.5 ELEKTROMAGNETISCHE STERILISATIE

ir. J.M. Meij

Technieken zoals koken of pasteuriseren worden al lange tijd gebruikt om de hoeveelheid bacteriën in voedingsmiddelen drastisch te verminderen, zodat de houdbaarheid vergroot wordt. Er zijn echter twee redenen om te zoeken naar nieuwe methoden voor de vergroting van de houdbaarheid:

- Een groeiende behoefte aan ‘vers’ voedsel dat nog steeds alle vitamines en andere voedingsstoffen bevat en daarnaast een ongewijzigde textuur heeft.
- Een groeiende belangstelling voor het energieverbruik van industriële voedselbereiding.

Methoden die al langer onderzocht worden zijn de elektronenstraalsterilisatie en bestraling. Relatief nieuwe onderzoeksgebieden zijn de hoge-druksterilisatie en de sterilisatie met licht of met elektrische of magnetische velden. Op deze laatste twee methoden zullen we hier kort ingaan. De werking van sterilisatie met elektrische velden berust op het blootstellen van voedingsmiddelen aan zeer sterke pulserende elektrische velden (tot 100 pulsen van maximaal 50 kV per cm). Dit heeft tot gevolg dat het grootste deel van de aanwezige bacteriën gedood worden of inactief gemaakt worden. Een probleem is de diëlektrische ontleding van voedingsmiddelen, waardoor eigenlijk alleen homogene vloeibare voedingsmiddelen met deze methode behandeld kunnen worden.

Ook met gepulste, oscillerende magnetische velden is het mogelijk micro-organismen te inactiveren. Experimenten met velden tussen 5 en 50 T bij frequenties tussen 5 en 500 kHz tonen bij 1 tot 100 pulsen een reductie van het aantal micro-organismen met minimaal 95%. De totale blootstelling aan de magneetvelden duurt meestal niet meer dan 10 ms. Een belangrijke eis waaraan de voedingsmiddelen moeten voldoen is dat ze een relatief hoge elektrische weerstand bezitten. Deze moet meer dan 10 tot 25 ohm-cm zijn. Hoe lager de elektrische weerstand en hoe dikker de doorsnede van het te behandelen voedingsmiddel, hoe groter de intensiteit van het magnetische veld moet zijn. De voedingsmiddelen kunnen in de verpakking worden behandeld en veranderen vrijwel niet qua textuur. Proeven zijn met succes uitgevoerd op onder andere melk, yoghurt, sinaasappelsap en voorverpakt brooddeeg. Deze paragraaf is grotendeels gebaseerd op [Barbosa-Cánovas, 1997].

REFERENTIES

- Barbosa-Cánovas, G.V., e.a., *Nonthermal preservation of foods*, Marcel Dekker (1997)
- Bestebroer, S.I., W.J.L. Jansen, *Efficiënte energieketens*, Nederlandse Duurzame Energieconferentie, Ede (1997)
- Boone, W., W.J.L. Jansen, *Elektrotechnologie, een nieuw industrieel elan*, Energiespectrum (1989)
- CADDET, *Industrial drying technologies*, CADDET Analyses Series No. **12** (1994)
- CADDET, *Process heating in the metals industry*, CADDET Analyses Series No. **11** (1993)
- Conrad, H., e.a., *Elektrothermische Verfahrenstechnik*, Vulkan-Verlag, Essen (1994)
- Engelen, E.W.L. van (red.), *Elektriciteit in perspectief; energie en milieu in de industrie*, STT-publicatie nr. 53, Samsom (1992)
- EPRI *Electrotechnology reference guide*, Report EM-4527, Project 2613-5, April (1986)
- <http://rott.esa.lanl.gov./movies.html>, zie par. 6.3 (koeltechnieken)
- Jansen, W.J.L., e.a., *Diëlektrisch drogen in de aardewerkindustrie*, Klei, Glas, Keramiek, 17^e jaargang, nr. **12**, p. 11-12
- Jansen, W.J.L., *Diëlektrisch drogen: een nieuwe optie*, Energiespectrum, pp. 219-227 (1991)
- Jansen, W.J.L., *Diëlektrische technologie in de industrie*, Elektrotechniek **67**, nr. 7, pp. 641-648 (1989)
- Jansen, W.J.L., *Ontwikkelingen van diëlektrische technieken in de industrie*, Energietechniek, nr. 72, p. 750-756 (1994b)

- Jansen, W.J.L., W. Boone, e.a., *Energie besparen met elektriciteit*, Elektrotechniek nr. **7/8**, jaargang 72, pp. 456-462 (1994a)
- Liere, J. van, A. Heertje, *Van megawatt naar ecowatt: een nieuwe visie op energiebeleid*, KEMA, Arnhem (1997)
- LLNL, *Scalable, diode end-pumping technology; A new diode-array design*, Lawrence Livermore National Laboratory, <http://www.llnl.gov/IPandC/op96/05/51-sca.html> (1998)
- Metaxas, A.C., *Foundations of electroheat*, John Wiley & Sons, Chichester (1996)
- Metaxas, A.C., R.J. Meredith, *Industrial microwave heating*, IEEE Power Engineering Series **4**, Peregrinus, London (1983)
- Mühlbauer, A., *Industrielle Elektrowärmetechnik*, Vulkan-Verlag, Essen (1992)
- *Optopower diode laser array*, Princeton University Atomic Physics Group, <http://pupgg.princeton.edu/~benlev/laser.html> (1998)
- Photonics, *What is a laser diode?*, <http://www.photonics.demon.co.uk/pages/product/diodes/whatis.html> (1998)
- Rudolph, M., H. Schaefer, *Elektrothermische Verfahren, Grundlagen, Technologien und Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin (1989)
- *Thermo-acoustic engines and refrigerators*, Physics Today, July (1995)
- UIE, *Advantages of electricity in industry*, UIE, Paris (1992a)
- UIE, *Dielectric heating for industrial processes*, UIE, Paris (1992c)
- UIE, *Electrical drying in industry*, UIE, Paris (1988)
- UIE, *Electricity in the food and drink industry*, UIE, Parijs (1996b)
- UIE, *Energy saving in industry by efficient use of electricity*, UIE, Paris (1996a)
- UIE, *Induction heating. Industrial applications*, UIE, Parijs (1992b)
- UIE, *Plasma technology for a better environment*, UIE, Paris (1957)
- WEKA, *Praktijkhandboek duurzaam bouwen*, Uitgeverij WEKA (1998)
- Wekken, B.C. van der, P. Quack, *Mechanische dampcompressie goedkoper dan thermische*, Procestechologie, september (1990)
- Ybema, J., e.a., *Prospects for energy technologies in the Netherlands*,. Vol. **1**, Syrene Integratiestudie, ECN-C-95002, in opdracht van Novem (1995)

Bijlage 1

BASISBEGRIPPEN

In deze bijlage zullen een aantal begrippen en componenten op het gebied van elektriciteit aan de orde komen die nuttig zijn voor een beter begrip van de in deze uitgave bijeengebrachte kennis. De bijlage is vooral bedoeld voor lezers die geen elektrotechnische achtergrond hebben.

Aan de orde komen zaken zoals vermogen, gelijkstroom en wisselstroom, maar ook passieve basiscomponenten zoals weerstanden, spoelen, condensatoren en transformatoren. Ook dioden zullen hier worden behandeld. Actieve componenten en vermogensomzeters worden behandeld in Deel 2, par. 2.5, Vermogenselektronica.

ELEKTRICITEIT

Stroom en spanning

De elektrische stroom I is de hoeveelheid elektrische lading die zich per tijdseenheid door¹ een geleider verplaatst. Deze hoeveelheid is afhankelijk van het potentiaalverschil U en van de totale tegenstand die de stroom ondervindt tussen het begin en het einde van de geleider. Meestal is de belasting (lamp, motor e.d.) bepalend voor de grootte van de stroom in het circuit. Het potentiaalverschil – meestal spanning genoemd – is te vergelijken met een hoogteverschil tussen twee waterbassins, de tegenstand voor de stroom is te vergelijken met de tegenstand die water ondervindt (door filters, vernauwingen, enz.) in een pijpleiding tussen de twee bassins. Deze tegenstand kan bestaan uit een weerstand R en een impedantie² Z . Als de belasting een weerstand is geldt voor de stroom:

$$I = U / R$$

.....
¹ Hoewel het veld rond de geleider hierbij essentieel is, spreken we voor het gemak van een stroom door een geleider.

² Zie bij Basiscomponenten in 'Spoel'.

De spanning U wordt aangeduid in volt (V), de stroom I in ampère (A), de weerstand R in ohm (Ω).

Vermogen

Het elektrische vermogen dat naar een belasting getransporteerd wordt, is gelijk aan het product van spanning over de belasting en stroom door de belasting. Omdat voor een weerstand geldt $U = I \times R$, is het vermogen dat aan een weerstand wordt overgedragen:

$$P = V \times I = I^2 \times R$$

Het vermogen P wordt aangeduid in watt. Dit vermogen is dus een momentaan gegeven dat net zoals de stroming in de pijp op een moment gemeten kan worden.

