Stichting
Toekomstbeeld
der Techniek

Elektriciteit in perspectief

'energie en milieu' in de industrie

Redactie: ir. E.W.L. van Engelen

Samsom

STT 53

ELEKTRICITEIT IN PERSPECTIEF

'energie en milieu' in de industrie

Stichting
Toekomstbeeld
der Techniek

De Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), in 1968 opgericht door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, heeft als doel:

- het van de ingenieurswetenschappen uit bestuderen van mogelijke toekomstige technische ontwikkelingen, in samenhang met andere maatschappelijke ontwikkelingen
- het op ruime schaal bekend maken van de resultaten van die studies om daarmee bij te dragen tot het verkrijgen van een meer integraal beeld van de toekomstige Nederlandse samenleving.

STT richt zich daarbij tot het bedrijfsleven, de overheden, het onderwijs en de geïnteresseerde burger.

Het adres van STT is Prinsessegracht 23, Postbus 30424, 2500 GK Den Haag, telefoon (070) 391 98 56.

ELEKTRICITEIT IN PERSPECTIEF

'energie en milieu' in de industrie

Redactie: ir. E.W.L. van Engelen

1992

Samsom BedrijfsInformatie bv, Alphen aan den Rijn/Zaventem

Omslagontwerp: De Boer & Van Teylingen

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Elektriciteit

Elektriciteit in perspectief : 'energie en milieu' in de industrie /
red.: E.W.L. van Engelen. – Alphen aan den Rijn [etc.] :
Samsom BedrijfsInformatie
Met lit. opg.
ISBN 90-14-04715-0
NUGI 855
Trefw.: industrie ; elektriciteit / energie en milieu.

D/1992/5640/042

© MXMII 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 reproduktie(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 één of meer pagina's is een vergoeding verschuldigd. Voor inlichtingen betreffende de hoogte en afdracht van de vergoeding kan men zich wenden tot Stichting Reprorecht Amstelveen.

Inhoud

1. Inleiding **11**

1.1 Techniek - bedreiging èn bescherming van het milieu 11
1.2 Werkwijze studie 13
1.3 Conclusies 17

2. Energie, milieu en economie **17**

2.1 Inleiding 17
2.2 Trends in de industriële energievoorziening 18
2.2.1 Energievraag en brandstofinzet 18
2.2.2 Elektriciteitsvraag en inzet van warmte-krachtvermogen 21
2.2.3 Structuur van de sector en energie-intensiteit 22
2.2.4 Energie- en elektriciteitsbesparing 24
2.2.5 Industriële energievoorziening en milieubelasting 27
2.3 De ontwikkeling van warmte-krachtvermogen in Nederland 28
2.3.1 Inleiding 28
2.3.2 Aanpak 30
2.3.3 Wijziging randvoorwaarden 32
2.3.4 De voordelen van warmte-krachtkoppeling 33
2.4 Milieu-aspecten: decentrale versus centrale opwekking van elektriciteit 35
2.4.1 Inleiding 35
2.4.2 Verzuring en smog 35
2.4.3 Mondiale problematiek (broeikas-effect) 37
2.4.4 Elektrificatie van de samenleving 39
2.4.5 Conclusies 40
2.5 Beleidsinstrumenten 41
2.5.1 Inleiding 41
2.5.2 Directe regulering 42
2.5.3 Economische instrumenten 43
2.5.4 Communicatieve instrumenten 44
2.5.5 Rol van de nutsbedrijven in het energiebeleid 45
2.5.6 Internationale aspecten 46
2.5.7 Milieu en toekomstige energieprijzen 46
2.6 Milieubeleid en economie: de visie van een energie-intensieve industrie 47
2.6.1 Inleiding 47
2.6.2 De rol van de technologische ontwikkeling 48
2.6.3 Rentabiliteit van milieu-investeringen 48

2.6.4 Regulerende heffingen 49
2.6.5 Bedrijven nemen het voortouw 50
2.6.6 Convenanten nader beschouwd 52

3. Efficiënte toepassing van elektriciteit in de industrie 55

3.1 Inleiding 55
3.2 Elektrische technieken ter bestrijding van milieuvervuiling 57
3.2.1 Elektrolyse 57
3.2.2 Elektrofiltratie 57
3.2.3 Centrifugeren 58
3.2.4 Concentreren 58
3.2.5 Verbranden bij hoge temperatuur 59
3.2.6 Omkeer-elektrodialyse 59
3.2.7 Oxydatie met ozon 60
3.2.8 Magnetische scheiding 60
3.2.9 Elektroflotatie 61
3.3 Elektrotechnologie in de industrie 61
3.3.1 Inleiding 61
3.3.2 Weerstandsverwarming 62
3.3.3 Inductieve verwarming 64
3.3.4 Diëlektrische verwarming 67
3.3.5 Verwarming met infrarood, ultraviolet of elektronenstralen 72
3.3.6 Boogverwarming 77
3.3.7 Plasma-verwarming 79
3.3.8 Laser 81
3.3.9 Luchtmes 81
3.3.10 Mechanische dampcompressie 83
3.4 Gebruik van elektriciteit in de procesindustrie 85
3.4.1 Inleiding 85
3.4.2 Elektriciteit als krachtbron 86
3.4.3 Elektriciteit voor procesbesturing 87
3.4.4 Elektriciteit voor conditionering 87
3.4.5 Elektriciteit voor scheidingsdoeleinden 89
3.4.6 Elektriciteit voor chemische reacties 90
3.4.7 Nieuwe mogelijkheden voor elektriciteit in de procesindustrie 91
3.5 Elektro-aandrijvingen en energiebesparing 92
3.5.1 Inleiding 92
3.5.2 Verliezen van standaardelektromotoren 92
3.5.3 Regelbare aandrijvingen 94
3.6 Efficiënte verlichting in de industrie 97
3.6.1 Inleiding 97
3.6.2 Elektriciteitsgebruik van verlichting in het bedrijfsleven 98
3.6.3 Verlichtingsapparatuur, terugblik en vooruitzichten 99
3.6.4 Werkplekverlichting 105
3.6.5 Automatische besturingsystemen 105

3.6.6 Toepassing van zonlicht voor binnenverlichting 106
3.6.7 Bevordering van efficiënte verlichting 106
3.6.8 Conclusie 106

4. Proceswarmte en energievoorziening in de industrie 107

4.1 Inleiding 107
4.1.1 De energiesituatie in de industrie 107
4.1.2 Verbetering van de energiesituatie in de industrie 110
4.1.3 Energie-opties voor laagwaardige warmte 111
4.2 Warmte-krachtkoppeling in de praktijk 113
4.2.1 De vraag naar proceswarmte 113
4.2.2 Potentiële energiebesparing 114
4.2.3 Mogelijke warmte-krachtconfiguraties 114
4.2.4 Gebruik van restwarmte 116
4.2.5 Bedrijfskosten en voorbeelden 116
4.2.6 Slotopmerkingen 118
4.3 Warmtepompen in de industrie 119
4.3.1 Inleiding 119
4.3.2 Warmtepompen, een overzicht 119
4.3.3 Mogelijke uitvoeringsvormen van warmtepompen 124
4.3.4 Toegepaste warmtepompen in de Nederlandse industrie 126
4.3.5 Markt en potentieel, knelpunten voor implementatie 128
4.3.6 Toekomstperspectief 129
4.3.7 Conclusies 130
4.4 Milieu-aspecten van warmte-krachtkoppeling 131
4.4.1 Inleiding 131
4.4.2 Energie en milieu 131
4.4.3 Uitgangspunten 132
4.4.4 Milieu-aspecten bij gelijke elektriciteitsproduktie 133
4.4.5 Milieu-aspecten bij gelijke warmteproduktie 134
4.4.6 Een nadere beschouwing van de milieu-effecten 135
4.4.7 Conclusies 136
4.5 Exergie: de kwaliteit van energie 137
4.5.1 Achtergronden 137
4.5.2 Kwaliteitsverschil 137
4.5.3 Exergie als kwaliteitsmaat 138
4.5.4 De relevantie van exergie voor warmtelevering 139
4.5.5 Meten met de juiste maat 139
4.5.6 Een voorbeeld 140
4.5.7 Warmte-krachtkoppeling 141
4.5.8 Opgave voor de toekomst 142

5. Nieuwe produktietechnieken van elektriciteit in de industrie 145

5.1 Inleiding door de distributiesector 145
5.1.1 Energievraag industrie (de markt) 145
5.1.2 Milieuwensen overheid (een randvoorwaarde) 147

5.1.3 Energieverkeer in Europa (markt en randvoorwaarde) 148
5.1.4 Energieheffing (een randvoorwaarde) 148
5.1.5 Rol distributiebedrijven 148
5.2 Zonne- en windenergie voor de industrie 150
5.2.1 Inleiding 150
5.2.2 Kenmerken van windenergie 150
5.2.3 Kenmerken van zonne-energie 151
5.2.4 De stand van zaken 152
5.2.5 Milieu-aspecten 153
5.2.6 De industrie 154
5.3 Energie uit biomassa 154
5.3.1 Inleiding 154
5.3.2 Technieken 154
5.3.3 Toepasbaarheid in de industrie 155
5.3.4 Knelpunten 156
5.4 Brandstofcellen 157
5.4.1 Algemeen 157
5.4.2 Historie 158
5.4.3 Karakteristieken van brandstofcellen 158
5.4.4 Typen brandstofcellen 161
5.4.5 De alkalische brandstofcel (AFC) 161
5.4.6 De fosforzure brandstofcel (PAFC) 162
5.4.7 De vaste-polymeerbrandstofcel (PEMFC) 163
5.4.8 De gesmolten-carbonaatcel (MCFC) 164
5.4.9 De vast-oxydebrandstofcel (SOFC) 165
5.4.10 Economische perspectieven 166
5.5 Waterstof als energiedrager 170
5.5.1 Produktie van waterstof 170
5.5.2 Waterstof als restprodukt 170
5.6 Thermionische energieomzetting 175
5.6.1 Inleiding 175
5.6.2 Technisch potentieel 176
5.6.3 Toepassing van thermionische energieomzetters 178
5.6.4 Configuratie van TEO-systemen 179
5.6.5 Rijpheid van het systeem 182
5.6.6 Rendementsverwachting 183
5.6.7 Kostenaspecten 183
5.7 Magneto-Hydro-Dynamische energieconversie 184
5.7.1 Inleiding 184
5.7.2 Werkingsprincipe 184
5.7.3 Stand van zaken 186
5.7.4 Vooruitzichten voor toepassing 190
5.7.5 Ontwikkelingskosten 190
5.8 Nucleaire energie: een toekomstvisie op decentrale opwekking 191
5.8.1 Inleiding 191
5.8.2 Stand van zaken 191
5.8.3 Ontwikkelingen 192
5.8.4 Conclusies 193

Organisatie van de studie 195

STT-publikaties 201

Subsidieverleners STT 205

1. Inleiding

1.1 TECHNIEK – BEDREIGING ÈN BESCHERMING VAN HET MILIEU

De tweede helft van de twintigste eeuw wordt in de industrielanden gekenmerkt door een ongekende welvaart. Na de verwoestingen van de Tweede Wereldoorlog richt men zich op herstel en uitbouw van de materiële levensstandaard. De VS gaan daarin voorop en weten de bevolking, in weerwil van een geldverslindende wapenwedloop met het Oostblok, een maatschappij van overvloed aan te bieden. De overwonnenen in de oorlog, militaire avonturen beu, werpen zich energiek op de opbouw van hun economie en zijn op dat gebied nu leidende machten in de wereld.

De techniek gaat in deze vijftig jaar met sprongen vooruit. Massaproduktietechnieken brengen kostbare consumptiegoederen zoals auto's onder het bereik van allen. De elektronica ondergaat een revolutie en iedereen kan zich veroorloven deel uit te maken van communicatienetwerken. Energie staat in de vorm van aardolie en aardgas in overvloed ter beschikking; de prijs ervan blijft jarenlang verwaarloosbaar. Kunststoffen worden een dagelijkse vanzelfsprekendheid in gebruiksvoorwerpen, industriële halffabrikaten, textielvezels en 'coatings'; de chemische industrie is na de voedingsmiddelenindustrie veruit de grootste in Nederland. De landbouw ten slotte vertoont een opmerkelijke stijging van de produktiviteit; naast de mechanisatie voeren de kunstmeststoffen en geraffineerde bestrijdingsmiddelen de opbrengsten tot ongekende hoogten op.

Aanvankelijk gaat alles goed. Maar twintig jaar na de oorlog doen zich in het natuurlijk milieu onrustbarende verschijnselen voor: het water van de grote meren van het Noordamerikaanse continent is biologisch dood, in de straten van Los Angeles maakt het zonlicht een giftige 'smog' uit de uitlaatgassen, de Westeuropese bossen raken onttakeld en biologen meten er een veel te hoge zuurgraad, chloorfluorkoolstofverbindingen blijken hoog in de stratosfeer boven de Zuidpool de ozonlaag te hebben aangetast, het kooldioxydegehalte van de aardatmosfeer vertoont een voortdurende stijging die op zichzelf genomen tot een temperatuurverhoging op aarde moet leiden.

Er gaan waarschuwende stemmen op. Grote indruk maakt in Nederland en elders het rapport 'Limits to growth', begin jaren zeventig aan de Club van Rome uitgebracht; het sombere perspectief van een hongerende wereldbevolking, een drastisch dalende levensverwachting en een exponentieel toenemende vervuiling kan slechts worden vermeden door een wijze zelfbeperking – in gezinsgrootte, in industriële produktie vooral van wegwerpartikelen – en door het voorkomen van milieuvervuiling en een minutieus hergebruik van grondstoffen. De oliecrisis van

1973 verhoogt de aardolieprijs tot een veelvoud en bepaalt de wereldbevolking bij de lichtzinnige manier waarop zij met energie omspringt. De Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT) publiceert in 1974 een rapport waarin de relatie tussen energie(besparing) en milieu wordt gelegd.

In het begin van de jaren tachtig dringt de ernstigste economische recessie sinds de Tweede Wereldoorlog, vergezeld van grote werkloosheid, de milieubezorgdheid naar de achtergrond. Maar aan het eind van het decennium keert de bezorgdheid terug. De doelstelling 'sustainable growth' uit het rapport 'Our common future' van de commissie-Brundtland (1987) wordt veel geciteerd. Ook in Nederland ontstaat een tweede golf van aandacht voor het milieu. Volgend op het rapport van de commissie-Brundtland en het rapport 'Zorgen voor morgen' van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM) presenteert minister Nijpels in 1988 het Nationaal Milieubeleidsplan (NMP).

Milieu en energiegebruik

De wereld zoekt naar nieuwe technieken om de milieu-aantasting te beperken en de gevolgen te bestrijden. Het NMP stelt dat technologische ontwikkeling een duurzame ontwikkeling behoort te zijn. De consequenties hiervan worden aangegeven met de begrippen energie-extensivering, kwaliteitsbevordering en beheer van de totale levenscyclus van een produkt van produktie tot recycling. STT onderkent de technische uitdaging en besluit een verkenning uit te voeren.

De aard van de technische problemen verschilt sterk per sector. Zo hebben de landbouw, het transport, de afvalverwerking en de energievoorziening elk hun eigen problemen. Daarom wordt besloten de studie in een beperkt kader uit te voeren. Energie is essentieel voor elk produktieproces. Bovendien is energiegebruik een belangrijk beleidsinstrument met betrekking tot het milieu voor zowel overheid als bedrijfsleven. STT geeft daarom het studieproject de titel 'Energie en milieu: energiegebruik in de industrie' mee.

Elektriciteit

Elektriciteit is een 'schone' in grote hoeveelheden beschikbare energie. Schadelijke emissies bij centrale elektriciteitsopwekking op grote schaal zijn goed beheersbaar. Slechts de uitstoot van kooldioxyde bij het gebruik van fossiele brandstoffen lijkt onvermijdelijk; dit is zonder intensieve besparing of het gebruik van kernenergie op dit moment niet op te lossen.

Het rendement van elektriciteitsopwekking kan tegenwoordig bijna 50% bedragen. Het totale energierendement kan door de restwarmte in industriële processen nuttig te gebruiken (warmte-krachtkoppeling) nog worden vergroot. Verder zijn elektrische technieken voorhanden of in een veelbelovende staat van ontwikkeling, waarmee tal van processen in de industrie op een minder milieubelastende wijze kunnen verlopen dan nu het geval is.

De STT-studie richt zich op het industrieel energiegebruik en gaat in de eerste plaats na of meer en efficiënt(er) gebruik van elektriciteit een interessante energiebespa-

ring voor de industrie kan opleveren. Tevens wordt bekeken of het wenselijk is elektriciteit decentraal op te wekken.

1.2 WERKWIJZE STUDIE

STT heeft voor de onderhavige studie een aantal deskundigen in werkgroepen bijeengebracht. Deze werkgroepen hebben elk een van de volgende hoofdstukken onder hun hoede genomen. Hoofdstuk 2 gaat in op de voorziening van de industrie met energie, vooral op de aspecten economie en milieu. Hoofdstuk 3 presenteert een aantal moderne elektrische technieken voor industriële toepassingen. Hoofdstuk 4 is voor een belangrijk deel gewijd aan gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit in de industrie. Hoofdstuk 5 behandelt een aantal alternatieve technieken voor de opwekking van elektriciteit die van belang kunnen zijn voor de toekomst.

De werkgroepleden zijn onder andere afkomstig van ECN, KEMA, Novem, TNO, het ministerie van Economische Zaken, de technische universiteiten, de elektriciteitsmaatschappijen en de grote industrie. In het hoofdstuk 'De organisatie van de studie' staan hun namen vermeld.

De bijdragen in deze publikatie zijn door verschillende deskundigen geschreven en staan min of meer op zichzelf. Verschillen van mening, vooral op politiek-economisch gebied, zijn onvermijdelijk en komen in de publikatie tot uiting.

1.3 CONCLUSIES

Energie, milieu en economie
Het gebruik van fossiele brandstoffen belast het milieu zwaar. De drang om het gebruik van energie te beperken, is de laatste jaren sterk toegenomen. Voor het bereiken van de verlangde besparing zijn wijzigingen van de huidige structuur van energie-opwekking, -distributie en -gebruik nodig. Deze wijzigingen kunnen slechts door een gericht beleid tot stand komen; een beleid dat zowel door de overheid, de industrie als de consument moet worden onderschreven. Actueel is de discussie over de door de regering voorgestelde energieheffing. Deze discussie zal nog enige tijd voortduren; tot vlak voor het moment van het ter perse gaan van deze publikatie zijn de bijdragen geactualiseerd.

Monopolies op nationale energiemarkten zullen naar alle waarschijnlijkheid tot het verleden gaan behoren. Al geruime tijd is de Europese Commissie bezig om het vrije verkeer van energie te bevorderen. Uiteindelijk zullen deze aspecten leiden tot meer concurrentie op de energiemarkt.

Efficiënte toepassing van elektriciteit in de industrie
Elektriciteit is een hoogwaardige energiedrager. De kosten van de opwekking maken elektriciteit in vergelijking met andere energiedragers tot een relatief duur produkt. Dit heeft er toe geleid dat elektriciteit in het verleden alleen dan werd

toegepast, wanneer geen redelijk alternatief voorhanden was. Bij tal van industriële toepassingen echter biedt elektriciteit interessante voordelen: besparing in gebruik van energie en materiaal, verlaging van de produktiekosten, verhoging van de produktkwaliteit en verbetering van de arbeidsomstandigheden.

Ook met betrekking tot de milieuproblematiek is het gebruik van elektriciteit het overwegen waard. Elektrische technieken belasten het milieu minder, omdat de elektriciteit op de plaats van gebruik een schone vorm van energie is. Bovendien kunnen elektrische technieken worden gebruikt om afvalstromen of (rookgas)emissies te reinigen. Daarnaast bieden deze technieken mogelijkheden tot energiebesparing.

Als voldoende aandacht naar het gebruik van elektriciteit voor aandrijvingen en verlichting uitgaat, is het mogelijk ook daar aanzienlijk op het huidige energiegebruik te bezuinigen.

Proceswarmte en energievoorziening in de industrie
Nederland leent zich mede gezien de uitgebreide aardgas-infrastructuur bijzonder goed voor decentrale warmte-krachtkoppeling. De toepassing hiervan leidt tot een aanzienlijke energiebesparing ten opzichte van gescheiden opwekking en daardoor tot een lagere uitstoot van CO_2. De uitstoot van verzurende stoffen is echter juist bij centrale opwekking beter te beheersen.

De rentabiliteit van de investering in warmte-krachtkoppeling kan worden verbeterd door samenwerking, bijvoorbeeld in joint ventures. Samenwerking tussen elektriciteitsdistributiebedrijven, elektriciteitsproduktiebedrijven en warmtegebruikers bevordert de dimensionering van warmte-krachtinstallaties op de warmtevraag; de te veel geproduceerde elektriciteit kan immers worden teruggeleverd aan het net. Dimensioneren op de warmtebehoefte leidt uiteindelijk tot verdere energiebesparing.

Over de energie- en milieu-aspecten van warmte-krachtkoppeling kunnen duidelijke kwantitatieve uitspraken worden gedaan vanuit een integrale beschouwing, waarin beide produkten (elektriciteit en warmte) en beide aspecten (energie en milieu) worden betrokken.

Om industriële afvalwarmte (opnieuw) op een bruikbaar temperatuurniveau te brengen, kunnen warmtepompen worden toegepast. Er is in de Nederlandse industrie een groot potentieel voor de warmtepomp; daarvan is op dit moment minder dan 5% gerealiseerd. Damprecompressiesystemen en gesloten elektrische warmtepompen worden reeds met succes toegepast; voor andere typen levert de stand der techniek nog problemen op. Demonstratieprojecten kunnen van grote betekenis zijn bij het onder de aandacht brengen van de warmtepomp.

Nieuwe produktietechnieken van elektriciteit in de industrie
Windmolens, zonnecellen en brandstofcellen zijn werkelijkheid geworden. Windmolens kunnen tot circa 5% van de totale elektriciteitsbehoefte dekken. Zonnecellen zijn tot nu toe te kostbaar voor inzet op grote schaal, maar in sommige

kleinschalige situaties reeds rendabel. De fosforzure brandstofcel is reeds in de handel; de prijs per kW is hoog, maar deze cel kan een concurrent van de verbrandingsmotor worden voor tractie op plaatsen waar strenge emissienormen gelden. Directe omzetting van warmte in elektrische energie volgens een thermionisch of een Magneto-Hydro-Dynamisch principe wordt in proefinstallaties onderzocht.

2. Energie, milieu en economie

2.1 INLEIDING

Energie is noodzakelijk voor elke vorm van leven. Maar de bestaande energiebronnen leveren haar in vele gevallen niet in de juiste vorm. Energieconversies zijn daarom essentieel. Daarbij komt dat energie vaak gebruikt wordt op plaatsen waar zij niet beschikbaar is. Transport is dan nodig. Ook is energie veelal beschikbaar op een moment dat zij niet gevraagd wordt en omgekeerd, zodat opslag van energie nodig is. Deze handelingen – conversie, transport en opslag – vormen het zogenaamde 'energiesysteem'. Het energiesysteem beschrijft alle acties die nodig zijn om energie, uitgaande van de grondvorm, in de juiste hoeveelheid en vorm en op het juiste moment aan de eindgebruiker aan te bieden.

Het energiesysteem is onderworpen aan een groot aantal randvoorwaarden. Een van de meest recente beperkingen is de milieubelasting. De aandrang om het gebruik van energie te beperken, is de laatste jaren sterk toegenomen. Het broeikas-effect en de zure regen zijn zeer bekend geworden.

Als veroorzakers van de zure regen zijn drie stoffen aan te wijzen: SO_2 dat wordt gevormd als de brandstoffen zwavel bevatten, NO_x dat ontstaat ten gevolge van een hoge verbrandingstemperatuur, en ammoniak afkomstig van de agrarische sector.

De emissie van kooldioxyde (CO_2) bij gebruik van fossiele brandstoffen wordt op lange termijn als het belangrijkste probleem gezien. Deze emissie leidt misschien tot aanzienlijke klimaatwijzigingen op aarde. Maar hier doet zich een merkwaardig probleem voor. Tegen de tijd dat er zekerheid bestaat of er inderdaad ten gevolge van de uitstoot van grote hoeveelheden CO_2 een ongewenst broeikas-effect optreedt, is het te laat om er iets tegen te doen. Maar als we nu ingrijpen – hetgeen overigens alleen rigoureus en mondiaal tot werkelijk succes kan leiden – zullen we nooit weten of de ingreep ook inderdaad nodig was.

De meest directe wijze om de CO_2-emissie te beperken, is het verminderen van het gebruik van fossiele brandstoffen. Het ligt dus voor de hand de mogelijkheden van besparing na te gaan. Een bijkomend voordeel is dat daarmee ook de uitstoot van veroorzakers van zure regen wordt verminderd.

Voor het bereiken van de verlangde besparing zijn wijzigingen van de huidige energiestructuur nodig. Deze wijzigingen kunnen slechts door een gericht beleid tot stand komen. Het is dus belangrijk, naast het inventariseren van de technische opties, na te gaan hoe een gericht energie- en milieubeleid kan leiden tot meer

besparingen. Dit beleid moet zowel door de overheid als door de industrie en de consument worden onderschreven.

Essentieel is dat het beleid grotendeels wordt bepaald door wat de afnemers van energie vragen. Energie wordt alleen daar geleverd waar zij wordt gevraagd. De afnemers zijn onder andere de miljoenen huishoudens en de miljoenen producenten van vele produkten. Er zijn dus veel actoren in het wereldenergieveld en dat maakt een samenhangend beleid zeer moeilijk.

Deze studie is gericht op het industrieel energiegebruik, en daarmee dus op een beperkt deel van het energiesysteem. Uitgangspunt is, na te gaan of het efficiënt(er) gebruik van elektrische energie voor de industrie een interessante besparing kan opleveren. Tevens is beschouwd of het wenselijk is de elektriciteit decentraal op te wekken.

Dit hoofdstuk stelt een discussie over energie, milieu en economie aan de orde. In paragraaf 2.2 wordt aan de hand van statistische gegevens het industriële energie- en elektriciteitsgebruik door de jaren heen beschouwd. Daarbij wordt nagegaan of er bepaalde tendensen zijn waar te nemen en of deze wellicht in de toekomst zijn door te trekken.
Actueel is de warmte-krachtkoppeling in de industrie. Nederland leent zich, gezien de uitgebreide aardgas-infrastructuur, als geen ander land voor deze vorm van decentrale gecombineerde opwekking. Desalniettemin is er nog altijd discussie over het wel of niet uitbreiden van het warmte-krachtpotentieel. Merkwaardig genoeg worden er argumenten gebruikt die voor een deel op milieutechnisch gebied liggen. In paragraaf 2.3 worden de mogelijkheden van de warmte-krachtkoppeling in Nederland uitvoerig besproken. In paragraaf 2.4 worden de milieu-effecten van centrale en decentrale opwekking met elkaar vergeleken.

Op de instrumenten die de overheid bij het energie- en milieubeleid ter beschikking staan, wordt ingegaan in paragraaf 2.5. In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk wordt de visie van een energie-intensieve industrie op de aangekondigde beleidslijnen verwoord.

2.2 TRENDS IN DE INDUSTRIËLE ENERGIEVOORZIENING

dr. J.J.C. Bruggink

Het industrieel energie- en elektriciteitsgebruik vertoont zekere trends. In deze paragraaf worden enige voor deze studie relevante getallen en trends toegelicht [1, 2 en 3].

2.2.1 ENERGIEVRAAG EN BRANDSTOFINZET

Historische groei van de energievraag
Het nationaal energiegebruik is in de afgelopen 25 jaar vooral gestegen in de periode

tot 1980, maar wordt de laatste 10 jaar meer gekarakteriseerd door conjuncturele schommelingen dan door structurele groei. Zoals in fig. 2.1 te zien is, geldt dit evenzeer voor de industrie. De groeitrend van het energiegebruik in de industrie was in de periode 1965-1980 ongeveer 6% per jaar. In de afgelopen 10 jaar volgden zware conjuncturele schommelingen, en vervolgens een afzwakking van de groeitrend tot rond 2% per jaar. Het gebruik in 1990 was bijna hetzelfde als in 1980 (ongeveer 960 PJ). De gebruikte cijfers hebben betrekking op de netto-aankoop van energiedragers door de industrie (verbruikssaldo). Men moet rekening houden met het feit dat een deel van deze aankoop wordt gebruikt als grondstof of als brandstof voor de gecombineerde opwekking van warmte en kracht (warmte-krachtkoppeling).

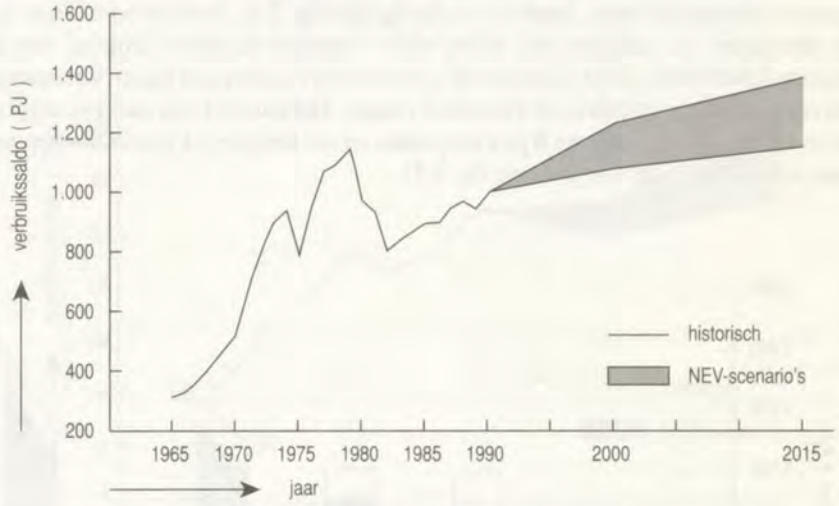


Fig. 2.1 Verbruikssaldo industrie (1965-2015)

Soort brandstof

In 1965 was de inzet van olieprodukten voor energiedoeleinden nog aanzienlijk. Olie is steeds verder verdrongen door aardgas, vooral na de oliecrises van de jaren zeventig. Het aandeel van olie in het verbruikssaldo was in 1965 nog bijna 60%, terwijl aardgas een aandeel had van slechts 6%. In 1980 was het aandeel van olie gedaald tot 40%; olie wordt dan voornamelijk als grondstof gebruikt. De jaren voor 1980 werden dus gekenmerkt door competitie tussen gas en olie. Na 1980 kreeg aardgas een monopoliepositie voor ondervuring, die nog versterkt werd door de geleidelijke uitbreiding van de warmte-krachtkoppeling. In de periode 1980-1990 hebben slechts geringe verschuivingen in de brandstofinzet plaatsgevonden. Alle brandstoffen bezetten een specifieke deelmarkt, waarop slechts in geringe mate sprake is van concurrentie. In de toekomst kan de concurrentie van aardgas met elektriciteit vooral voor specifieke toepassingen een grotere rol gaan spelen. Deze competitie zou belangrijker kunnen worden door de steeds verdere terugdringing van de stoomvraag en door strengere milieu-eisen.

Vooruitblik tot 2015

De geschetste ontwikkelingen van 1965 tot 1990 tonen aan dat in 25 jaar veel veranderingen mogelijk zijn. Sommige van deze ontwikkelingen, zoals de grotere penetratie van aardgas, konden in 1965 redelijk worden voorzien. Andere ontwikkelingen, zoals de trendomslag in de energievraag rond 1980, lijken moeilijker voorspelbaar. Een vooruitblik tot 2015, zoals in de Nationale Energieverkenningen, probeert deze zekerheden en onzekerheden in kaart te brengen.

Voor illustratieve doeleinden zijn in dit hoofdstuk de cijfers van het 'Global Shift'-scenario (relatief lage groei) en het 'European Renaissance'-scenario (relatief hoge groei) gebruikt. Uit beide scenario's kan men twee conclusies trekken. In de eerste plaats zwakt de structurele groei van de industriële energievraag verder af tot hoogstens 1,5% per jaar. Energiebesparingen compenseren de economische groei in belangrijke mate, maar niet volledig (zie fig. 2.2). In de tweede plaats zet de penetratie van aardgas toch door, soms vanwege de sterke stijging van de warmte-krachtinzet, soms vanwege de concentratie van de groei buiten de sectoren die olieprodukten en kolen als grondstof vragen. Het aandeel van aardgas stijgt in de scenario's met ten minste 6 procentpunten en ten hoogste 14 procentpunten per jaar, vooral ten koste van olie (zie fig. 2.2).

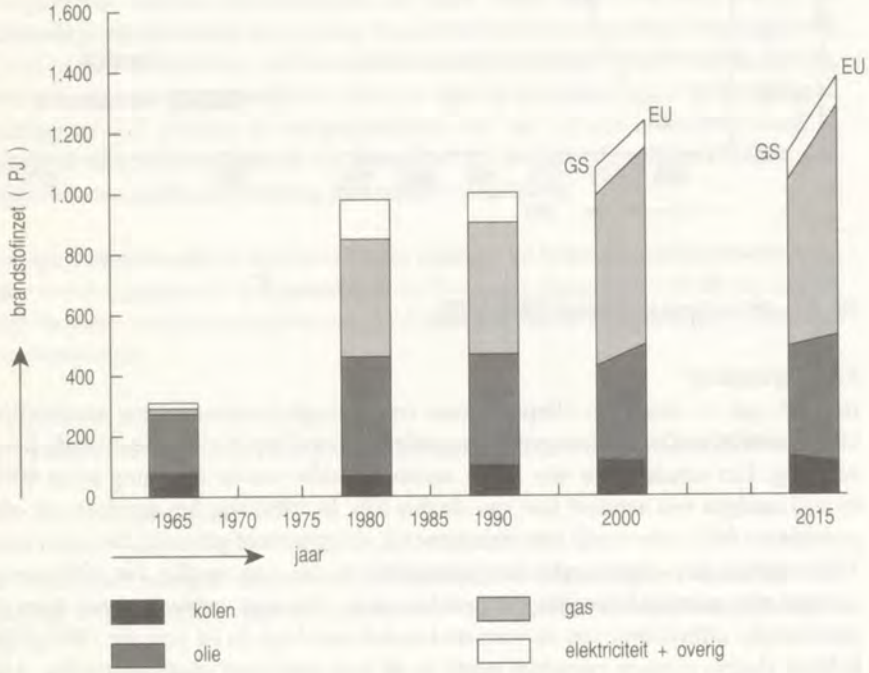


Fig. 2.2 Brandstofinzet industrie (1965-2015)
GS = 'Global Shift'-scenario, EU = 'European Renaissance'-scenario.