Een elektrische verwarming met een vermogen van 1.000 watt gebruikt in een uur 1.000 wattuur (Wh) of 1 kWh. Een gloeilamp van 100 watt gebruikt in 10 uur 1 kWh.

De joule is een andere gebruikelijke eenheid voor energie. Een joule is gelijk aan 1 wattseconde. In de praktijk wordt vooral de megajoule gebruikt (MJ = 10^6 joule). Van verschillende brandstoffen zijn sterk uiteenlopende hoeveelheden nodig voor het vertegenwoordigen van dezelfde hoeveelheid energie, zoals getoond wordt in tabel B1.

Tabel B1

Een MJ uitgedrukt in hoeveelheden van verschillende energiedragers. Een MJ is gelijk aan 0,278 kWh. O.a. naar [Lysen, 1979].

	Benzine (liter)	Aardgas via leiding (liter)	Waterstofgas (liter, bij 0 °C, 1 Atmosfeer)	Droog brandhout (g)	Sinaas- appels	Boter- hammen
1 MJ =	0,02	32	92	74	5	3

We kunnen diverse voorbeelden geven van de prestaties van een MJ en een kWh (tabel B2).

	Huis warm houden in vrieskou	Water aan de kook brengen	100 m hijsen	Water pompen naar 50 m hoogte	TV in bedrijf (100 W)
1 MJ	1 - 2 minuten	2 liter	1.000 kg	2.000 liter	2 uur + 3 kwartier
1 kWh	3,6 - 7,2 minuten	7,2 liter	3.600 kg	7.200 liter	10 uur

Tabel B2

Prestaties van een MJ en een kWh. O.a. naar [Lysen, 1979].

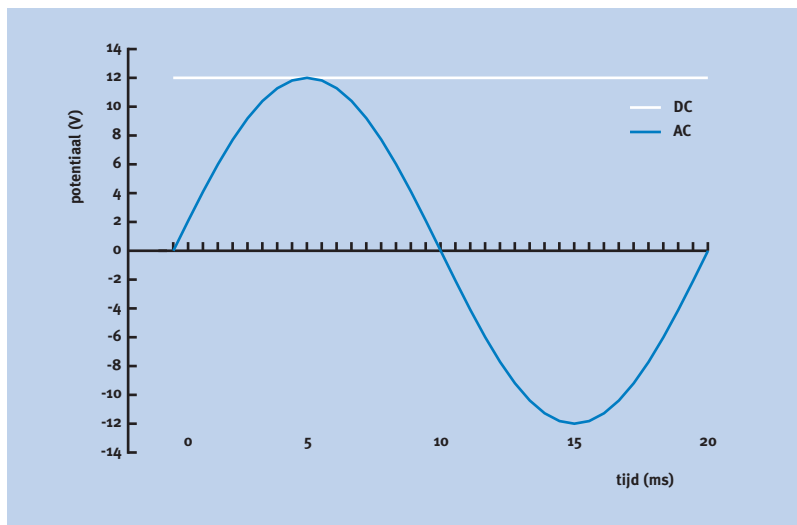
Gelijkstroom en wisselstroom

Een accu of een batterij in een zaklantaarn is een opslagvat voor elektrische lading en kan gelijkstroom ofwel direct current (DC) produceren. Tussen de twee polen van de accu is een constant potentiaalverschil aanwezig. Wanneer we bijvoorbeeld een lampje (= een belasting) aansluiten tussen de klemmen van de accu, dan zal er een stroom gaan lopen waarvan de grootte afhangt van de

spanning en de weerstand van het lampje. Deze spanning blijft vrijwel constant, totdat de lading 'op' is en de accu uitgeput begint te raken. In een grafiek kunnen we deze constante spanning als een horizontale lijn uitzetten tegen de tijd. Bij wisselstroom ofwel alternating current (AC) varieert de spanning voortdurend in grootte en polariteit, waarbij afhankelijk van de belasting ook de stroom varieert en de stroomrichting zich omkeert. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de meeste opwekeenheden roterende machines zijn (generatoren). De snelheid waarmee de spanning varieert is afhankelijk van de rotatiesnelheid van de generator. In de praktijk wordt in de elektriciteitsvoorziening deze snelheid zo veel mogelijk constant gehouden. De variaties in spanning zijn daardoor cyclisch van aard en volgen een sinusvormige kromme. Fig. B1 geeft een voorbeeld van het spanningsverloop in de tijd. De frequentie in het Europese net is gestandaardiseerd op 50 cycli per seconde, oftewel 50 Hz. In de VS gebruikt men 60 Hz.

2Fig. B1

Wissel- en gelijkstroom met dezelfde maximale spanning. Bij een weerstand als belasting keert de richting van de stroom om, wanneer de spanning door nul gaat. Bij dezelfde maximumspanning is het beschikbare vermogen bij wisselspanning kleiner dan bij gelijkspanning, omdat de wisselspanning het grootste deel van de tijd kleiner is. Het beschikbare vermogen is bij DC $\sqrt{2}$ (ca. 1,4) keer zo groot als bij AC. De waarde waarmee een wisselspanning doorgaans wordt aangeduid is de waarde van de gelijkspanning met gelijk effect op het vermogen; dit heet de effectieve waarde van de spanning. De 230 V uit het stopcontact kent dan ook een piekspanning van 325 V.

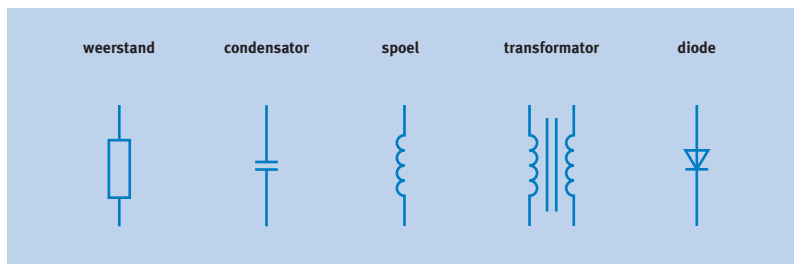


BASISCOMPONENTEN

Veel apparaten gebruiken de elektrische energie inwendig in een andere vorm dan waarin deze aangeboden wordt. Er kan DC nodig zijn in een versterker die gevoed wordt uit het lichtnet (AC), of juist een hoogfrequente wisselspanning voor een TL-buisje dat gevoed wordt met batterijen (DC). Een tv gebruikt spanningen tot 30.000 V, terwijl de spanningen in een pc (12 V, 5 V en 3,3 V) veel lager zijn dan de 220 V uit het net. Met vermogenselektronische schakelingen kan de aangeboden elektrische energie omgezet worden in een vorm die geschikt is voor de toepassing. Dergelijke schakelingen worden vermogenselektronische omzetters of converters genoemd.

Fig. B2

Symbolen voor een aantal basiscomponenten.



We zullen hierna de belangrijkste passieve componenten bespreken die in deze omzeters gebruikt worden. In fig. B2 staan de symbolen voor de componenten zoals deze voor elektrische schema's gebruikt worden.

Weerstand

Een weerstand is een component die de elektrische stroom een tegenstand laat ondervinden. Weerstanden worden geproduceerd met vele specifieke weerstandswaarden (R). Hoe hoger de weerstand, hoe meer tegenstand de stroom ondervindt. De stroom door de weerstand genereert warmte, daarom zijn weerstanden altijd gespecificeerd en gedimensioneerd tot een bepaald vermogen. Gloeilampen hebben een bepaalde weerstand; hoe lager de weerstand, hoe groter de stroom en dus hoe groter het vermogen. Ook de geleiders die gebruikt worden voor het transport van elektriciteit hebben een bepaalde (lage) weerstand. Zie hiervoor ook par. 2.2, Geleiders en supergeleiders.

Weerstanden die na elkaar (in serie) in een geleider worden geplaatst hebben een totale weerstand tot gevolg die de som is van de weerstandswaarden.

$$R_{\text{totaal}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Twee gelijke gloeilampen³ die in serie worden aangesloten zullen samen een dubbele weerstand bieden aan de stroom en branden dan ook beide op halve stroomsterkte.

Plaatsen we meer weerstanden parallel (naast elkaar) in de geleider, dan ondervindt de stroom in iedere weerstand tegenstand, maar kan zich door alle weerstanden tegelijkertijd verplaatsen. De totale tegenstand die de stroom ondervindt is dan ook lager dan die van de afzonderlijke weerstanden.

In formulevorm:

$$1/R_{\text{tot}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$$

³ In essentie een weerstands-draad in een beschermend gas.

Als we meer gloeilampen op de contactdozen in ons huis aansluiten, dan zijn deze lampen parallel aangesloten. Hoe meer lampen, hoe groter de stroom door onze elektriciteitsmeter.

Spoel

Een spoel is een stuk geïsoleerde geleider, opgerold rond een ‘kern’ van weekijzer, lucht of ander materiaal. Een spoel gedraagt zich voor gelijkstroom gewoon als een stuk draad.

Voor wisselstroom heeft een spoel echter een impedantie of frequentieafhankelijke ‘tegenstand’:

$$Z = 2 \pi f L$$

waarin f de wisselspanningsfrequentie en L de zelfinductie van de spoel is.