2.2.2 *ELEKTRICITEITSVRAAG EN INZET VAN WARMTE-KRACHT-VERMOGEN*

Historische groei van de elektriciteitsvraag

De nationale elektriciteitsvraag vertoont in de afgelopen 25 jaar een stijgende lijn, alhoewel het tempo van de groei afneemt. In 1965 lag het nationaal jaarlijks gebruik op 22 TWh; momenteel ligt het rond de 70 TWh. De trend in het industriële elektriciteitsgebruik is dezelfde (zie fig. 2.3). De stijging liep hier van 9 TWh in 1965 via 27 TWh in 1980 naar 32 TWh in 1990. Een gemiddelde groei in de periode 1965-1980 van meer dan 7% per jaar, die in de periode 1980-1990 terugviel naar minder dan 2% per jaar. Een opvallend verschil met de totale industriële energievraag is de veel geringere invloed van conjuncturele schommelingen. De laatste jaren is er weer duidelijk sprake van een aantrekkende groei.

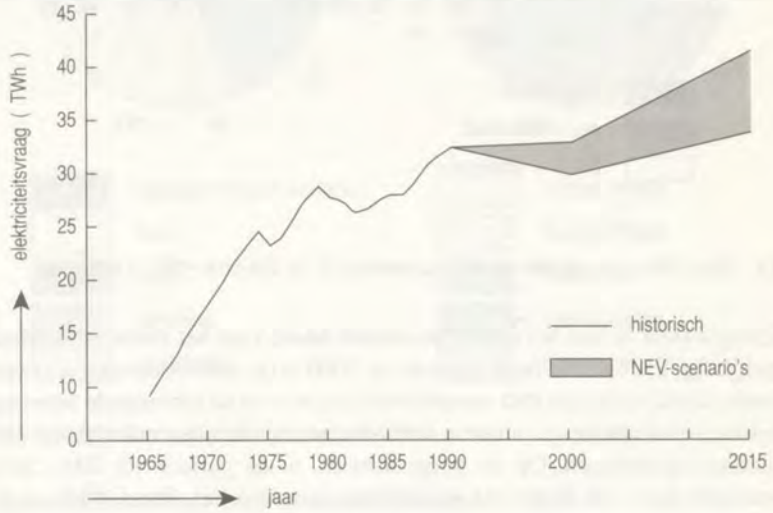


Fig. 2.3 Elektriciteitsvraag industrie (1965-2015)

Ontwikkeling van warmte-krachtvermogen

Een groeiend deel van de industriële elektriciteitsvraag wordt gedekt door warmte-krachtinstallaties. Aan het einde van de jaren zeventig was de situatie op de markt voor warmte-krachtopwekking vrij stabiel. Het aandeel van de aftapturbines en tegendrukturbines op deze markt lag daarbij boven de 80%. In de jaren tachtig veranderde deze situatie drastisch. De omvang van het vermogen nam gestaag toe, terwijl het aandeel van gasturbines en stoom- en gasturbines (STEG) steeg tot meer dan 70% (zie fig. 2.4). Omdat aan het einde van deze periode tevens het aantal draaiuren toenam, was de groei van de produktie nog sterker.

Vooruitblik tot 2015

Kijken we naar de veronderstellingen over het verloop van de industriële elektriciteitsvraag zoals opgenomen in de Nationale Energieverkenningen, dan wijkt het

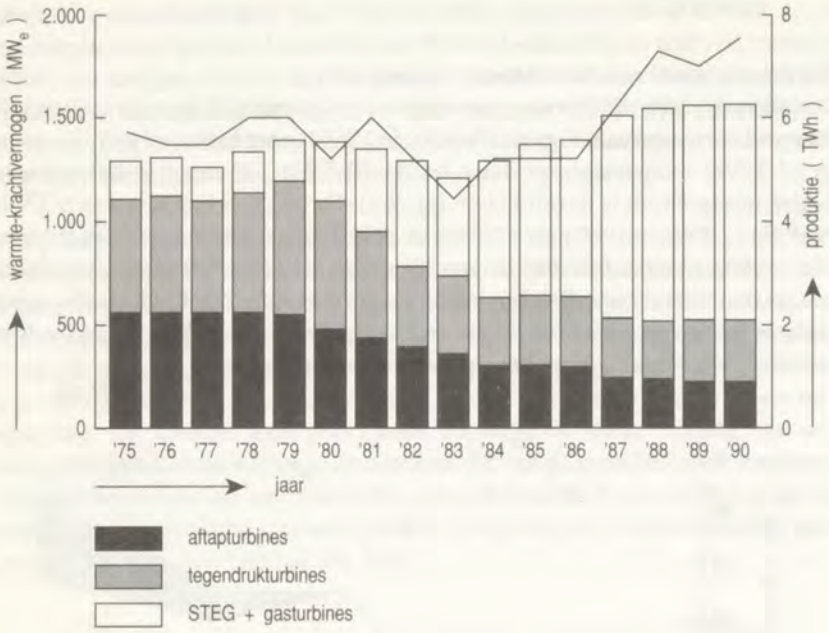


Fig. 2.4 Gecombineerde warmte- en krachtopwekking in de industrie (1975-1990)

beeld nogal sterk af van het eerder geschetste beeld voor het totale verbruikssaldo (vergelijk fig. 2.1 en 2.3). In de periode tot 2000 is de groei minimaal tot negatief. Dit heeft vooral te maken met veronderstellingen over de afnemende omvang van de elektriciteitsintensieve industrie in Nederland en het aanvankelijk succes van besparingsinspanningen. Op de lange termijn, in de periode na 2000, zien we daarentegen weer een duidelijke versterking van de groei. Rond 2000 zit er een neerwaartse knik in de groeicurve voor wat betreft de totale energievraag, en een opwaartse knik in de groeicurve voor wat betreft de elektriciteitsvraag. De bijdrage van het warmte-krachtvermogen aan deze vraag loopt in de verschillende scenario's nogal uiteen. In het lage scenario is er nauwelijks sprake van groei, terwijl in het hoge scenario het geïnstalleerd vermogen stijgt van ruwweg 1.700 MW_e naar meer dan 4.000 MW_e in 2015. Hierbij inbegrepen is een inzet van warmte-krachtvermogen voor proceswarmte (geen stoom) van bijna 400 MW_e en een inzet van brandstofcellen van 600 MW_e.

2.2.3 STRUCTUUR VAN DE SECTOR EN ENERGIE-INTENSITEIT

Huidig patroon van de energievraag

De energie-intensieve industrie heeft een groot aandeel in de Nederlandse industrie. Deze industrie heeft zich vooral ontwikkeld door enerzijds de geografische positie van Nederland als invalspoort voor grondstoffen en anderzijds de beschikbaarheid van aardgas. De sector chemie en de sector basismetaal nemen samen reeds 77%

van het energiegebruik voor hun rekening (zie fig. 2.5 bij a.). Ook de voedings- en genotmiddelenindustrie, bouwmaterialen en papier en karton zijn van groot belang (samen 16%). De overige industrie neemt ten slotte een aandeel in van niet meer dan 7%.

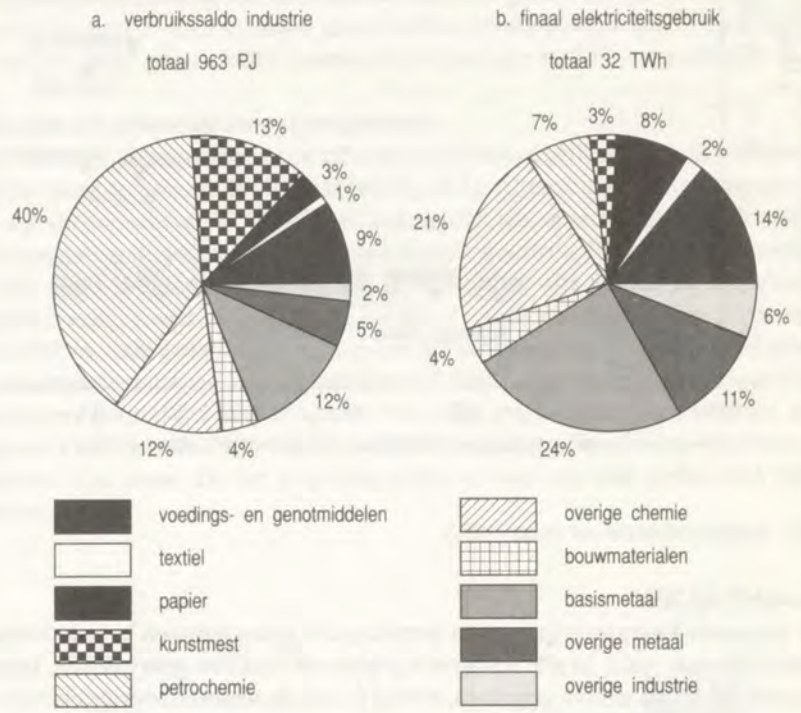


Fig. 2.5 Energiegebruik per industriële sector (1990)

Huidige samenstelling van de elektriciteitsvraag

Het beeld van de sectorale samenstelling van de elektriciteitsvraag is iets minder geprononceerd dan dat van de energievraag als totaal (zie fig. 2.5 bij b.). De sectoren chemie en basismetaal nemen hier maar 55% van de totale vraag in. Dit ligt ten dele aan de meer gespreide toepassing van elektriciteit. Bovendien doet de grove indeling van industriële sectoren zoals gehanteerd in energiestatistieken, onvoldoende recht aan de grote spreiding van elektriciteitsgebruik in deze sectoren. Bedrijfstakken waar de elektriciteitskosten een fors aandeel van de totale kosten uitmaken, zijn elektrochemie (chloor/alkali, fosfaat en siliciumcarbide), kunstmestchemie, elektrostaal, primair aluminium, zink, papier en karton. Momenteel vormen elektrolyse (bijna 30%), mechanische aandrijving (bijna 25%) en pompen (bijna 20%) de belangrijkste categorieën toepassingen. Daarnaast zijn compressie en ventilatie van belang. Verlichting neemt niet meer dan 5% in beslag, thermische toepassingen slechts enkele procenten.

Energie- en elektriciteitsintensiteit per sector

Fig. 2.6 geeft een beeld van de energie- en elektriciteitsintensiteit per sector in 1990. Deze intensiteiten zijn gedefinieerd als respectievelijk het energieverbruikssaldo

per eenheid produktie en het finaal elektriciteitsgebruik per eenheid produktie. De grote verschillen tussen de sectoren chemie en basismetaal enerzijds en de sectoren overige metaal en overige industrie anderzijds springen er duidelijk uit.

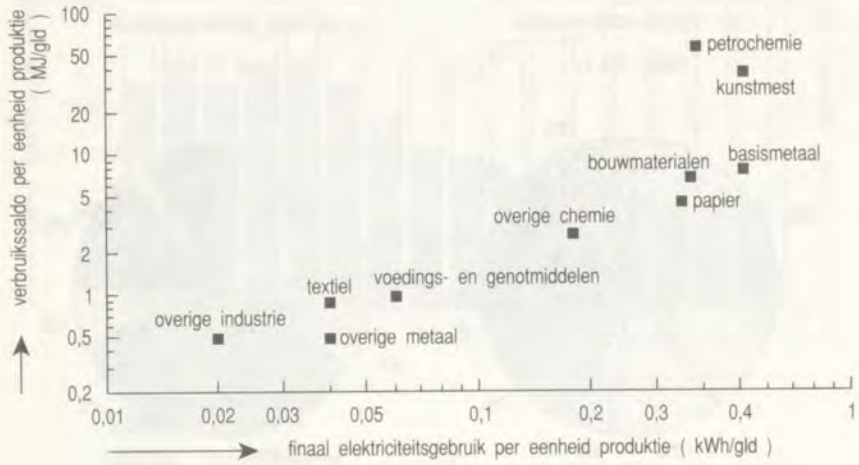


Fig. 2.6 Energie-intensiteit per sector (1990)

Vooruitblik tot 2015

In de Nationale Energieverkenningen worden grote veranderingen in de industriesectoren verondersteld. In alle scenario's groeien de sectoren petrochemie, kunstmest en basismetaal slechts langzaam, terwijl vooral de sectoren overige chemie en overige metaal sterk groeien. Deze twee subsectoren omvatten vooral verwerkende bedrijven met een matige energie-intensiteit. In feite dragen structuurwijzigingen zo eveneens bij aan de afnemende groei.

2.2.4 ENERGIE- EN ELEKTRICITEITSBESPARING

Evaluatie van energiebesparingen

Energiebesparingen kunnen op verschillende manieren tot stand komen, namelijk door

- minder te produceren (volume-effect);
- minder energie-intensieve produkten te produceren (structuureffect);
- efficiëntieverbetering van de finale energievraag per produkt (besparingseffect in enge zin);
- efficiëntieverbetering van de energieconversie (conversie-effect).

Besparingen worden meestal uitgedrukt in procenten. Voor een juiste interpretatie moet duidelijk zijn welke vormen van energiebesparing in de berekening meegenomen zijn en welk jaar als referentiejaar is gekozen. Voor een evaluatie van energiebeleid zijn het volume-effect en het structuureffect van minder belang, omdat deze effecten geen beleidsdoelstelling zijn. Het conversie-effect heeft vooral

betrekking op de inzet van meer warmte-krachtvermogen. Evaluatie van dit effect vereist een veronderstelling over de vermeden brandstofinzet in de centrale elektriciteitsproduktie. Meestal worden besparingsdoelstellingen geformuleerd in termen van het besparingseffect in enge zin. Zo wordt in de Nota Energiebesparing een besparingsdoelstelling van 15% voor de industrie genoemd. Dit streefcijfer betreft de finale energievraag inclusief grondstoffen per eenheid produkt. Voor de finale vraag exclusief grondstoffen wordt een percentage van 20% gehanteerd.

Bereikte en verwachte energiebesparingen

Het belang van de verschillende effecten kan worden geïllustreerd aan de hand van cijfers over de periode 1980-2000 (zie fig. 2.7). Allereerst is de feitelijke energievraag (historisch of verwacht) als indexcijfer ten opzichte van 1990 uitgezet. Vervolgens is dit indexcijfer verhoogd met de groei van de produktie in respectievelijk 1980-1990 en 1990-2000. Dit is het volume-effect zoals in de figuur met pijlen is aangegeven. Vervolgens is berekend wat de energievraag in 1990, respectievelijk in 2000 geweest zou zijn, indien bij het produktievolume van die jaren de produktiestructuur van 1980, respectievelijk 1990 zou zijn behouden. Deze waarde vertegenwoordigt het besparingseffect in enge zin. De gevonden waarden geven aan dat in de periode 1980-1990 zowel het besparingseffect als het structuureffect positief zijn, maar dat het besparingseffect in omvang veel groter was dan het structuureffect.

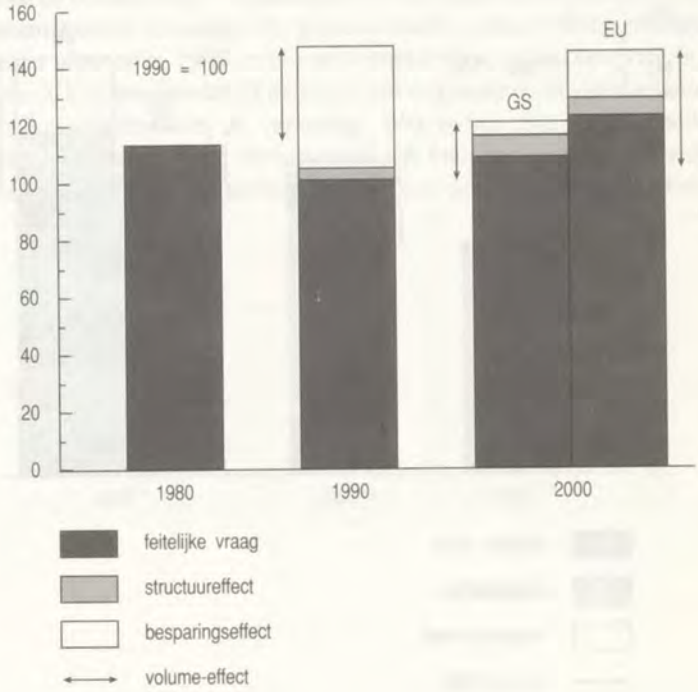


Fig. 2.7 Energiebesparingen industrie (1980-2000)
GS = 'Global Shift'-scenario, EU = 'European Renaissance'-scenario.

Voor de toekomst zijn de verwachtingen voor het besparingseffect zoals opgenomen in de Nationale Energieverkenningen, veel gematigder, terwijl het gewicht van structuurveranderingen relatief groter wordt. Tezamen kunnen deze twee effecten het volume-effect in deze periode echter niet compenseren, zoals eerder wel het geval was. Alleen in het 'European Renaissance'-scenario wordt de overheidsdoelstelling van 15% besparing gehaald.

Bereikte en verwachte elektriciteitsbesparingen

De situatie met betrekking tot de elektriciteitsvraag verschilt sterk van de situatie voor de totale energievraag (vergelijk fig. 2.7 en 2.8). In de eerste plaats zijn de besparingseffecten in de periode 1980-1990 veel kleiner gebleven en hebben het volume-effect bij lange na niet kunnen compenseren. Bovendien was het structuureffect hier negatief, wat betekent dat de Nederlandse industrie in deze periode meer elektriciteitsintensief is geworden. De verwachtingen voor de toekomst liggen echter geheel anders. Zowel energiebesparingen in enge zin als sterke structurele verschuivingen leiden ertoe dat het volume-effect meer dan gecompenseerd wordt en de verwachte elektriciteitsvraag niet boven het niveau van 1990 uitkomt.

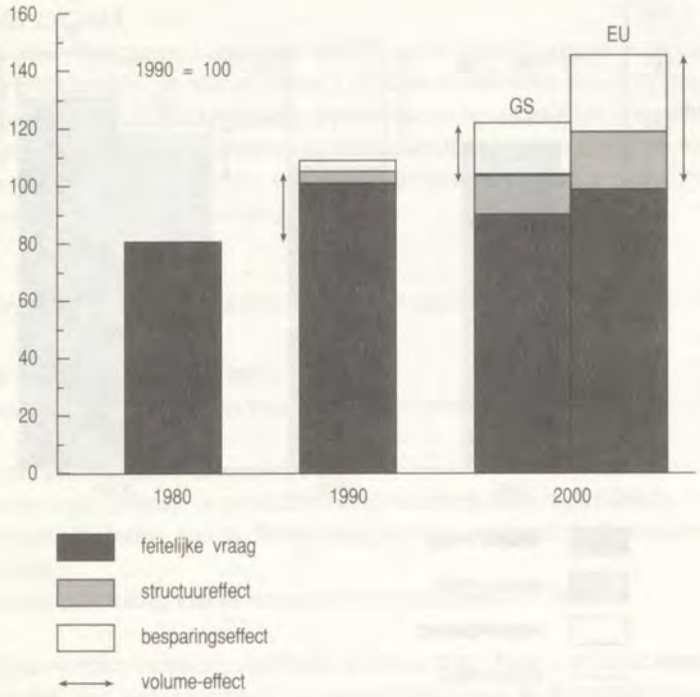


Fig. 2.8 Elektriciteitsbesparingen industrie (1980-2000)
GS = 'Global Shift'-scenario, EU = 'European Renaissance'-scenario.

2.2.5 INDUSTRIËLE ENERGIEVOORZIENING EN MILIEUBELASTING

Aandeel industrie in verzurende emissies

De milieubelasting van de Nederlandse industrie moet worden gezien in verhouding tot de totale milieubelasting die wordt veroorzaakt door de eindgebruikers (zie fig. 2.9). Hiervoor dient de uitstoot van de centrales en de raffinaderijen te worden toegerekend aan de afnemende sectoren, waarvan de industrie, de huishoudens en het transport de belangrijkste zijn. De sector 'overig' omvat naast diensten en land- en tuinbouw ook de belasting van raffinaderijen die wordt toegerekend aan de uitvoer van olieprodukten. Vooral in de emissies van SO_2 heeft deze sector een belangrijk aandeel. Behalve de emissies afkomstig uit verbranding van fossiele brandstoffen, zijn ook de procesemissies in de industrie van belang. Voor SO_2 vormen deze emissies bijna de helft van de totale emissies. Uit de cijfers blijkt dat de industrie direct en indirect verantwoordelijk is voor ongeveer 50% van de SO_2-emissie en voor ongeveer 20% van de NO_x-emissie. Uit deze cijfers kan worden geconcludeerd dat de industrie verantwoordelijk is voor ongeveer een derde van de totale verzurende emissies (exclusief ammoniak). Dit is minder dan kan worden toegerekend aan de sector transport (ongeveer 40%), maar veel meer dan aan de sector huishoudens (ongeveer 7%).

Aandeel industrie in broeikasgasemissies

De uitstoot van CO_2 kan op meer manieren worden gemeten, namelijk met of zonder uitstoot door de behandeling van grondstoffen en bunkers (olieprodukten bestemd voor de internationale zeevaart). De gepresenteerde cijfers hebben betrekking op hoeveelheden uitstoot in 1990, exclusief grondstoffen en bunkers (zie fig. 2.9). Geconcludeerd kan worden dat de industrie een ongeveer even groot aandeel heeft in het broeikas-effect als in de verzuring. Wel is van alle eindverbruikers de industrie hier direct en indirect verantwoordelijk voor het grootste aandeel (30%) met de sectoren huishoudens en transport op een gedeelde tweede plaats (ieder 20%).

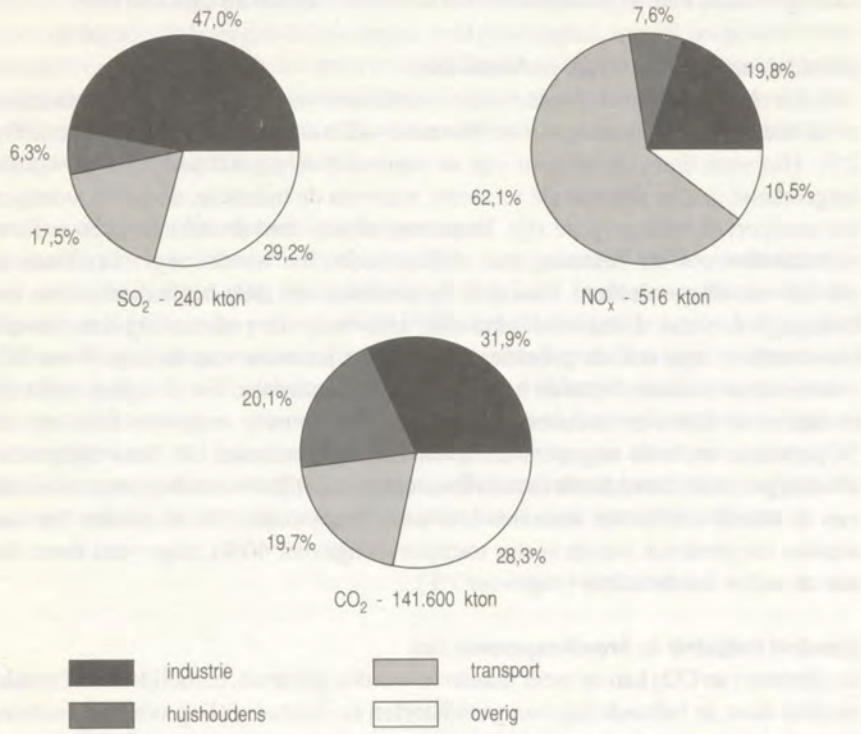


Fig. 2.9 Emissie van SO_2, NO_x en CO_2 in 1990, exclusief grondstoffen en bunkers

Literatuur

[1] BOONEKAMP, P.G.M., e.a., *Nationale Energieverkenningen 1990-2015*, ESC/ECN, Petten, 1992

[2] *De Nederlandse energiehuishouding*, Centraal Bureau voor de Statistiek, diverse jaren

[3] *Statistisch Bulletin*, diverse nummers, Centraal Bureau voor de Statistiek, jaargang 1991

2.3 DE ONTWIKKELING VAN WARMTE-KRACHTVERMOGEN IN NEDERLAND

ing. T. van der Does

2.3.1 INLEIDING

Aan het eind van de jaren tachtig kwam er een wijziging in het denken over de produktie van elektriciteit. Aanleiding hiertoe was een aanzienlijke prijsverhoging

van fossiele brandstoffen alsmede een wijziging in de organisatiepatronen van de nutssector en de technologische ontwikkeling van gasturbines. Er vond een herwaardering plaats van de decentrale opwekking; de milieuproblematiek die zich aan het eind van de jaren tachtig aandiende, gaf de stoot daartoe. Reden dus, om lange-termijnplannen te gaan maken voor een groeiend aandeel van decentrale opwekking in de elektriciteitsvoorziening van Nederland. Met andere woorden: hoe groot is het warmte-krachtvermogen dat de komende jaren in Nederland kan worden opgesteld?

Hiervan zijn door verschillende instanties schattingen gemaakt. Sommige daarvan hebben betrekking op het totale warmte-krachtvermogen, andere op dat in de industrie. De Rijksoverheid stelde in 1987 een Stimuleringsprogramma Warmte-Kracht op, dat aannam dat aan het toen in het land geïnstalleerde vermogen van 1.700 MW tot 1995 700 – 1.000 MW zou worden toegevoegd. Op 1 januari 1992 draaide er echter al 2.700 MW (zie fig. 2.10) en waren subsidieaanvragen voor een verdere 1.000 MW ingediend, wat het totaal over enige jaren al op 3.700 MW brengt. De Samenwerkende Elektriciteits-produktiebedrijven (Sep) hebben hun Elektriciteitsplannen steeds naar boven moeten bijstellen. In de recente Hoofdlijnen van het Elektriciteitsplan 1993-2002 wordt voor het jaar 2000 een totaal van 3.750 MW vermeld. De Nota Energiebesparing van het ministerie van Economische Zaken noemt voor dat jaar zelfs 5.500 – 6.000 MW. Ook de energiedistributiesector heeft een schatting gemaakt, die is neergelegd in zijn Milieu Actie Plan (MAP) 1991. Deze sector stelt zich voor het jaar 2000 een nationaal geïnstalleerd warmte-krachtvermogen van 4.500 MW tot taak. De Nederlandse maatschappij

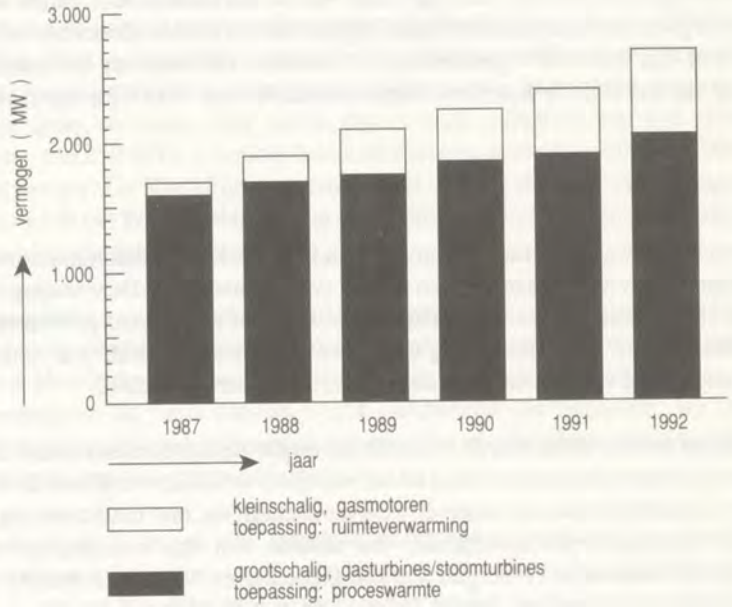


Fig. 2.10 Opgesteld decentraal warmte-krachtvermogen per 1 januari 1992

voor energie en milieu (Novem) heeft aan het ministerie van Economische Zaken bericht deze taak uitvoerbaar te achten.

Voor het geïnstalleerde warmte-krachtvermogen in de industrie in het jaar 2000 acht het MAP 1991 een cijfer van 3.300 MW haalbaar. Momenteel staat in de industrie 2.050 MW opgesteld.

De conclusie is dat de ontwikkeling veel sneller gaat dan de plannen aangeven. Dit kan met een voorbeeld geïllustreerd worden. De provincie Zuid-Holland is goed voor de helft van het potentieel aan warmte-krachtvermogen. De 'Warmtekaart' (door de Sep vervaardigd; brengt het lokale warmte-aanbod en de lokale warmtevraag in kaart) toont in Zuid-Holland de grootste concentratie warmtevraag: industriële warmte voor het Europoort-Botlekgebied, verwarming voor de glastuinbouw en de warmtevraag voor de geconcentreerde woningbouw. Echter, in de plannen van de energiebedrijven is het warmte-krachtvermogen nog geen 25% van de landelijke taakstelling. Alleen al voor het industriegebied Europoort-Botlek kan worden aangenomen dat daar méér dan de helft van het landelijk industrieel potentieel (de eerder genoemde 3.300 MW die de energiebedrijven in 2000 gerealiseerd willen zien) kan worden geplaatst. Bij deze 3.300 MW is echter nog maar nauwelijks het veranderende patroon meegenomen.

In andere delen van Nederland, waar beter wordt ingespeeld op de veranderende situatie, ziet men dat dit grote invloed heeft op de ontwikkeling van decentraal vermogen. Daarom hebben de energiebedrijven aangegeven dat het warmte-krachtpotentieel in de industrie veel hoger is dan oorspronkelijk geraamd.

Indien er optimaal gebruik wordt gemaakt van de warmtebehoefte zullen wij in de komende jaren met een aanmerkelijke stijging van het eerder genoemde industriële potentieel van 3.300 MW geconfronteerd worden. Dit betekent een aanzienlijke stijging van het warmte-krachtvermogen ook na het jaar 2000 (zie fig. 2.11).

2.3.2 AANPAK

Het decentraal warmte-krachtvermogen kan in de toekomst alleen maximaal worden uitgebuit als we uitgaan van een andere marktbenadering. De warmtegebruiker kan de restwarmte van de elektriciteitscentrales niet altijd goed gebruiken. Deze centrales worden overeenkomstig een eigen behoefte geregeld, wat inhoudt dat vraag en aanbod van warmte niet altijd goed op elkaar aansluiten.

Men zal de warmtevraag van de industrie als uitgangspunt moeten nemen. Daartoe zouden de elektriciteitproducenten en het energiedistributiebedrijf met de warmteafnemer in contact moeten treden en hem aanbieden om, met inachtneming van de grootst mogelijke vertrouwelijkheid ten aanzien van zijn bedrijfsgegevens, de levering van warmte te verzorgen. De energiebedrijven zullen dan worden geconfronteerd met een nogal wisselend warmtepatroon. Zij zullen de warmte voor een prijs moeten aanbieden die lager is dan de prijs waarvoor het bedrijf zelf de warmte kan maken. Ook de leveringscondities zullen aantrekkelijker moeten zijn dan

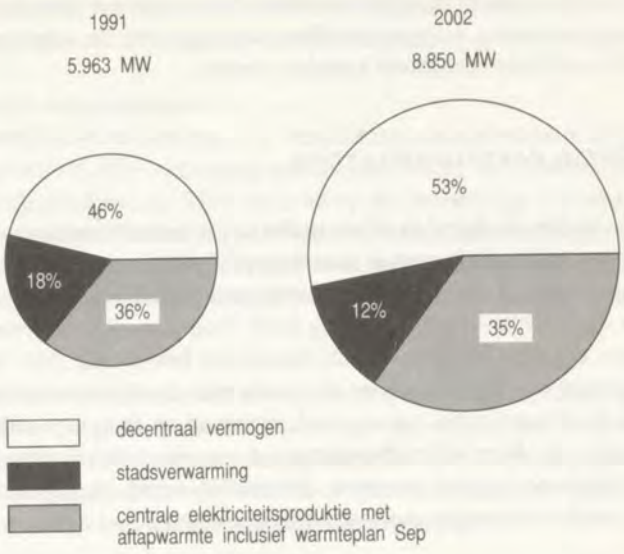


Fig. 2.11 Het totaal van alle plannen; elektriciteitsproduktie gekoppeld aan de levering van warmte

wanneer de klant in eigen beheer in de warmtevraag voorziet. Het energiebedrijf moet dus beter kunnen inspelen op veranderingen in de warmtebehoefte dan het bedrijf dat gebruik maakt van in eigen beheer opgestelde stoomketels, zelf zou kunnen.

Op dit moment is in de reeds eerder genoemde Hoofdlijnen van het Elektriciteitsplan 1993-2002 opgenomen dat vooral in het zuiden van Nederland de produktiesector in samenwerking met de energiedistributiesector de warmtevraag van Shell Moerdijk gaan voorzien. Hier wordt een centrale gebouwd met een elektrisch vermogen van 250 MW, rekening houdend met een stoombehoefte van Shell van 100 ton per uur. De Hoofdlijnen noemen voor de periode 2000-2002 een verdere uitvoering van het Warmteplan, omdat er duidelijke indicaties zijn dat de mogelijkheden groter zijn dan was voorzien.

In het noorden en zuiden van ons land overleggen de industrie, de produktiesector en de distributiesector reeds op een aantal plaatsen om te komen tot optimale condities. Hier is de juiste benadering zichtbaar: er wordt prioriteit gegeven aan de warmtevraag en op basis hiervan wordt elektriciteit geproduceerd. De centrale wordt niet geplaatst waar voldoende koelcapaciteit voorhanden is, maar zo mogelijk op het terrein van de warmte-afnemer.

Het is verleidelijk om in een geconcentreerd industriegebied de verschillende warmtevragen te koppelen aan de energieproduktie. Het blijkt echter dat die weg veelal doodloopt. De praktijk heeft geleerd dat, als een centrale gebouwd wordt die in de warmtevraag van een bepaald bedrijf voorziet, de warmte voor een ander bedrijf in de omgeving veelal niet aan de gestelde eisen voldoet. Als ook de

omliggende bedrijven onder dezelfde condities en met een zeer grote betrouwbaarheid van warmte zouden kunnen worden voorzien, zou de capaciteit van de warmte-krachtinstallatie veel groter kunnen worden.

2.3.3 WIJZIGING RANDVOORWAARDEN

De randvoorwaarden die bepalen of er sprake is van rentabiliteit van de warmte-krachtinstallaties, zullen de komende jaren een wijziging te zien geven. De huidige economische parameters leiden tot de bouw van grootschalige installaties en maken de voordelen die warmte-krachtkoppeling heeft (hoger rendement, energiebesparing, geringere bijdrage broeikas-effect) moeilijker bereikbaar. Met de subsidie voor warmte-krachtinstallaties kunnen de kosten van de extra investering worden geëlimineerd. In de paragrafen hierna wordt ingegaan op de vraag welke primaire randvoorwaarden bij rentabiliteitsberekeningen van warmte-krachtinstallaties in aanmerking dienen te worden genomen. Bovendien wordt aangegeven in welke richting deze randvoorwaarden moeten worden gewijzigd.

De subsidie
De huidige subsidie van 25% op investering voor zowel groot- als kleinschalige installaties is bij de huidige energieprijzen noodzakelijk. In alle gevallen geldt dat, als er geen subsidie verleend wordt, er ook geen warmte-krachtinstallatie wordt geplaatst. Drastische verhoging van de energieprijzen (maar dan wel wereldwijd) of de invoering van regulerende heffingen (bij grotere besparingen moet een lagere heffing worden betaald) zouden hierin verandering brengen. Het zou goed zijn als in de discussies over regulerende heffingen op energieprijzen deze feiten werden meegenomen.

Subsidies zijn een instrument van de Rijksoverheid. Dit brengt met zich mee dat op langere termijn bij de investeerder onzekerheid bestaat over de continuïteit van de regeling.

Het gastarief
De bruikbaarheid van een warmte-krachtinstallatie is afhankelijk van de levering van aardgas. Daarmee is er dus ook een afhankelijkheid van de tariefstructuur van het aardgas en van de relatie tussen de aardgasprijs en de gemiddelde brandstofkosten voor elektriciteitsproduktie. In de gasprijs is momenteel geen bijdrage verdisconteerd die een beter gebruik van aardgas stimuleert. In de discussie over eventuele heffingen zou een dergelijke bijdrage in de gasprijs ter sprake kunnen komen. Deze bijdrage zou leiden tot een groter aandeel van de decentrale elektriciteitsopwekking in de energieproduktie, en dat betekent een betere bediening van de 'warmtemarkt'.

Warmte-krachtkoppeling vraagt, net als de bouw van elektriciteitscentrales, om besluitvorming die gebaseerd is op de effecten op lange termijn. Het gaat om aanzienlijke investeringsbedragen en de te verwachten rentabiliteit wordt veel jaren vooruit bekeken. De exploitatiesubsidie zou een werkbare vorm krijgen als een eventuele heffing op de aardgasprijs daarin zou worden verwerkt. Men zou deze

heffing, afhankelijk van het rendement van de toepassing, naar de gebruiker kunnen terugsluizen in plaats van het geven van een subsidie op de investering.

De waardering van elektriciteit
Voor de rentabiliteitsberekening is de waardering van elektriciteit als produkt een belangrijk criterium. Een verhoging van de waardering van elektriciteit met 15% geeft hetzelfde resultaat als 25% subsidie op de investering. De waardering van elektriciteit wordt momenteel afgeleid van de huidige elektriciteitsproduktie en de daarbij gestelde normen. Hierbij neemt de toepassing van warmte-krachtvermogen echter zulke grote vormen aan, dat een herijking van deze normen wellicht op zijn plaats is.

Bijvoorbeeld: de netstructuur van elektriciteitsopwekking is gebaseerd op elektriciteitsproduktie met grote eenheden. Decentrale opwekking met kleinere eenheden daarentegen, vraagt een andere inpassing en leidt tot een besparing op het transport van elektrische energie. Bovendien hebben kleinere eenheden een grotere mate van flexibiliteit wat bijdraagt aan een kleinere reservefactor.

Decentrale warmte-krachtkoppeling, met een zo hoog mogelijk elektrisch omzettingsrendement, is een betrouwbare methode van elektriciteitsproduktie. Wanneer dit feit als uitgangspunt wordt gehanteerd bij de waardebepaling van decentraal warmte-krachtvermogen, is de waarde niet langer gekoppeld aan de beschikbaarheid op enkele kwartieren per jaar, maar zal de totale bedrijfstijd een maat zijn voor deze waarde. Voor de waardebepaling is het onderscheid tussen centraal en decentraal vermogen dan ook achterhaald.

De planning van het decentraal vermogen
De planning van het decentraal vermogen is eigenlijk minder een verandering dan een toevoeging. Een goede planning is een essentiële voorwaarde. De noodzaak tot planning wordt onderkend bij elektriciteitsproducenten in Nederland en wordt ook benadrukt in rapporten van de Algemene Energie Raad (AER).

Er is veel samenwerking tussen de verschillende partijen nodig om het warmtekrachtpotentieel te realiseren. Hierbij zijn stabiele randvoorwaarden voor de duur van de planperiode noodzakelijk. Het is niet te vermijden dat de betrokken partijen zich op een of andere wijze zullen committeren.

2.3.4 DE VOORDELEN VAN WARMTE-KRACHTKOPPELING

De koppeling van het warmtegebruik aan de elektriciteitsproduktie wordt in alle gepresenteerde plannen gezien als het belangrijkste middel om energiebesparing te bereiken. In de nu volgende paragrafen volgt een opsomming van de belangrijkste voordelen van warmte-krachtkoppeling.

Milieu
De grootste en meest interessante warmte-krachtmarkt is de industriële warmtekrachtkoppeling. Met STEG-eenheden en aardgas, zijn technologisch goede en

betrouwbare resultaten bereikt. De ontwikkeling van deze technieken is gestimuleerd door de eisen van de luchtvaart. Bij eenheden van 30 – 250 MW en bij STEG-eenheden van 40 – 250 MW kan een rendement van de elektriciteitsproduktie worden gehaald tot 52%. Het zijn aardgasgestookte eenheden met een zodanige NO_x-emissie dat dit de meest milieuvriendelijke optie is voor het produceren van elektriciteit. De ervaringen van de afgelopen jaren hebben ertoe geleid dat deze eenheden ook bij behoudende elektriciteitsproducenten volledig geaccepteerd zijn. Met een optimale benutting van het warmte-aanbod van deze eenheden kan een energiebesparing van 30% worden gerealiseerd. Deze besparing resulteert in een aanzienlijke verlaging van de CO_2-emissie.

Selectief gebruik van gas

Het toepassen van warmte-krachtkoppeling bevordert het denken over een selectief gebruik van gas. Technologisch gezien is het verbranden van gas de eenvoudigste weg om in warmte te voorzien. Er zijn systemen ontwikkeld die gas met een hoog rendement op milieuvriendelijke wijze verbranden. Het op deze manier verwarmen heeft echter als nadeel dat van een hoogwaardig produkt (gas) alleen een laagwaardig produkt (warmte) wordt gemaakt. De koppeling van de produktie van elektriciteit met gebruik van de restwarmte resulteert in een beter gebruik van ons gas, immers tijdens de produktie van de benodigde warmte ontstaat een hoogwaardig produkt (elektriciteit).

Stimulering van overleg op Europees niveau

De volgende, haast noodzakelijke randvoorwaarden voor de toepassing van warmte-krachtkoppeling maken het met aardgas zowel elektriciteit als warmte produceren in Nederland rendabel:

- de aanwezigheid van aardgas en een dicht gasleidingennet voor distributie;
- een hoge bevolkingsdichtheid;
- een kwalitatief hoogstaand elektriciteitsnet waardoor teruglevering van elektriciteit mogelijk is;
- klimatologische factoren waardoor een aanzienlijk deel van het warmte-krachtpotentieel in de ruimteverwarming kan worden toegepast;
- de aanwezigheid van de procesindustrie en de glastuinbouw.

Deze factoren geven Nederland een unieke positie in de elektriciteitsvoorziening. Er zullen niet zoveel landen zijn waar een zo groot deel van de elektriciteitsvoorziening te realiseren is met warmte-krachtinstallaties. Er zal in Europa in toenemende mate gebruik worden gemaakt van de mogelijkheden om de stabiliteit van de energievoorziening te vergroten. Nederland zal zijn ervaringen kunnen inbrengen met het decentraal elektriciteitsproduktievermogen, en met het beheersen en optimaliseren van warmte-krachteenheden.

Referenties

- *Jaarverslag 1991 en Werkplan 1992*, Projektbureau Warmte/Kracht, februari 1992
- DOES, T. VAN DER, *De ontwikkeling van het decentraal vermogen*, in: Energietechniek, maart 1992

- *Persbericht over het Elektriciteitsplan 1993-2002 van de Samenwerkende Elektriciteits-produktiebedrijven* (Sep)
- *Nota Energiebesparing*, ministerie van Economische Zaken, 1991
- *Eerste Milieu Aktie Plan van de energiedistributiesector*, Stuurgroep Integraal Milieu Beleidsplan van de energiedistributiesector, 1991
- *Nota Klimaatverandering*, ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 1991
- *Stimuleringsprogramma Warmte/Kracht*, ministerie van Economische Zaken, juni 1987

2.4 MILIEU-ASPECTEN: DECENTRALE VERSUS CENTRALE OPWEKKING VAN ELEKTRICITEIT

dr. J.A.M.M. Kops

2.4.1 INLEIDING

Het Nederlandse beleid met betrekking tot de elektriciteitsopwekking is in het verleden weinig constant geweest. Zo werd na de oliecrises diversificatie van de brandstof een belangrijke pijler van het energiebeleid. Dit gebeurde om zowel economisch als politiek niet te sterk afhankelijk te zijn van één enkele brandstofsoort. Alhoewel de argumentatie nog steeds geldt, is diversificatie momenteel nauwelijks meer een uitgangspunt van het energiebeleid. Dit wordt nu bijna volledig bepaald door de mondiale milieuproblematiek (broeikas-effect).

In het licht van een zo groot mogelijke efficiëntie is een toenemend gebruik van warmte-krachtkoppeling een belangrijke optie. De totale omvang van het toekomstige warmte-krachtvermogen is sterk afhankelijk van de mate waarin dit vermogen decentraal zal worden ingevoerd. Daaraan zijn milieuconsequenties verbonden. Deze dienen zorgvuldig te worden afgewogen om nieuwe zwenkingen in het beleid te voorkomen. Enige milieu-aspecten worden hieronder nader beschouwd.

2.4.2 VERZURING EN SMOG

Energieconversie met gebruik van fossiele brandstoffen resulteert in de emissie van verzurende stoffen (bij olie en steenkool NO_X en SO_2; bij aardgas alleen NO_X). In het afgelopen decennium heeft de verzuringsproblematiek veel wetenschappelijke en politieke aandacht gekregen. Dit heeft geresulteerd in een aanmerkelijke reductie van de emissies. Het overheidsbeleid is gericht op nog aanzienlijk verder gaande emissiereducties. Met de elektriciteitsproduktiesector is hiertoe een convenant gesloten. Bij het emissiebeperkingsprogramma zullen zowel primaire maatregelen zoals IVNR (In Vuurhaard NO_X-Reductie) als 'end of pipe'-maatregelen zoals denitrificatie (DENOX) en rookgasontzwaveling (DESOX) worden toegepast.

Ook bij kleinschalige warmte-krachtinstallaties zijn primaire en end of pipe-maat-

regelen mogelijk [1]. Onder andere vanwege de 'economy of scale' zijn de mogelijkheden echter beperkter. De emissie van verzurende stoffen door warmte-krachtinstallaties is vergeleken met twee centrale opwekkingsscenario's (respectievelijk 1/3 nucleair, 1/3 KV-STEG, 1/3 STEG (gas), en 1/2 KV-STEG, 1/2 STEG (gas)) [2]. Hieruit blijkt dat voor de uitstoot van verzurende stoffen het scenario dat de nucleaire opwekking bevat, de voorkeur verdient (zie fig. 2.12).

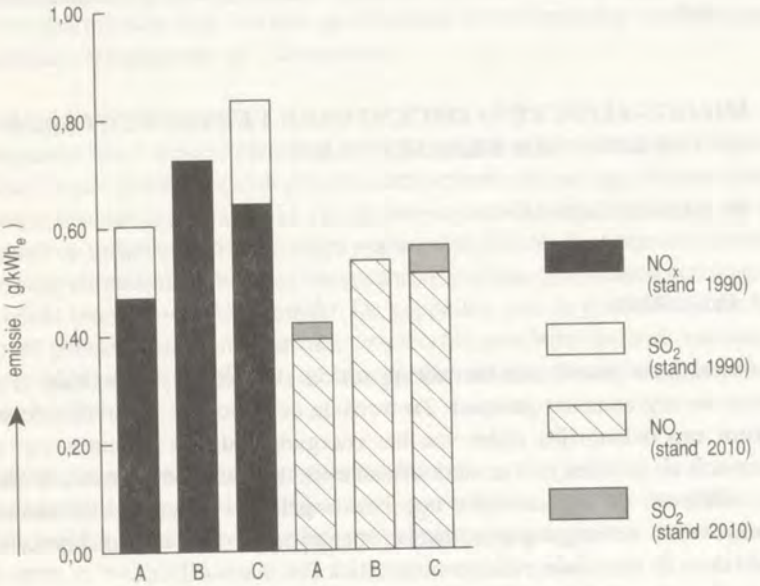


Fig. 2.12 Emissies van NO_x en SO_2 voor drie scenario's
A = evenredig KV-STEG, STEG (gas) en nucleair; B = warmte-krachtkoppeling;
C = evenredig KV-STEG en STEG (gas).

Naast verzuring speelt NO_x ook een rol in de problematiek van zomersmog, die door een sterk verhoogde concentratie van oxydantia (O_3 en NO_2) wordt gekenmerkt. Door met fossiele brandstoffen gestookte elektriciteitscentrales wordt NO_x voornamelijk als NO geëmitteerd. Door middel van de volgende reactie wordt NO omgezet in NO_2:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

Onder invloed van zonlicht kan de omgekeerde reactie optreden. Deze reacties resulteren dus niet in een netto-toename van het oxydantniveau. Echter, door reactie van NO met vluchtige organische koolwaterstoffen (VOC) kan ook NO_2 worden gevormd, dus zonder de opname van een O_3-molecuul. Bij elektriciteitscentrales die zelf weinig VOC emitteren, zal pas op grote afstand van de op grotere hoogte geëmitteerde schoorsteengassen voldoende VOC ingemengd zijn om een verhoogd oxydantniveau mogelijk te maken.

Bij laaggeplaatste bronnen zoals kleine warmte-krachteenheden zal een snellere menging met bijvoorbeeld door het verkeer geëmitteerd VOC plaatsvinden, met versterkte smogvorming als resultaat. Berekeningen die zijn uitgevoerd bij een 250 MW_e warmte-krachteenheid, toonden slechts een beperkte invloed (kleiner dan 2%) op het oxydantniveau. Dit komt omdat bij zomerse omstandigheden waarbij de smogproblematiek speelt, de achtergrondconcentraties reeds hoog zijn. Voor kleine, verspreid opgestelde eenheden ontbreekt een goede analyse, zodat er geen directe conclusie te trekken valt. In theorie vertonen zij echter een sterkere smogvorming.

2.4.3 MONDIALE PROBLEMATIEK (BROEIKAS-EFFECT)

Uitstoot broeikasgassen

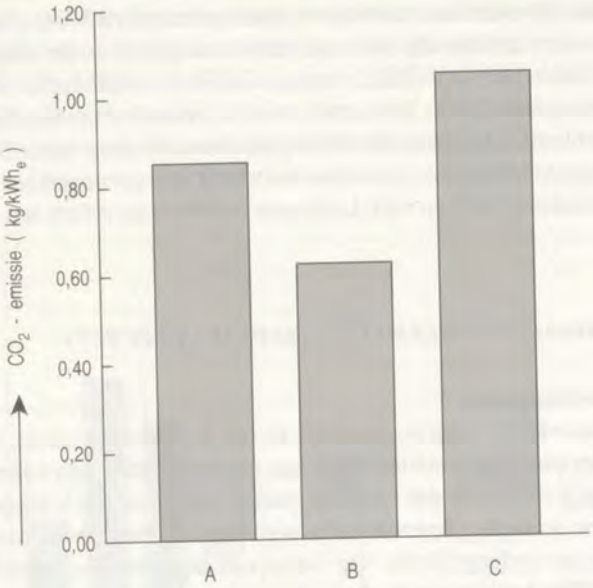
Het 'broeikas-effect' staat momenteel in het brandpunt van de milieupolitieke aandacht. Het wordt toegeschreven aan een duidelijke stijging van de atmosferische concentraties van gassen die wel transparant zijn voor het kortgolvige zonlicht, maar de door de aarde uitgezonden langgolvige straling absorberen (CO_2 is van deze gassen het belangrijkste). Op basis van de huidige concentratiestijgingen geven modelberekeningen voor het midden van de volgende eeuw een temperatuurstijging van 2 tot 5 °C te zien. De gevolgen van deze klimaatverandering, die ook een sterke verandering van neerslagpatronen en een toename van extremen (stormen, overstromingen) kan inhouden, kunnen zeer groot zijn. Het is dan ook begrijpelijk dat ondanks de nog grote onzekerheden in de modelberekeningen een grote politieke en maatschappelijke druk aanwezig is om tot een aanmerkelijke reductie van de CO_2-emissie te komen.

De CO_2-uitstoot ten gevolge van energieconversie is niet alleen omgekeerd evenredig met het conversie-rendement, maar ook afhankelijk van de soort brandstof. Wat dit laatste betreft verdient uranium (kernenergie) als brandstof veruit de voorkeur. Van de voor ons land meest relevante fossiele brandstoffen levert aardgas (56 kg CO_2 per GJ) beduidend minder CO_2 dan steenkool (92 kg CO_2 per GJ).

De CO_2-produktie van de eerder genoemde drie conversie-alternatieven is vergeleken [2]. Uit het in fig. 2.13 gegeven resultaat blijkt dat warmte-krachtkoppeling duidelijk het gunstigst scoort. Dit komt door het hoge conversie-rendement en het gebruik van aardgas als brandstof. Er moet echter worden opgemerkt dat CH_4 ook een broeikasgas is. Bij een aardgaslekkage van 4% wordt het CO_2-voordeel van aardgas ten opzichte van steenkool teniet gedaan [3]. Over de aardgaslekkage in Nederland zijn nauwelijks betrouwbare gegevens voorhanden. De officieel gehanteerde getallen zijn veelal erg laag (ongeveer 0,1%), vooral vergeleken met bijvoorbeeld Rusland (ongeveer 10%). Het voordeel van warmte-krachtkoppeling zal dus enigszins minder zijn dan in het alleen op CO_2 gebaseerde beeld van fig. 2.13. Hoeveel minder is niet aan te geven.

Verwijdering van CO_2

Om verdere reductie van CO_2-emissies te bewerkstelligen, wordt in toenemende mate onderzoek gedaan naar methoden om CO_2 uit rookgassen te verwijderen.



Bron: [2]

Fig. 2.13 Emissies van CO_2 voor drie scenario's
A = evenredig KV-STEG, STEG (gas) en nucleair; B = warmte-krachtkoppeling;
C = evenredig KV-STEG en STEG (gas).

Hiervoor bestaan diverse technieken, waarvan enkele reeds in de praktijk worden toegepast [4]. Zo wordt door middel van een chemisch absorptieproces bij een gasgestookte centrale in Texas circa 1.000 ton CO_2 per dag afgevangen [5]. De economisch meestbelovende techniek lijkt vooralsnog mogelijk bij een KV-STEG-installatie [4]. In een kolenvergasser wordt steenkool omgezet in een synthesegas dat voornamelijk bestaat uit H_2, CO, CO_2 en H_2O. Door toevoeging van extra water kan in de volgende shift-reactie CO in CO_2 worden omgezet onder de vorming van H_2:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Dit kan resulteren in CO_2-concentraties tot circa 40%, wat een efficiënte verwijdering sterk vergemakkelijkt. Dit principe, aangevuld met het afvangen van CO_2 door middel van een fysisch absorptieproces, is voorgesteld voor een KV-STEG-installatie [6]. Volgens Ruiter [4] resulteert dit in een verhoging van de kWh-prijs met 25% tot 80%.

In principe zou bovenstaande methode ook kunnen worden toegepast op een afzonderlijke kolenvergassingsinstallatie, waarna vervolgens het H_2 in warmte-krachteenheden wordt verbruikt. Voor het verwezenlijken van een veilige distributie van H_2 bestaan vooralsnog technische en economische 'bottle-necks'. Samenvattend kan op basis van de huidige inzichten worden gesteld, dat toekomstige CO_2-verwijdering economisch alleen haalbaar lijkt bij KV-STEG-installaties.

Overigens ontstaat er dan wel een probleem: waar moet de CO_2 worden opgeborgen? Het door de overheid gehanteerde IBC-criterium (Isoleren, Beheersen, Controleren) is zeer moeilijk haalbaar.

Internationale consequenties
De mondiale energieconsumptie zal de komende decennia nog zeer sterk stijgen. Deze ontwikkeling wordt veroorzaakt door de explosieve bevolkingsgroei in (vooral) de derde wereld en de aldaar te verwachten noodzakelijke stijging van het energiegebruik per persoon. In de derde wereld is men voor een belangrijk deel aangewezen op steenkool als brandstof. Verwacht wordt dat een en ander zal leiden tot een bijna verdubbeling van de mondiale CO_2-uitstoot door elektriciteitsopwekking in 2010 [7].

Nederland neemt momenteel 0,7% van de mondiale antropogene CO_2-emissie voor zijn rekening. Een stabilisatie of zelfs een geringe teruggang van deze emissie heeft mondiaal geen betekenis. Er kunnen vraagtekens worden gezet bij de manier van reductie van de CO_2-emissie in Nederland waarbij men bijna volledig overgaat op aardgas als brandstof. Dit zal resulteren in een stagnatie van de Nederlandse ontwikkeling van schone, efficiënte kolenstooktechnologie. Deze ontwikkeling is vooral met het oog op de broeikasproblematiek mondiaal van veel meer belang dan de Nederlandse CO_2-emissie.

2.4.4 ELEKTRIFICATIE VAN DE SAMENLEVING

De omvang waarin warmte-krachtkoppeling kan worden toegepast, is sterk afhankelijk van de verhouding tussen de warmte- en de krachtvraag. De ontwikkeling in het Nederlandse energiegebruik toont een duidelijke groei in de vraag naar kracht. De komende jaren zal dit beeld mogelijk enigszins worden beïnvloed door de introductie van kleinschalige energieconversietechnieken, zoals warmtepompen en brandstofcellen. Een ombuiging van de trend lijkt echter onwaarschijnlijk. Ook moet worden onderkend dat er duidelijke milieuvoordelen aan deze verdere elektrificatie van de samenleving verbonden zijn. Als voorbeeld wordt nader ingegaan op de milieuvoordelen van elektrische auto's [8].

Milieuvoordelen van elektrisch transport
In tabel 2.1 zijn de emissies in Nederland aangegeven van de voor elektriciteitscentrales en het wegverkeer relevante stoffen. Bij toepassing van elektrische auto's zal de emissie van het wegverkeer afnemen, maar de emissie door centrales toenemen. De extra benodigde elektriciteit, en dus de hiermee gepaard gaande emissieverhoging, is omgekeerd evenredig met de efficiëntie van de toe te passen accu's. Derhalve is in tabel 2.2 voor enkele soorten accu's – die ten dele nog in ontwikkeling zijn – een vergelijking gemaakt tussen de emissie ten gevolge van elektrische tractie voor alle lichte voertuigen (personenauto's en lichte bestelauto's) binnen de bebouwde kom, en de conventionele tractie (benzine, diesel). Tabel 2.2 toont dat de CO_2-reductie bij de huidige stand der techniek beperkt is, doch in de toekomst sterk kan toenemen. De emissiereductie voor de overige componenten is groot, waarbij ook nog bedacht moet worden dat het een reductie van 100% betreft op emissies in

het directe stedelijke leefmilieu. Het is dan ook niet verwonderlijk dat in Californië ernaar wordt gestreefd in het jaar 2000 20% van alle autokilometers voor rekening te laten komen van elektrische auto's. Het extra basislastvermogen dat daarmee correspondeert, is circa 2.000 MW_e.

	CO_2	CO	C_xH_y	NO_x	Stof	SO_2	Pb
E-centrale	37.700	2	0	78	2	47	-
wegverkeer	23.900	756	204	283	16	12	0,3
totaal*	134.900	945	228	465	25	180	0,3

* vuurhaarden + wegverkeer

Bron: [9]

Tabel 2.1 Emissies (10^6 kg) in Nederland in 1989

	CO_2	CO	C_xH_y	NO_x	Stof	SO_2	Pb
benzine/diesel	6.900	359	108	46	3	2	0,1
E-auto's a	6.300	0,3	0,1	13	0,8	8	-
E-auto's b	5.000	0,2	0	10	0,3	6	-
E-auto's c	4.000	0,2	0	8	0,2	5	-

a Pb/PbO_2-accu
b Na/S-accu
c Na/S- of Li-accu

Tabel 2.2 Emissies (10^6 kg) in Nederland door het verkeer van lichte voertuigen binnen de bebouwde kom

2.4.5 CONCLUSIES

- Met betrekking tot de uitstoot van verzurende stoffen verdient centrale elektriciteitsopwekking, inclusief de toepassing van kernenergie, de voorkeur.
- Het op grote schaal toepassen van kleine, zeer verspreid opgestelde warmtekrachteenheden resulteert theoretisch in een toename van smog. Een goede analyse ontbreekt nog.
- De toepassing van warmte-krachtkoppeling leidt tot een duidelijk lagere CO_2-emissie dan centrale opwekking. In de toekomst kan dit beeld evenwel omslaan als op een bepaald moment CO_2-verwijdering in praktijk wordt gebracht. Voorlopig lijkt dit economisch alleen haalbaar bij centrale KV-STEG-eenheden.
- Een beleid dat uitsluitend gericht is op reductie van CO_2-emissies in Nederland, levert een uiterst geringe bijdrage aan de bestrijding van de mondiale broeikasproblematiek. Meer effect kan worden verkregen door de ontwikkeling van schone efficiënte kolenvergassing te stimuleren.
- De verdere elektrificatie van de samenleving, waaraan onmiskenbaar ook milieuvoordelen zijn verbonden, vermindert in de toekomst de toepasbaarheid van kleinschalige warmte-krachtkoppeling.

Literatuur

[1] WONDERGEM, A., *Verlaging NO_x-vorming in gasmotoren en turbines*, in: Energiespectrum, mei 1990, pp. 134-138

[2] HASSELT, R.J. VAN, *Warmte-kracht, koppeling met toekomst in de 21ste eeuw*, in: Energiespectrum, juli/augustus 1991, pp. 196-201

[3] RUIJGROK, W.J.A., *De emissie van broeikasgassen en de broeikasgasbijdrage van gas- en kolengestookte elektriciteitscentrales*, in: Elektrotechniek, Vol. 69, nr. 10, oktober 1991, pp. 845-851

[4] RUITER, J.P., *Reductie van CO_2-emissie bij elektriciteitsproduktie*, in: Elektrotechniek, Vol. 69, nr. 12, december 1991, pp. 1025-1034

[5] KAPLAN, J.L., *Cost-saving process recovers CO_2 from power plant fluegas*, in: Chemical Engineering, november 1982

[6] HENDRIKS, C.A., e.a., *The recovery of carbon dioxide from power plants*, in: OKKEN, P.A., e.a., Climate and energy: the feasability of controlling CO_2 emissions, Kluwer, Dordrecht, 1989

[7] *IAEA Proceedings of Senior Expert Symposium on Electricity and the Environment, 13-17 mei 1991*, Helsinki, 1991

[8] BAKEMA, G.F., *Energie- en milieu-aspecten van elektrische voertuigen*, in: Energiespectrum, november/december 1990, pp. 277-281

[9] *Kwartaalbericht milieustatistieken*, Centraal Bureau voor de Statistiek, Vol. 8, nr. 3, 1991. Idem 90/4 en 91/1

2.5 BELEIDSINSTRUMENTEN

met bijdragen van drs. H.J.M. Snoep en drs. P.J. de Wit

2.5.1 INLEIDING

De overheid heeft bij het voeren van een energie- en milieubeleid verschillende instrumenten ter beschikking. Over de hantering van die instumenten lopen de opvattingen sterk uiteen. Wij proberen de standpunten in dit hoofdstuk zo objectief mogelijk weer te geven.

Op het moment van schrijven (februari 1992) loopt er een onderzoek naar de effecten van regulerende heffingen. Dit wordt verricht door de commissie-Wolfson. Van enkele deelstudies zijn via de pers de conclusies reeds bekend gemaakt.

Naar verwachting zal deze commissie ook ingaan op de effecten van de verschillende beleidsinstrumenten. De discussie zal echter in een internationale context dienen te worden geplaatst. Nederland met zijn open economie kan zich niet veroorloven te veel af te wijken van de rest van de wereld. In de vrij zwakke structuur van de Nederlandse economie zijn de economische consequenties te groot, zeker nu de vooruitzichten somber zijn.

De partijen hebben elk hun belangen en nemen een eigen standpunt in. Enerzijds is

er de nationale overheid, gedreven door de politiek; de internationale pogingen tot coördinatie blijken tot nu toe machteloos. Anderzijds zijn er producenten die zich bedreigd voelen door de verslechtering van hun concurrentiepositie, maar daarnaast ook kansen herkennen en oplossingen kunnen aandragen. De consumenten vormen een derde belangrijke groepering. Zij zijn degenen die uiteindelijk zullen lijden als de beoogde 'duurzame groei' uit het rapport-Brundtland niet wordt bereikt.

Aanvankelijk werd in dit rapport de indruk gewekt dat de ontwikkelingen in economie en milieu niet tegengesteld zouden zijn. Ook de eerste uitkomsten van het NMP waren hoopgevend. Een verscherping van het milieubeleid zou in economisch opzicht geen grote gevolgen hebben. Langzamerhand dringt echter het besef door dat, mede gezien de onduidelijkheid over de technische ontwikkeling, een optimaal milieubeheer op lange termijn ten koste kan gaan van economische groei. Al lijken de gevolgen op korte termijn en op macro-schaal nog te overzien, een streng milieubeleid zal waarschijnlijk een aanzienlijk effect op groei en werkgelegenheid hebben.

Er bestaat weinig discussie over de algemene principes van het milieubeleid. Kort samengevat luiden deze:
- het voorkomen van milieuschade verdient de voorkeur boven herstel achteraf: het 'preventie-beginsel';
- de vervuiler betaalt;
- economische efficiëntie en kosteneffectiviteit: een 'milieugulden' kan maar één maal worden uitgegeven.

In de Europese gemeenschap is het subsidiariteitsprincipe van belang. Dit houdt in dat het elke lidstaat is toegestaan een beleid te voeren dat dieper ingrijpt dan het gezamenlijke Europese beleid. Ook de keuze van instrumenten voor het nationale milieubeleid behoort tot de competentie van de lidstaten. Het gaat om de volgende instrumenten: directe regulering, economische instrumenten (voornamelijk heffingen en subsidies) en communicatieve instrumenten.

2.5.2 DIRECTE REGULERING

De directe regulering geeft de overheid de macht milieuvriendelijk gedrag af te dwingen door middel van normen, regels en voorschriften. Het is op dit moment nog steeds de meest toegepaste vorm van milieubeleid. Binnen de directe regulering vormt 'normstelling' het belangrijkste instrument. Normstelling is een verzamelnaam voor een groot aantal verschillende instrumenten met als gemeenschappelijk kenmerk dat deze instrumenten grenzen aangeven voor het doen en laten van individuen en groepen in de maatschappij. Overschrijden van de normen is niet toegestaan; ter handhaving staan bestuurs- of strafrechtelijke sancties ter beschikking. Een bijzondere vorm van normstelling is de 'voortschrijdende' normstelling. Dit houdt in dat de normen gefaseerd worden aangescherpt. Een voorbeeld van voortschrijdende normstelling is de SO_2-emissienorm voor raffinaderijen.

Bij de normstelling wordt gewoonlijk rekening gehouden met de mogelijkheden

van de betrokkenen om aan de normen te voldoen. Als uitgangspunt kunnen achtereenvolgens worden genomen:

- *Best practible means.* Meestal gaat de regelgever uit van de best uitvoerbare technieken. Dit zijn de middelen ter voorkoming of bestrijding van milieuverontreiniging die, gegeven de stand der techniek, het doeltreffendst zijn en tegelijkertijd economisch aanvaardbaar zijn.
- *Best technical means.* In sommige gevallen leiden 'best practible means' tot onvoldoende resultaten en moet gebruik worden gemaakt van de beste bestaande technieken.
- *Best imaginable means.* Bij voortschrijdende normstelling is het denkbaar dat voor de lange termijn wordt uitgegaan van de best denkbare technieken. Deze normstelling wordt ook wel 'technology forcing' genoemd.

Het belangrijkste argument voor de toepassing van directe regulering is de veronderstelde effectiviteit. Bij economische en communicatieve instrumenten, die in de volgende paragrafen uitgebreider besproken zullen worden, zijn de resultaten onzekerder, omdat de overheid moet afwachten of men het gewenste gedrag inderdaad gaat vertonen.

2.5.3 ECONOMISCHE INSTRUMENTEN

Onder de noemer 'economische instrumenten' vallen heffingen en subsidies. De functie van de heffing is tweeledig. In de eerste plaats genereren heffingen een opbrengst waarmee (ten dele) het milieubeleid of specifieke voorzieningen kunnen worden gefinancierd. In de tweede plaats kunnen heffingen prijsverhoudingen zodanig beïnvloeden dat grondstoffen, emissies, produkten of afvalstoffen waarop een heffing rust, duurder worden. In Nederland vormen subsidies het belangrijkste instrument voor de directe stimulering van milieutechnologie. Het gaat hierbij dan om een financiële ondersteuning ten behoeve van het bereiken van (milieu)beleidsdoeleinden.

Van deze instrumenten staat op dit moment de regulerende energieheffing het meest in de belangstelling. Het is dan ook een instrument met twee duidelijk sterke punten: de vervuiler betaalt en de marktkrachten kunnen ongestoord hun werk doen. De discussie over de inzet spitst zich aan de 'macro'-kant toe op de vraag wat de overheid zou moeten gaan doen met de zeer omvangrijke inkomsten. Een bestemming voor milieudoeleinden of toevoeging aan de algemene middelen is niet aan de orde. Aard en omvang van een regulerende heffing en de doelstellingen met betrekking tot de collectieve lastendruk zijn daarmee niet te verenigen. Terugsluizen is dan geboden, maar dat kan op verschillende manieren. De maatschappelijke acceptatie van een dergelijke forse ingreep zou het meest ermee gediend zijn als elke individuele betaler van de heffing langs een andere weg zoveel mogelijk wordt gecompenseerd via een uitgebalanceerd pakket belasting- en premiemaatregelen. Een alternatief is om met de voor terugsluizen beschikbare gelden andere politieke en maatschappelijke doelstellingen na te streven zoals een vereenvoudiging van het belastingstelsel of verlaging van de arbeidskosten.

Aan de 'micro'-kant van de discussie gaat het vooral over de vraag of een heffing wel een efficiënt middel is om energiebesparing te bevorderen. Uit tal van onderzoeken blijkt dat de prijselasticiteit van de vraag naar energie gering is. Daarnaast zal de heffing zo'n beslag leggen op het beschikbare budget dat de ruimte om te investeren in efficiencyverbetering afneemt. Ook psychologisch kan een heffing slecht vallen. Net nu velen innerlijk overtuigd zijn van de noodzaak de milieuconsequenties van het eigen handelen te onderzoeken, dreigt de overheid te komen met een instrument dat weer noopt tot een afwerende houding.