Voor een 50 Hz wisselspanning geldt dat $Z \approx 314,16 L$.

De impedantie is het gevolg van het opbouwen van een magnetisch veld in de spoel. Doordat de aanpassing van het magneetveld aan de steeds veranderende spanning tijd kost, zal de stroom (die evenredig is met het opgebouwde veld) in de tijd achterlopen bij de aangeboden wisselspanning. De stroom door de spoel is 90° in fase verschoven (ijlt na) ten opzichte van de spanning. Dit is een van de oorzaken van de vraag naar blindvermogen (zie ook par. 2.5.3 in Deel 1, Reëel en blindvermogen).

Condensator

Een condensator is een ‘opslagvat’ voor lading en kan een hoeveelheid lading opslaan en weer afstaan. In de praktijk worden condensatoren op verschillende manieren gemaakt, maar het principe berust altijd op het scheiden van twee geleidende oppervlakken (elk verbonden met een van de spanningspolen) door een dunne isolatielaag. Een condensator gedraagt zich in een gelijkstroomcircuit na het opladen als een isolator. Voor wisselstroom is het verhaal echter anders.

De condensator zal wanneer hij wordt aangesloten op een wisselspanning zich voortdurend ontladen en opladen. Daardoor lijkt het alsof de condensator wisselstroom doorlaat. Voor de stroom in de condensator geldt:

$$I = U 2 \pi f C$$

waarin f de wisselspanningsfrequentie is en C de capaciteit van de condensator. De ‘aantrekkingskracht’ van de tegengesteld geladen oppervlakte maakt dat de stroom in de condensator 90° vooruitloopt op de aangeboden spanning. Ook hier bestaat er dus een faseverschil tussen de stroom door de condensator en de spanning erover.

In de praktijk zien we dat componenten met spoelen (TL-ballast, elektromotor) gecombineerd worden met condensatoren, zodat de ‘voorlopende’ en de najlende stroom elkaar zo veel mogelijk opheffen.

Diode

Een diode laat slechts in één richting stroom door. Een diode heeft een bepaalde minimum- en een bepaalde maximumspanning (doorslagspanning) waarbij hij kan functioneren. Dioden worden vaak gebruikt in bruggelijkrichters om van wisselstroom stroom in één richting te maken, waarvan met een aantal extra stappen gelijkstroom gemaakt kan worden (zie Deel 2, par. 2.5).

Transformator

Een transformator bestaat uit twee of meer spoelen en kan de ene wisselspanning in de andere omzetten. Daarbij is de verhouding tussen de ingaande en de uitgaande spanning evenredig aan de verhouding tussen het aantal windingen van de ingaande en de uitgaande spoel. De windingen van de spoel zijn doorgaans rond een weekijzeren kern gewonden, en bestaan meestal uit koperdraad met een isolatielaagje. Vaak is een transformator omgeven door blik om de magnetische velden af te schermen. Hoogvermogenstransformatoren worden vaak gekoeld met olie.

REFERENTIE

- Lysen, E.H., *Eindeloze energie, alternatieven voor de samenleving*, Uitgeverij Spectrum (1977, 1980)

Bijlage 2

VOORVOEGSELS EN EENHEDEN

VOORVOEGSELS

Symbol	Voorvoegsel	Factor
E	exa	10^{18}
P	peta	10^{15}
T	tera	10^{12}
G	giga	10^9
M	mega	10^6
k	kilo	10^3
m	milli	10^{-3}
μ	micro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	pico	10^{-12}
f	femto	10^{-15}
a	atto	10^{-18}

EENHEDEN VAN ENERGIE

1 Joule (J) = 1 Watt-seconde (Ws) = 1 Newtonmeter (Nm)

3600 J = 1 Wh

1 kWh = 3,6 MJ

Bij opwekking uit primaire brandstoffen in Nederland [Novem Energiegids, 1998]:

Grootschalige productie anno 1990 1 kWh = 8,98 MJ primair

Grootschalige productie anno 2000 1 kWh = 8,45 MJ primair

Energie-inhoud aardgas:

1 m³ aardgas = 31,65 MJ tot 35,17 MJ

(onder-, resp. bovenwaarde Gronings gas)

Organisatie van de studie

Deze publicatie is tot stand gekomen met de actieve medewerking van 77 deskundigen. STT is veel dank verschuldigd aan al degenen die belangeloos veel tijd en energie aan dit project hebben besteed. Een stuurgroep werd gevormd om de juiste invalshoek te vinden en het inhoudelijke gehalte van de studie te bewaken. De eerste drie werkgroepen hebben ieder een hoofdstuk van Deel 1 geschreven, de bijdragen van de vierde werkgroep zijn te vinden in Deel 2 van dit boek. Tussentijds is een workshop georganiseerd om de vorming en uitwisseling van ideeën te stimuleren.

Stuurgroep

ir. H.J.M. Beurskens	ECN, Petten
ir. G.H. Bontius	EnergieNed, Arnhem
ir. J.M.H. van Engelshoven	Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Den Haag (tot 1-4-1998)
dr.ir. B. Gravendeel	HMA Power Systems, Ridderkerk
ir. G.N. van Ingen	Akzo Nobel Chemicals bv, Amersfoort
dr. H.L. Jonkers	Ministerie van OCenW
prof.ir. W.L. Kling	Sep, Arnhem
drs. L. Knegt (<i>voorzitter</i>)	Universiteit van Maastricht
drs. F.J.G. van de Linde	STT, Den Haag
ir. E.H. Lysen	Universiteit van Utrecht
dr. S.B. van der Molen	ECN, Brandstoffen, Conversie & Milieu, Petten
ir. G. Peppink	Sep, Arnhem
ir. W. Schatborn	ECN, Petten
prof.ir. L. van der Sluis	Technische Universiteit Delft
prof.dr. L.L.G. Soete	Merit, Universiteit van Maastricht
ir. P.T.M. Vaessen	Kema Nederland B.V., Arnhem
prof.dr. A.H.M. Verkooijen	Interfacultair Reactor Instituut, Technische Universiteit Delft

Werkgroep Toekomst van de elektriciteitsvoorziening in dichtbevolkte gebieden op kleinschalig niveau

prof.dr.ir. R. Belmans	Katholieke Universiteit Leuven, België
ir. P.G.M. Boonekamp	ECN Beleidsstudies, Petten
ir. J. Çaçe	Energie Holland NV, Hoofddorp
J.H. Griffioen	Eneco, Rotterdam
ir. S.W.H. de Haan	Technische Universiteit Delft
ir. D. Jansen	ECN, Petten
ir. J. Janssen	EnergieNed, Arnhem
ir. J.J. Kruisman	Energie Noord West N.V., Amsterdam-Zuidoost
ir. J. Meeuwssen	Technische Universiteit Delft
ing. K.H.T.J. van Otterdijk	ECN, Petten
ir. H.F.A. Sidler	C.O.R.E. International, Lochem
M.B.N. Tham	NKF Holding, Delft (tot 1-12-1998)
prof.dr. A.H.M. Verkooijen (<i>voorzitter</i>)	Interfacultair Reactor Instituut, Technische Universiteit Delft

Werkgroep Toekomst van de elektriciteitsvoorziening vanuit een nationaal en mondiaal perspectief

prof.dr.ir. W. D'Haeseleer	Katholieke Universiteit Leuven, België
H. Geene	NKF Kabel, Delft
ir. P. Giesbertz	Kema Consulting, Bonn, Bondsrepubliek Duitsland
prof.ir. W.L. Kling	Sep, Arnhem
dr.ir. G.C. Paap	Technische Universiteit Delft
ir. G.C. van Uitert	Ministerie van Economische Zaken
ir. P.T.M. Vaessen (<i>voorzitter</i>)	Kema Nederland B.V., Arnhem
ir. J.R. Ybema	ECN Beleidsstudies, Petten

Werkgroep Elektrificatie in mobiele toepassingen

ir. A. Brouwer	Novem Verkeer en Vervoer, Utrecht
ir. R.J.F. van Gerwen	Kema Nederland B.V., Arnhem
ing. W. Heijboer	Spijkstaal Elektro b.v., Spijkenisse
P.C. McKay	ECN Beleidsstudies, Petten
dr. S.B. van der Molen (<i>voorzitter</i>)	ECN Brandstoffen, Conversie & Milieu, Petten
dr.ir. B.J.C.M. Rutten	AVV, Rotterdam
dr.ir. D. Schmal	TNO-MEP, Apeldoorn
ing. B. Warnaar	NZH Techniek, Haarlem
ir. W.G.F. van den Wittenboer	EnergieNed, Arnhem

Werkgroep Doorbraaktechnologie voor besparing en hernieuwbare duurzame opwekking

ing. C.G.B. Bleijenbergh	Akzo Nobel Engineering BV, Arnhem
dr.ir. J. Buys	TNO Industrie, Eindhoven
Dipl. ing. P.H.W. Droste	Escete b.v., Enschede
dr.ir. B. Gravendeel	HMA Power Systems, Ridderkerk
dr. W.A. van Kampen	Magnetics Enterprise, Leiden
dr. C.C. Kranenburg	Overmars Organisatie Adviseurs, Utrecht
dr.ir. P.H.F. Morshuis	Technische Universiteit Delft
G. Oudakker	Van Hattum en Blankevoort, Woerden
ir. G. Peppink (<i>voorzitter</i>)	Sep, Arnhem
ir. M.J. van Randwijk	Hoogovens, Ijmuiden
dr. H.J. Veringa	ECN, Petten

Externe auteurs

prof.dr. J.M. Akkermans	A.K.M.C., Koedijk
John C. Bass	Hi-Z Technology Inc., San Diego, USA
prof.dr.ir. S.H.A. Begemann	Philips Lighting, Eindhoven
C.M. de Blok	ASTER thermo acoustische systemen, Hazerswoude
ir. W. Boone	Kema Nederland B.V., Arnhem
dr. A. Bos	ECN, Petten
R. de Bruijne	Novem, Utrecht
prof.dr. J.A. Ferreira	Technische Universiteit Delft
dr. W. Gilijamse	ECN, Petten
J. Grin	Universiteit van Amsterdam
dr.ir. B. ten Haken	Universiteit Twente
dr.ir. E.J.M. van Heesch	Technische Universiteit Eindhoven
ing. A.A. Hirdes	NS Railinfrabeheer, Utrecht
ir. W.J.L. Jansen	Kema Nederland B.V., Arnhem
dr. G. van der Lee	Sep, Arnhem
dr. K.A.H. van Leeuwen	Technische Universiteit Eindhoven
dr. H. Lyon jr.	Marlow Industries Inc., Dallas, USA
dr. H.A.C. Meinders	Philips, Eindhoven
dr.ir. U. Nienhuis	Projectbureau All Electric Ship, Den Haag
dr.ir. L.J.J. Offringa	Technische Universiteit Eindhoven
ir. P.A. Oostendorp	TNO-MEP, Apeldoorn
dr.ir. L. Plomp	ECN, Petten
prof.dr. D. Povh	Siemens A.G., Erlangen, Bondsrepubliek Duitsland
prof.dr. W.C. Sinke	ECN, Petten
ir. P. Toussaint	Sep, Arnhem
ir. C. Witziers	TNO Wegtransport, Delft

Projectleiding

Het project stond onder leiding van Jeroen Meij, projectleider bij STT. Bij de organisatie van de studie werd hij bijgestaan door Rosemarijke Otten en Annette Potting, beiden projectsecretaresse bij STT. De discussies met en adviezen van STT-directeur Erik van de Linde hebben het project mede vormgegeven. Aan de redactie van de publicatie is meegewerkt door Rosemarijke Otten en Erik van de Linde. De laatste heeft ook aan de samenvatting een belangrijke bijdrage geleverd. De par. 1.4, 3.6.4 (Deel 1), 3.2.2, 5.2.1 en 6.3.2 (Deel 2) zijn vertaald uit het Engels door Jeroen Meij.

STT-publicaties

Alle publicaties waarbij het ISBN is vermeld, zijn verkrijgbaar via STT of via de boekhandel.

De overige publicaties zijn alleen te verkrijgen bij

STT

Postbus 30424

2500 GK Den Haag

Telefoon +31 70 3029830

Fax +31 70 3616185

E-mail otten@stt.nl

De meest recente publicatielijst is op de homepage te vinden:

<http://www.stt.nl>

- 61 Stroomversnelling, de volgende elektrische innovatiegolf
Redactie: ir. J.M. Meij, 1999 (ISBN 90 804496 2 8)
- 60 Nanotechnology, towards a molecular construction kit
Edited by Arthur ten Wolde, 1998 (ISBN 90 804496 1 X)
- 59 Bouwwijs, materialen en methoden voor toekomstige gebouwen
Redactie: ir. Annemieke Venemans, 1997 (ISBN 90 6155 816 6)
- 58 Gezonde productiviteit, innoveren voor betere arbeidsomstandigheden
Redactie: ir. Arie Korbijn, 1996 (ISBN 90 6155 744 5)
- 57 Digitale leermiddelen in beroepsopleidingen (incl cd-i en samenvatting)
Redactie: dr. A. ten Wolde, 1996 (ISBN 90 6155 730 5)
- 56 Microsystem technology: exploring opportunities
Edited by Gerben Klein Lebbink, 1994 (ISBN 90 14 05088 7)
- 55 Schone kansen, denkbeelden over ondernemerschap en milieu-
management
Redactie: ir. E.W.L. van Engelen, J. van Goor, 1994 (ISBN 90 14 04929 3)
- 54 Goederenvervoer over korte afstand
Redactie: ir. M.J. Venemans, 1994 (ISBN 90 14 04928 5)
- 53 Elektriciteit in perspectief, 'energie en milieu'
Redactie: ir. E.W.L. van Engelen, 1992 (ISBN 90 14 04715 0)
- 52 Inspelen op complexiteit
Redactie: drs. M.J.A. Alkemade, 1992 (ISBN 90 14 03883 6)
- 51 Plantaardige grondstoffen voor de industrie
Redactie: drs. W.G.J. Brouwer, 1991 (ISBN 9014 03882 8)
- 50 Opleiden voor de toekomst: instrument voor beleid
ir. H.B. van Terwisga en drs. E. van Sluijs, 1990 (ISBN 90 14 04506 9)
- 49 Grenzen aan techniek
Redactie: ir. A.J. van Griethuysen, 1989 (ISBN 90 14 03880 1)
- 48 Kennissystemen in de industrie
Redactie: ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1988
- 47 Kennissystemen in de dienstensector
Redactie: drs. A.Y.L. Kwee en ir. J.J.S.C. de Witte, 1987
- 46 Kennissystemen en medische besluitvorming
Redactie: ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1987
- 45 Kennissystemen in het onderwijs
Redactie: ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1987
- 44 Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst
Redactie: ir. G. Laurentius, 1987
- 43 Nieuwe toepassingen van materialen
Redactie: ir. A.J. van Griethuysen, 1986
- 42 Techniek voor ouderen
Redactie: ir. M.H. Blom Fuhri Snethlage, 1986 (ISBN 90 14 03822 4)

- 41 De toekomst van onze voedingsmiddelenindustrie
Redactie: drs. J.C.M. Schogt en prof.dr.ir. W.J. Beek, 1985
- 40 Bedrijf, kennis en innovatie
Redactie: ir. H. Timmerman, 1985
- 39 De kwetsbaarheid van de stad; verstoringen in water, gas, elektriciteit en telefonie
Samensteller: ir. G. Laurentius, 1984
- 38 Man and information technology: towards friendlier systems
Edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1983
- 37 Nederland en de rijkdommen van de zee: industrieel perspectief en het nieuwe zeerecht
Redactie: ir. J.F.P. Schönfeld en mr.dr.s. Ph.J. de Koning Gans, 1983
- 36 Informatietechniek in het kantoor; ervaringen in zeven organisaties
Samensteller: drs. F.J.G. Fransen, 1983
- 35 Automatisering in de fabriek; vertrekpunten voor beleid
Redactie: ir. H. Timmerman, 1983
- 34 Flexibele automatisering in Nederland; ervaringen en opinies
Redactie: ir. G. Laurentius, ir. H. Timmerman en ir. A.A.M. Vermeulen, 1982
- 33 Toekomstige verwarming van woningen en gebouwen
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1982
- 32 Micro-elektronica voor onze toekomst; een kritische beschouwing
Samenstellers: burggraaf E. Davignon e.a., 1982
- 31-9 Micro-elektronica: de belastingdienst
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-8 Micro-elektronica: het reiswezen
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-7 Micro-elektronica: het kantoor
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-6 Micro-elektronica: het bankwezen
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-5 Micro-elektronica: het ontwerpproces
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-4 Micro-elektronica: productinnovatie van consumentenprodukten en diensten voor gebruik in huis
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-3 Micro-elektronica: procesinnovatie in de sector elektro-metaal
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-2 Micro-elektronica: de grafische industrie en uitgeverijen
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 31-1 Micro-elektronica: de rundveehouderij
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981

- 31 Micro-elektronica in beroep en bedrijf; balans en verwachting
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981
- 30 Biotechnology; a Dutch perspective
Edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1981
- 29 Wonen en techniek; ervaringen van gisteren, ideeën voor morgen
Redactie: ir. J. Overeem en dr. G.H. Jansen, 1981
- 28 Distributie van consumentengoederen; informatie en communicatie in
perspectief
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1980
- 27 Steenkool voor onze toekomst
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1980
- 26 Bos en hout voor onze toekomst
Redactie: ir. T.K. de Haas, ir. J.H.F. van Apeldoorn, ir. A.C. Sjoerdsma, 1979
- 25 Arts en gegevensverwerking
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1979
- 24 Toekomstbeeld der industrie
prof.dr. P. de Wolff e.a., 1978
- 23 De industrie in Nederland: verkenning van knelpunten en mogelijkheden
Redactie: ir. H.K. Boswijk en ir. R.G.F. de Groot, 1978
- 22 Materialen voor onze samenleving
Redactie: ir. J.A. Over, 1976
- 21 Stedelijk verkeer en vervoer langs nieuwe banen?
Redactie: ir. J. Overeem, 1976
- 20 Voedsel voor allen, plaats en rol van de EEG
prof.dr. J. Tinbergen e.a., 1976
- 19 Energy conservation: ways and means
edited by J.A. Over and A.C. Sjoerdsma, 1974
- 18 Mens en milieu: kringlopen van materie
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
- 17 Mens en milieu: zorg voor zuivere lucht
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
- 16 Mens en milieu: beheerste groei
Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
- 15 Technologisch verkennen: methoden en mogelijkheden
ir. A. van der Lee e.a., 1973
- 14 Techniek en preventief gezondheidsonderzoek
dr. M.J. Hartgerink e.a., 1973
- 13 Communicatiestad 1985: elektronische communicatie met huis en bedrijf
prof.dr.ir. J.L. Bordewijk e.a., 1973
- 12 Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening: mogelijkheden en
consequenties
dr.ir. H. Hoog e.a., 1972