Over hoogte, grondslag en andere invoeringsmodaliteiten van een regulerende heffing is men nog lang niet uitgepraat. Naar verwachting zal de discussie in de loop van 1992 in een beslissend stadium komen. Dit zal afhangen van de parlementaire behandeling van het wetsontwerp Aanpassing Wabm, het rapport van de commissie-Wolfson en de verdere oordeelsvorming in de EG.

2.5.4 COMMUNICATIEVE INSTRUMENTEN

Met communicatieve instrumenten beoogt de overheid milieudoelstellingen te bereiken door middel van informatie, overreding, overtuiging en overeenstemming met de doelgroepen. Tot deze categorie worden demonstratieprojecten, milieuzorgsystemen, voorlichting en convenanten gerekend. Ondanks hun ogenschijnlijke eenvoud blijken er toch enige haken en ogen aan communicatieve instrumenten te zitten. Er zijn grenzen aan de invloed van de overheid. Er wordt steeds vaker en gemakkelijker naar het instrument van de voorlichting en de communicatie gegrepen; bij energiebesparing is de inzet van het middel voorlichting minder recent.

Empirisch onderzoek wijst uit dat de effectiviteit van communicatieve instrumenten uiterst beperkt is. Wel kunnen zij een ondersteunende rol spelen bij de inzet van andere instrumenten. Zo is uit de literatuur bekend dat het prijsinstrument merkbaar sterker werkt wanneer opgelegde prijsverhogingen (heffingen) of -verlagingen (subsidies, fiscale voordelen) nadrukkelijk worden toegelicht. Nieuwe informatie kan de doorslag geven. Deze opmerking geldt vooral voor de meer 'traditionele' voorlichtingsinstrumenten zoals grootschalige en brede voorlichtingscampagnes, en voor een meer gerichte voorlichting, bijvoorbeeld een energie-adviesbus. Naar het zich laat aanzien, kan één categorie van communicatieve instrumenten, zelfstandig ingezet, wel een zekere mate van effectiviteit bereiken. Dat is de zogenaamde 'eco-feedback': informatieve terugkoppeling van het eigen (en eventueel andermans) gedrag.

Een meer principiële vraag is: is de overheid de juiste 'afzender' van de voorlichtingsboodschap? Zij doet meestal een beroep op het verantwoordelijkheidsbesef van bedrijf of burger. In het sociaal-psychologisch deelonderzoek van het Integratieproject Milieu en Economie wordt daarover opgemerkt: 'Het is tevens een van de oplossingen. Een verandering van moraal is dan vereist. Dat is moeilijk, omdat er niet één juiste moraal bestaat; wat moreel is hangt af van de situatie.' Dit raakt ook aan de geloofwaardigheid van de overheid als communicator. Het aantal overheidsbeslissingen dat bedoeld of onbedoeld het energiegebruik doet stijgen, is

groot. Oproepen tot een energiezuinige moraal door een actor die zelf dikwijls een apert energie-onvriendelijk gedrag vertoont, overtuigt niet of werkt zelfs averechts. Ten slotte is de vraag in hoeverre de overheid vanuit haar positie in de samenleving wel de juiste instantie is om burgers en bedrijven op hun verantwoordelijkheid aan te spreken. In de Nederlandse samenleving zien wij in elk geval een deel van de ontvangers van zo'n boodschap vraagtekens plaatsen bij de wenselijkheid van een dergelijke voorlichtingsactie van de overheid.

2.5.5 ROL VAN DE NUTSBEDRIJVEN IN HET ENERGIEBELEID

Nutsbedrijven hebben vanouds de taak energie te leveren tegen zo laag mogelijke kosten. Onder druk van de maatschappelijke discussies en de milieu- en energiesituatie begint daarin duidelijk verandering te komen. Was het voorheen zo dat bemoeienis vanuit de nutsbedrijven met de aard en de omvang van de energievraag bij de klant ondenkbaar was, thans ontstaat steeds meer aandacht voor 'demand side management', het beïnvloeden van de vraag naar energie bij de afnemers. Dit betekent het leveren van met energiegebruik samenhangende diensten met een hoge kwaliteit tegen een zo laag mogelijke totale prijs voor de dienst, in plaats van voor de energie. De gedachte daarachter is dat deze aanpak, afhankelijk van de condities, wederzijds en maatschappelijk voordelig kan zijn. Deze condities betreffen tariefstelling tussen nutsbedrijf en afnemer, tussen distributiebedrijf en produktiebedrijf, opgelegde bepalingen ten aanzien van taak en tarieven, en dergelijke. Ook de klant echter zal moeten 'wennen' aan deze betrekkelijk nieuwe benadering; zijn problemen liggen onder meer in de verstrekking van vertrouwelijk geachte gegevens, en autonomie in huis of bedrijf, ook ten aanzien van het energiegebruik. Dat 'wennen' zal sneller gaan naarmate het belang van de klant bij demand side management groter is: financieel voordeel, gemak, en dergelijke.

In hoeverre kan de Rijksoverheid van deze ontwikkeling gebruik maken? De rol van de nutsbedrijven biedt wel degelijk aanknopingspunten. Het gaat vooral om het scheppen van dusdanige condities waardoor de nutsbedrijven de ruimte krijgen demand side management uit te voeren. Zo zullen nutsbedrijven de vrijheid moeten hebben hogere tarieven die voortvloeien uit besparingsinvesteringen, aan de klanten door te berekenen. De hogere tarieven zijn te rechtvaardigen als de totale kosten voor energiefuncties (licht, kracht, warmte enz.) daardoor bij de klant lager worden dan nu het geval is. Een nadere analyse is gewenst. Naast het wijzigen van de condities waaronder nutsbedrijven opereren, kan er een krachtige impuls uitgaan van een gewijzigde wettelijke taakstelling van nutsbedrijven. De rol van nutsbedrijven voor het bereiken van milieudoelstellingen lijkt altijd sterk onderschat. Dat geldt niet alleen voor de energiebedrijven, maar ook voor andere nutsbedrijven, zoals waterzuivering en afvalverwijdering. Deze bedrijven kunnen een belangrijke rol spelen bij preventie en hergebruik, en daarmee als 'nevenprodukt' ook een bijdrage aan energiebesparing leveren.

2.5.6 *INTERNATIONALE ASPECTEN*

De overheid doet er verstandig aan de internationale context goed in de gaten te houden. Dat geldt op drie niveaus. Nationale doelstellingen zijn weinig zinvol bij problemen met een grensoverschrijdend karakter. Zowel met betrekking tot de verzuring als meer recent het broeikas-effect is uitgebreid internationaal overleg tot stand gekomen. De huidige Nederlandse CO_2-doelstelling is nog unilateraal vastgesteld. Voor toekomstige doelstellingen ligt dat minder voor de hand. Ook bij het zoeken van een oplossing wanneer nieuwe technologieën in beeld komen, kan een breed draagvlak de kans op succes sterk vergroten. Technologische samenwerking, bijvoorbeeld in EG-verband, maar ook databanken waarmee informatie over reductie van emissies toegankelijk wordt gemaakt, zoals onder andere het International Energy Agency (IEA) die beheert, kunnen daarbij een belangrijke rol spelen. Ten slotte kan ook als het gaat om de instrumenten, niet louter nationaal worden gedacht. Het streven naar een Europese markt betekent dat instrumenten die aangrijpen op internationaal verhandelde goederen en diensten of internationaal opererende bedrijven, bij voorkeur samen met de EG-partners moeten worden ingezet. Zowel bij de toepassing van de WET (Wet Energiebesparing Toestellen) als bij de mogelijke invoering van een regulerende energieheffing is het overleg in EG-verband belangrijk.

2.5.7 *MILIEU EN TOEKOMSTIGE ENERGIEPRIJZEN*

Er valt een toenemende invloed van de milieuproblematiek op de energieprijs te verwachten. Niet zozeer de absolute schaarste van energievoorraden zal daarbij een rol spelen, maar wel de schaarste aan 'milieugebruiksruimte'. Naar verwachting zal deze milieugebruiksruimte (door overheden en supra-nationale organen) in toenemende mate worden ingeperkt. De schattingen voor de lange-termijnkosten van een 'schone' (emissie- en afvalarme) energievoorziening gaan in de richting van minimaal *f* 15,-/GJ thermisch en *f* 25,-/GJ elektrisch. Er zijn twee wegen die op lange termijn naar dit of een hoger prijsniveau kunnen leiden.

De eerste mogelijkheid is dat via voorschriften en regels de eisen geleidelijk zullen worden aangescherpt. Dit zal – zo kan op grond van de ontwikkelingen in het verleden worden verwacht – vooral leiden tot de inzet van bestrijdingstechnieken (end of pipe) en tot voortgaande energiebesparing. De tweede mogelijkheid is het naar voren halen van de op lange termijn te verwachten hogere energieprijzen. In concreto betekent dat een heffing waarvan de hoogte wordt bepaald door enerzijds de te verwachten autonome energieprijsstijging en anderzijds het na te streven reguleringseffect. Een olieprijsscenario van $40 per barrel in 2000 zou dan leiden tot ruwweg een verdubbeling van de huidige energieprijzen. Om deze heffing aanvaardbaar te maken, zullen andere collectieve lasten (vooral op de factor arbeid, maar ook de vennootschapsbelasting, de BTW, e.d.) navenant moeten worden verlaagd.

Met deze tweede weg is tevens een 'derde weg' geopend, namelijk het verschuiven van de belastinggrondslag van vooral arbeid naar 'milieugoederen', waaronder

energie. Nadere uitwerking van dit idee kan leiden tot een verdergaande belasting op energie dan volgt uit het eerder beschreven economisch criterium (de langetermijnkosten). Op grond van fiscale overwegingen (bijvoorbeeld: diversificatie van belastinggrondslagen; nu rust ca. 73% van de collectieve lastendruk op de factor arbeid) kan voor een hogere heffing worden gekozen. Een dergelijke heffing zal vooral preventieve technologische innovaties uitlokken: efficiencyverhoging, duurzame-energiebronnen. De invoering van zo'n energiebelasting zal niet ineens en uitsluitend in Nederland kunnen gebeuren. Het heeft weinig zin energie-intensieve bedrijven op deze manier over de grens te jagen en vervolgens dezelfde energie-intensieve, maar dan geïmporteerde produkten te blijven kopen.

De energiekosten zullen hoe dan ook op lange termijn naar een hoger niveau toegroeien, tenzij de samenleving bewust besluit het milieu niet serieus te nemen. Wanneer effectieve maatregelen achterwege blijven, zal het milieuprobleem telkens weer op de deur bonzen, net zolang tot aan serieuze oplossingen wordt gewerkt met de beschreven gevolgen voor de prijzen van dien.

Referenties

- KEMP, R.P.M., e.a., *Instrumenten voor de stimulering van milieutechnologie*, deel 14 in de reeks Beleidsstudies Technologie Economie van het ministerie van Economische Zaken
- BLEIJENBERG, A.N., *Lastenverschuiving voor energiebesparing*, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft, 1990
- BECHT, H.Y., *CO_2-reductie in lange-termijn energiescenario's*, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft, 1990
- SOEST, J.P. VAN, *Milieu en economie: sterke hand of onzichtbare hand*, eindrapport Integratieproject Milieu en Economie, eerste fase, Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft, 1991

2.6 MILIEUBELEID EN ECONOMIE: DE VISIE VAN EEN ENERGIE-INTENSIEVE INDUSTRIE

drs. P.J. de Wit

2.6.1 INLEIDING

Inmiddels is het beginsel 'de vervuiler betaalt' als richtsnoer voor milieubeleid geaccepteerd. Het was de commissie-Brundtland die het principe *duurzame groei* ('sustainable growth') onder woorden bracht. In de toekomst moet deze doelstelling wereldwijd zijn.

Subsidies en regulerende heffingen zijn een directe ingreep in de markt. Het economisch break-even-point wordt verplaatst, wat de beslissing van bedrijven en consumenten beïnvloedt. Een land dat in regelgeving voorop loopt, benadeelt zijn positie ten opzichte van de landen die geen maatregelen nemen. Immers, duurzaam-

heid van de economische groei is nog steeds geen leidend beginsel in de internationale handel. Dit kan op zijn beurt weer leiden tot protectionistische overheidsmaatregelen.

Tweederde van de wereld staat nog aan het begin van een industriële revolutie. Daarom is een duurzame internationale arbeidsverdeling, gebaseerd op comparatieve kostenvoordelen waarin de factor milieu is meegenomen, de eerste decennia nog niet te verwachten. Een pragmatische aanpak binnen Nederland, afgestemd op de Europese politiek, lijkt voorlopig het maximaal haalbare.

2.6.2 DE ROL VAN DE TECHNOLOGISCHE ONTWIKKELING

Een veel gestelde vraag is of de ontwikkeling van de techniek de milieuproblemen kan oplossen. De snelle technologische ontwikkeling biedt interessante oplossingen. Om echter een goede basis te kunnen leggen voor de technologische ontwikkeling, is economische groei noodzakelijk. De daarmee gepaard gaande nieuwe investeringen bieden de mogelijkheid van vooruitgang, ook op het gebied van milieu. Mogelijk moet een stuk van de economische groei aan de milieudoelstelling worden opgeofferd.

Het heeft er alle schijn van dat in de toekomst meer oplossingen vanuit de voortschrijdende techniek kunnen komen. Er wordt te veel aan de technologische vooruitgang getwijfeld en de politiek is te weinig geïnteresseerd in ondersteuning van de technologie en daarmee samenhangend het onderwijs.

2.6.3 RENTABILITEIT VAN MILIEU-INVESTERINGEN

Een apart onderwerp vormt de vraag of milieu-investeringen rendabel zijn. Voorstanders van milieuheffingen wijzen vaak op een heffing op de oppervlaktewaterlozing, die niet alleen effectief is geweest, maar ook ervoor gezorgd heeft dat bepaalde bedrijven een technologische know-how hebben opgebouwd die marktwaarde heeft. Een door deze voorstanders vaak gemaakte opmerking is dat investeringen in het milieu zichzelf terugverdienen. Dit geldt dan niet of in mindere mate voor investeringen in end of pipe-oplossingen. Zulke investeringen zullen meestal leiden tot een verhoging van de kostprijs. Maar de procesgeïntegreerde oplossingen betalen volgens hen zichzelf terug. Immers: minder verliezen en emissie leiden tot efficiencyverbetering.

Bij bepaalde toepassingen is inderdaad bewezen dat de investering zichzelf terugbetaalt. Waren dit echter niet de eenvoudige oplossingen die voor de hand lagen en die al lang gerealiseerd hadden moeten zijn? De eerste initiatieven bieden immers altijd veelbelovende resultaten. Het vervolg vraagt minder voor de hand liggende oplossingen, en die betalen zichzelf veel moeilijker terug.

2.6.4 *REGULERENDE HEFFINGEN*

Welk beleidsinstrument de overheid inzet, is afhankelijk van het gekozen model. Het in Amerika gehanteerde confrontatiemodel is gebaseerd op directe regelgeving met veel straffen, sancties en heffingen. Het Engelse consensusmodel werkt daarentegen met subsidies en convenanten en sluit op dit moment beter aan bij de in Nederland gehanteerde praktijk.
Als uitvloeisel van het Nationaal Milieubeleidsplan-plus worden momenteel de mogelijkheden van regulerende heffingen op energiegebruik, verven met organische oplosmiddelen en wegwerpverpakkingen onderzocht. In 1990 heeft de Europese Commissie ten behoeve van energiebesparing en klimaatbeheer een voorstel gelanceerd om een substantiële heffing op energie te leggen.

De chemische industrie heeft zich als een van de eerste branches bereid getoond vèrgaande afspraken met de overheid te maken over reducties van energiegebruik, emissies en afval. Deze afspraken houden belangrijke inspanningen van deze industrietak in. Bij de later ontstane discussies over regulerende heffingen heeft de industrie daaraan dan ook een aantal strikte voorwaarden verbonden:
- Controle op de effectiviteit voor het bereiken van het gestelde milieudoel.
- Voorkomen van een concurrentieverstoring door internationale inbedding van de maatregelen.
- Zo gering mogelijke fiscale uitvoeringskosten.
- Gelijktijdige lastenverlichting elders zodat de collectieve lastendruk niet stijgt.

Op een aantal van deze voorwaarden wordt verder ingegaan.

Economische consequenties van regulerende heffingen
Het sturen in de markteconomie zal ongetwijfeld leiden tot verstoringen van het produktie- en consumptiepatroon. Een heffing op energie heeft alleen dan een optimaal resultaat als zij mondiaal wordt ingevoerd. Landen die met maatregelen als regulerende heffingen vooruitlopen, zullen worden gestraft met een verslechterde concurrentiepositie van het eigen bedrijfsleven. Deze conclusie werd onlangs bevestigd door de deelstudie van de commissie-Wolfson.

De studie van deze commissie is nog niet afgerond. Een van de belangrijkste vragen is het effect van een heffing op vraag en aanbod. Eerdere onderzoekingen wijzen in de richting van een uiterst geringe prijselasticiteit. Dit zou inhouden dat de heffing in verhouding tot de kostprijs zeer hoog zou moeten zijn. Hiermee wordt de schade bij eenzijdige toepassing navenant hoger. Bedrijven zullen besluiten elders te gaan produceren, behalve als een systeem van importheffingen wordt ingesteld om importen uit landen waar deze maatregelen niet genomen zijn, tegen te houden. Dergelijke maatregelen zijn echter vanuit technisch en politiek oogpunt uiterst gecompliceerd en derhalve vrijwel onuitvoerbaar. Het voorgaande geldt wellicht ook voor andersoortige heffingen en in meer algemene zin voor een kostenverhogend milieubeleid.

Bestemming van de opbrengst van regulerende heffingen
Een apart vraagstuk vormt de bestemming van de opbrengst van regulerende heffingen. In lijn met het eerder genoemd principe 'de vervuiler betaalt' dient de

opbrengst te worden aangewend voor milieumaatregelen, bijvoorbeeld om verontreinigingen uit het verleden ongedaan te maken of voor infrastructurele investeringen in het milieu.

Er gaan echter ook stemmen op om de opbrengst te besteden aan verlaging van de loon- en inkomstenbelasting of van de sociale lasten en zo te komen tot een verlaging van de loonkosten. Men hoopt dan op voordelige werkgelegenheidseffecten. De energie-intensieve industrie zal echter een andere vestigingsplaats moeten zoeken, waar de milieubelasting beter kan worden gedragen dan in Nederland. Gehoopt wordt op een stevige groei van de arbeidsintensieve werkgelegenheid, die minder milieubelastend is. Ook hierover zal de commissie-Wolfson rapporteren. Hierop vooruitlopen, heeft weinig zin.

Wel blijkt uit de nota 'Economie met open grenzen' van het ministerie van Economische Zaken dat de structuur van de Nederlandse economie internationaal gezien niet sterk is. De structuur vertoont grote gaten en het lijkt erop dat Nederland zich niet kan veroorloven bepaalde sterke punten – zoals de energie-intensieve industrie – niet tot het uiterste te benutten. Een verslechtering van de vestigingsvoorwaarden door voorop te lopen bij milieuheffingen zal een desastreus effect hebben op de Nederlandse economie, tenzij Nederland bereid is genoegen te nemen met een lagere of zelfs een negatieve groei.

Het is van belang bedrijven te stimuleren onderzoek te doen naar milieuvriendelijker substituten voor processen en produkten. Mede daarom zal de overheid erop moeten toezien dat de industrie in staat blijft haar positieve rol in deze technologische vernieuwing te vervullen. Dit verdraagt zich niet met een beleid dat via regulerende heffingen substantiële extra lasten oplegt.

2.6.5 BEDRIJVEN NEMEN HET VOORTOUW

Zoals eerder is gezegd, is het in de VS gehanteerde confrontatiemodel gebaseerd op directe regelgeving en lijkt het Engelse consensusmodel meer op dat van Nederland. Maar, zou het bedrijfsleven niet zèlf het voortouw moeten nemen om de normen toe te passen die in overleg met de overheid zijn vastgesteld? Bedrijven kunnen zich bij de uitwerking van hun strategische plannen hierop richten. Omdat het gaat om een lange-termijnvisie en een veel tijd en geld vragende omschakeling, is het noodzakelijk dat de overheid zich als een betrouwbare gesprekspartner opstelt. Hierop zal bij de bespreking van de convenanten worden teruggekomen.

Er bestaan grote verschillen in de wijze waarop binnen bedrijven met milieuregelgeving wordt omgegaan. In een TNO-onderzoek worden de volgende methoden onderscheiden:
- Er zijn bedrijven die zich volgens een afhankelijke strategie uitsluitend verlaten op de regelgeving van de overheid.
- Bij een defensieve strategie is milieubeleid in enige vorm aanwezig, maar het bedrijf beperkt zich tot wat de overheid voorschrijft.

- Bij een offensieve en pro-actieve strategie wil het bedrijf de eigen milieuproblemen oplossen. Het milieu is echter een randvoorwaarde in het totale beleid.
- Bij een innovatieve strategie is het milieu een van de centrale doelstellingen van het beleid.

Veel bedrijven bevinden zich nog in stadia tussen een defensieve en een offensieve strategie. Dit is afhankelijk van de soort bedrijvigheid, maar vooral ook van de economische mogelijkheden en van wat de concurrentie doet.

Het programma 'Responsible Care'

Zeker voor de chemische industrie geldt dat zij een pro-actief beleid voert. Met het programma Responsible Care stelt deze industrie zich ten doel de veiligheids-, gezondheids- en milieueffecten van produkten en processen te controleren en te verbeteren. De Europese chemie ziet het programma Responsible Care als een grote stap op weg naar een industrie die verantwoord opereert, verantwoorde produkten maakt, de milieubelasting onder controle heeft en daarover verantwoording aflegt aan het publiek.

Onlangs heeft de chemische industrie internationaal nadere afspraken gemaakt. De chemische industrieën in Europa, Japan en de VS hebben bepaalde verplichtingen op zich genomen. Dit is een voorbeeld ter navolging op internationale schaal.

De doelstellingen van het milieubeleid moeten in overleg met de overheid worden bepaald. Convenanten zijn daarvoor de aangewezen weg. Dit zijn afspraken tussen overheid en industrie om milieuverontreiniging in bepaalde bedrijfstakken en gebieden te reduceren of zelfs te elimineren.

De industrie voelt zich verantwoordelijk en streeft vrijwillig de doeleinden van het milieubeleid na. Het is logisch dat de overheid de afspraken in een convenant laat volgen door wetgeving, zodat uiteindelijk alle partijen verplicht zijn tot dezelfde inspanningen. Een vergunningensysteem biedt daartoe de mogelijkheid.

Het risico dat achterblijvende bedrijven die nog uitsluitend een defensieve strategie toepassen, niet bereid zouden zijn mee te doen, kan worden opgeheven door een in de tijd gedoseerde wetgeving. Daardoor worden ook de achterblijvers verplicht tot dezelfde inspanningen.

Deze combinatie van Responsible Care, convenanten en wetgeving moet voldoende zekerheid bieden om een gezond leefmilieu te bereiken. Dit systeem zou kunnen worden vervolmaakt door een effectieve communicatie tussen de partners: consumenten, overheid en industrie. Jaarlijkse milieurapportages en vrijwillige milieuaudits kunnen een bruikbaar middel zijn om wederzijds vertrouwen te wekken. Van de overheid wordt dan een meerjarig beleid verwacht waarop de industrie haar maatregelen kan baseren.

2.6.6 CONVENANTEN NADER BESCHOUWD

De eigen verantwoordelijkheid die de industrie op zich neemt, houdt in dat de industrie en de overheid tot afspraken komen over lange-termijnmilieudoelstellingen. De voordelen van deze convenanten boven wettelijke maatregelen zijn:

- De problemen kunnen sneller worden aangepakt, namelijk direct als er overeenstemming is bereikt. Wetgeving vereist een meer gedetailleerde discussie en dus meer tijd. Convenanten zullen ook sneller leiden tot actie. Bedrijven weten waar zij aan toe zijn en wat de doelen zijn die zij moeten bereiken.
- Convenanten geven bedrijven de ruimte de doelen op een wijze te bereiken die bij hun beleid past. Zo kan bijvoorbeeld in een meerjarenplan tot vervanging van een verouderde fabriek met een onnodig hoge emissie worden besloten. Bedrijven hoeven niet overhaast end of pipe-oplossingen toe te passen, maar kunnen het doel na enige jaren in één stap bereiken.
- Deze vrijheidsgraad biedt bedrijven de kans hun middelen effectiever ten behoeve van het milieu in te zetten.
- Convenanten geven bedrijven tenslotte meer vrijheid om economische oplossingen te zoeken. Zij vormen een stimulans voor innovatie op het gebied van milieutechnologie.

Een nadeel van convenanten voor de overheid is de inperking van de politieke bewegingsruimte. In de politiek willen de standpunten nogal eens snel veranderen. Langjarige vrijwillige afspraken zijn alleen werkbaar als zowel de overheid als de beleidmakers voldoende discipline en een langjarig consistent beleid in acht nemen. De afspraken moeten zijn gebaseerd op wederzijds vertrouwen.

Een tweede mogelijk nadeel van convenanten voor de overheid is dat het parlement hierop minder invloed heeft dan op de wetgeving. Anderzijds zijn nieuwe wetten bijna nooit direct in volle omvang in de praktijk toe te passen en dus zeker in de aanvangsfase niet effectief, nog afgezien van de vereiste controle die vaak te wensen overlaat. De Nederlandse overheid betrekt in de besluitvorming over de convenanten ook consumentenorganisaties en milieuactiegroepen. Dit vangt gedeeltelijk het gebrek aan parlementaire invloed op.

Resumerend lijken de voordelen zwaarder te wegen dan de nadelen. Bovendien blijkt de samenwerking tussen overheid en bedrijfsleven vaak vruchtbaarder en stimulerender dan een situatie waarin de overheid dwingend voorschrijft wat het bedrijfsleven te doen staat.

Referenties

- *You can spend the environmental ECU only once*, toespraak S. de Bree, lid Raad van Bestuur DSM op 3 december 1991 bij de Environmental Protection Conference te Brussel
- MOL, T., B. SCHOLTENS, *Naar een duurzame economie: duurzame ontwikkeling als economische strategie voor Nederland*
- *Economie en milieu*, rapport nummer 18, Sociaal Economische Raad, 1991

- VOLLEBERGH, H.R.J., *Vervuilen schaadt, betalen baat*, in: ESB, 20 november 1991
- MUISWINKEL, L.F. VAN, e.a., *Economie en milieu en het Nederlandse beleid*, in: Economisch Statistische Berichten, 11 september 1991
- DELDEN, A.TH. VAN, e.a., *Onderneming en milieubeheer*, in: Economisch Statistische Berichten , 25 september 1991
- BOVENBERG, A.L., e.a., *Instrumentkeuze in het milieubeleid*, in: Economisch Statistische Berichten, 6 november 1991
- BAGCHUS, F., *Alleen milieuverbruiksbelasting leidt tot duurzame economie*, in: Milieumagazine, nr. 5, mei 1991
- TUININGA, E.J., *Naar een nieuw elan voor het milieu*, in: Economisch Statistische Berichten, 12 juni 1991
- FOLMER, H., *De interne markt en de gevolgen voor het milieu*, in: Economisch Statistische Berichten, 14 februari 1990
- NOË, W.C.H., P.A.G. VAN BERGEIJK, *Vrijhandel en het milieu*, in: Economisch Statistische Berichten, 30 januari 1991
- VOLLEBERG, H.R.J., J.L. DE VRIES, *Financiële instrumenten voor het milieubeleid*, in: Economisch Statistische Berichten, 26 september 1990

3. Efficiënte toepassing van elektriciteit in de industrie

3.1 INLEIDING

Wij gaan in dit hoofdstuk in op een efficiënt gebruik van energie en elektriciteit. Maar eerst volgen enige algemene overwegingen bij het gebruik van elektriciteit als energiedrager.

Elektriciteit is een hoogwaardige energiedrager. Een van de redenen is dat elektrische energie in het algemeen overal, altijd en steeds in dezelfde vorm (spanning en frequentie) voorhanden is. Centrale elektriciteitsproduktie maakt het gebruik van verschillende primaire energiebronnen mogelijk. Bovendien is de leverantie van elektrische energie onafhankelijk van klimatologische omstandigheden.

Eenmaal opgewekt is elektriciteit efficiënt, goed doseerbaar, universeel en milieuvriendelijk. Bij tal van industriële (in het bijzonder verwarmings)processen biedt elektriciteit zeer interessante mogelijkheden, vooral vanwege de bijna onbegrensde doseringsmogelijkheden en de zeer hoge energiedichtheden, die mogelijk zijn.

De opwekking van elektriciteit gaat, zoals bekend, met verliezen gepaard. De kosten van de opwekking maken elektriciteit, in vergelijking met andere energiedragers, tot een relatief duur produkt. Deze wetenschap deed bij de gebruikers van elektriciteit het idee ontstaan dat elektriciteit alleen dàn moet worden gebruikt, wanneer geen redelijk alternatief voorhanden lijkt.

Er moet rekening worden gehouden met het omzettingsrendement van elektriciteit in nuttige arbeid. Gedurende de laatste decennia zijn er op dit gebied aanzienlijke verbeteringen te constateren, verbeteringen die direct van invloed zijn op de belasting van het milieu. Ter illustratie worden in fig. 3.1 de tegenwoordige omzettingsrendementen van elektrische energie in licht vergeleken met het rendement van onder meer de vroegere gasverlichting. Het voorbeeld spreekt nog meer tot de verbeelding als wordt bedacht dat de warmteverliezen bij de omzetting van elektrische energie in licht nog steeds vrij hoog zijn.

De toepassing van elektriciteit voor 'kracht' (aandrijving) is een klassiek voorbeeld van de verminderde belasting van het milieu. Met de komst van de elektromotor verdwenen in de jaren twintig de met stoomkracht aangedreven, omvangrijke, inefficiënte en gevaarlijke centrale aandrijfsystemen voor werktuigen. Tegenwoordig zou een overhaaste keuze voor het gebruik van kleine verbrandingsmotoren, los

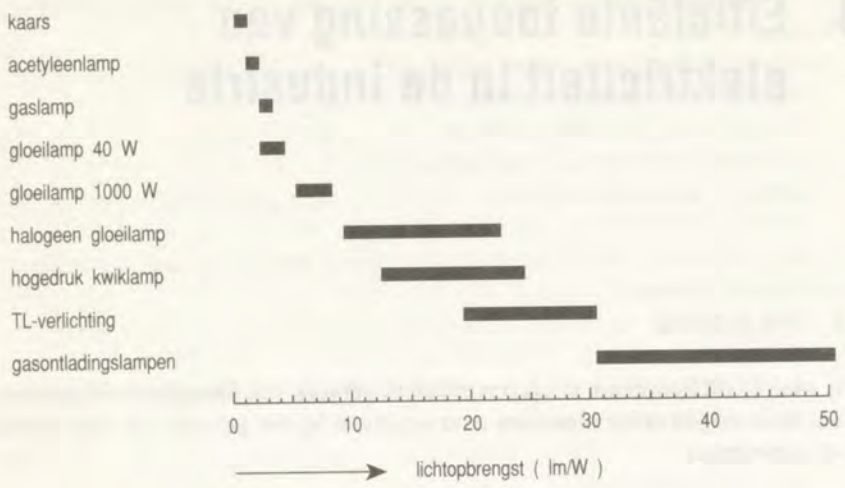


Fig. 3.1 Lichtopbrengst (indicatief) in lumen per watt primair vermogen

van andere technische complicaties, een belangrijke achteruitgang met betrekking tot het milieu kunnen betekenen.

Bij een beschouwing van mogelijke toepassingen van elektriciteit gaat het om drie aspecten:
- de elektrotechnische mogelijkheden om anderszins veroorzaakte milieubelasting of -vervuiling tegen te gaan of weg te nemen;
- energiebesparing door gebruik te maken van elektriciteit als energiedrager;
- de gunstige eigenschappen van elektriciteit met betrekking tot het milieu. Aan dit aspect is de eis verbonden dat de gebruikte elektriciteit met gebruik van de ontstane warmte wordt opgewekt.

Paragraaf 3.2 van dit hoofdstuk heeft betrekking op het eerste aspect. Er worden voorbeelden besproken van elektrische technieken die gebruikt kunnen worden om afvalstromen of (rookgas)emissies te reinigen. Veel van deze technieken zijn reeds lang bekend en worden op grote schaal toegepast. Ze kunnen echter vaak op alternatieve wijze worden ingezet, waarbij een rendementsverbetering wordt behaald. Dit kan dan weer resulteren in een verlaging van de belasting van het milieu. Voorbeelden hiervan zijn elektrolyse en centrifugeren. Er zijn diverse nieuwe ontwikkelingen die nog maar een beperkte toepassing hebben, maar zeker meer aandacht verdienen. Voorbeelden hiervan zijn omkeer-elektrodialyse, magnetische scheiding en elektroflotatie.

In paragraaf 3.3 wordt uitgebreid ingegaan op technische mogelijkheden tot energiebesparing door het gebruik van elektriciteit. Hierbij wordt veel aandacht besteed aan warmtetoepassingen. De flexibele doseerbaarheid (plaats, intensiteit en tijdsduur) voor vooral hogere temperaturen betekent vaak een geringere milieubelasting in vergelijking met andere energiedragers. Meer algemeen gesproken zijn bij het

gebruik van elektrische technieken in de industrie de volgende voordelen te behalen:
- besparing in energie- en materiaalgebruik;
- verlaging van de produktiekosten;
- verhoging van de produktkwaliteit;
- verbetering van de arbeidsomstandigheden;
- verlaging van de milieubelasting.

Aan het derde aspect – een efficiënte elektriciteitsopwekking – wordt in hoofdstuk 4 aandacht geschonken.

3.2 ELEKTRISCHE TECHNIEKEN TER BESTRIJDING VAN MILIEUVERVUILING

ir. G.H. Bontius

3.2.1 ELEKTROLYSE

Elektrolyse is gebaseerd op de omzetting van (opgeloste) ionen in moleculen die neerslaan op een elektrode en vervolgens kunnen worden verwijderd. Deze techniek wordt op grote schaal toegepast, vooral in de galvanische industrie. Ook voor het ontsluiten van onzuivere metalen (in oxydevorm) is elektrolyse een interessante mogelijkheid. Het energiegebruik is onder meer afhankelijk van de beginconcentratie en het verwijderingsrendement.

Bij reiniging en recycling is elektrolyse van belang voor het terugwinnen van metalen uit vloeibare afvalstromen. Edele metalen worden zo teruggewonnen en zware metalen verwijderd vóór lozing van de afvalstroom. In principe is deze techniek bruikbaar bij de (voor)behandeling van allerlei soorten vloeibare afvalstromen, mits de concentraties metalen niet te laag zijn.

3.2.2 ELEKTROFILTRATIE

Bij elektrofiltratie worden stofdeeltjes die zich in een gasstroom bevinden, in een sterk elektrisch veld (40 tot 110 kV/m) geladen. De geladen deeltjes worden afgevangen op (geaarde) neerslagelektroden en kunnen daarna worden verzameld. De inzet van elektrofilters voor het verwijderen van stofdeeltjes uit rookgassen en gassen afkomstig van industriële processen, is algemeen bekend. Elektrofilters worden vooral toegepast bij grotere hoeveelheden gassen. Het energiegebruik van een elektrofilter ligt bij grotere installaties met normale verwijderingsrendementen tussen 0,05 en 0,4 kWh per 1000 m^3 gas.

Een vrij nieuwe techniek is het natte elektrofilter. Dit is een combinatie van een elektrofilter met een natte wasser. Vóór het elektrofilter worden de gassen bevochtigd met een fijne waternevel. De druppeltjes, die ontstaan zijn op de stofdeeltjes,

worden vervolgens geladen in een elektrisch veld en in de vorm van een vloeistoffilm gevangen op een neerslagelektrode. Op deze wijze kunnen zeer kleine deeltjes (aerosolen) worden verwijderd en kan het vangstrendement sterk worden verbeterd. Bovendien lossen andere, gasvormige componenten zoals SO_2, HCl en vluchtige metalen in de vloeistofnevel op.

3.2.3 CENTRIFUGEREN

Centrifuges met hoge omtreksnelheden keren in vrijwel elke industriële sector terug. Voor het scheiden van mengsels (vast-vloeistof of vloeistof-vloeistof) met verschillende dichtheden in afvalstromen kan een centrifuge goed als (voor)scheider worden ingezet. Deze centrifuge is vaak te prefereren boven andere technieken zoals filtratie en bezinking. Het gebruik van centrifuges kan een proces sneller doen verlopen en een betere scheiding doen bereiken. In het algemeen is de omvang van de installatie bij een centrifuge beduidend kleiner dan bij conventionele scheidingstechnieken.

Bij veel processen waar een scheiding van vloeistof en vaste stof of vloeistof en vloeistof moet worden verwezenlijkt, kan een centrifuge energetisch gunstiger zijn dan een conventionele methode, waar meestal sprake is van indirect energiegebruik.

3.2.4 CONCENTREREN

Het concentreren van een oplossing door het oplosmiddel te verdampen, wordt vooral toegepast in de voedingsmiddelenindustrie. Ook in andere industrieën zijn er mogelijkheden. Het komt steeds vaker voor dat afvalwaterstromen met de gebruikelijke technieken niet voldoende kunnen worden gereinigd, omdat de eisen steeds strenger worden. Als alternatief kan men ertoe overgaan afvalstromen in te dampen tot een vast produkt dat vervolgens kan worden hergebruikt, verbrand of gedeponeerd.

Voor het concentreren door middel van verdamping is thermische energie nodig, vrijwel altijd in de vorm van stoom. Het indampen gebeurt in een aantal fasen, waardoor de benodigde stoom in feite meer keer kan worden gebruikt alvorens de stoom wordt gecondenseerd. Indampen is een techniek die veel thermische energie vereist.

Door de inzet van mechanische dampcompressie (MVR, Mechanical Vapour Recompression) wordt de behoefte aan thermische energie sterk gereduceerd. Bij MVR wordt de gebruikte stoom door middel van een (elektrisch aangedreven) compressor weer op een hoger exergetisch niveau gebracht; de stoom kan dan opnieuw worden gebruikt. Hierdoor wordt het stoomverbruik zeer laag; er zijn dan alleen nog lekverliezen. (In paragraaf 3.3.10 zal dit principe uitvoeriger ter sprake komen.)

3.2.5 *VERBRANDEN BIJ HOGE TEMPERATUUR*

Vast en vloeibaar afval van velerlei soort wordt verbrand waarbij de ontstane rookgassen worden gereinigd. Indien de verbranding niet volledig is, is de verwijdering van zeer schadelijke componenten uit de rookgassen soms niet voldoende mogelijk of zeer bewerkelijk. Als voorbeeld kunnen niet alleen dioxinen en furanen worden genoemd, maar ook andere polycyclische en/of gehalogeneerde koolwaterstoffen. Bij sterk vervuilde afvalstoffen kan verbranding bij zeer hoge temperaturen om milieutechnische redenen aantrekkelijk zijn, terwijl ook het totale rendement beter is.

Hiertoe zijn verschillende elektrische technieken beschikbaar. Deze worden ook bij andere processen gebruikt waar een relatief hoge temperatuur vereist is (bijvoorbeeld het smelten van legeringen). In paragraaf 3.3 komen deze technieken uitgebreid aan bod:

- plasma-verwarming (temperatuur 4.000 tot 20.000 °C)
  Een gas wordt geïoniseerd en sterk verhit ten gevolge van een boogontlading in een zogenaamde plasmatoorts.
- boogoven (temperatuur tot 2.500 °C)
  De warmte uit een boogontlading wordt direct gebruikt.
- elektrobrander (temperatuur tot 2.000 °C)
  In een conventionele gasbrander wordt een boogontlading gerealiseerd zodat de brandertemperatuur hoger wordt.
- infraroodovens (temperatuur tot 1.000 °C)
  De gewenste temperatuur wordt met behulp van infrarode straling bereikt.

Bij het gebruik van fossiele brandstoffen (vooral aardgas) is de maximum haalbare temperatuur beperkt tot circa 2.000 °C. Bovendien neemt de bruikbare energie snel af bij hogere temperaturen en gaat het merendeel verloren met de uitlaatgassen.

3.2.6 *OMKEER-ELEKTRODIALYSE*

Elektrodialyse (ED) is een techniek waarbij gebruik wordt gemaakt van membranen die selectief ionen doorlaten. Op deze wijze kunnen oplossingen worden ontdaan van bepaalde ionen of moleculen. Een goede reiniging is mogelijk. De drijvende kracht voor de ionen is afkomstig van een potentiaalverschil tussen twee elektroden. De inkomende vloeistofstroom wordt gesplitst in een gezuiverd eindprodukt en een stroom die een hoge concentratie aan ionen bevat.

Bij omkeer-elektrodialyse (EDR, 'Electro Dialysis Reversal') wordt de polariteit van de elektroden periodiek omgewisseld. Hierdoor wordt het risico van vervuiling van de membranen sterk verminderd. Met EDR kunnen diverse soorten afvalwater worden behandeld. EDR wordt toegepast bij het concentreren van oplossingen. De schone stroom kan worden hergebruikt of gerecirculeerd. EDR kan eveneens worden gebruikt bij het terugwinnen van metalen. De techniek kenmerkt zich door een relatief laag energiegebruik en kan zeker concurreren met de conventionele concentratietechnieken. Het energiegebruik is afhankelijk van vele factoren (bij het

terugwinnen van metalen kan een gebruik van 5 tot 15 kWh per kg teruggewonnen metaal bij hoge startconcentraties als richtgetal worden gehanteerd).

Ook andere toepassingen zijn mogelijk, bijvoorbeeld in de automobielindustrie. De carrosserieën van auto's krijgen een anti-corrosiebehandeling in een bad met zinkfosfaten. Vervolgens wordt de carrosserie afgespoten met gedemineraliseerd water. Het water raakt vervuild en moet worden behandeld (verwijdering van zink en fosfaten). Daarna wordt het geloosd. Met ED of EDR kunnen de kosten aanzienlijk worden gereduceerd omdat zowel de chemicaliën als het water kunnen worden hergebruikt.

3.2.7 OXYDATIE MET OZON

Het behandelen van water met ozon wordt reeds lang toegepast bij de bereiding van drinkwater en in rioolwaterzuiveringsinstallaties, vooral voor verwijdering van micro-organismen. In principe echter kunnen alle vloeibare afvalstromen, waarin oxydeerbare componenten aanwezig zijn, met ozon worden behandeld. Ozon is een zeer krachtig oxydatiemiddel dat selectief reageert met organische componenten. De restprodukten zijn onschadelijk, in tegenstelling tot oxydatiemiddelen op basis van chloor.

Ozon reageert goed met fenolen, cyaniden en methanol, maar ook andere verbindingen kunnen worden omgezet. De hoeveelheid ozon die voor voldoende oxydatie nodig is, wordt door diverse factoren bepaald. Als factoren kunnen onder andere de reactiesnelheid, de temperatuur van de vloeistof en de verblijftijd worden genoemd.

Ozon wordt verkregen door lucht of zuurstof door een cel te leiden waar elektrische ontladingen (hoogspanning) plaatsvinden. Een gedeelte van de zuurstof wordt omgezet in ozon. Het energiegebruik van een ozon-generator is circa 15 kWh per kg geproduceerd ozon, uitgaande van lucht. Bij zuurstof als basis is het energiegebruik circa 6 kWh per kg ozon. Ozon wordt meer en meer ingezet ter vervanging van andere oxydatiemiddelen. Een interessante, alternatieve toepassing is een combinatie van ozonisering en bestraling met ultraviolet licht (UV-licht). Hierdoor wordt de oxydatiesnelheid sterk vergroot. Het energiegebruik van de benodigde UV-lamp is gering.

3.2.8 MAGNETISCHE SCHEIDING

Magnetische scheiding wordt reeds lang toegepast bij het verwerken van vaste (afval)stoffen. Een nieuwe techniek voor het behandelen van afvalwater is het gebruik van een sterk magneetveld met een hoge gradiënt; namelijk 'high gradient magnetic separation' (HGMS). Bij deze techniek wordt afvalwater door een sterke magneet geleid. De deeltjes in het afvalwater die magnetische eigenschappen hebben, worden gevangen in een magnetisch filter. Zodra het filtermateriaal verzadigd is, wordt de magneet uitgeschakeld en het filter schoongespoeld. Het spoelwater bevat dan hoge concentraties afgescheiden componenten. Het is ook mogelijk

het proces continu uit te voeren. De gradiënt zal dan echter lager zijn en de scheiding minder volledig. Door het afvalwater te behandelen met bepaalde ijzerverbindingen kunnen ook niet-magnetische deeltjes worden verwijderd. Deze techniek staat bekend als magnetisch enten.

Magnetische scheiding is vooral geschikt voor het verwijderen van zware metalen en fosfaten uit afvalwater. Hierbij kunnen in een compacte installatie grote hoeveelheden water worden behandeld. Het energiegebruik van de magneet is laag, circa 15 Wh per m^3 behandeld afvalwater (bij een hoeveelheid afvalwater van 300 m^3/h).

3.2.9 ELEKTROFLOTATIE

Bij flotatie worden gesuspendeerde deeltjes (vast of olie-achtig) uit een waterige oplossing verwijderd door fijne luchtbelletjes door de oplossing te blazen. De gesuspendeerde deeltjes worden door de luchtbelletjes geabsorbeerd en komen bovendrijven. Daarna kan dan verwijdering eenvoudig plaatsvinden.

Bij elektroflotatie worden de belletjes verkregen door elektrolyse van het water. De ontstane gasbelletjes (H_2 en O_2) zijn erg fijn en talrijk, zodat een zeer goede afscheiding kan worden gerealiseerd. Deze techniek wordt vooral toegepast voor de behandeling van water- en oliemengsels met een gering dichtheidsverschil. Het energiegebruik ligt tussen de 50 en 400 Wh per m^3 behandeld afvalwater.

Referenties

- GARDAIS, D., e.a., *Environnement et Électricité, les procédés électriques de traitement des rejets industriels*, Dopee Diffusion, Avon, 1990
- JANSEN, W.J.L., *Elektrotechnologie, verwarmen met een plasma*, KEMA-rapport 00325-EO 89-3014, 1989
- *Energiebesparing en elektrotechnologie in de praktijk*, KEMA, 1990
- VOS, G. VAN DE, *Magnetische waterzuivering biedt perspectief*, in: I2-Procestechnologie, nr. 9, 1988

3.3 ELEKTROTECHNOLOGIE IN DE INDUSTRIE

ir. W. Boone

3.3.1 INLEIDING

In veel technieken in de industrie speelt elektriciteit de hoofdrol. Men spreekt wel van elektrotechnologie [1, 2]. De specifieke eigenschappen van een techniek bepalen in welke sector van de industrie en in welk deelproces deze eigenschappen met voordeel kunnen worden toegepast [3, 4].

Wanneer wordt geprobeerd een inventarisatie te maken van het gebruik van

elektriciteit in industriële processen, komen in eerste instantie de volgende technieken aan de orde:
- weerstandsverwarming;
- inductieve verwarming;
- diëlektrische verwarming;
- infrarood/ultravioletverwarming;
- boogverwarming;
- plasma-verwarming;
- laser;
- luchtmes;
- mechanische dampcompressie.

In deze opsomming hoort ook de warmtepomp thuis. Op deze toepassing wordt uitgebreid ingegaan in hoofdstuk 4.

In de volgende paragrafen zal vooral aan de praktische toepassingen van deze vormen van elektrotechnologie aandacht worden besteed. Helaas worden deze 'volwassen' technieken door onbekendheid en vooroordeel in Nederland nog te weinig gebruikt en gewaardeerd.

3.3.2 WEERSTANDSVERWARMING

Principe

Bij weerstandsverwarming wordt elektrische energie in een weerstand omgezet in warmte. De weerstand kan worden gevormd door een weerstandselement in bijvoorbeeld een oven, of in de vorm van een dompelaar. In beide gevallen spreekt men van indirecte verwarming. De warmte wordt via geleiding, convectie en straling naar het te verwarmen produkt 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 (orde van grootte ongeveer 100 kW/m^2).

Er zijn ovens zowel voor batchgewijze produktie als voor continue produktie via een lopende band [5]. De elektrische oven munt vooral uit door lage stilstandsverliezen, hetgeen direct samenhangt met de goede regelbaarheid van elektriciteit. 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 oxydatie te voorkomen. Als warmte-overdrachtmedia worden in ovens naast lucht onder andere stikstof, waterstof, koolmonoxyde, methaan of mengsels van deze gassen gebruikt.

Toepassingen van indirecte weerstandsverwarming

De indirecte elektrische oven is eenvoudig en wordt alom toegepast [1]. Met

indirecte weerstandsverwarming kunnen vermogensdichtheden van 40 tot 200 kW/m^2 worden bereikt.

Toepassingen van 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, smelten en lassen. Daarnaast wordt directe weerstandsverwarming 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 verwarming 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).

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 produkt diepgevroren, chemisch geconserveerd of ingeblikt hoeft te worden. De constructie van de elektrode die de stroom in het materiaal brengt, is van belang. Produkten die op deze manier kunnen worden gesteriliseerd, zijn sauzen, soepen, chili-con-carne en mayonaise.

Beton uitharden

Voor het versneld uitharden van beton moet het beton worden verwarmd. Dit kan met behulp van stoom. Een effectievere methode echter is elektrisch verwarmen. Daartoe kan men de bewapeningsdraden als weerstandselement gebruiken. Een directere methode is verwarming met een elektrische stroom die door het beton zelf wordt gestuurd. Daarbij worden elektroden in het beton gestort of tegen het beton geplaatst. De elektrische weerstand van nat, nog niet uitgehard beton is laag, de weerstand van uitgehard beton is hoog. Er moet dus op worden gelet dat het beton homogeen wordt verwarmd. Na een inleidende verwarming verloopt het proces verder zonder energietoevoer omdat bij uitharden van beton warmte vrijkomt.

3.3.3 INDUCTIEVE VERWARMING

Principe

Een wisselend magnetisch veld in een geleidend materiaal wekt kringstromen in dat materiaal op. De energie van deze kringstromen wordt in 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.

Bij inductieve verwarming wordt de energie overgedragen door het magnetisch veld. Het verwarmingscircuit voor inductieve verwarming vertoont 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.

Toepassingen

Hierna volgen vier voorbeelden van toepassingen van inductief verwarmen.

Verwarmen

Metaal moet worden verwarmd voordat het kan worden vervormd, bijvoorbeeld door walsen, stampen, smeden en extruderen. Een warmtebehandeling is ook nodig om de mechanische eigenschappen van het materiaal te verbeteren, bijvoorbeeld harden, ontlaten, temperen en spanningsvrij gloeien.

In veel gevallen zal een keuze moeten worden gemaakt tussen weerstandsverwarming of inductieve verwarming. Inductief verwarmen is relatief duur, vooral voor grotere installaties. Het energiegebruik komt in de regel gunstiger uit bij inductieve verwarming 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 produktie-aantallen voordelen oplevert.

Bij verwarmen ten behoeve van vervormen, zal een homogene verwarming worden nagestreefd [5]. In de meeste gevallen zal daartoe middenfrequent inductief worden verwarmd. Bij verwarmen voor verbetering van de mechanische eigenschappen gaat het vaak om oppervlaktebehandelingen, bijvoorbeeld het harden van tandwielen en aslagers. In dit geval hoeft alleen het oppervlak van het metaal te worden verwarmd. Het toepassen van een hoge frequentie is dan gunstig vanwege de kleine indringdiepte (skin-effect). Er worden vaak hoogfrequent-installaties gebruikt, afhankelijk van de afmetingen van het te verwarmen object. Fig. 3.2 geeft enkele voorbeelden van spoelvormen voor harden.

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

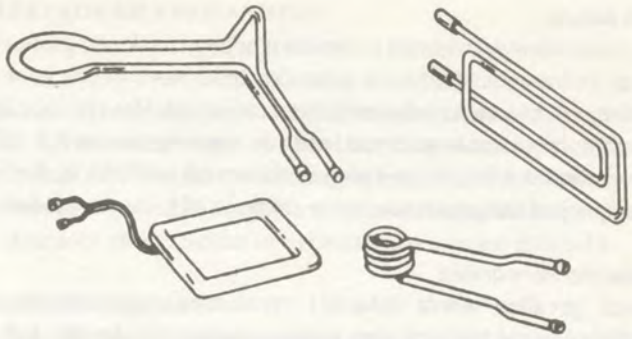
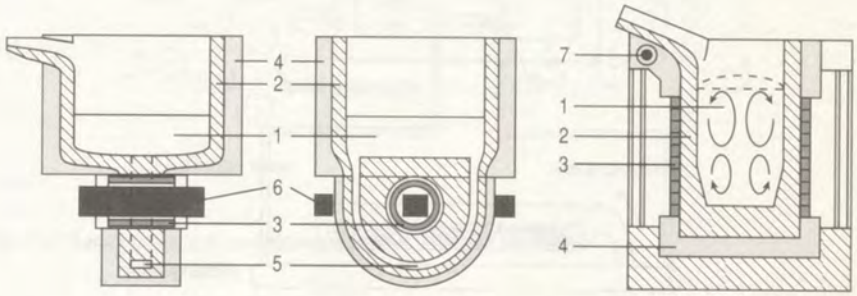


Fig. 3.2 Enkele voorbeelden van spoelvormen

worden zowel laagfrequente als middenfrequente ovens toegepast. De constructie verschilt en is mede afhankelijk van de metaalsoort. Fig. 3.3 geeft een laagfrequente inductiesmeltoven met gesloten ijzerkern weer. Dit type oven wordt toegepast voor het smelten van non-ferro-metalen zoals koper en aluminium. Elk type metaal vraagt 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 (zie fig. 3.3).



kanaaloven kroesoven

1 gesmolten metaal
2 vuurvast materiaal
3 primaire spoel
4 warmte-isolatie
5 smeltring (ring met gesmolten metaal, als 1)
6 ijzerkern
7 draaias

Fig. 3.3 Vormen van smeltovens

Solderen en lassen
Inductieve ovens voor verwarmen en smelten hebben vaak een groot vermogen en worden in de zware metaalindustrie gebruikt. Inductieve ovens voor solderen en lassen worden ook in andere industrietakken toegepast. Het zijn midden- of hoogfrequente ovens. 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 produkt.

Indirect inductief verwarmen
In een aantal gevallen wordt inductief verwarmen toegepast bij niet-metalen produkten. Deze bevinden zich dan in een metalen houder die inductief wordt verwarmd. De warmte wordt via geleiding overgedragen op het produkt. Zo worden bijvoorbeeld lakken op blikken gedroogd door de blikken inductief te verwarmen, en wordt het vochtprofiel in papier gehomogeniseerd door de papierwals inductief te verwarmen. Een karakteristieke toepassing is een trommeldroger waarvan de wand inductief wordt verwarmd [6]. Deze trommeldroger (zie fig. 3.4) werd ontwikkeld door het Electricity Research and Development Centre te Capenhurst, Engeland.

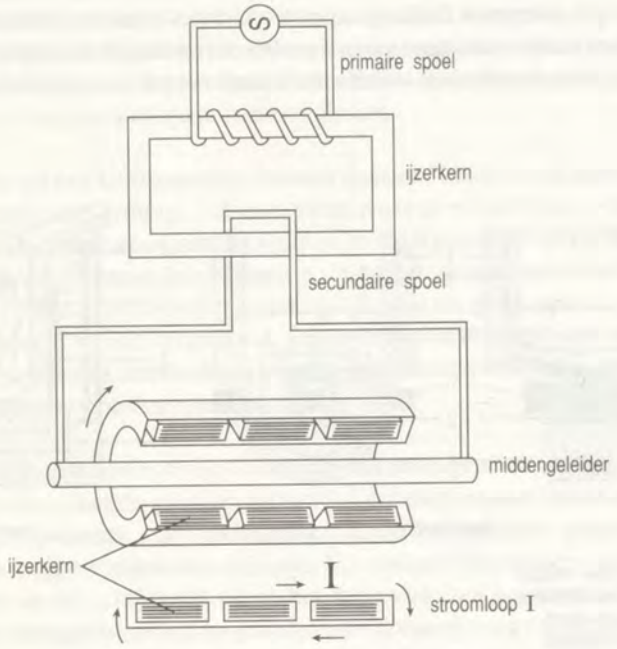


Fig. 3.4 Schema van een inductieve trommeldroger

3.3.4 DIËLEKTRISCHE VERWARMING

Principe

Bij diëlektrische verwarming wordt elektrische energie via een hoogfrequent elektrisch veld aan het materiaal toegevoerd en daar omgezet in warmte [7, 8]. Ook bij deze techniek vindt de warmteontwikkeling in het materiaal zelf plaats, zodat zeer lokaal kan worden verwarmd en geen warmte-overdrachtmedium nodig is. De warmte kan daardoor zeer efficiënt in het materiaal worden gebracht.

Diëlektrische eigenschappen

Een produkt kan alleen diëlektrisch worden verwarmd als het een slechte geleider is. Materiaal, geschikt voor diëlektrisch verwarmen, bevat vrije ladingdragers en/of elektrische dipolen (zie fig. 3.5). Bij een wisselend elektrisch veld trachten de ladingen de richting van het veld te volgen. De vrije ladingdragers komen daarbij in trilling, de dipolen gaan roteren. De verhoogde bewegingsenergie van de moleculen uit zich als warmte en dus door een stijging van de temperatuur. De door het elektrische veld geïnduceerde bewegingsenergie van de trillende ladingdragers en roterende dipolen wordt door wisselwerking tevens overgedragen aan naburige moleculen.

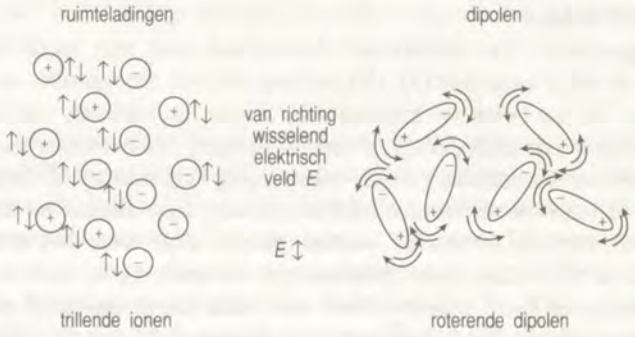


Fig. 3.5 Ladingdragers in een elektrisch veld

De juiste materiaaleigenschappen voor diëlektrisch verwarmen worden bepaald door de diëlektrische constante en de verlieshoek van het materiaal. De waarde van de diëlektrische constante wordt bepaald door het aantal dipolen per volume-eenheid. De mate waarin de dipolen hun bewegingsenergie overdragen (de mate van warmteontwikkeling in het materiaal) wordt aangegeven door de diëlektrische verlieshoek. De verlieshoek is eveneens een maat voor de warmteontwikkeling veroorzaakt door vrije ladingdragers. Een derde grootheid die bij diëlektrisch verwarmen wordt gebruikt, is de verliesfactor. De verliesfactor is het produkt van de diëlektrische constante en de verlieshoek.

De in de praktijk gebruikte frequenties zijn 13, 27, 900 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, terwijl voor kleine objecten met hoge gewenste vermogensdichtheden MG wordt gekozen. Tabel 3.1 geeft de diëlektrische constante en de verliesfactor van een aantal materialen voor twee frequenties bij diëlektrisch verwarmen.

	Temperatuur	27 MHz		2.450 MHz	
	(°C)	ε'	ε"	ε'	ε"
teflon	22	2,1	0,0003	2,1	0,0003
polytheen	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 3.1 De diëlektrische constante ε', de verliesfactor ε" voor verschillende materialen bij twee frequenties, respectievelijk RF en MG

Diëlektrisch drogen

Bij droogprocessen kan diëlektrisch verwarmen vaak met succes in de laatste droogfase worden toegepast [9]. Het verloop van een droogproces wordt gegeven in fig. 3.6. Na het (vaak op mechanische wijze) verwijderen van vocht tot een bepaalde lage vochtigheid, volgt de verdere droging van het materiaal. Bij gebruik van conventionele middelen kost dit onevenredig veel energie; de droogtijd neemt snel toe. Diëlektrisch verwarmen leidt in een dergelijke situatie tot een efficiënter gebruik van energie, omdat de warmte precies daar waar het nodig is wordt opgewekt, 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 – 5 worden bekort. Deze combinatie wordt aangeduid met de afkorting ARFA, Air Radio Frequency Assisted drying. Behalve de besparing op energie treedt eveneens een kostenbesparing op als gevolg van de kortere procestijd. Gelet op de benodigde investeringen ligt het voor de hand diëlektrische droging pas toe te passen als de klassieke middelen ontoereikend zijn.

De nu volgende vier voorbeelden van diëlektrisch drogen zijn afkomstig uit de textiel- en de voedingsmiddelenindustrie. Diëlektrische drogers worden echter ook op vele andere plaatsen met succes toegepast, bijvoorbeeld in de keramische industrie en bij lederwaren, bouwmaterialen, verpakkingen en papier.

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 bv gebeurde dit vroeger in een aparte bewerking in een batch-oven. De wol werd verpakt in netten, in de oven gehangen, gedroogd met hete lucht en na het drogen

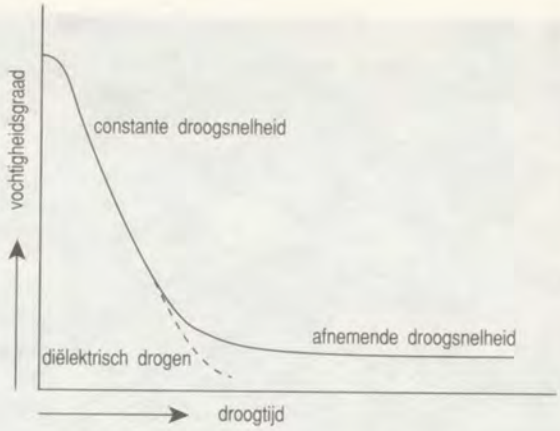


Fig. 3.6 Vochtigheidsgraad bij drogen, uitgezet tegen de tijd

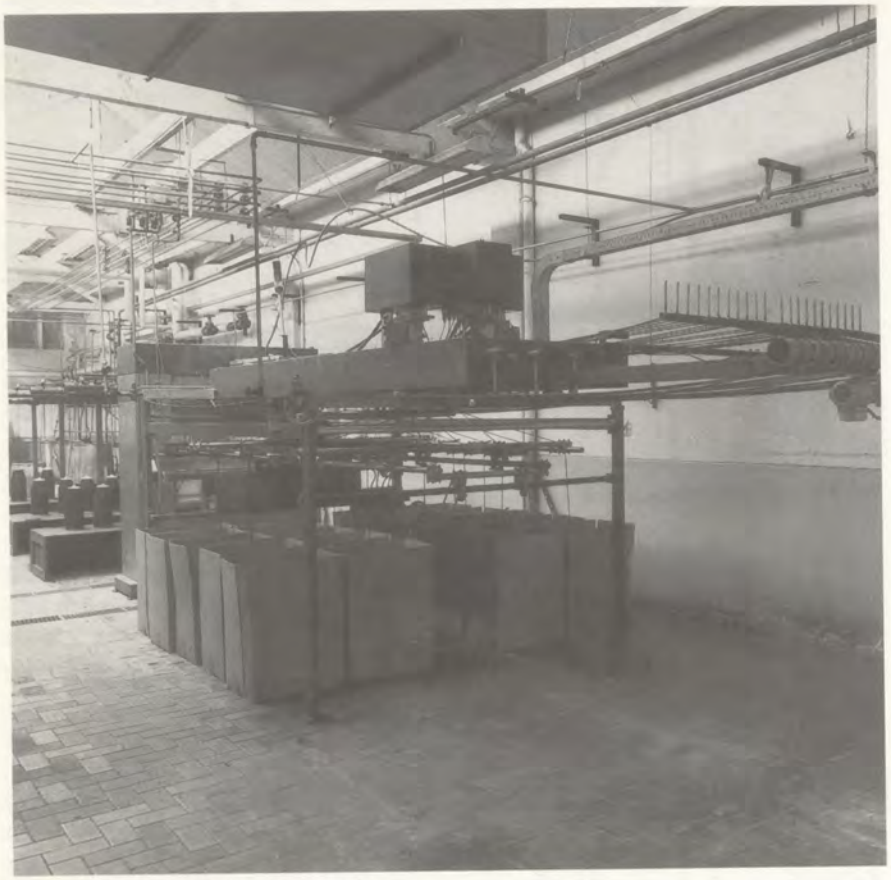
verpakt. Enige tijd geleden is een systeem ontwikkeld waarbij met gebruikmaking van een microgolfoven het gehele proces vervilten-drogen-verpakken in één procesgang wordt uitgevoerd. Fig. 3.7 geeft een beeld van de installatie. Op de voorgrond staat de verviltingsmachine, daarachter zijn drie 6 kW microgolf-droogovens zichtbaar.

Gebakvormen

Een te hoog vochtgehalte in bakkerijprodukten leidt snel tot schimmel. Een laag vochtgehalte (5%) is dus gewenst. Een van de deelprocesssen na het bakken is dan ook het drogen. Bij bakkerij Pruvé bv bleek het toepassen van een radiofrequente droger economisch aantrekkelijk vanwege de lage energiekosten en de kleine afmetingen van de oven. De investeringskosten van de radiofrequente droger (inclusief het benodigde vloeroppervlak) bedroegen slechts 56% van die van een conventionele oven. De lengte van de oven was slechts 20% van het conventionele alternatief. Het totale energiegebruik van de gecombineerde droger was ongeveer hetzelfde als van een conventionele installatie. De produktiecapaciteit werd met 30% verhoogd, terwijl vochtgehalten lager dan 5% worden bereikt. Fig. 3.8 geeft een beeld van het inwendige van de installatie.

Frites

Een van de gebruikelijke deelprocessen bij het produceren van voorgebakken frites is het drogen. Convectief drogen heeft vaak een harde, droge buitenkant tot gevolg, terwijl de binnenkant nog relatief nat is. Resultaat is een ongewenste textuur en een taai fritesstaafje. Om kwaliteitsredenen wordt dit drogen uitgevoerd met een ARFA-droger: de combinatie van drogen met hete lucht en diëlektrische energie. In fig. 3.9 is de ARFA-droger te zien die bij de firma Meijer Frozen Foods bv is geïnstalleerd. Met diëlektrisch drogen kan een homogene vochtverdeling in de frites worden verkregen.



Bron: Leidsche Wolspinnerij bv

Fig. 3.7 Drogen van wol met microgolven

Polyester garens
Bij het drogen van polyester garens moet een kwart liter water per kilogram produkt worden verwijderd. Dit proces vond plaats in een 25 kW elektrische heteluchtoven. Door het toepassen van een radiofrequente droger is de droogtijd tot 40% gereduceerd en een energiebesparing van 50% behaald. Bovendien is de kwaliteit verbeterd omdat het resterende vocht homogeen over de draadspoel is verdeeld.

Diëlektrisch verwarmen
Hierna volgen vier voorbeelden van diëlektrisch verwarmen.

Lassen van plastics
De warmte, meestal afkomstig van een 27 MHz generator, doet het plastic op de gewenste plaats smelten en daardoor hechten. De materialen dienen een hoge verliesfactor te hebben (PVC). Belangrijke toepassingen zijn bijvoorbeeld te vinden in de medische sector (infuus- en bloedzakken).

Blancheren, pasteuriseren en steriliseren
Het gaat hier om warmtebehandelingen in stijgende graad van intensiteit met als

Bron:
Pruvé bv

Fig. 3.8 Radiofrequent drogen van gebakvormen

doel bacteriën te vernietigen. Nadat de voedingsmiddelen zijn verpakt, kan het proces met bijvoorbeeld microgolfenergie worden uitgevoerd. Deze produktievolgorde biedt een essentieel voordeel ten opzichte van conventionele methoden.

Vulcaniseren van rubber

Meer dan de helft van alle industriële microgolftoepassingen betreft het vulcaniseren van rubber. Dit is een chemisch proces; het vindt plaats onder toevoer van diëlektrische warmte. De chemische structuur van het materiaal verandert, waardoor de eigenschappen aanzienlijk worden verbeterd. Omdat rubber de warmte slecht geleidt, biedt toepassing van diëlektrische warmte hier een duidelijk voordeel.

Uitharden van lijmen

Een laatste voorbeeld van diëlektrisch verwarmen is het uitharden van een lijmverbinding. Behalve dat de warmte slechts daar waar deze nodig is (namelijk in de lijm) wordt opgewekt, is het voordeel dat de slechte warmtegeleidbaarheid van materialen zoals hout geen rol meer speelt.

Bron: Meijer Frozen Foods bv

Fig. 3.9 ARFA-drogen van frites

3.3.5 VERWARMING MET INFRAROOD, ULTRAVIOLET OF ELEKTRONENSTRALEN

Principe

Infrarode (IR) en ultraviolette (UV) straling wordt opgewekt in een elektrische lamp of buis. Het is een straling met een zeer hoge frequentie. Bij toepassing voor verwarming wordt de straling op het te verwarmen produkt gericht. Dit produkt absorbeert een deel van de stralingsenergie die wordt omgezet in warmte. In feite wordt bij infrarood- en ultravioletverwarming gebruik gemaakt van een klassieke manier om warmte over te brengen, namelijk door straling. Overigens vindt er ook nog enige overdracht van energie door convectie plaats [10].