- 11 Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland
prof.dr. J.J. Went e.a., 1972
- 10 Barge carriers: some technical, economic and legal aspects
drs. W. Cordia e.a., 1972
- 9 Het voeden van Nederland nu en in de toekomst
prof.dr.ir. M.J.L. Dols e.a., 1971
- 8 Mens en milieu: prioriteiten en keuze
ir. L. Schepers e.a., 1971
- 7 Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future
ir. J.H. Bakker e.a., 1971
- 6 De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland
dr. P.J. van Duin, 1971
- 5 De overgangsprocedures in het verkeer
prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1969
- 4 Hoe komt een beleidsvisie tot stand?
Ir. P.H. Bosboom, 1969
- 3 Verkeersmiddelen
prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1968
- 2 Techniek en toekomstbeeld; telecommunicatie in telescopisch beeld
prof.dr.ir. R.M.M. Oberman, 1968
- 1 Toekomstbeeld der techniek
ir. J. Smit, 1968

Overige uitgaven:

- Techniek verlegt grenzen, als u begrijpt wat ik bedoel;
STT/Toonder, 1997
- New applications of materials;
edited by A.J. van Griethuysen, 1988 (ISBN 0 95 13623 0 5)
- Mariene ontwikkelingen in de Verenigde Staten, Japan, Frankrijk,
West-Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en Nederland: organisatie, aandachtsgedebieden en budgets
Redactie: ir. J.F.P. Schönfeld en mr.drs. Ph.J. de Koning Gans, 1984
- Het belang van STT (toespraak bij het 15-jarig bestaan van STT)
door prof.ir. Th. Quené, 1983
- De innovatienota; een aanvulling;
H.K. Boswijk, J.G. Wissema, en W.C.L. Zegveld, 1980

Deze studie kwam tot stand dankzij de financiële steun van bedrijfsleven, overheid en het Koninklijk Instituut van Ingenieurs.

Subsidieverleners STT

ABN AMRO Holding
ADP Nederland
Akzo Nobel
Alcatel Nederland
Amsterdam Airport Schiphol
Arcadis
Bakkenist Management Consultants
Campina Melkunie
CMG Nederland
Cosun
CSM
Delft Instruments
Dow Benelux
Dredging International
DSM
Du Pont de Nemours (Nederland)
Eerste Nederlandse Cement Industrie (ENCI)
Eldim
EnergieNed
Energieproduktiebedrijf UNA
Ericsson Telecommunicatie
Europe Combined Terminals
Fugro
Gamma Holding

Groupe Schneider	Nederlandse Unilever Bedrijven
Heineken Nederland	Norit
Hoechst Holland	Océ Technologies
W.A. Hoek's Machine- en Zuurstoffabriek	Origin
Holland Railconsult	Overlegorgaan Productiesector
Hollandsche Beton Groep	Philips Electronics
Industriële Consulente Nederland	Pink Elephant
ING Bank	Polynorm
IQUIP Informatica	Rabobank Nederland
KEMA	Roccade Informatica Groep
Koninklijke Gist-brocades	Sep
Koninklijke Hoogovens	Shell Nederland
Koninklijk Ingenieurs en Architectenbureau	Siemens Nederland
HASKONING	Simac Techniek
Koninklijk Instituut van Ingenieurs	Solvay Chemie
Koninklijke PTT Nederland	Stichting Energieonderzoek Centrum
Koninklijke Schelde Groep	Nederland
Koninklijke Ten Cate	Stork
F. van Lanschot Bankiers	TBI Holdings
Lucent Technologies	TNO
Micro*Montage	Urenco
Ministerie van Economische Zaken	VNU Verenigde Nederlandse
Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en	Uitgeversbedrijven
Visserij	Vredestein
Ministerie van Onderwijs, Cultuur en	Xerox (Nederland)
Wetenschappen	
Ministerie van Verkeer en Waterstaat	
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke	
Ordening en Milieubeheer	
Nationale Investeringsbank	
Nederlandsche Apparatenfabriek Nedap	
Nederlandse Gasunie	
Nederlandse Participatie Maatschappij	
Nederlandse Spoorwegen	

Sponsors voor deze uitgave



NS Railinfrabeheer is de kracht achter het Nederlandse spoorwegnet. In opdracht van het ministerie van Verkeer en Waterstaat zorgt zij voor een goed functionerende, efficiënte en veilige railinfrastructuur.

De overheid geeft de beslissende aanzet, NS Railinfrabeheer zorgt dat het 'spoor'. Innovatie, nieuwbouw en beheer en instandhouding worden ingezet ten dienste van een optimale beschikbaarheid van het spoorwegnet. Landelijke samenhang en regionale verfijning gaan daarbij hand in hand.

De EDON Groep. Stuwende kracht in Noord- en Oost-Nederland

De EDON Groep wordt gevormd door EDON, Traedon, EDON Duurzaam, CasTel en Hanze Milieu, en voorziet de consument en de zakelijke markt van diensten en producten op het gebied van energie, kabel/telecom en afval/milieu. In deze context stimuleert en initieert de EDON Groep technische ontwikkelingen, met name waar het duurzame energie betreft.

NV EDON Groep

Postbus 519
8000 AM Zwolle





Delft

The Netherlands



**Vermogenselektronica en
ElektroMagnetische Conversie
Centrum**

NIEUW KENNISCENTRUM VEMC²

VEMC² is het nieuwe gezamenlijke kenniscentrum van de groep Platformtechnologie van TNO-PML en de vakgroep Vermogens Elektronica en Elektrische Machines van de TU-Delft. Binnenkort betrekken beide samen een nieuw laboratorium op de TU-Delft. De in defensieonderzoek verworven expertise van TNO-PML krijgt daarmee een extra civiele impuls en de gecombineerde kennis en faciliteiten van VEMC² geven een grotere kritische massa in de nationale en internationale R&D-arena. VEMC² wil zich, in samenwerking met andere spelers op EMVT-gebied, vooral richten op industriële productinnovatie.



C.O.R.E.
INTERNATIONAL

COncepten REcycling
COnsultancy Renewable Energy
CO₂ REductie

'Energy is C.O.R.E. (s) business'

Heuvelenweg 18
7241 HZ Lochem
tel. 0573 - 256358
fax 0573 - 254420

EnergieNed



*In het heden zit
de toekomst verborgen
goed belicht is richting te zien*

Wat kunnen wij bieden

De toekomst is niet kenbaar! Wat kan helpen is het 'hier en nu' te herdefiniëren vanuit verschillende contexten, zodat ook zwakke signalen betekenis krijgen en doorkomen. Belangrijk is daarbij de wisselende samenhang vast te stellen tussen technologische innovatie, werkprocessen en mensen.

Wat kunt u verwachten

Een creatieve no-nonsens aanpak, onbevangen luisteren, vanzelfsprekendheden ter discussie stellen en belangeloos interpreteren.

Voor meer informatie en toezending van onze nieuwsbrief

Overmars Organisatie Adviseurs,
Postbus 3282, 3502 GG UTRECHT
☎ : 030-2965335 ✉ : info@overmars.nl



KEMA Nederland B.V.

Postbus 9035, 6800 ET ARNHEM
e-mail: emvt@kema.nl



Mission

To create advantage for our customers in the markets in which they operate, through the systems provided, installed and supported by us.

At a profit!

Power & Industry

Generatoren en motoren voor industriële toepassing

Marine & Offshore

AC drives voor maritieme applicaties

Heavy Material Handling

AC drives voor kraan applicaties

Special Products

Supergeleidende spoelen



AES Project:

Maritiem
Nederlands
Onderzoek
Ontwikkeling
Prototypes
Test & demo
Exploitatie

Technologie:

EMVT
Brandstofcellen
Turbines
Energie-opslag
Non-fossil fuel
Voortstuwens
Generatoren
AC/DC distributie
E-gebruikers



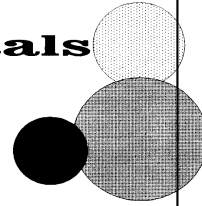
Zeestraat 100
2518 AD Den Haag
070-345 51 65

ESCETE

Single Crystal Technology B.V.