Bij infraroodverwarming zijn drie golflengtegebieden te onderscheiden:
- langgolvige stralers (4 – 10 μm);
- middengolvige stralers (2 – 4 μm);
- kortgolvige stralers (0,76 – 2 μm).

Eigenschappen stralers
De voornaamste eigenschappen van de stralers zijn samengevat in tabel 3.2.

Toepassing van infraroodstralers
Infraroodverwarming kan worden toegepast in infraroodovens of met open stralers [11]. In beide gevallen wordt een aantal lampen tot een of meer stralingspanelen gecombineerd. Het voordeel van een oven is 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 produkt door. IR-straling 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 IR-ovens gering. Daarnaast zijn de bekende voordelen van elektrotechnologie van toepassing, zoals goede regel- en doseerbaarheid en de mogelijkheid tot automatiseren; een energie-overdrachtmedium is niet nodig. Infraroodverwarming wordt onder andere toegepast in de automobielsector (het drogen van spuitwerk, vooral na plaatwerkreparaties). Tabel 3.3 geeft een overzicht van mogelijke toepassingen in verschillende industriesectoren.

Ultravioletverwarming en elektronenbombardement
Ultravioletverwarming en elektronenbombardement (EB, ook wel elektronenstraalverwarming genoemd) zijn twee totaal verschillende technieken. Toch worden ze hier gezamenlijk behandeld omdat ze op dezelfde toepassing zijn gericht: het vernetten en uitharden van polymere coatings.

Bron:
Frozen
ods bv

In beide technieken is de energie van de straling hoog. Voor UV-licht blijkt dit uit fig. 3.10. 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 kwikdamplampen 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 versneller. Elektronen worden vrijgemaakt uit een kathode. Deze bestaat vaak uit een metalen draad die tot zeer hoge temperatuur wordt verhit. De uit de kathode tredende elektronen worden met behulp van een hoge spanning versneld. De bundel elektronen wordt op het produkt 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

		(°C)	maximale radiantie (μm)	maximaal (kW/m²)	waarbij nog 10% energie-uitstraling)		door de produkten	van de straling	
IR kortgolvig	lamp	2.000	1,4	10	1 seconde	3.000 uren	belangrijk (vereist isoleren)	goed	homogene verwarming voor dikke produkten (enkele mm)
	kwartsbuis	2.200	1,2	300	1 seconde	5.000 uren		goed	
IR middengolvig	kwartsbuis	1.050	2,2	70	30 seconden	5.000 uren tot 10.000 uren	weinig	middelmatig	de verwarming is relatief oppervlakkig en wordt goed geabsorbeerd door vochtige produkten
	straalpaneel	650	3,5	25	2 minuten	meer jaren	weinig	middelmatig	
	metalen stralingselement	750	2,8	40	2 minuten	meer jaren	weinig	middelmatig	
IR langgolvig	straalpaneel pyres	350	4,6	15	5 minuten	meer jaren	weinig	klein	de verwarming is oppervlakkig en dus geschikt voor dunne produkten
	keramisch element	300 tot 700	3 tot 5	40	5 minuten	meer jaren	weinig	klein	

Tabel 3.2 Voornaamste eigenschappen van infraroodstralers

Metaal	Textiel	Kunststof	Voeding
– bakken van verf	– drogen van stof en van lijm	– verwarmen vóór het vacuumvormen	– bakken van koekjes
– verwarmen van assen	– polymerisatie van harsen	– drogen van korrels	– drogen van beschuiten
– drogen van gewassen stukken	– drogen van drukinkt	– drogen van gewassen bladeren	– opwarmen van voedingsmiddelen
– vóórverwarmen van lasnaden	– thermofixatie van latexschuim op de rugzijde van tapijten	– verwarmen vóór het plooien van buizen	– roosteren van vlees
– drogen van vernis		– polymerisatie van kunststoffen	– bakken van een korst op leverpastei
– drogen van glazuur			– pasteuriseren en steriliseren van melk, vruchtesap
– verwarmen vóór het zandspuiten			

Glas	Drukkerij	Papier	Anders
– voorverwarmen van flessen	– drogen van inkt	– drogen van papier	– drogen van houten panelen
– voorverwarmen van gelaagd glas	– drogen van zeefdrukken	– drogen van lak	– drogen van tabak
– drogen van glazuur	– drogen van behangpapier	– polymerisatie van toevoegprodukten	– afdichten van batterijen
– drogen van spiegels en van vernis ter bescherming van de spiegellaag	– verwarmen van inkt		– smelten van was
			– verwarmen van krimpfolie

Tabel 3.3 Mogelijke toepassingen in verschillende industriesectoren

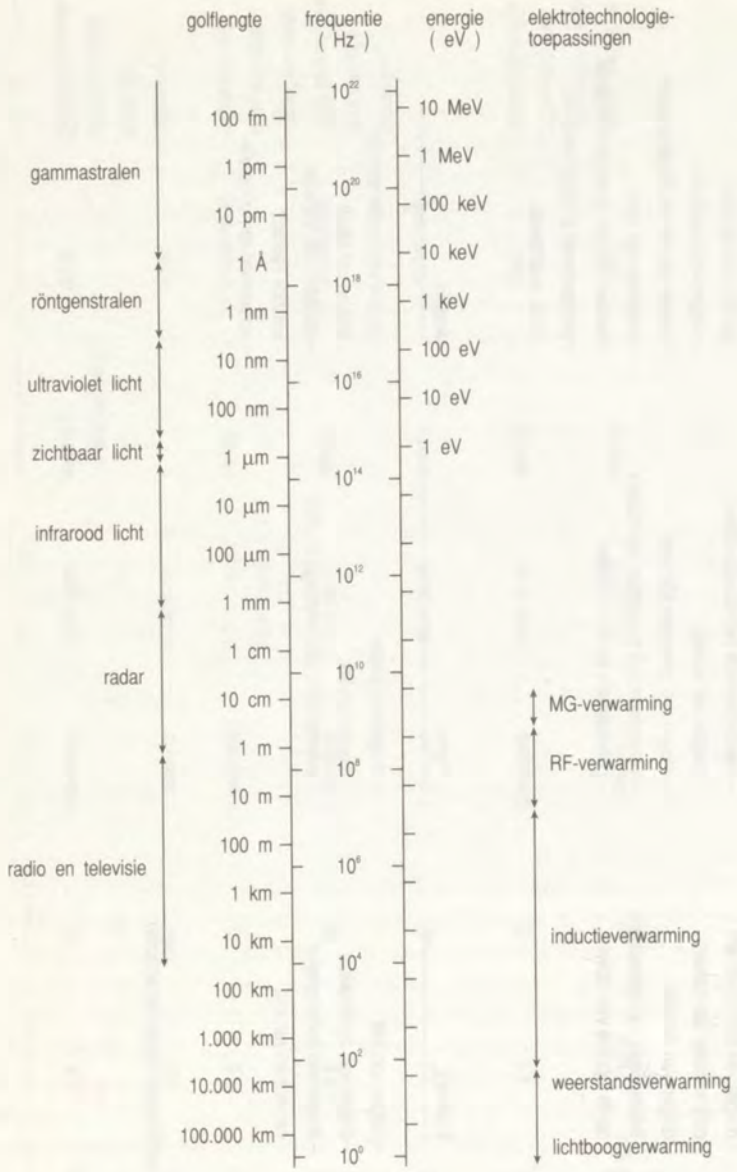


Fig. 3.10 Elektrotechnologieën geplaatst in het frequentiespectrum

moet het materiaal in enige mate transparant zijn voor UV-licht. Elektronenstralen dringen goed in het materiaal door. Uitharden met een elektronenbombardement verloopt sneller dan met UV-straling. Voor uitharding met behulp van UV-licht moeten foto-initiatoren in de coating aanwezig zijn. Het uitharden met behulp van UV- en EB-technieken heeft enkele belangrijke voordelen boven conventionele coatingtechnieken. Het uitharden gaat snel en er is geen warmtebehandeling nodig. Zo kunnen ook temperatuurgevoelige materialen 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 lakken op metaal, het drogen van hout, papier, inkt en lijm, voor textielveredeling en lamineren (zoals in melkkartons). Daarnaast kunnen UV- en EB-technieken worden toegepast bij de produktie van magneetbanden, compact discs, glasvezels en printplaten. EB wordt eveneens gebruikt voor het steriliseren van medische apparatuur en van voedsel, zoals dat ook geschiedt met gamma-straling.

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.

3.3.6 BOOGVERWARMING

Principe
In de boogoven wordt de elektrische energie via een boogontlading omgezet in warmte [5]. De warmte wordt gebruikt voor smelten en lassen van metalen. De boogelektroden bevinden zich in de smeltzone zelf, de boogenergie wordt daardoor 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.

Toepassingen
Hierna volgen vier voorbeelden van toepassingen van boogverwarming.

Wisselstroomboogoven
In de boogoven zijn drie elektroden aanwezig (driefasensysteem). 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 grafietelektroden. Deze elektroden kunnen stroomdichtheden tot 30 A/cm^2 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.
Het vermogen van de boog komt niet geheel ten goede aan het smelten van het metaal, er treden warmteverliezen op. Als deze verliezen worden verdisconteerd, spreekt men over het actieve rendement.

De wisselstroomboogoven (zie fig. 3.11) wordt het meest toegepast. Deze oven wordt onder andere gebruikt voor het smelten van ijzer en staal en voor de produktie 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 metallur-

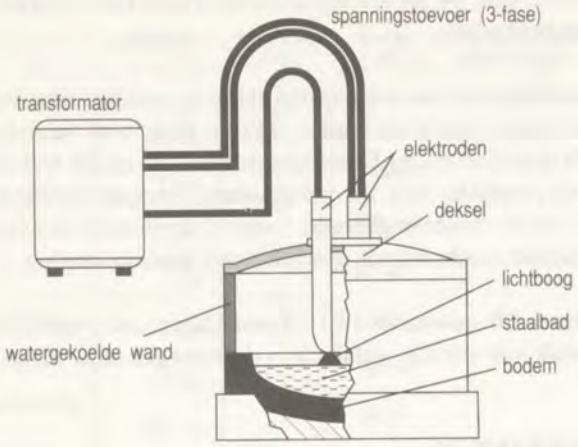


Fig. 3.11 Wisselstroomboogoven

gische bewerkingen ligt op 500 – 700 kWh per ton. Het actieve rendement van de oven ligt rond de 70 – 75%.
De wisselstroomboogoven wordt voorts toegepast voor de produktie van allerlei ijzer- en staallegeringen zoals ijzersilicium, chroomstaal, mangaanstaal, en voor de produktie van silicium, calciumcarbide en fosfor.

Gelijkstroomboogoven
Gelijkstroomboogovens worden 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; het skin-effect en ook het proximity-effect ontbreken. (Beide effecten hebben tot gevolg dat de geleidingselektronen zich voornamelijk langs het oppervlak van de geleiders bewegen. 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.

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 vacuümgelijkstroomboogoven kunnen naast edelstaal en andere ijzer- en staallegeringen zeer zuivere metalen als tantaal, titaan, zirkoon, molybdeen, niobium, hafnium en wolfraam worden geproduceerd.

Vonkerosie
Een zeer bekende toepassing van de elektrische boog is het lassen van metalen. Een meer bijzondere en 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 spanningsimpulsen opgewekt. Door de hoge spanningpuls ontstaat doorslag van de elektroden naar het werkstuk.

Op deze manier zijn 'verspaningen' van verschillende duizenden mm^3 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.

3.3.7 PLASMA-VERWARMING

Principe
Plasma-verwarming vindt plaats met behulp van een plasmatoorts. Daarin wordt in een gasstroom een gasontlading in stand gehouden die zorgt voor een plasma, een zeer heet geïoniseerd gas met een hoge energiedichtheid. Plasma-verwarming wordt toegepast in industriële processen waar hoge temperaturen vereist zijn.

Het plasma bestaat uit positieve ionen en negatieve elektronen en is daarom elektrisch geleidend. De beweging van het plasma kan magnetisch worden beïnvloed, het is immers een geleidend medium. Naast magnetische beïnvloeding heeft de sterke gasstroom effect op het plasma. De temperaturen in het plasma variëren tussen 3.000 en 20.000 °C [12].

Er worden twee typen plasma-bogen onderscheiden: de overgedragen en de niet-overgedragen boog. Fig. 3.12 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 elektrode-opening.

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.

Toepassingen
Veel toepassingen van plasma-verwarming liggen in de staalindustrie. De plasma-

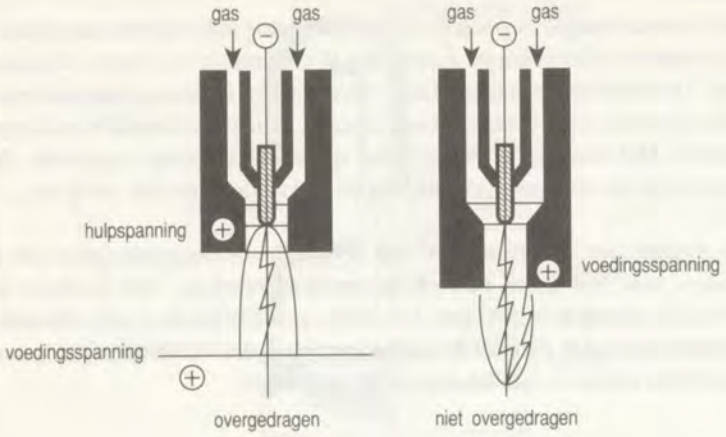


Fig. 3.12 Basistypen van de plasmatoorts

toorts wordt gebruikt om bestaande technieken te verbeteren. De produktie 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 produktie van diverse ijzerlegeringen zoals ijzerchroom, ijzermangaan en ijzersilicium. Ook wordt de plasmatoorts gebruikt om non-ferro-metalen als 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.

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 titaniumdioxyde en acetyleen geproduceerd. De plasmatoorts wordt eveneens toegepast in de cement- en papierindustrie. Ook in de geavanceerde coating-technologie vindt de plasmatoorts een toepassing, namelijk in thermisch spuiten. Met deze techniek kunnen in motoren en gasturbines lagen worden aangebracht, waardoor het rendement stijgt en de slijtage vermindert. Ook kunnen laagwaardige materialen van hoogwaardige oppervlaktelagen worden voorzien.

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 plasmatoorts 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.

3.3.8 LASER

Principe

Het woord laser is van oorsprong een afkorting: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Een laser is dus een lichtversterker [11]. Hij creëert een stroom fotonen die een identieke frequentie (monochromatisch), fase (coherent) en richting hebben. De eerste laser werd gebouwd rond 1960.

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, stabielere 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 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.

Een laser moet worden gekoeld. De energie-efficiëntie van een laser is zeer slecht. Enkele belangrijke voordelen van lasers in de industrie zijn:
- op kleine oppervlakten zijn zeer grote vermogensdichtheden realiseerbaar;
- instelling kan met zeer grote nauwkeurigheid geschieden.

Toepassingen

Toepassingen zijn vooral te vinden bij geavanceerde technieken als 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. Andere bewerkingen die met lasers kunnen worden uitgevoerd, zijn markeren en graveren, microbewerkingen zoals boren, wegsmelten en vastzetten (bijvoorbeeld het oognetvlies) en het uitvoeren van warmtebehandelingen (oppervlakteharden op moeilijk te bereiken plaatsen). CO_2-lasers worden veel gebruikt voor het snijden van allerhande materiaal (staal, weefsels, plastic, papier).

3.3.9 LUCHTMES

Principe

Natte oppervlakken van produkten met uiteenlopende geometrieën kunnen zeer

effectief worden gedroogd met een luchtmes. Een luchtmessysteem bestaat uit de componenten (zie fig. 3.13) elektromotor, ventilator, drukkamer en spuitmond.

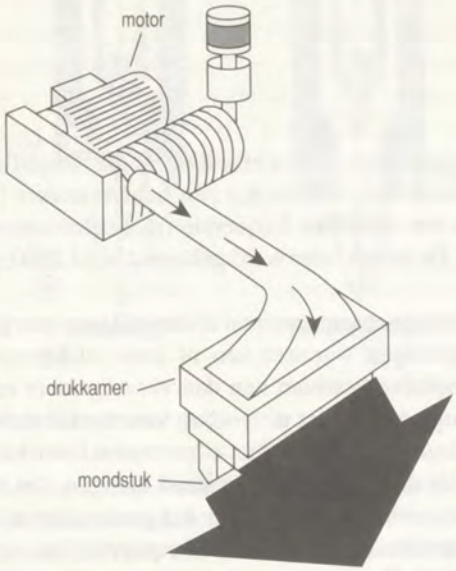


Fig. 3.13 Tekening van een luchtmessysteem

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. De oppervlakken van de produkten worden gedroogd door de luchtstraal met hoge snelheid over het vochtige oppervlak te spuiten (zie fig. 3.14). Door de luchtstraal wordt de vloeistoffilm opgebroken, de vloeistof wordt voor het grootste deel verneveld en de rest van het vocht verdampt.

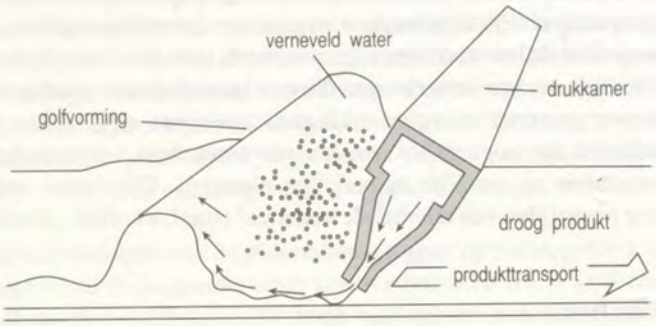


Fig. 3.14 Principe van vochtverwijdering met een luchtmessysteem

Het proces is energetisch gezien zeer efficiënt omdat bij het vernevelen (mechanisch drogen) geen verdampingsenergie hoeft te worden toegevoerd.

Toepassingen
De techniek wordt gebruikt voor het drogen van mechanisch sterke materialen zoals aardewerk, metaalplaten, tapijten en fruit. De investeringskosten zijn relatief laag. Andere voordelen zijn dat de installaties over het algemeen weinig ruimte vragen en het luchtmes eenvoudig in bestaande processen is in te passen.

3.3.10 MECHANISCHE DAMPCOMPRESSIE

Bij mechanische dampcompressie wordt de warmte-inhoud van de gevormde damp (meestal waterdamp) teruggewonnen, doordat de damp op een hoger drukniveau wordt gebracht. Bij een hogere druk ligt de condensatietemperatuur hoger. Er is een relatief geringe hoeveelheid elektrische energie voor de aandrijving van de compressor nodig, waarmee de terugwinning van verdampingswarmte plaatsvindt. Mechanische dampcompressie is dus een interessant alternatief voor thermische dampcompressie bij indampinstallaties [13].

Bij indampen met mechanische dampcompressie gaat geen verdampingswarmte verloren. De onttrokken damp wordt door middel van een compressor in druk en temperatuur verhoogd en vervolgens als verwarmingsmedium teruggevoerd naar de indamper (zie fig. 3.15). In de indamper condenseert de damp, zodat de verdampingswarmte volledig wordt hergebruikt. In de praktijk is voor het voorverwarmen van het produkt en voor het opvangen van de procesvariaties een kleine

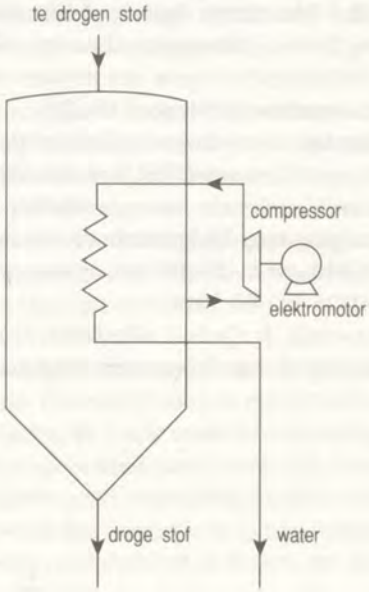


Fig. 3.15 Mechanische dampcompressie met een eentrapsverdamper

hoeveelheid stoom nodig. De voor de compressie benodigde energie is een factor 10 tot 20 kleiner dan de warmte-inhoud van de onttrokken damp.

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 (bijvoorbeeld het indikken van melk en wei en het drogen van dierlijk afval). Belangrijke voordelen van deze techniek zijn het lage energiegebruik en het vermijden van stankoverlast.

Literatuur

[1] *Elektrische technieken voor warmteprocessen*, VEEN, rapport 71484-WPB 870688, Arnhem, 1987

[2] BOONE, W., W.J.L. JANSEN, *Elektrotechnologie, een nieuw industrieel elan*, in: Energiespectrum, 1989

[3] *Electrotechnology reference guide*, EPRI Report EM-4527, Project 2613-5, april 1986

[4] *Efficiënt gebruik van elektriciteit in de industrie, 80 besparingsideeën*, VEEN, Arnhem; Sven, Apeldoorn; Novem, Sittard, 1988

[5] RUDOLPH, M., H. SCHAEFER, *Elektrothermische Verfahren, Grundlagen, Technologien und Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin, 1989

[6] *Electrical drying in industry*, International Union of Electroheat, Working Group M. Maljean, e.a., 1988

[7] JANSEN, W.J.L., *Diëlektrische technologie in de industrie*, in: Elektrotechniek 67, nr. 7, 1989, pp. 641-648

[8] METAXAS, A.C., R.J. MEREDITH, *Industrial microwave heating*, IEE Power Engineering Series 4, Peregrinus, London, 1983

[9] JANSEN, W.J.L., *Diëlektrisch drogen: een nieuwe optie*, in: Energiespectrum, september 1991, pp. 219-227

[10] *Syllabus Themadag Infrarood drogen in industriële processen*, Energie-Technologisch Centrum ETECE, 6 november 1987

[11] *Syllabus Symposium Verwarmen van oppervlakken met behulp van elektriciteit*, Vereniging voor Elektrotechnologie, Arnhem, 6 juni 1991

[12] JANSEN, W.J.L., *Elektrotechnologie, verwarmen met een plasma*, KEMA-rapport 00325-EO-89-3014

[13] WEKKEN, B.C. VAN DER, P. QUACK, *Mechanische dampcompressie goedkoper dan thermische*, in: Procestechnologie, september 1990

3.4 GEBRUIK VAN ELEKTRICITEIT IN DE PROCESINDUSTRIE

dr.ir. A.A.H. Drinkenburg

3.4.1 INLEIDING

Het gebruik van elektriciteit in de procesindustrie is zeer divers. We kunnen ruwweg de volgende categorieën van gebruik onderscheiden:
- als krachtbron;
- voor conditionering. (Onder conditionering wordt het gereed maken van produktstromen voor een volgende fysische of chemische operatie verstaan. Voorbeelden: verwarmen, koelen, bevochtigen, op goede deeltjesgrootte brengen en voormengen.)
- voor scheidingsdoeleinden;
- voor procesregeling en instrumentatie;
- ten behoeve van elektrochemische en fotochemische reacties.

Voorts zijn er nieuwe ontwikkelingen waarin het gebruik van elektriciteit een belangrijke rol speelt.

De procesindustrie is zeer energie-intensief. Dat betekent dat deze industrie niet kan volstaan met het afnemen van elektriciteit uit openbare of particuliere bron, maar dat de functie van elektriciteitsbron, intern en eventueel ook extern, moet worden geoptimaliseerd. Zolang de opwekking van elektriciteit nog gepaard zal gaan met een relatief laag thermisch rendement en er voor de restwarmte in de maatschappij geen gegarandeerde afzet bestaat, zal het economisch voordelig blijven lokaal elektrische energie op te wekken onder directe gebruikmaking van de restwarmte (warmte-krachtkoppeling). Op warmte-krachtkoppeling zal in het volgende hoofdstuk uitvoerig worden ingegaan.

Een tweede en steeds belangrijkere reden waarom de procesindustrie rechtstreeks bij elektriciteitsopwekking wordt betrokken, is het komende hergebruik van kunststofafval. Uiteraard zal de industrie proberen een zo groot mogelijk percentage kunststof direct voor hergebruik geschikt te maken, maar een zeker gedeelte zal moeten worden gepyrolyseerd (soort vergassingsproces) en/of verbrand. Het lijkt handzaam dit verbrandingsproces parallel aan verbranding voor het opwekken van energie (thermische recyclage) uit te voeren.

Het is goed hier enige aandacht te besteden aan de produktgang van de (petro)-chemische procesindustrie. Grondstof voor de petrochemische industrie is hoofdzakelijk nafta, een aardoliefractie. Deze wordt (thermisch) gekraakt tot hoofdzakelijk etheen en propeen, de zogenaamde monomeren. De monomeren worden daarna weer in een nieuwe volgorde gepolymeriseerd tot basispolymeren voor de kunststofindustrie. In wezen wordt dus energetisch de trap opgegaan door de grondstoffen (laag gepolymeriseerde produkten) af te breken tot monomeren en daarna de trap afgegaan door polymerisatie.

De energie voor het thermisch kraken wordt voor het grootste deel uit de nafta zelf

gewonnen door verbranding van restprodukten. De energie die vrijkomt bij het polymerisatieproces wordt grotendeels weggekoeld. Alles bij elkaar is dit dus niet erg energie-efficiënt. Wellicht dat een andere basisstof voor kunststof, te weten aardgas, in de toekomst voor rendabeler processen kan gaan zorgen. Vooralsnog is er een lange weg te gaan. De chemische industrie borduurt voort op de verkregen grondstoffen uit de petrochemische industrie door middel van addities, oxidaties, enzovoorts. In de regel zijn deze processen exotherm.

3.4.2 ELEKTRICITEIT ALS KRACHTBRON

Breken, malen, zeven

Een belangijk deel van het elektriciteitsgebruik in de procesindustrie wordt besteed aan het gereedmaken van vaste stoffen voor verdere behandeling. Dat gebeurt al gedeeltelijk bij de ertswinning, maar gaat nog verder in de grondstofbereidende industrie. Verkleinen, breken, malen, gevolgd door zeven vergen ongeveer 5% van de totale elektrische energieproduktie. Veelal wordt de verkleiningsstap weer gevolgd door een compounderingsstap (mengen en/of reageren) en agglomeratie (omzetten van poeders in 'brokken'). Agglomeratie vindt plaats door granuleren en pelleteren. Dit is nodig om een stofvrij handelbaar produkt te krijgen of ter wille van intrinsieke procestechnische eisen (bijvoorbeeld vermindering van drukval over hoogovenbedden).

Mengen en roeren

Mengen en roeren is een basisoperatie in de procesindustrie die vaak met zeer grote energie-consumptie gepaard gaat. De bedoeling is fysische opmenging van componenten, het in dispersie houden van vloeistof-vloeistof- of vloeistof-vast-systemen of het laten reageren en/of extraheren (bijvoorbeeld van een component in de gasfase die daartoe eerst in de vloeistof moet oplossen). Van de grote benodigde agitatie wordt vaak zijdelings gebruik gemaakt door gelijktijdig warmte over te dragen.

Energetisch gezien is het meng- en roerproces van dispersies zeer inefficiënt. Immers, zeer veel energie wordt door de gehele vloeistof gedissipeerd, terwijl het bij bijvoorbeeld gas-vloeistof-dispersies slechts gaat om een laagje ter dikte van 100 micrometer rondom de gedispergeerde bellen. Zelfs voor zeer fijne dispersies worden dan slechts enkele procenten van de gedissipeerde energie nuttig gebruikt. De rest gaat verloren. Roermotoren van meer dan 50 kW op relatief kleine vaten zijn geen uitzondering. Directe roering door middel van oppervlakte-actieve energiedissipatie zou te prefereren zijn. Soms gebeurt dat automatisch als er sprake is van grote verschillen in oppervlakte-energie (spontane emulsificatie), soms kan roeren door statische en dynamische elektrische velden teweeg worden gebracht. Mengen en roeren is echter vooralsnog geen terrein voor subtiele acties.

Roterende apparatuur

Pompen, compressoren, ventilatoren gebruiken veel energie vaak op economisch efficiënte wijze. Rendement op energie is aan de maat. Speciaal bij compressoren wordt hieraan de laatste tijd veel aandacht besteed, mede omdat een laag energetisch

rendement tot oververhitting leidt en daardoor tot een extra laag compressierendement. Dit geldt vooral bij compressoren in serie. Een regelbaar toerental komt daarom steeds meer in gebruik.

Vastestofbehandeling
Als vervolg op malen en zeven wordt elektrische energie gebruikt voor het transport en de opslag van vaste stoffen. Vaak door middel van indirect pneumatisch transport, soms door middel van banden en trilgoten (schudgoten).

Centrifuges, decanters
Centrifuges en decanters worden gebruikt voor de afscheiding van vaste stoffen uit slurries. Vaak zijn dit grote gebruikers van energie, niet zozeer door het stationaire gedrag, maar door het energiegebruik bij het op gang komen na stilstand. Dikwijls kunnen centrifuges met succes vervangen worden door bijvoorbeeld filterbanden met een veel geringer energiegebruik.

Extruders
Een extruder is een 'alleskunner' ('allesmoeter'?) op het gebied van kunststofverwerking: mengen, ontgassen, kneden, compounderen, smelten, reactor, granulator. De viskeuze aard van de kunststofsmelt zorgt voor een grote energiedissipatie, zeker in de gedeelten van de schroef-huis-combinatie waar dunne lagen worden afgeschoven. Daardoor zijn extruders grote energiegebruikers, gedeeltelijk ook voor taken waarvoor dit niet nodig is (compounding).

3.4.3 ELEKTRICITEIT VOOR PROCESBESTURING

In de jaren zeventig vond in de procesregeling een grootscheepse overschakeling plaats van pneumatische instrumentatie naar elektronische dataverzameling, gevolgd door elektrische sturing. Verbeterde veiligheid van apparatuur maakt dit mogelijk. Daarop volgend, en ten dele parallel, vindt een revolutie plaats naar computergestuurde processen.

In eerste instantie had dit tot gevolg dat de pneumatische procesregelapparatuur één op één door elektrische apparatuur werd vervangen. Daarna zijn nieuwe regelconcepten geformuleerd op basis van fysisch-chemische modelvorming. We staan nu voor de derde fase, waarin de procestechnologie zelf ingrijpend zal worden veranderd, omdat de moderne regeling daartoe de mogelijkheid biedt. Zo zal de vanouds bekende tweedeling batch-proces versus continu proces vervagen, omdat een nieuwe klasse dynamische processen op de grens van beide gaat ontstaan. Het gebruik van elektriciteit door de procesregeling is minimaal. De gevolgen zijn evenwel groot, speciaal ook voor het terugdringen van de energiebehoefte van de procesvoering door betere uitwisseling en aangepaste sturing.

3.4.4 ELEKTRICITEIT VOOR CONDITIONERING

Een proces wordt gekarakteriseerd door een produktiegang van grondstof naar

eindprodukt waarin parallel of in serie een aantal fysische, chemische en mechanische bewerkingen plaatsvindt. Gedeeltelijk zijn dit reacties, gedeeltelijk scheidingsoperaties en gedeeltelijk transport en opslag. Tussendoor vinden vele conditioneringen van tussenprodukten plaats zoals: verwarmen, verhitten, koelen, bevochtigen, drogen, compounderen, vormen. Als regel zal een dergelijke conditionering plaatsvinden met gebruik van al aanwezige proceswarmte. Lokaal is het evenwel noodzakelijk externe energie te betrekken; hierna volgen enkele voorbeelden.

- Cryogene koeling, vaak voor absorptie van reactiewarmte bij polymerisatieprocessen. Directe koeling van dergelijke reactoren is vooralsnog lastig, zodat vaak wordt overgegaan op voorkoeling van de monomeergrondstof, die daarna wordt verhit door de reactiewarmte tot evenwel nog steeds aanvaardbare temperaturen. De technologie om reactoren wel direct te koelen, komt eraan en zal leiden tot grote besparingen. Cryogene koeling wordt ook toegepast bij destillatieve scheiding van zeer vluchtige gassen. In beide gevallen wordt een grote hoeveelheid elektriciteit gebruikt (orde 10^{15} J/jaar per fabriek). Ook zal cryogene koeling voor scheidingsprocessen in de toekomst worden vervangen door alternatieve scheidingsprocessen, zoals membraanprocessen.
- Het verwarmen van processtromen zal slechts zelden met behulp van elektriciteit gebeuren. Een uitzondering vormen processen die moeten plaatsvinden bij zeer hoge temperaturen. Daarbij dienen we te denken aan temperaturen boven 2.000 °C, zoals bijvoorbeeld voor de produktie van keramische materialen en metalen. Verhitting met behulp van chemische verbrandingswarmte komt bij deze temperaturen aan de uiterste grens. Een zeer speciaal proces is de produktie van technisch siliciumcarbide uit kool en siliciumoxyde. De 'reactor' is hierbij letterlijk een dijk van kool en zand, waarin zich een enorme koolgeleider bevindt die met circa 20 MW elektriciteit wekenlang op hoge temperatuur wordt gestookt, totdat de kern van de dijk is uitgereageerd.
- Het drogen van vaste stoffen gebeurt normaliter door middel van hete gassen. Bij kleine, vaste stofdeeltjes is dit ook geen probleem, omdat als regel de snelheid van opwarmen hoog genoeg is en de diffusie van de te verdampen stof ook snel kan geschieden. Wanneer de afmetingen van de vaste stof groter worden, kan een verwarmingsproces via externe gassen problematisch worden. Vooral bij precieuze materialen kan dit leiden tot een ontoelaatbaar groot temperatuurverschil tussen het inwendige en de buitenkant van het materiaal. Een oplossing voor zulke gevallen is elders in dit hoofdstuk beschreven: diëlektrische verwarming. Deze verwarmingstechniek wordt – zij het spaarzaam – op industriële schaal gebruikt en zal beslist verdere toepassing vinden bij de verwerking van inherent dure produkten, omdat degradatie van het produkt door lokale oververhitting kan worden voorkomen.
- Een speciaal voorbeeld van conditionering door elektriciteit is de kathodische bescherming van metalen tegen corrosie, vooral van pijpleidingen. Het energiegebruik bij dit proces is gering. Immers, het gaat hier niet om transport of overdracht, maar om het maken van een bepaalde overspanning, hetgeen in principe zonder vermogensverlies kan gebeuren. Uiteraard zullen in de praktijk toch lekstromen optreden. Een speciale uitvoeringsvorm in een waterige omgeving is de kathodische protectie door middel van nat contact met een onedeler

metaal, bijvoorbeeld een zink-strip. Voor schepen is dit een onderhoudvriendelijke oplossing. Op deze wijze wordt door het optreden van een potentiaalverschil tussen het onedele zink en het edeler staal een 'eigen batterij' gevormd.