Single Crystals
Wafers
Isolators
Resonators
Ceramics
Ceramic Powders
Sputtertargets



P.O. Box 3896 - NL 7500 DW Enschede - The Netherlands
PHONE: ..31 - 53 - 435 6146 FAX: ..31 - 53 - 435 2134
e-mail: escete@escete.com

Index

A		
	aandrijftechniek	237, 241, 276, 306, 383, 385
	aanloopstroom	362
	aanraakveiligheid	62, 77, 145
	aanspreekniveaus	122, 123, 145
	aarding	138, 321
	absorptiewarmtepomp	493
	acceleratie	260, 261, 273
	accu	87, 88, 295
	adiabatisch	339
	aerogel	444
	afschakelvoorwaarden	224
	afschermstromen	451
	afvalwaterstromen	521
	AllnGaN	459
	alkalizouten	521
	AlN	328
	alnico	350, 351
	anergie	490
	anode	430, 431, 436, 437
	antennelaag	373, 374
	aquifer	72
	arbeidsfactor	120, 122, 124, 383, 413, 414
	array	464
	asloze schroef	20, 247, 311, 511
	asynchroonmotor	274
	autark	59, 73
	autodeelsystemen	237, 238

B

batterij	19, 115, 116, 128, 185, 215, 275, 284, 285, 310, 312, 429, 432
bekrachtiging	212
belastingpatroon	95, 246
belastingkracht	277, 508
belastingsturing	254, 255, 267
bemetering	158
besparing	18, 35, 100, 114, 457, 459, 461, 462
betrouwbaarheid	16, 61, 62, 83, 84, 95, 105, 131, 143, 154, 158, 183, 188, 190, 193, 194, 203, 204, 208, 221, 230, 260, 270, 275, 297, 302, 312, 369, 370, 414, 419, 445, 525
beveiliging	144, 145, 146, 148, 224, 356
biogas	63, 99, 523
biomassa	106, 128, 153, 169, 174, 525
bladhoek	384
bladverstelling	167
blindcomponent	119, 122
blindstroom	417
blindvermogen	7, 74, 119, 120, 121, 122, 124, 125, 129, 130, 148, 211, 360, 383, 385, 415, 417, 418, 532
blokgolf	363
blokkeerspanning	34, 347
bodemwarmte	69, 93
bonding	48, 345
boogelektroden	482
boogontlading	467, 482, 484
borstelloze motor	270, 271, 272
bovenleiding	258
brandstofcel	240, 243, 244, 250, 289, 290, 292, 293, 437
brandstofcelvoertuig	231, 290, 291, 294, 295, 313
bruggelijkrichter	358, 359, 360, 533
buffer	83, 363, 497, 514
buitenpoolmotor	271
bulkheterojunctie	373
busstructuur	83, 123, 145, 295, 366
calciumcarbide	483
capaciteitsfactor	106
capacitief	413
CdTe	370

C

cel (van batterij)	284, 378, 379, 435
cermet	379
choppercircuit	363
collector	68, 72, 354, 395
communicatie	21, 95, 98, 104, 124, 139, 142, 143, 154, 248, 285, 295, 297, 298, 302
commutator	268, 503
compensator	125, 137, 415, 416, 417
compressiewarmtepomp	492, 493
compulsator	514
condensator	17, 43, 44, 83, 120, 122, 128, 241, 242, 288, 358, 359, 440, 441, 442, 444, 445, 514, 532
contactloos	424, 512
contactslijtage	424
convectie	174
convenanten	517
conversiemethode	22, 176
conversie-rendement	75, 371, 510
converter	45, 47, 93, 200, 222, 223, 360, 362, 416
convolutiepatronen	102
COP, coefficient of performance	111, 490, 491, 502
cyaniden	486
cycleerbaarheid	444
cycloconverter	362
D dagcyclus	18, 144
dagopslag	73
dampcompressie	501
datatransferfilters	343
deellast	130, 292, 300, 390
deelontlading	322
degaussing	517
demagnetisatie	349, 350, 352
diacetyleen	373
diamant	328, 329
diëlektrica	9, 44, 45, 46, 48, 287, 319, 321, 322, 323, 324, 325, 328, 441, 442, 467, 473, 474, 476, 477, 525
diode	353, 358, 363, 383, 464, 487, 488, 533
diodelaser	464, 465, 466, 487, 488
dipolen	473
dips	79, 137

E

dissipatie	54, 364, 508
distributiespanning	127, 128, 129
distributieverliezen	252
domotica	140, 146
doorlaatgedrag (halfgeleiders)	354, 356, 357, 361
doorslagspanning	533
doorslagveldsterkte	321, 322, 347
dotering	343, 344, 433
draaggolf	361
draaispoelmeter	349
draaistroomaandrijvingen	361
draaistroommachine	270
drain	357
droogmethoden	157, 474, 476, 488, 507
drukgasisolatie	329
dubbele-laagtechnologie	442
dwaarsregeltransformator	199
eilandbedrijf	93, 246
electriciteitswet	159, 170
elektrode	437, 443, 444, 484, 514, 521
elektrodepositie	521
elektrodialyse	520
elektrolyt	377, 444
elektronenmobiliteit	346
elektronenstraalsterilisatie	525
elektronenstraalverwarming	479
elektronenstralen	10, 477, 481, 516
elektrosorptie	521
emissie	90, 138, 293, 294, 309
emitter	354, 357
energiebalanswoningen	82
energieladder	66
energiemanagement	61, 146
energieopslag	10, 17, 70, 115, 125, 128, 151, 152, 153, 214, 215, 222, 241, 243, 260, 276, 416, 428, 441, 445, 452, 453
energieoverdracht	10, 21, 404, 410, 422, 425, 471
energieprestatienormen	16, 66
ethaan	328
excitonen	372, 373
exergie	111, 490
explosieverdichten	514

F	extruderen	471
	faalmechanismen	420
	Faraday	50, 52, 55, 326, 443
	fasegrens	346
	fasehoek	122, 124, 199, 416, 418
	faserelatie	39
	faseverschuiving	510
	ferriet	351, 352, 513
	ferroxdur	351
	filtercomponenten	138
	flanksteilheid	138
	flicker	125, 133, 136
	fluorescentielampen	457
	flux (magnetische)	340, 348, 349, 423, 451, 505
	folielagen	440
	fosforen	459
	frequentieomzetter	246, 325, 364, 385
	frequentieregelaar	204, 274, 360, 364, 365
	fusiereactie	401
	futures	35
	G	Ga (gallium)
GaAs		345, 346, 347
gasaansluiting		94, 98, 99
gasinfrastructuur		157, 493
gasmotorwarmtepomp		493
gasontlading		458, 480, 486, 522
gasontladingslamp		128, 457, 461
gasreiniging		295, 520
gaswet		393
gate		42, 43, 353, 354, 356, 357, 383, 415
gatentransport		373
gebruikscentra		203, 219
geleidbaarheid		323, 325, 328, 347, 376, 472, 501
geleider		9, 33, 319, 330, 345, 414
geleidingsband		430
gelijkspanningstussenkring		383
gelijkspanningsvoedingen		518
gelijkstroomboogoven		483
gelijkstroomgenerator		50
gelijkstroomkabel		153, 214
gelijkstroommachines		257, 268, 269, 271, 272, 273, 274, 503
geluidsemisatie	146, 230	

	geluidsenergie	498
	generator	122, 172, 239, 240, 282, 382, 383
	geothermie	16, 176
	getijdenenergie	165, 176, 179, 406
	gewichtsverlaging	271, 305, 308
	golfslagenergie	16, 105, 175, 179, 221, 394, 395
	grafietdrager	437
	grafietelektrode	482, 483
	grafietpapier	380
H	hafnium	483
	halfgeleiderlaag	372, 373
	halfgeleiderlegeringen	375
	halfgeleiderschakelaars	20, 45
	harmonischen	136, 358, 363, 415, 417, 418
	He	396
	herladen (batterijen)	435
	homebot	142
	hoogspanning	80, 125, 172, 181, 333, 411, 419, 522
	hoogspanningsgelijkstroom	10, 202, 414
	hoogspanningskabelsystemen	327
	hoogspanningswisselstroom	203
	hoogtoerenmotoren	325
	hoogvermogenstransformatoren	533
	huisautomatisering	139, 143
	huishoudkoelkasten	492
	hydro-elektriciteit	150, 175, 185, 202, 203, 218, 220, 221, 222, 377
	hypercar	308
	hysterese	348, 349, 350, 471
I	ijzerchroom	485
	ijzercircuit	423
	ijzerkern	472
	ijzerlegeringen	485
	ijzermangaan	485
	ijzeroxyden	485
	ijzersilicium	483, 485
	imide	433
	impedantie	123, 124, 126, 135, 136, 412, 528, 532
	impulsgenerator	483
	indampproces	488, 491
	inertiaalopsluiting	402, 403
	infraroodverwarming	478, 479

	injectietransformator	417
	inkoppeling	173, 203
	interconnectie	8, 151, 217, 218, 219
	interferentieproblemen	138
	internet	13, 22, 31
	inversielaag	357
	inverter	40, 107, 153, 182, 185, 358, 360, 361, 369
	invoedingspunten	195
	ionenbundel	402
	ionenconcentratie	444
	ionendichtheid	397
	ionengeleiding	378, 429, 520
	isotherme	391, 393
	ITER	397, 399, 400, 401, 402
	iteratie	54, 304
J	jaarcyclus	18, 85, 86, 102, 103, 144, 183
	jaarverbruik	102
K	kabel	200, 206, 225, 331, 332, 333, 413
	kaliumpcarbonaat	379
	katalysator	292, 380
	kennis	286
	kernfusie	9, 21, 333, 334, 396, 397, 399, 400,
	kevlar	323
	kikker	49, 52
	kleurendisplays	463
	kleurstoflaser	464
	kleurweergave	459
	kobaltoxidekathode	432
	koelcyclus	499
	koelement	46, 500, 501, 502
	koelkanalen	340
	koelkastprincipe	454
	koeltechnologie	34, 334, 343, 495, 496, 498
	koolstofelektrode	432, 444, 521
	koolstofvezel	386
	kortsluiting	62, 75, 77, 78, 224, 412
	koudebuffer	80, 101, 113, 115
	kringstromen	337, 339, 471
	kroesoven	472
	kruissubsidiëring	158
	kunststofkabel	331, 332, 333