3.4.5 ELEKTRICITEIT VOOR SCHEIDINGSDOELEINDEN

Elektrische velden kunnen worden gebruikt als drijvende kracht voor stoftransport. Daarmee is ook de potentie voor stofscheiding aanwezig. Daarbij moet dan wel op de te scheiden stof een lading aanwezig zijn, bijvoorbeeld ionen, elektrische ladingen op de buitenkant van vastestofdeeltjes of gelokaliseerde ladingen door middel van polarisatie. Van elk van deze processen vinden we voorbeelden in de techniek. Groot economisch en milieu-technisch belang hebben elektrostatische stoffilters (van oudsher bekend als Cottrell-filters).

Stofafscheiding wordt technisch teweeggebracht door gebruik te maken van de inertie van de deeltjes (bij vrij 'grote' deeltjes: groter dan enige microns) of door diffusie naar vaste wanden (bij zeer kleine deeltjes: kleiner dan 0,1 micron). In het tussengebied is afscheiding door aërodynamische interactie niet goed bruikbaar. Deeltjes van deze grootte zijn evenwel het meest gevaarlijk en dat is logisch. Immers, ook in mens en dier worden de deeltjes aërodynamisch in de luchtwegen afgescheiden en zullen de deeltjes met deze tussengrootte hun weg vinden naar de longen. Elektrostatische stofafscheiding is echter wel bruikbaar voor deze tussengrootte en wordt veelvuldig toegepast, vooral in grote gasstromen na verbrandingsinstallaties. Het elektrisch energiegebruik van deze installaties is per unit niet groot, voor de totale installatie echter wel. De vangst vindt plaats omdat de vastestofdeeltjes tussen twee elektroden migreren naar de plaat en daar worden afgescheiden. Meestal is één elektrode als draad uitgevoerd en de andere elektrode als plaat. Tussen de elektroden wordt een (sterk pulserend) hoogspanningsveld aangelegd van verschillende kV per cm.

De afscheiding van ionen in een vloeistof, elektroforese, berust eveneens op migratie in een elektrisch veld, maar dan bij zeer lage veldsterkten. Deze techniek wordt vrijwel alleen gebruikt voor analytische doeleinden en nauwelijks voor kwantitatieve produktenscheiding op industriële schaal.

Een derde techniek voor scheidingsdoeleinden, die wel industriële toepassing vindt, is de destabilisatie van vloeistof-vloeistofoppervlakken onder invloed van een elektrostatisch of elektrodynamisch veld. Wanneer twee niet-mengbare vloeistoffen in een elektrisch veld worden gebracht, zal het verschil in diëlektrische constante tussen de vloeistoffen aanleiding geven tot grote krachten op het grensvlak tussen de twee vloeistoffen. Hiermee wordt een pseudo-oppervlaktespanning opgewekt, die aanleiding geeft tot zeer sterke destabilisatie van het grensvlak. Het effect wordt gebruikt om coalescentie tussen disperse druppels teweeg te brengen ('coalescer'). Op dezelfde wijze kan destabilisatie van een gas-vloeistofoppervlak 'filmboiling' (met lage warmte-overdrachtcoëfficiënt) doen overgaan in 'nucleate boiling' (met hoge warmte-overdrachtcoëfficiënt). Soortgelijke effecten zijn te

bereiken bij een overgang van filmcondensatie naar druppelcondensatie. Deze technologieën zijn nog niet operationeel.

3.4.6 ELEKTRICITEIT VOOR CHEMISCHE REACTIES

Elektrochemische reacties zoals bijvoorbeeld vernikkelen zijn reeds lang bekend. In het bijzonder is de elektrochemische hydrolyse (elektrolyse) van keukenzout tot natriumloog en chloorgas een basisreactie voor de anorganisch-chemische industrie. Ook metalen (zoals aluminium) kunnen worden geproduceerd via elektrolyse uit gesmolten zouten. Verder zijn zuiveringsprocessen van afvalstromen bekend waarbij metalen zoals koper elektrolytisch uit de afvalstroom worden afgescheiden. Soms gebeurt dit op een vloeistof-gefluïdiseerd bed van metalen deeltjes dat fungeert als kathode. Elektrolyse wordt ook (op kleine schaal) voor de produktie van waterstof en zuurstof gebruikt. Een specifieke toepassing hiervan is de produktie van zwaar water; deuterium en tritium komen immers gemakkelijker als dissociatieprodukt vrij dan waterstof.

Elektrolytische produktie van geoxydeerde produkten heeft tot bepaalde successen geleid (bijvoorbeeld kaliumpermanganaat). Ook zijn processen bekend voor het elektrochemisch halogeneren van produkten aan de anode van een cel. Toch is het emplooi voor elektrochemische reacties buiten de chloor-loog-produktie nog zeer beperkt. Oxydatie-reacties komen nog het meest in aanmerking. Wat betreft het elektrisch energiegebruik is de te verwachten produktiegrootte in Nederland circa 10.000 ton/jaar bij een gebruik van 1 – 10 kWh/kg. In totaal spreken we dus over maximaal 10^8 kWh per jaar.

De omgekeerde elektrochemische reactie, de produktie van elektrische energie uit een chemische reactie, is van groot praktisch nut bij accumulatoren. De brandstofcel heeft hieraan een nieuwe dimensie toegevoegd. De elektrochemische reactie zal echter pas grote economische waarde krijgen, wanneer het opgewekte vermogen per massa-eenheid van de batterij voldoende groot is geworden. Op dat moment zal de elektrochemie een revolutie in de transportwereld teweegbrengen. Gezien de recente ontwikkelingen is een dergelijke sprong voorwaarts niet ver meer.

Een specifieke toepassing van elektriciteit bij het uitvoeren van chemische reacties is de fotochemie. Door middel van elektriciteit kan monochromatisch licht worden opgewekt dat kan worden gebruikt voor de aanslag van specifieke moleculen in een omgeving met een lage temperatuur. Daardoor kunnen moleculen lokaal in zo'n hoge energietoestand worden gebracht dat chemische reacties kunnen optreden. Het effect van een voortdurend hoge temperatuur en een daarmee gepaard gaande degradatie van produkten wordt zo voorkomen. De moeilijkheid ligt vooralsnog in de precieze afstemming van de golflengte van de straling op het type reactie. Niettemin is vanwege de zeer hoge specificiteit een groeiende interesse in dit traject waar te nemen. De natuur met haar zeer uitgebalanceerde chemie op basis van fotochemische reacties mag ons als 'lichtend' voorbeeld dienen. De produktopbrengst bij een hoeveelheid ingestraalde energie is in de regel zeer groot. In de

toekomst zullen we hiervan veel mogen verwachten, zeker wanneer met de nodige accuratesse laserlicht op golflengte kan worden ingesteld.

3.4.7 NIEUWE MOGELIJKHEDEN VOOR ELEKTRICITEIT IN DE PROCES-INDUSTRIE

We kunnen een onderscheid maken naar enerzijds het gebruik van elektriciteit voor het creëren van elektrische velden (primair) en anderzijds voor het produceren van hoog-energetische toestanden (secundair).

Zeer sterke elektrische velden kunnen aanleiding geven tot zogenaamde corona-ontladingen. Een geringe verstoring zal dan een hoge moleculaire energiestroom met verrassende gevolgen in de zin van optredende chemische reacties teweegbrengen. Zo'n geringe verstoring kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een radioactieve emissie van een bèta-straler. Door de hoge elektrische veldsterkte zullen moleculen in een uitzonderlijke configuratie kunnen worden gebracht. De toevoeging van een zeer hoge energieconcentratie in de vorm van een lokale doorslag zal specifieke reacties tot gevolg hebben. Deze mogelijkheden zullen leiden tot procesvoering op micro-schaal (specifieke reacties bij lage temperatuur en druk). Corona-reactoren zullen daarom belangrijk worden.

Een nog vrijwel onontgonnen technologie is het gebruik van plasma's voor initiatie van chemische reacties. Veel organisch-chemische reacties worden getriggerd door radicalen die in een keten atomen van andere moleculen abstraheren en daarmee reageren tot een gewenst produkt. Het geradicaliseerde molecuul zal als nieuw startpunt dienen in de keten, totdat terminatie met bijvoorbeeld een tweede radicaaltrein optreedt. Radicalen kunnen worden geproduceerd door thermische ontleding bij hoge temperatuur, door apart toe te voegen initiatoren of door overdracht vanuit plasma's. Hoge temperaturen maken de reacties vaak minder selectief. Daardoor ontstaat grondstofverlies en een zuiveringsprobleem. Initiatoren zijn dikwijls duur en zijn eveneens een bron van contaminatie. Plasma's gebruiken als 'locomotief' voor de radicaaltrein is niet duur en veroorzaakt geen zuiverheidsproblemen. De reacties kunnen dan bij lagere temperatuur worden uitgevoerd. De plasma's worden in de gasfase met elektrische middelen in stand gehouden.

Een indirecte weg is de produktie van radicalen door middel van ozon, dat zelf door elektrische ontlading uit zuurstof is verkregen. De radicalen initiëren kettingreacties tot een gewenst produkt. Een dergelijke procesvoering lijkt ingewikkeld ten opzichte van een procesvoering met thermische radicalen, maar kan bij een veel lagere temperatuur en selectiever worden uitgevoerd. Uiteindelijk kan zo op grondstof en energie worden bespaard.

Referenties

- CODD, C.W., e.a., in: Chemical Technology, Vol. IV, 1972, pp. 226
- PERRY, R.H., *Chemical engineers handbook*, hoofdstuk 17, 1984
- SIEBENHOFER, M., in: Chemical Engineering Technology 1991, pp. 904

- KELSALL, G.H., in: Journal Electrochemical Society, nr. 138, 1991, pp. 108
- YAMANAKA, I., K. OTSUKA, in: Journal Electrochemical Society, nr. 138, 1991, pp. 1033
- BERGHMANS, J., in: International Journal of Heat Mass Transfer, nr. 19, 1976, pp. 791

3.5 ELEKTRO-AANDRIJVINGEN EN ENERGIEBESPARING

ir. W.G. Kuijpers

3.5.1 INLEIDING

Ongeveer 65% van ons industrieel elektriciteitsgebruik wordt door elektromotoren in 'kracht' omgezet. De elektromotor wordt toegepast in onze produktieprocessen, fabricagelijnen, watervoorziening, tractie, enzovoorts. De belangrijkste eis aan een elektromotor is dat op een betrouwbare manier elektrische energie wordt omgezet in mechanische energie, liefst onderhoudvrij. De elektromotor voldoet uitstekend aan deze eis. Met name de driefasen-kortsluit-ankermotor staat bekend als uiterst robuust, betrouwbaar en op de lagers na onderhoudvrij. In Nederland zijn miljoenen elektromotoren in bedrijf. Elektromotoren zijn gestandaardiseerd in vermogen, toerental en afmetingen. Standaardmotoren zijn uit voorraad leverbaar. Hierdoor is een snelle toelevering en uitwisselbaarheid gewaarborgd.

In de loop der jaren is de behoefte aan toerenregeling toegenomen. In het verleden werd hiervoor voornamelijk de gelijkstroommotor in combinatie met een gelijkrichter toegepast. Nadeel van de gelijkstroommotor is echter dat de commutator en borstels in het onderhoud aandacht vragen. Het laatste decennium zijn dank zij de ontwikkelingen in de vermogenselektronica, frequentie-omzetters ontwikkeld waarmee de robuuste kortsluit-ankermotor probleemloos in toeren kan worden geregeld. Ook toerenregelaars worden op voorraad gehouden.

Door het grote aandeel van motoren in het industriële elektriciteitsgebruik is het belangrijk deze kritisch te bekijken op mogelijkheden voor energiebesparing. In het vervolg zijn elektromotoren en toerenregelingen voor elektromotoren aangeduid met de verzamelterm elektro-aandrijvingen.

Wij maken onderscheid tussen twee vormen van energiebesparing:
- (bij voorkeur standaard) elektromotoren met lage verliezen;
- toerenregeling op werktuigen of apparaten, waardoor minder energie nodig is in het produktieproces.

3.5.2 VERLIEZEN VAN STANDAARDELEKTROMOTOREN

Ontwikkeling
Wereldwijd wordt de kortsluit-ankermotor met vast toerental al lang zeer veel

toegepast. De kortsluit-ankermotor heeft een zeer robuuste bouw, is weinig gevoelig voor de omgeving, vereist weinig onderhoud en is goedkoop.

De elektromotor is een commercieel produkt. Er is een ontwikkeling om steeds minder materiaal toe te passen. Daarmee loopt de grondstofhoeveelheid per kW terug en daarmee de kostprijs. Er zijn isolatiematerialen ontwikkeld die hogere geleidertemperaturen toelaten. De koeling werd verbeterd. Deze ontwikkelingen leiden tot een aanzienlijke verlaging van het motorgewicht per kW asvermogen. Verbeterde materialen leiden tot reductie van verliezen, maar door de commerciële drang naar vermindering van de kostprijs wordt ook op materiaal bespaard, waardoor de verliezen weer toenemen. Het rendement speelt een ondergeschikte rol.

Aankoopcriteria
Motoren worden gekocht op grond van prijs, mechanische prestaties aan de as, betrouwbaarheid en onderhoudvriendelijkheid. Bij aanschaf wordt nauwelijks gekeken naar het rendement. De vraag is dan ook of het rendement van elektromotoren technisch voor verbetering vatbaar is en met welke prijsconsequenties die verbeteringen gepaard gaan.

Rendementsverbetering
Het rendement van een kortsluit-ankermotor is hoog. Desondanks kunnen de verliezen van verschillende fabrikaten aanzienlijk verschillen. Bijvoorbeeld, een 160 kW motor met een rendement van 95,5% verliest 7,5 kW vermogen. Dezelfde motor van een ander fabrikaat met een rendement van 92,5% heeft bij vollast 13 kW verlies, bijna het dubbele. Ondanks het klein lijkende rendementsverschil is het verschil tussen de verliezen groot. Reden genoeg om na te gaan welke rendementsverbeteringen praktisch haalbaar zijn; de goede eigenschappen van de huidige generatie elektromotoren moeten uiteraard gehandhaafd blijven.
Daarvoor kan de volgende benadering worden gekozen. Elektromotoren zijn opgebouwd uit standaardonderdelen, zoals de behuizingen en de blikpakketten. Dit is een belangrijk gegeven dat behouden moet blijven bij het ontwerp van motoren met hogere rendementen. Daardoor hoeft de produktietechniek niet te worden aangepast en kunnen zelfs bij kleine afnamen acceptabele prijzen worden gehanteerd.

Onlangs is een aantal motorontwerpen uit diverse vermogensklassen van 1 tot 75 kW nader geanalyseerd. Daarbij is eerst een standaardmotor berekend en vervolgens een motor voor hetzelfde vermogen met een grotere behuizing en een groter blikpakket (langere blikpakketten en grotere diameters). De statorwikkeling is vervolgens zodanig berekend, dat thermische, mechanische en elektrische eigenschappen vergelijkbaar waren met de standaardmotor.

De berekende rendementsstijgingen waren opmerkelijk. Het rendement van de standaard 1,1 kW motor werd met 10 procentpunten verbeterd. Bij de 7,5 kW motor was de stijging afhankelijk van het pooltal 5 – 8 procentpunten en bij de 75 kW motor 2 – 5 procentpunten. Gemiddeld konden de verliezen in de motor met de helft worden gereduceerd.

Opvallend was ook dat vaak de ventilator kon vervallen waardoor het geluidniveau

aanzienlijk verminderde. Zouden deze motoren momenteel in Nederland op grote schaal zijn toegepast, dan was er sprake van een besparing van 3 – 4% op het elekriciteitsgebruik van elektromotoren.

Overdimensionering
Berekeningen laten zien dat voor de meeste motoren het rendement in het gebied van 75 – 100% belasting nagenoeg constant is. Deze conclusie houdt in dat enige overdimensionering in het algemeen niet leidt tot rendementsverlaging zoals wel eens wordt beweerd. Uiteraard is uit overwegingen van elektrische aard (arbeidsfactor, aanloopstroom) overdimensionering af te raden.

Terugverdientijden
Een belangrijk aankoopcriterium is de prijs. De berekende motoren hebben grotere afmetingen en vragen meer materiaal en zijn daardoor duurder. De meerprijzen zijn aanzienlijk. Daartegenover staat dat er bespaard wordt op elektriciteit. Een globale benadering, gebaseerd op een kWh prijs van *f* 0,15 levert een terugverdientijd van 6.000 – 25.000 bedrijfsuren op. Dat wil zeggen dat bij continue processen de extra investering in 1 à 3 jaar is terugverdiend.

Conclusies
De eerder genoemde indicatieve waarnemingen leiden tot de volgende conclusies:
- Met de gebruikelijke materialen zijn de verliezen van elektromotoren eenvoudig met bijna de helft te reduceren, waarbij de hogere investeringskosten binnen enkele jaren zijn terugverdiend.
- Motorfabrikanten zijn in staat motoren met een hoger rendement te fabriceren, maar doen dit niet omdat de markt er niet om vraagt.
- Energiebesparing bij elektromotoren is geen technisch probleem, maar een mentaliteits- en cultuurprobleem.
- Kopers van elektromotoren moet duidelijk worden gemaakt dat het op economische gronden aantrekkelijk is motoren met een hoger rendement te kopen. Als hulpmiddel bij de evaluatie van offertes moet het begrip verlieswaardering worden ingevoerd. Dit houdt in dat elke watt minder vermogensverlies een financiële waardering krijgt (gebaseerd op elektriciteitskosten en een bepaalde terugverdientijd), die wordt afgetrokken van de aanschafprijs.
- Indien kopers hogere rendementen waarderen, zullen fabrikanten vanzelf overgaan op de produktie van betere motoren. Dat stimuleert nieuwe ontwikkelingen. Er zal bijvoorbeeld een betere blikkwaliteit worden toegepast. Dit blik is nu al voorhanden, maar wordt alleen bij de grotere vermogens gebruikt.
- Het verdient aanbeveling tot een rendementskeurmerk voor goed ontworpen motoren te komen.

3.5.3 REGELBARE AANDRIJVINGEN

Algemeen
Voor de regeling van het toerental zijn zowel mechanische als elektrische concepten beschikbaar. We beperken ons hier tot de verliesarme elektrische concepten.

Energiebesparing met een regelbare aandrijving

Het motief voor de keuze van een regelbaar toerental is vaak snelheids/hoeveelheidsregeling en/of energiebesparing. Snelheids/hoeveelheidsregeling is op verschillende manieren uitvoerbaar. Soms ligt een regelbare aandrijving het meest voor de hand, vooral voor snelheidsregeling bij de bewerking of behandeling van vaste stoffen. Bij vloeistoffen en gassen zijn er alternatieve mogelijkheden waarmee aanzienlijk lagere investeringskosten zijn gemoeid. Daartegenover staat dat deze alternatieven in het algemeen niet verliesarm zijn.

Er is een principieel verschil tussen de verliesarme toerenregeling en het verliesrijke concept, bijvoorbeeld een smoorklep voor debietregeling van een vloeistof. Het benodigde vermogen is evenredig met het produkt van het drukverschil tussen pers- en zuigzijde van de pomp en het debiet. Het principiële verschil is dat bij een toerenregeling alleen de druk over het leidingsysteem tussen pers- en zuigzijde van de pomp (evenredig met het kwadraat van het debiet) komt te staan. Bij een smoorklep komt daarbij nog de drukval over de smoorklep zelf. Het resultaat is dat bij smoring de druk over de pomp zelfs toeneemt naarmate het debiet minder wordt. Dit is een gevolg van de vorm van de zogenaamde Q-H-kromme (verband tussen pompdruk en debiet) van de centrifugaalpomp. In fig. 3.16 zijn globaal de theoretische vermogens uitgezet.

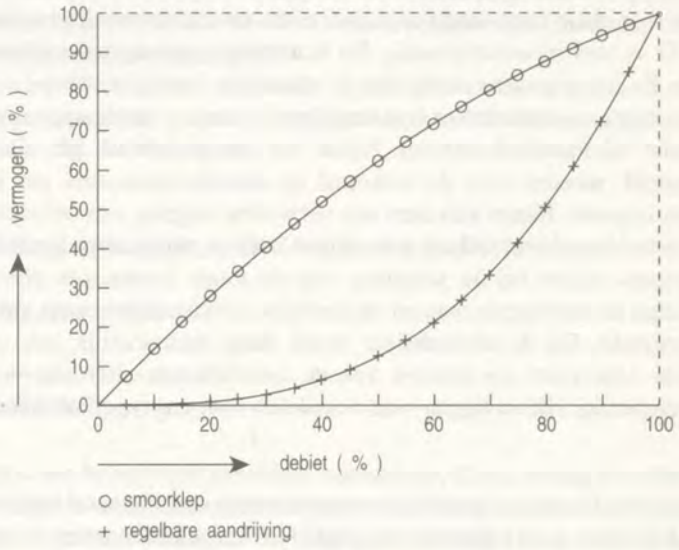


Fig. 3.16 Theoretische pompvermogens bij debietregeling (exclusief pomp- en aandrijfverliezen)

In deze benadering zijn de verliezen van de pomp en de aandrijving verwaarloosd om het principiële verschil tussen de twee methoden duidelijk te laten blijken. Voor een goede analyse dienen de verliezen van pomp en aandrijving op hun instelpunt wel nadrukkelijk te worden beschouwd. Juist het instelpunt heeft hierop een sterke invloed. De leveranciers kunnen de benodigde informatie aanreiken.

Energie- en investeringskosten
Het energiegebruik gedurende de levensduur van de installatie is afhankelijk van het gekozen systeemconcept, en daarmee ook de energiekosten. Vooral voor de eindgebruiker is het interessant het gehele traject, dus niet alleen de investering maar ook de exploitatiekosten, te evalueren. De eenvoudigste benadering is het kapitaliseren van de kosten voor investering en energiegebruik. Daarvoor moeten alternatieven worden uitgewerkt.

Haalbaarheidsonderzoek
Of een regelbare aandrijving economisch verdedigbaar is, wordt in een aantal stappen bepaald:
- Ten eerste wordt vanuit het proces en de latere bedrijfsvoering vastgesteld of regeling technisch zinvol is. Bij een continu proces op maximale capaciteit is regeling bij voorbaat niet aantrekkelijk.
- Is een regeling technisch zinvol, dan is de vraag welke middelen ter beschikking staan. Er zijn vaak verschillende alternatieven zoals de smoorklep en de regelbare aandrijving in verschillende uitvoeringen.
- Vervolgens wordt vastgesteld hoe hoog de investeringskosten per alternatief zijn. Hieronder vallen ook alle kosten om het regelend apparaat in te passen.
- De volgende stap is het vaststellen van het energiegebruik gedurende een bepaalde periode. Deze periode kan de levensduur van de installatie zijn, maar ook de maximale terugverdientijd voor extra investeringen die het bedrijf toestaat. Er is veel informatie nodig om het energiegebruik gedetailleerd vast te stellen. Er zijn gegevens nodig van de verwachte bedrijfsvoering (welke deellastsituaties gaan optreden en hoe lang deze duren) en van de apparatuur (in het bijzonder deellastrendementen). Nadat het energiegebruik per alternatief is vastgesteld, moeten voor de toekomst de elektriciteitskosten per alternatief worden bepaald. Hierin kan men een verwachte stijging van het elektriciteitstarief betrekken. Voor zulke berekeningen bestaan computerprogramma's.
- Vervolgens zullen bij de schatting van de totale kosten per alternatief de eenmalige investeringskosten en de jaarlijkse elektriciteitskosten moeten worden opgeteld. Bij de uiteindelijke keuze dient nadrukkelijk ook te worden gekeken naar voor- en nadelen van de verschillende alternatieven voor de bedrijfsvoering. Hierin liggen vaak voordelen voor een regelbare aandrijving.

Conclusies
In tegenstelling tot de standaardelektromotoren met vast toerental kan voor regelbare aandrijvingen geen algemene conclusie worden getrokken over de grootte van de energiebesparing. Men kan in het algemeen zeggen dat aanzienlijke besparingen mogelijk zijn. Echter, de daadwerkelijke besparing is geheel afhankelijk van de toepassing. Er zou wel nadrukkelijker in de ontwerpfase van een proces naar besparingsmogelijkheden moeten worden gekeken.

Aanbevelingen
- Stimuleer de aankoop van aandrijvingen met lage verliezen door bij aanschaf de verliezen in te calculeren.
- Onderzoek of het zinvol is oude elektromotoren met hoge verliezen te vervangen door nieuwe motoren met lage verliezen.

- Onderzoek de mogelijkheid van aan-uit-schakeling en poolomschakelbare motoren. Dit is de eenvoudigste vorm van toerenregeling en de extra investeringen zijn gering.
- Onderzoek de mogelijkheid om (tijdelijke) reductie van opbrengsten, snelheden, hoeveelheden of debiet in de eigen installatie toe te passen. Deze concepten kunnen sterk energiebesparend zijn. Pomp- en ventilatieverliezen bijvoorbeeld nemen in het algemeen met de derde macht van het debiet af. Stem de hoeveelheid af op de vraag van het moment.
- Houd bij aanschaf van een regelbare aandrijving rekening met punten zoals netvervuiling en storinggevoeligheid. Voorkomen is beter dan genezen.

Referenties

- KUIJPERS, W.G., *Elektro-aandrijvingen en energiebesparing*, in: PT/Energie, nr. 9, 1990
- *Marktonderzoek naar het elektriciteitsgebruik en de mogelijkheden van elektriciteitsbesparing in de Nederlandse industrie*, E3T Consult, Woubrugge, december 1990
- *Onderzoek naar verbetering van het rendement van laagspannings-kortsluitankermotoren*, rapport nr. 94471-EPB 92-54, KEMA, 1992
- *State of the art: drive power*, rapport 41. Bewerking van het gelijknamige Competitekrapport van Lovins, A.B., Rocky Mountains Institute, Colorado, Rijksuniversiteit Groningen, IVEM
- JOHANSSON, TH.B., e.a., *Electricity, efficient end use and new generation technologies and their planning implications*, Lund University Press, Sweden, 1989

3.6 EFFICIËNTE VERLICHTING IN DE INDUSTRIE

ing. P.J.M. Brieffies

3.6.1 INLEIDING

Verlichting is een belangrijke gebruiker van energie. Circa twintig procent van het totale Nederlandse elektriciteitsgebruik kan worden toegeschreven aan verlichting. De jaarlijkse uitstoot die daarvan het gevolg is, bedraagt zeven miljoen ton CO_2, elf duizend ton SO_2 en veertien duizend ton NO_x. Een andere bron van milieuschade vormen afgewerkte gasontladingslampen. Deze lampen worden vanwege de aanwezige zware metalen als chemisch afval beschouwd. Inmiddels is er in Nederland een verwerkingsfabriek voor afgedankte lampen in gebruik die voldoende capaciteit heeft om alle lampafval in Nederland te verwerken.

3.6.2 *ELEKTRICITEITSGEBRUIK VAN VERLICHTING IN HET BEDRIJFSLEVEN*

Vooral in de zakelijke dienstverlening, zoals kantoren en winkels, vormt verlichting een belangrijke post op de energie-rekening. Naar schatting is verlichting verantwoordelijk voor 30 – 40% van het elektriciteitsgebruik in deze sector (fig. 3.17). Het aandeel verlichting in het industriële elektriciteitsgebruik is betrekkelijk gering, ongeveer 5%. Als we de basisindustrie – enkele grote bedrijven die zeer veel elektriciteit in het produktieproces gebruiken – buiten beschouwing laten en kijken naar de verwerkende industrie, dan zorgt verlichting voor 15% van het elektriciteitsgebruik.

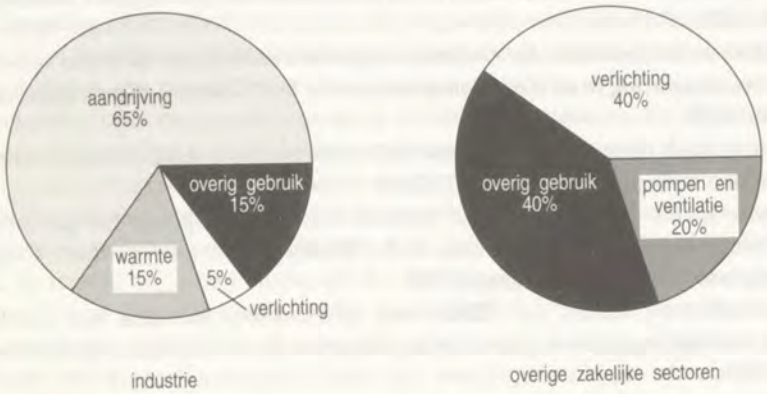


Fig. 3.17 Gebruik van elektrische energie in de industrie en in overige zakelijke sectoren

De lamp die (al sedert 1936) het meest wordt toegepast, is de fluorescentielamp. Het rendement van deze lamp is sinds de introductie meer dan verdubbeld. De bijbehorende apparatuur, zoals armatuur en voorschakelapparaat, heeft sinds die tijd een belangrijke ontwikkeling doorgemaakt. Moderne spiegelarmaturen met hoog rendement bundelen het licht en richten het licht naar beneden, waardoor absorptie op plafond en wanden wordt voorkomen. Elektronische voorschakelapparaten zorgen voor verdere rendementsverhoging, levensduurverlenging en trillingvrij, rustig licht.

Verlichting wordt niet alleen voor visuele taken gebruikt. In de tuinbouw wordt op grote schaal assimilatieverlichting toegepast om de groei van planten te bevorderen. In de industrie wordt verlichting gebruikt voor allerlei procesdoeleinden, zoals droging of bijvoorbeeld uitharding van specifieke lijmen. Op dergelijke toepassingen van verlichting zal hier niet worden ingegaan.

3.6.3 VERLICHTINGSAPPARATUUR, TERUGBLIK EN VOORUITZICHTEN

Lampen

De mens gebruikt al duizenden jaren kunstmatige verlichting, eerst in de vorm van olielampen en daarna kaarsen en gaslampen. De uitvinding van de gloeilamp en de vele andere ontwikkelingen hebben het comfort en de betrouwbaarheid van verlichting spectaculair verbeterd. Fig. 3.18 geeft de ontwikkeling en rendementsverbetering in de periode 1930-1980 weer. Het beginpunt van een lijn geeft de introductie van een nieuw lamptype aan. Zo is in de jaren vijftig het gloeilampassortiment uitgebreid met de halogeenlamp: een lamp met een hoger rendement, een langere levensduur en compactere afmetingen. In de jaren zestig verschenen de metaalhalogeenlamp en de hogedruknatriumlamp op de markt. Op de verticale as staat het rendement van de lichtbronnen in lumen lichtopbrengst per opgenomen watt elektrisch vermogen (lm/W). Duidelijk is het grote verschil te zien tussen fluorescentielampen en gloeilampen. De lagedruknatriumlamp heeft het hoogste lichtrendement, weliswaar met een matige kleurweergave. (Zie ook tabel 3.4 waarin een kort historisch overzicht van het kunstlicht is opgenomen). Na de aanvankelijk snelle stijging in rendement begint rond 1980 het einde van de mogelijkheden te naderen. De meest recente ontwikkelingen in de lichttechniek tonen een verdere toename van het rendement.

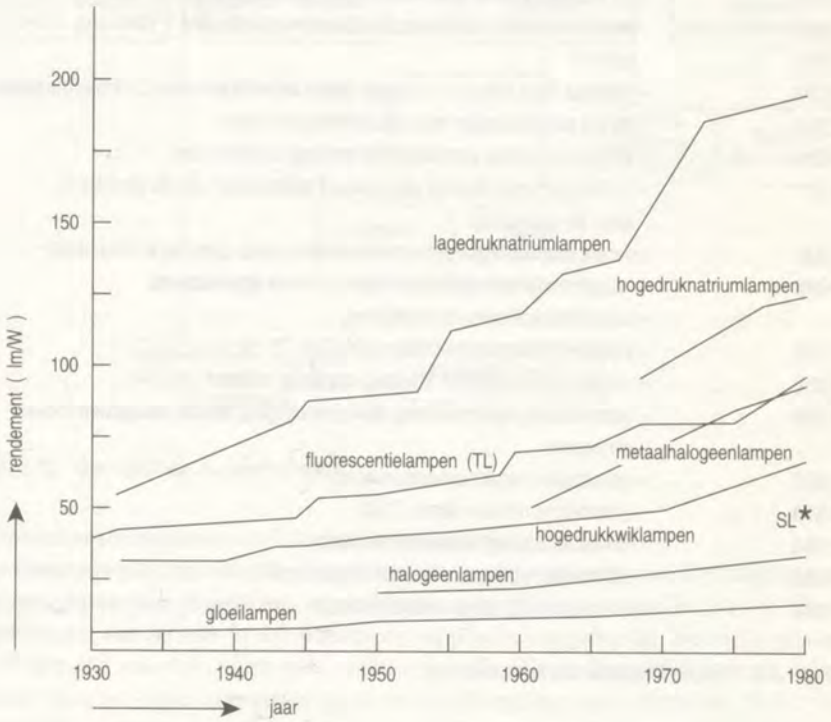


Fig. 3.18 Ontwikkeling van het verlichtingsrendement van lampen

Andere ontwikkelingen liggen vooral in nieuwe toepassingsmogelijkheden door verkleining, lagere prijs, betere kleureigenschappen, langere levensduur en betere regelbaarheid. Op dit moment is een breed scala van lampen beschikbaar, waarmee aan vrijwel elke eis kan worden voldaan. Ruwweg kunnen we het lampenaanbod onderverdelen in gloeilampen en gasontladingslampen. De verschillende lampgroepen met hun vertakkingen staan weergegeven in fig. 3.19.

In kantoorgebouwen zijn de meest toegepaste lampen fluorescentielampen en gloeilampen. Fluorescentielampen worden meestal gebruikt voor algemene verlichting in het plafond, gloeilampen bij decoratie of als werkplekverlichting (in bureaulampen en dergelijke). De hogedrukgasontladingslampen worden voornamelijk in een meer industriële omgeving toegepast, vooral in hogere bedrijfshallen. Lagedruknatriumlampen lenen zich goed voor terreinverlichting. In tabel 3.5 staat de huidige toepassing van lampen in de utiliteit in Nederland weergegeven. Gezien de dominante rol van fluorescentie- en gloeilampen wordt op deze twee lamptypen verder ingegaan.