L

kunststofmatrix	434
kunstverlichting	68
Kyoto	34, 329
KZnOOH	435
laagohmig	340
laagspanning	18, 75, 76, 87, 89, 116, 142, 144, 254, 295, 416, 417
laboratoriumrendement	370
laden (batterijen)	19, 80, 253, 254, 255, 256, 283, 284, 285, 288, 312
lager	451, 509, 510, 513
lamprendement	457
laserdepositietechnieken	341
laserlichtshows	463
laserpuls	327
leidingverliezen	69
lekspanningsindicatie	275, 312
lekstroomverliezen	441
levensduurkosten	502
levensduurschatting	225
leveringskwaliteit	131
Li	396, 432, 433
lichtboogovens	136
lichtconversie	464, 465, 466
lichtopwekkingsrendement	456, 457, 459
Lieense	452
lijncontact	517
lijnimpedantie	416, 418
LiN	433
LiOH	431
lithiumaluminaat	379
lithiumbatterij	282, 429, 434, 443
lithiumelektrode	432
lithiumoxide	433
loodaccu-technologie	18, 19, 89, 116, 144, 215, 280, 283, 286, 305, 309, 310, 438
Lorentzkracht	412
luchtelektrode	435, 436, 437
luchtmes	467, 507
luchtvaartbrandstof	249
machineregeling	276
magneetmateriaal	9, 21, 45, 319, 348, 350, 351, 386, 505

M

magneten	9, 14, 33, 245, 249, 270, 272, 339, 348, 349, 350, 351, 386, 399, 445, 451, 506, 508, 510, 512, 514, 520
magnetisatie	348, 349, 350, 506, 514
markttrends	515
massakabel	332
mastbeeld	200
metaalfilm	441
metaalgrid	374
metaalhalogenide	457
metaalhydride	290, 430, 431
metaalhydridebatterijen	430, 431
metaalphtalocyaniden	437
microgolfconversie	404
microgolftechnologie	325, 425, 426, 475, 477
microgolftransmissiesysteem	425
middenfrequent	471, 472
middenspanning	18, 88, 125, 148, 253, 310, 332, 411, 418
middenspanningskabels	333
modulekosten	369
monitoring	10, 30, 410, 419, 420
monokristallijn	325, 335, 345, 346
monolaag	371, 372
motorinformatie	275, 312
motorkoppel	269, 274
motorregeling	46, 272
motorstroom	122
motorsystemen	271, 272, 274, 505
multifilament	339, 340
multikristallijn	346
multiplexers	343
naafmotor	271, 272
nachtopslag	185, 190
NaOH	431
NbTi	334, 337, 339, 340, 342, 446, 447
Nd	351, 431
neodymium	271, 272, 350, 351, 386, 464, 465, 466
netbeheer	136, 151, 153, 158, 159, 199, 204
netcapaciteit	73
netfrequentie	106, 131, 382, 387, 518
netimpedantie	135, 137
netstabilisatie	451

N

O

netstations	224, 411
netstructuur	83, 254
netuitval	123
netvervuiling	7, 79, 131, 133, 135, 137, 138, 358, 363
netwerkanalyse	54, 55
netwerkconcept	53, 54, 364
Ni	379, 430, 431, 434
NiCd	283, 284
nikkelanode	431
nikkelfolie	341
nikkel-metaalhydridebatterij	19, 28, 116, 215, 283, 285, 310, 434
nimby	166
niobium	325, 483
NiOOH	430
noodstroomsysteem	360
normspanning	131, 132
NorNed	150, 214
nuldoorgang	77, 359, 412, 413
oliedrukkabel	331
onderbrekingschakeling	514
onderhoudsperiode	194
onderwaterconstructies	223
onderwaterturbines	176
onderzoek	90, 147
ontgassen	483
onthardingsinstallaties	521
ontkoppelmethoden	243
ontladen (batterijen)	18, 87, 89, 99, 116, 117, 275, 280, 283, 285, 312, 420, 424, 431, 433, 434, 438, 443, 445, 522
ontmagnetiseren	505
ontsteekhoek	359, 360, 362
ontsteekstroom	354
ontvangstantenne	405, 425, 426
ontziling	521
opslagtechnologieën	21, 38, 115, 118, 214, 222, 263, 428, 452
opslagverlies	88
opsluitingstechnologie	402
orifice	496, 497, 498
overgangsweerstand	422
overstroombeveiliging	122
oversynchrone	384

P

oxidatiereformers	292
ozonproductie	424
papierisolatie	322, 331
parallel-hybride voertuig	309
pathfinder	248, 249
pellet	402
perovskiet	379
piekcentrale	215
plasma	397, 399, 400, 401, 402, 484
plasmareiniging	520
plasmatoorts	484, 485
plasmaverwarming	467, 484, 485
polyacetyleen	344
polyaniline	344
polykristallijne	325, 328
polymeerbrandstofcel	380
polymeerdisplays	463
polymeerelektrolyt	286, 378
polymeermengsel	323, 373, 374
polypyrrool	344
polythiofeen	344
polyurethaan	476
polyvinilideenfluoride	395
pompaccumulatiesystemen	214
power conditioner	416, 418
proliferatiegevoeligheid	403
propeller, sloopsschroef	11, 511, 513
protonengeleidend	378, 380
pseudocapaciteit	443
pulsbreedtemodulatie	361
pulsbron	522
pulsbuiskoeler	496, 497
pulsasersystemen	446
pulsvoeding	523
puntlas	487

**Q
R**

quantumput-materiaal	376
RABITS	341
radiofrequent	467, 468, 474, 475, 476
Rankine	454
reciprociteit	138
recuperatief remmen	260, 262
recycleerbaarheid	215, 286

redox	430
redoxflowbatterij	117, 215, 429, 438
referentiesinus	361
reflectiefactor	460
reformer	19, 20, 29, 109, 244, 292, 293, 294, 295, 309, 381, 454
regelelektronica	461
regenerator	390, 391, 392, 393, 394, 497
reinigingstechnologie	520
reluctantiemotor	271
remanentie	348, 349, 390, 451
remweerstand	295
resonantieconverters	440
responstijd	443, 446
restlevensduur	225, 419, 421
rijcyclus	275, 276, 277, 279
rijdraad	259, 262
rijregelingen	273, 274, 275
ringnet	191, 195, 221
robijnkristal	464
rotoras	503, 505, 506
rotorhoekstabiliteit	210
rotoroppervlak	165, 172
rotorring	512
ruimtelading	324, 325
ruimtespiegel	405
ruimteverlichting	458
rutiel	325
S samarium	350, 351, 386
samarium-kobalt	514
schakelautomaten	77
schakelcontacten	123
schakeleigenschappen	20, 34, 38, 40, 41, 43, 45, 48, 328, 346, 347, 356, 361, 363, 364
schakeltechnologie	78, 246, 258, 328, 329, 456
scheepsaandrijving	368, 511, 513
seizoeneffecten	85, 112
seizoenopslag	68, 71, 72, 73, 92, 96, 103, 185, 186, 454
sensorstechnologie	114
separatorplaat	377, 378, 380
seriegelijkstroommotor	274



Op satellietwaarnemingen gebaseerde weergave van de aarde, waarbij alle tijdzones bij nacht worden getoond. Bron: The Living Earth inc.



shuntmotor	273, 274
Si	334, 345, 347, 370
SiC	44, 325, 347
signaalprocessor	387
siliciumblokken	346
siliciumcarbide	44, 345, 347
siliciummodulen	369
siliciumplak	341, 374
siliciumtechnologie	369
skuderieten	376
slaapstand (stand by)	517
snellaadtechnologie	19, 253, 255, 283, 284, 285, 286, 309
source	30, 354, 357
spanningsaanpassing	129, 362
spanningsdaling	120, 130
spanningsinverters	361
spanningsomvormer	295
spanningsonderbrekingen	445
spanningsregeling	130, 209
spanningsslingeringen	209
spanningsstabiliteit	116, 131, 211, 212, 213, 215, 385
sperstroom	354
spiegelconcentrators	389
spoelvormen	473
Sr	335, 379
stabiliteit	207, 209, 210, 211, 212, 213
stadsdistributie	20, 252, 311
stadsverwarming	69, 159
stappenmotoren	352
startaccu	254
stator	271, 277, 278, 420, 503, 504, 505, 512
stedebouw	99
stirling-generator	388, 496
stofverwijdering	520
stofzuigermotor	503
stoomreforming	292
stoorbronnen	136
stoorspanning	136
stoorspectrum	138
stoorstromen	136
storingsdiagnosesysteem	273
storingsreserve	194, 195

stranded investments	159
strontiumtitanaat	325
strooiveld	447
stroombegrenzers	20, 284, 335, 342, 347
stroomdichtheid	39, 42, 43, 203, 333, 334, 335, 337, 338, 340, 341, 342, 432, 437, 482
stroomverdeling	198, 331
stroomverdringingseffect	330
stroomversterker	354, 356
stuurelektrode	354
stuurelektronica	328
stuurstroom	354
substraat	341, 345
subtransmissie	203
supercondensator	10, 19, 45, 283, 286, 287, 288, 289, 295, 307, 313, 428, 440, 441, 443, 444
supergeleider	341
supernet, supergrid	17, 26, 27, 151, 153, 173, 200, 217, 218, 219, 222
T	
TA (thermoakoestisch)	392, 393, 394, 496, 497, 498, 499, 500
tandemstructuur	370
tantaal	483
teerfracties	525
tegenfase	417
tegenkoppel	279
telecom	105, 128, 140, 141, 142, 147, 148, 162, 326
terugkoppelcircuit	393
terugleveren	70, 72, 73, 233, 262, 264
teruglevertarief	93, 104
tesla	51, 52, 333, 340, 348, 445, 447, 448, 514
TGV	260, 261
thyristor	39, 43, 124, 129, 273, 353, 354, 357, 360, 362, 365, 382, 414, 415, 470
Ti	399
titaniumdioxide	371, 372, 485
toerenregelingen	211
toerentalreductie	279
tokamak	399, 401, 402, 403
tolueenverwijdering	523
toortsgas	485

	tractiebatterijen	282
	tractiesysteem	259
	tramweganet	268
	transformatiestappen	191
	transformator	17, 51, 114, 127, 135, 191, 194, 221, 358, 363, 399, 423, 424, 482, 514, 517, 533
	transiënten	123, 133, 211, 212
	transistor	39, 328, 346, 357, 512
	transmissieverliezen	460
	transportverliezen	412
	treinaandrijving	260
	trenchtechnologie	357
	tritium	396, 399
	trommeldroger	473
	tuinlampen	114
	turbine	210, 382, 384
	twaaalfasen-spanning	360
	tweerichtingscommunicatie	80
U	uitwisselingscontract	199
	ultraviolet technologie	467, 480, 481
	utiliteitssector	491, 492
V	veldanalyse	55, 56
	veldbenadering	272, 364
	veldenergie	503
	veldgeleiding	343
	veldinversie	324, 325
	veldregelingen	211
	veldsynthese	52, 55, 56
	ventilatielucht	67
	ventilatorbedrijf	382
	verbrandingsmotorhybride voertuigen	290, 292
	verbrandingsmotorvoertuigen	268, 310
	verbruikscentra	179, 411
	verdeelstations	411
	vergiftingsinstallatie	106
	verkabeling	223, 332
	verlichting	456, 459, 460, 461, 462
	vermaakindustrie	463
	vermaasd net	83, 123, 145
	vermogensbalans	79, 81, 85, 103, 120, 122
	vermogensbatterij	245
	vermogenshalfgeleiders	41, 45, 48, 52, 54, 124, 357

vermogensregeling	271, 273, 276, 306, 308, 383, 470
vermogensschakelaars	42, 260, 264, 411
vermogensstabilisatie	213, 222
verouderingsexperiment	420
verstromen	167, 172, 223
vervoersconcepten	20, 229, 236, 238, 244, 311
verwarming	146, 391, 471
verzamelrail	258
vezelvormende mengsels	323
vlamboog	422
vliegtuigtechnologie	305
vliegwiel	21, 117, 337, 449, 450
vloerverwarmingssysteem	169
voedingsstations	411
voertuigconcept	8, 237, 239, 244, 245, 307, 311
voertuigdynamica	279
voertuiggeleiding	8, 230, 296, 300, 302, 311, 313
voertuigkarakteristieken	21, 311
vonkersie	483
vonkvorming	422, 424
voorbeeldwijk	7, 18, 91, 92, 102, 103, 104
voorschakelapparaat	457, 461
vraagcentra	17, 222
vraagpatronen	85, 188, 254
vraagpiek	61, 99, 104, 105, 154
waferstepper	38
warmteafgiftesystemen	146
warmtebehandeling	471, 477, 481, 487
warmtedissipatie	334
warmtedistributie	65, 69, 70, 71, 98
warmtegeleidend	146, 328
warmteopslag	68, 70, 71, 92
warmteoverdracht	389, 390, 473
warmtewinning	144, 168, 454
waterkrachtreservoirs	190
waterkrachtvermogen	196, 200
waterschommel	175
waterstofisotopen	396, 399
waterstofmotoren	250
waterstofopslag	72, 73
waterstofpijpleiding	188, 190
waterstofproductie	190

W

weekijzers	533
weerstand	501, 521, 526, 528, 529, 530, 531
weerstandregeling	273, 295
weerstandsverliezen	333
weerstandsverwarming	114, 157, 467, 469, 470, 471, 490
wegwerpelektronica	344
wielslipbeheersing	279
wijkcentrale	109
wijktype	92, 104, 105, 107
wijkverwarmingssystemen	69
windaanbod	167, 218, 382
windcondities	136
windenenergie	108, 152, 166, 170
windturbineparken	105, 156
wisselgelijkrichter	360
wisselrichter	358, 360
wisselspanningsfrequentie	532
wisselspanningsinsteller	362
wisselstroomboogoven	482, 483
wisselstroomgenerator	51
wisselstroommachine	269, 270, 271
wisselveld	334
woestijnland	217
woningisolatie	109
wooncluster	99
YBaCuO	334, 337
zeekabels	219, 223
zelfontlading	280, 287, 430, 431, 436, 438, 444
zelfregelende	140
zelfvoorzienend	72, 92, 98
zenderafstemgeheugen	517
zendvermogen	248
zink	436
zirkoniumoxide	378, 379
zoninstraling	67, 112, 129, 168, 174, 180, 426
zonne-energiecentrale	405
zonthermische	72, 218
zuidoriëntatie	18
zuigfilters	417
zuurstofelektrode	437
zuurstofproductie	437
zuurstofreductie	437

Y
Z



Het belang van elektriciteit als energiedrager zal in de komende decennia verder toenemen. Niet alleen omdat elektriciteit zo handig is, maar ook omdat elektriciteit goede uitgangspunten biedt voor energiebesparing en duurzame opwekking.

Dit boek geeft aan waarom, en biedt een overzicht van nieuwe ontwikkelingen in elektrische technologie. Veranderingen in de woonwijk zoals toenemende elektrificatie, zelfopwekking, opslag, besparing en tweewegverkeer worden beschreven.

Ook bespreken we zaken zoals toenemende uitwisseling en het ontstaan van een supernet op internationaal niveau. Bij de toekomstvisies op het gebied van vervoer blijkt dat dit door hybride en elektrische voertuigen zuiniger, betrouwbaarder en stiller kan worden.

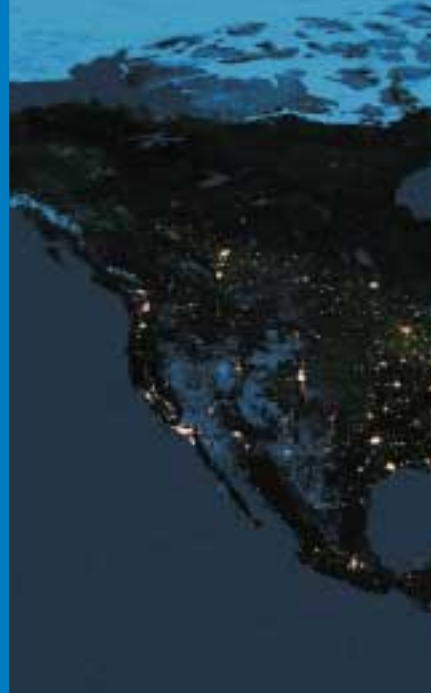
De vermogenselektronica krijgt vanwege haar rol als sleuteltechnologie speciale aandacht.

Het tweede deel van het boek geeft een algemeen overzicht van technologieën die een rol kunnen spelen in de elektriciteitshuishouding van de komende decennia.

Naast materialen en componenten worden meer dan 70 technologieën behandeld op het gebied van opwekking, transport, distributie, opslag en gebruik van elektriciteit.

Dit boek is een speciale jubileumuitgave ter gelegenheid van het 30-jarig bestaan van STT.

Het is het resultaat van een gezamenlijke inspanning van 77 deskundigen van kennisinstituten, universiteiten, bedrijfsleven en overheid.



ISBN 90-804496-2-8



9 789080 449626