100.000 v. Chr.	– houtvuur in grot
30.000 v. Chr.	– prototype olielamp (dierlijk vet in uitkepingen van rotsen)
5.000 v. Chr.	– potten met brandende plantaardige olie
begin jaartelling	– olielamp met gedraaide pit van vlas of katoen
	– ontwikkeling van de kaars
1809	– Sir Humphry Davy ontwikkelt eerste koolspitslamp
1860	– eerste installatie van koolspitslampen in vuurtorens
1865	– gaslicht
1879	– Thomas Alva Edison en Joseph Swan ontwikkelen de kooldraadgloeilamp
1900	– eerste experimenten met gasontladingslampen
1908	– William Coolidge ontwikkelt de wolfraam gloeidraad
1910	– Irving Langmuir bereikt een langere levensduur van de gloeilamp door de gasvulling
1932	– eerste toepassing lagedruknatriumlamp voor openbare verlichting
1933	– hoger rendement gloeilamp door dubbele spiralisering
	– ontwikkeling hogedrukkwiklamp
1936	– introductie lagedrukkwiklampen (TL)
1938	– vulling gloeilamp met krypton, argon en stikstof
1958	– ontwikkeling halogeenlamp door toevoeging van de halogenen jodium en broom
1965	– introductie hogedruknatriumlamp
1978	– introductie trifosforlamp (TLD)
1984	– introductie hoogfrequentverlichting
1985	– introductie compacte fluorescentielampen
1991	– introductie QL-lamp (inductielamp)

Tabel 3.4 Tijdtabel historie van het kunstlicht

	Aantal lichtpunten	Gemiddeld vermogen (watt)	Elektrisch gebruik (GWh/jr)
gloeilamp	4.000.000	60	605
halogeenlamp	60.000	50	8
fluorescent(TL)	14.000.000	37	1.565
compact fluorescent (SL)	330.000	18	15
compact fluorescent (PL)	970.000	18	55
hogedruk Hg	110.000	86	29
lagedruk Na	110.000	65	22
hogedruk Na	110.000	71	24
totaal	19.000.000		2.320

Bron:
VROM

Tabel 3.5 Overzicht van toegepaste lampen in de utiliteit

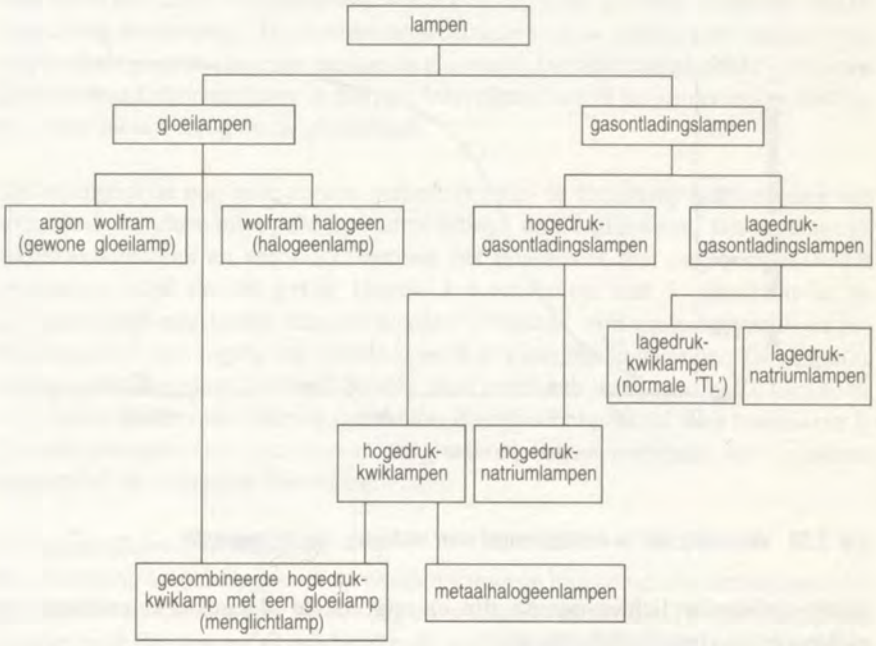


Fig. 3.19 Overzicht van soorten lampen

Fluorescentielampen en elektronische voorschakelapparatuur

De fluorescentielamp wordt ook wel lagedrukkwiklamp genoemd. De lamp bestaat uit een glazen buis gevuld met een inert gas en een kleine hoeveelheid kwik. Op de binnenkant van de buis is een fluorescerend poeder aangebracht. Het licht ontstaat door botsing van elektronen met kwikatomen. De aangeslagen kwikatomen vallen terug naar een lage energietoestand onder uitzending van ultraviolet licht. Het onzichtbare ultraviolette licht wordt door de fluorescerende laag omgezet in zichtbaar licht. Het poeder bepaalt de eigenschappen van de lamp, zoals de kleur van het licht, de kleurweergave en de lichtopbrengst.

Rond 1936 werden de eerste fluorescentielampen geïntroduceerd. De fosforpoeders bleken schadelijk voor de gezondheid en rond 1948 werden deze poeders vervangen. De jaren zeventig brachten een doorbraak in de coating: trifosforcoating. Dit is een combinatie van drie typen fosfor die ieder bijna monochromatisch licht in de kleuren rood, groen en blauw produceren. Gezamenlijk leveren deze wit licht. Het resultaat is een lamp met zowel een hoog rendement als een goede kleurweergave.

Een belangrijke recente ontwikkeling is de toepassing van elektronische voorschakelapparaten. Hiermee is het lamprendement verder verbeterd. Fluorescentielampen en andere soorten gasontladingslampen hebben een voorschakelapparaat nodig om de lamp te starten en de stroom te begrenzen. Het conventionele voorschakelapparaat bestond uit een smoorspoel, bestaande uit een ijzerkern met koperwikkeling. De elektronische voorschakelapparaten ontsteken en voeden de lamp met een hoogfrequente spanning. De frequentie heeft een sterke invloed op de lichtopbrengst van de lamp (zie fig. 3.20).

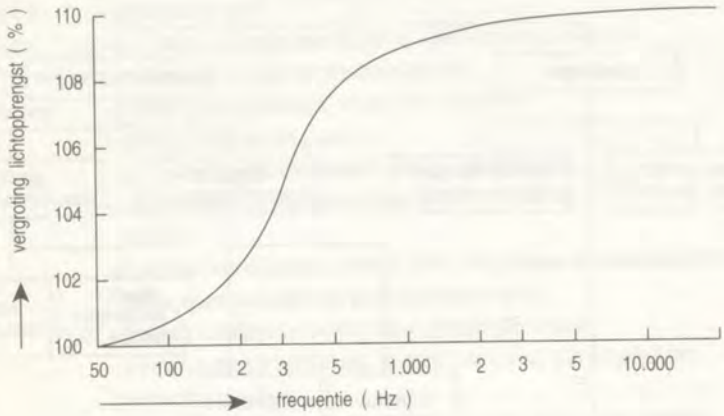


Fig. 3.20 Vergroting van de lichtopbrengst door verhoging van de frequentie

Naast verbeterde lichtopbrengst zijn er nog enkele algemene kenmerken van elektronische voorschakelapparatuur:
- de energieverliezen in het voorschakelapparaat zijn geringer. De energiebesparing door toepassing van elektronische voorschakelapparatuur bedraagt 20 – 30%;
- het licht is 'rustiger';
- de start van de lamp wordt beter gecontroleerd;
- de werkcondities resulteren in een langere levensduur die met 50% is toegenomen (12.000 uur in plaats van 8.000 uur);
- tijdens de levensduur van de lamp blijft de lichtopbrengst meer constant;
- er bestaat nu de mogelijkheid tot automatisch dimmen, gecontroleerd door een lichtsensor;
- de werkomstandigheden worden soms veiliger door een vermindering van het zogenaamde 'stroboscopisch effect'.

Gloeilampen
De gloeilamp heeft een betrekkelijk lage lichtopbrengst omdat veel straling in het infrarode gebied wordt uitgezonden. Als materiaal voor de gloeidraad wordt wolfraam gebruikt, voornamelijk vanwege het hoge smeltpunt en de lage verdampingssnelheid. Een gasvulling in de lamp gaat de verdamping van de draad tegen, waardoor deze op een hogere temperatuur kan worden gebracht. Een hogere temperatuur betekent een aanzienlijk hogere lichtopbrengst, dus een hoger rendement. Een hogere werktemperatuur verkort echter wel de levensduur. Een normale gloeilamp is ontworpen voor een gemiddelde levensduur van 1.000 uur.

De gloeilamp werd in 1878 geïntroduceerd. Het rendement was in 1936 al met een factor tien verbeterd. Dit was het gevolg van toepassing van betere materialen, een betere gloeidraadconstructie, en gasvulling. Pas in 1958 werd een aanzienlijke verbetering in de gloeilampverlichting bereikt door de ontwikkeling van de halogeenlamp. Deze lamp heeft een rendement van 20 – 25 lm/W bij een levensduur van 2.000 uur. In de halogeenlamp wordt een halogeen (jodium of broom) aan de gasvulling toegevoegd. De verdampte wolfraam van de gloeidraad verbindt zich met het halogeen en slaat niet neer op de glaswand. De moleculen bereiken opnieuw de gloeidraad door stroming in het gas. Vervolgens wordt het molecuul ontleed en keert het metaal terug op de gloeidraad.

De belangrijkste nog in te voeren verbetering van de gloeilamp is toepassing van infrarood- en ultraviolet-reflecterende coatings op de glaswand. Dit verlaagt de infraroodverliezen en verhoogt daarmee het rendement met ongeveer 40%. De levensduur blijft daarbij gelijk. Hoewel het rendement van de gloeilamp en de halogeenlamp nog verder kunnen worden verbeterd, zijn grote besparingen pas haalbaar door vervanging van gloeilampen door gasontladingslampen. De afmeting van gasontladingslampen hoeft daarbij geen probleem meer te zijn. Zo zijn in de auto-industrie zeer compacte gasontladingslampjes ontwikkeld voor toepassing in platte koplampen. Ook voor de normale gloeilamp bestaat inmiddels een uitstekend alternatief: de compacte fluorescentielamp.

Compacte fluorescentielampen
De gloeilamp en de halogeenlamp worden vanwege hun compacte afmetingen veel toegepast voor decoratieve verlichting en werkplekverlichting. De introductie van de compacte fluorescentielamp betekende een geschikt alternatief. Inmiddels is een breed assortiment beschikbaar, waarvan in fig. 3.21 een aantal typen wordt getoond.

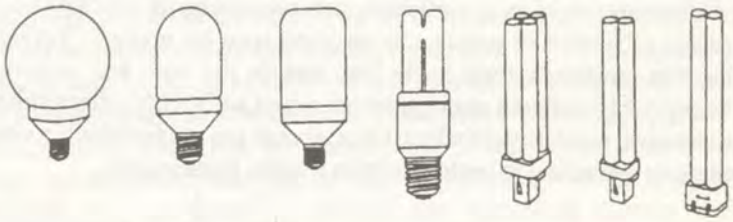


Fig. 3.21 Enige typen compacte fluorescentielampen

Veel typen passen in een normale gloeilampfitting. De typen met vierkante voet kunnen worden gebruikt in armaturen die voorzien zijn van een ingebouwd voorschakelapparaat en een geschikte fitting. Er worden zowel conventionele als elektronische hoogfrequentvoorschakelapparaten toegepast. De lampen met een elektronisch voorschakelapparaat hebben een hogere lichtopbrengst. Ze zijn kleiner en lichter, maar duurder. In vergelijking met gloeilampen hebben compacte fluorescentielampen een rendement dat vier tot vijf keer zo hoog is. De kleurweergave is iets minder goed dan van gloeilampen.

De inductielamp
Een recente ontwikkeling die niet ongenoemd mag blijven, is de QL-lamp (zie fig. 3.22). Deze lamp is gebaseerd op het principe van elektromagnetische inductie. Hierbij wordt de energie met behulp van een zendantenne uitgestraald in de gasvulling. Deze gasvulling fungeert als ontvanger. Het voor het menselijk oog onzichtbare ultraviolette licht dat zo ontstaat, wordt door een fluorescentiepoeder omgezet in zichtbaar licht. In dit lamptype ontbreekt de gloeidraad die bij conventionele lampen de levensduur bepaalt. Hierdoor is de levensduur spectaculair verbeterd tot 60.000 uur. Dat is zestig keer meer dan de levensduur van normale gloeilampen.

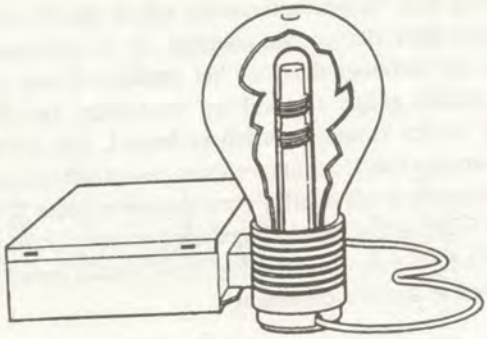


Fig. 3.22 De QL-lamp

Armaturen
Een goede verlichtingsinstallatie bestaat uit meer dan alleen een lamp. Het armatuur is voor de functionaliteit van de verlichting zeker zo belangrijk. Het licht wordt door het armatuur gebundeld en gericht naar de plaats waar het nodig is. Vervuiling en vergeling van armaturen zorgt in de loop van de tijd voor een terugval in de lichtopbrengst. Met volledig gesloten armaturen en verbeterde reflectormaterialen kan deze terugval worden verminderd. Door inbouw van afschermende roosters kan verblinding en spiegeling in beeldschermen worden tegengegaan.

Een recente ontwikkeling is de toepassing van folies met een opgedampte zilverlaag. Deze folie bezit een zeer hoge reflectiewaarde die een hoog armatuurrende-

ment oplevert. In fig. 3.23 is de golflengte-reflectiekromme van enkele metalen weergegeven. De vette curve toont de goede reflectie van zilver.

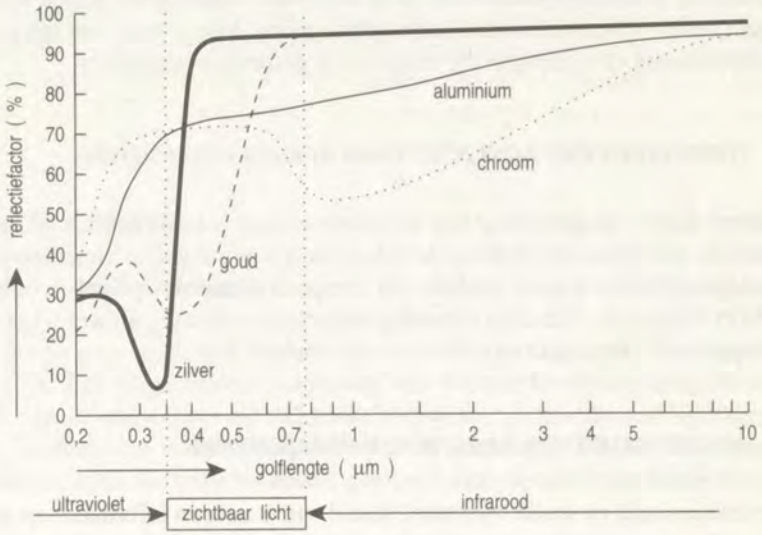


Fig. 3.23 Golflengte-reflectiekromme van enkele metalen
De vette curve geeft de reflectie van zilver weer.

3.6.4 WERKPLEKVERLICHTING

De vereiste verlichtingssterkte in een werksituatie wordt bepaald op grond van de taak die moet worden verricht. Dit gebeurt bijna altijd op dezelfde plaats. Het is dus meestal verspilling van energie om hetzelfde hoge lichtniveau in de gehele ruimte te realiseren. Werkplekverlichting in de vorm van bureaulampen of machinelampen biedt dan een goed alternatief. Een gematigde algemene verlichting blijft noodzakelijk voor de overige ruimte en voorkomt te grote helderheidsverschillen.

3.6.5 AUTOMATISCHE BESTURINGSYSTEMEN

Een verlichtingsinstallatie bevat behalve lampen en armaturen ook nog een schakel- of besturingsysteem om het licht in en uit te schakelen of te dimmen. Door een intelligent besturingsysteem kan worden voorkomen dat verlichting onnodig lang of onnodig sterk brandt. Er kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van sensoren om de aanwezigheid van mensen in een ruimte vast te stellen, en op grond daarvan de verlichting te schakelen. Een andere optie is daglichtcompensatie ofwel het dimmen van de binnenverlichting op basis van buitenlichtsterkte. Hierbij wordt de lichtsterkte door een sensor vastgesteld; naar aanleiding daarvan verhoogt of verlaagt het regelsysteem de sterkte van de binnenverlichting. Klokregelingen

bieden de mogelijkheid de verlichting op vooraf ingestelde tijden in of uit te schakelen.

Geavanceerde besturingsystemen die in de toekomst ongetwijfeld zullen worden toegepast, zijn bijvoorbeeld individuele lichtregeling door middel van infrarood-afstandsbediening of regelingen die reageren op gesproken opdrachten.

3.6.6 TOEPASSING VAN ZONLICHT VOOR BINNENVERLICHTING

Een geheel andere mogelijkheid van energiebesparing is beter gebruik te maken van zonlicht voor binnenverlichting. In enkele landen wordt geëxperimenteerd met verlichtinginstallaties waarin zonlicht via computergestuurde spiegels wordt gebundeld in lichtpijpen. Via deze inwendig reflecterende lichtpijpen wordt het licht door het gebouw verspreid.

3.6.7 BEVORDERING VAN EFFICIËNTE VERLICHTING

De beschikbaarheid en snelle toegankelijkheid van kennis en informatie op grond waarvan afnemers beslissingen kunnen nemen, vormen een probleem. De vraag wat de optimale keuze in specifieke situaties is, kan vaak niet direct en op maat worden beantwoord. Dit maakt een goede keuze aanzienlijk moeilijker. Er zijn wel hulpmiddelen, bijvoorbeeld computerprogramma's. Hiermee kan op basis van de eigen bedrijfssituatie een realistisch inzicht worden verkregen in besparingsmogelijkheden van efficiënte verlichtinginstallaties.

Moderne efficiënte verlichting is vaak duurder in aanschaf. Om een bredere toepassing te stimuleren, zijn subsidieregelingen gewenst. In 1992 zullen de energiebedrijven in Nederland een subsidieregeling ten uitvoer leggen om energiezuinige verlichting in de utiliteitssector te bevorderen.

3.6.8 CONCLUSIE

De verlichtingstechniek heeft de afgelopen honderd jaar een spectaculaire ontwikkeling doorgemaakt. Deze ontwikkeling gaat nog steeds door, zij het dat de sterkste groei in lamprendementen afneemt. Het gemiddelde verlichtingsrendement kan echter door bredere toepassing van efficiënte lampen, armaturen en voorschakelapparatuur nog toenemen. Voorwaarde is dat de kostprijs en de functionaliteit, zoals kleurweergave en afmetingen, verder verbeteren. Recente innovaties in de richting van kleinere afmetingen en betere kleureigenschappen bieden hoopvolle perspectieven voor de toekomst. Verdere stimulering is mogelijk door subsidie en kennisoverdracht.

4. Proceswarmte en energie-voorziening in de industrie

4.1 INLEIDING

ir. A.W.M. van Wunnik

Op het energiegebruik in de Nederlandse industrie zijn nog significante besparingen mogelijk. Een uitgebreidere toepassing van warmte-krachtkoppeling (nuttig gebruik van de restwarmte bij elektriciteitsopwekking) kan daartoe bijdragen. Een ander middel is de warmtepomp, waarvan de toepassing in de industrie nog in de kinderschoenen staat. Dit hoofdstuk geeft een analyse van beide toepassingen.

De energie-intensiteit van Nederland heeft zich in vergelijking met andere landen sinds de eerste energiecrisis slechts matig ontwikkeld. Tabel 4.1 laat enige cijfers zien.

	1973	1986	Daling (%)
Nederland	0,44	0,35	20
(West-)Duitsland	0,38	0,30	21
Noord-Amerika	0,78	0,58	26
Japan	0,41	0,29	29
IEA-landen	0,56	0,43	23

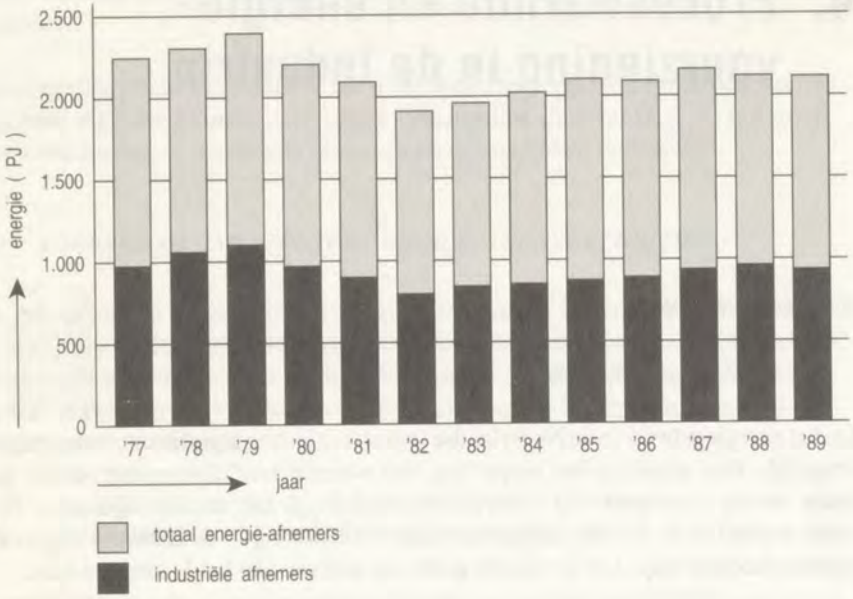
Bron:
[4]

Tabel 4.1 Energie-intensiteit in miljoen ton olie-equivalent per miljard US$ BNP in 1980

We hoeven niet in genuanceerde beschouwingen te vervallen om aan te tonen dat Nederland nog eens moet bekijken of zijn energiehuishouding te verbeteren valt.

4.1.1 DE ENERGIESITUATIE IN DE INDUSTRIE

De industrie neemt in Nederland een substantieel aandeel van het energiegebruik voor haar rekening. Het totaal finaal energiegebruik en het energiegebruik in de industrie is gegeven in fig. 4.1. Uit deze figuur blijkt dat het totale energiegebruik en het energiegebruik in de industrie gedurende de jaren 1977 tot 1989 geen groei heeft gekend en dat het aandeel van het energiegebruik voor de industrie steeds circa 43% van het totaal is.



Bron: [5]

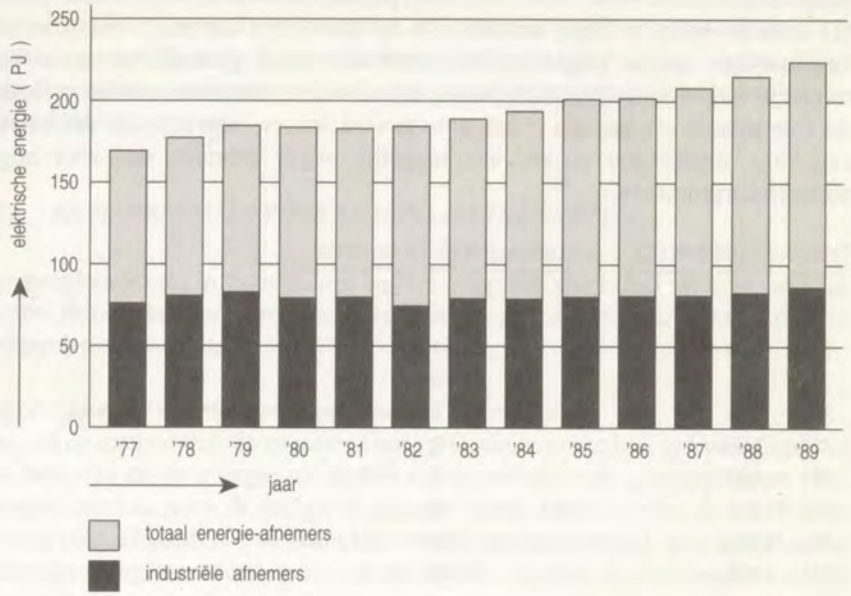
Fig. 4.1 Het totaal finaal energiegebruik en het energiegebruik in de industrie

De toekomstige ontwikkeling van de Nederlandse energiehuishouding is onder andere door TNO verkend [1]. De potentiële besparing is aanzienlijk: ongeveer 40%. De mogelijkheden tot besparing in warmtegebruik blijken ruim tweemaal zo groot als die in elektriciteitsgebruik. De industrie kan netto bijna 30% besparen, vooral in warmtegebruik. Anders geformuleerd: de warmte-krachtverhouding in de industrie kan aanzienlijk dalen.

Fig. 4.2 toont een lichte stijging in het elektriciteitsgebruik, zowel in het totaal als in de industrie. Het aandeel van elektriciteit in het totaal finaal energiegebruik groeide van 8% in 1977 tot 11% in 1989. In de industrie groeide het aandeel van 8 naar 9%.

We kunnen dus stellen dat de warmte-krachtverhouding in de industrie ongeveer 10 is. Deze verhouding kan gezien de besparingsmogelijkheden dalen tot circa 7.

Als we teruggaan in de historie van warmte-krachtkoppeling, zien we dat deze techniek al vóór 1960 in Nederland haar intrede deed. In 1960 werd ongeveer 22% van de totale elektriciteitsproduktie opgewekt met decentrale elektriciteitsopwekking (zie tabel 4.2). Dit is langzaam teruggelopen tot 11% in 1980. Door de enorme prijsstijging ten gevolge van de energiecrisis werd warmte-krachtkoppeling na 1981 weer rendabel. Het opgestelde vermogen is na 1980 weer sterk gestegen: van 1.400 MW_e tot 1.700 MW_e in 1987. Omdat in 1986 de energieprijzen sterk daalden, waren stimuleringsmaatregelingen nodig om het geplaatste warmte-krachtvermogen in 1988 verder te doen toenemen.



Bron: [5]

Fig. 4.2 Het totaal elektriciteitsgebruik en het elektriciteitsgebruik in de industrie in warmte-eenheden

Jaar	Centraal (MW_e)	Warmte-kracht (MW_e)	Procentueel
1960	4.000	880	22
1970	8.500	1.200	14
1980	12.000	1.400	11
1987	13.000	1.700	13
1990	13.600	2.250	16,5
2000	16.000	> 5.000	> 31

Tabel 4.2 Opgesteld elektrisch vermogen in Nederland

Op aandrang van de Commissie Warmte-kracht heeft de overheid een subsidieregeling ingesteld (25% op investeringskosten) waardoor het opgestelde warmte-krachtvermogen opnieuw groeide. De groei op dit moment is ongeveer 250 – 300 MW_e per jaar. De prognose is dat het opgesteld warmte-krachtvermogen in het jaar 2000 meer dan 5.000 MW_e zal zijn. Dat betekent bij een totaal opgesteld elektrisch vermogen van 16.000 MW_e dat meer dan 30% van de totale elektriciteitsproduktie plaatsvindt met warmte-krachtvermogen, waarvan volgens de prognose 3.000 MW_e in de industrie zal worden gebruikt.

Het warmtegebruik in de industrie verdeeld naar procestemperatuur is weergegeven in tabel 4.3. Het blijkt dat veruit het grootste deel in het temperatuurinterval tussen 101 – 200 °C ligt. Kleinere hoeveelheden warmte van andere temperaturen worden voornamelijk gebruikt bij specifieke processen in de chemische, de metaal- en de

bouwmaterialenindustrie. De meer recente gegevens van de Sep Warmtekaart 1991 [2] laten dit beeld volledig bestaan. Uit dit alles blijkt dat in de industrie veel laagwaardige energie (lage-temperatuurwarmte) wordt gebruikt, en dat er veel ruimte is voor warmte-krachtkoppeling. De situatie zou kunnen worden verbeterd door de waarde van energie in cascades te verdelen, en erop te letten dat warmte van hoge temperatuur zo efficiënt mogelijk wordt gebruikt, dus voor hoge-temperatuurprocessen.

Temperatuurinterval (°C)	Energiegebruik (% van totaal)
– 100	4
101 – 200	54
201 – 300	5
301 – 400	12
401 – 500	8
501 – 600	5
1.101 – 1.200	6
1.401 – 1.500	2
1.601 – 1.700	2
1.701 –	2

Bron: [3]

Tabel 4.3 Het energiegebruik (exclusief het elektriciteitsgebruik) in de industrie per temperatuurinterval naar rato van het totaal (in %)

4.1.2 VERBETERING VAN DE ENERGIESITUATIE IN DE INDUSTRIE

Uit de voorafgaande paragraaf blijkt dat er veel mogelijkheden zijn om de energiesituatie in de industrie te verbeteren. Deze verbetering is te bereiken door:
- het minimaliseren van de energievraag ('bronbestrijding');
- het optimaliseren van de energiehuishouding.

Bronbestrijding is de eenvoudigste, maar daarom niet de minst waardevolle manier om energie besparen. Het optimaliseren van de energiehuishouding is een geheel andere benadering. Een voorbeeld hiervan is het ontwerpen van een warmte-krachtinstallatie op basis van de warmtevraag. In wezen betekent deze benadering een pleidooi voor energiecascadering: probeer eerst met de brandstof de meest hoogwaardige vorm van benodigde energie te maken om daarna met de 'afvalenergie' in de meer laagwaardige vormen te voorzien. Een nuttige variant daarbij is de warmtetransformatie, waarbij uit laagwaardige energievormen een hoogwaardige vorm wordt gemaakt. Daarbij wordt slechts een geringe hoeveelheid extra (elektrische) energie voor pompen en dergelijke gebruikt.

Fundamenteel anders dan bij bronbestrijding berust het optimaliseren van de energiehuishouding op een verbetering van omzettingsprocessen. Hierbij kan het zoeken naar een zo groot mogelijk exergetisch rendement als leidraad dienen. Op exergie als kwaliteitsmaat voor energie wordt later in dit hoofdstuk verder ingegaan.

In Nederland worden de mogelijkheden tot optimalisatie van het energiegebruik nog niet volledig benut. Dit komt onder andere omdat er bij het optimaliseren ook sprake is van energieomzettingen die buiten het eigen speelveld van de betrokken industrie vallen. Anders gezegd, er doemen naast technische problemen ook institutionele problemen op.

4.1.3 ENERGIE-OPTIES VOOR LAAGWAARDIGE WARMTE

De energiebehoefte in de industrie bestaat voor een groot deel uit laagwaardige warmte met een temperatuur tussen 50 en 200 °C. Aan deze behoefte kan op diverse manieren worden voldaan.

Toevoer energie in primaire vorm naar het gebruikspunt
Een van de methoden is de energie in haar primaire vorm te brengen naar de plaats van behoefte en de energie ter plekke om te zetten in de gewenste vorm. Het voordeel hiervan is dat de energie in primaire vorm, zonder verlies en met behulp van een relatief goedkoop systeem kan worden getransporteerd. Een nadeel evenwel is dat energiecascadering niet of nauwelijks mogelijk is. Dat betekent dat de energieomzetting exergetisch gezien voor verbetering vatbaar is. Verder is de schaal van de omzetting relatief klein waardoor negatieve gevolgen voor rendement, investeringen en bedrijfsvoering ontstaan. Deze methode mag bekend worden verondersteld. Zij dient verder als een referentiekader voor de andere methoden.

Toevoer energie in secundaire vorm naar het gebruikspunt
Een andere methode is de primaire energie elders in een secundaire vorm om te zetten die op de plaats van bestemming direct bruikbaar is. Daar de warmtebehoefte een zeer groot deel van de energievraag vormt, betekent dit dat warmte in de vorm van heet water, stoom of thermische olie moet worden getransporteerd. Een variant is elders elektriciteit op te wekken en de energie in deze vorm te brengen naar de plek van de warmtebehoefte. Een voordeel van energieomzetting elders is energiecascadering. Tevens zijn door het werken op grotere schaal voordelen te behalen in techniek, economie en milieu. Een nadeel is dat de secundaire energievorm – als dat warmte is – met meer verliezen en tegen hogere kosten moet worden getransporteerd. Bij elektriciteit zijn de nadelen van verliezen en hogere transportkosten nauwelijks aanwezig. Er zijn echter uit energetisch/exergetisch oogpunt kanttekeningen te maken bij het gebruik van elektriciteit voor dit soort toepassingen.

Deze methode leent zich zoals gezegd uitstekend voor energiecascadering. Een praktische uitvoeringsvorm is de warmte-krachtkoppeling. Bij deze vorm wordt de primaire energie deels omgezet in een 'hoogwaardige' vorm, te weten elektriciteit ('kracht'), deels in goed bruikbare ('laagwaardige') rest- en/of afvalwarmte. De momenteel gangbare warmte-krachtopties zijn vooral gebaseerd op gasmotoren en gasturbines.

Uitgaande van een correcte exergetische benadering moet worden gestreefd naar een zo hoog mogelijk elektrisch rendement, gecombineerd met een adequaat gebruik van rest- en afvalwarmte. In principe houdt dit in dat de 'Steam Injected

Gasturbine' (STIG) met zijn hoog elektrisch rendement als eerste mogelijkheid moet worden overwogen. De schaalgrootte van de STIG-installatie kan bij de warmte-afzet echter tot problemen leiden.
De andere technieken – gasmotor, gasturbine en STEG – scoren exergetisch wel minder, maar zullen gezien de kleinere schaal minder afzetproblemen veroorzaken. De gasmotor als industriële toepassing kent nog enige beperkingen in het temperatuurniveau van de rest- en afvalwarmte.

Omgekeerd bestaat de principiële wens de benodigde warmte zoveel mogelijk te betrekken uit een cascadeproces. Eenvoudig gezegd betekent dit dat bij de projectie van een warmte-krachtoptie de warmtevraag bepalend is voor de grootte. Gezien de warmte-krachtverhouding in de energievraag van de industrie betekent dit dat elektriciteit moet worden teruggeleverd.

De beide principes 'hoog elektrisch rendement' en 'de warmtevraag is bepalend' voeren tot de gedachte dat de warmte-krachtpotentie pas optimaal kan worden benut bij een goed samenspel tussen industrie en nutsbedrijven. In dit samenspel brengt de industrie haar behoefte aan warmte en kracht in. De nutsbedrijven hebben een optimale opwekking van deze warmte en kracht tot taak. Zij kunnen hierbij gemakkelijker op een grotere schaal opereren en kunnen ook qua economie en risicospreiding andere maatstaven hanteren. In de praktijk kan dit resulteren in lokale of zelfs regionale warmtenetten of in lokale stoomnetten die worden gevoed uit energiecentra.

Toevoer energie in primaire of secundaire vorm voor energietransformatie op gebruikspunt

Een derde methode is het toevoeren van primaire of secundaire energie die ter plekke wordt omgezet in een drijvende kracht voor een energietransformatie. Voorbeelden zijn de absorptiewarmtepomp (primaire energie wordt direct omgezet), de gasmotorgedreven warmtepomp (primaire energie wordt indirect omgezet) en de elektrisch gedreven warmtepomp (maakt gebruik van secundaire energie).

Het voordeel van deze methode is dat ontstane afvalwarmte opnieuw kan worden gebruikt. De economische mogelijkheden zijn echter beperkt.

Literatuur

[1] *Energiebesparingspotentiëlen 2015*, referentienummer 90-258, TNO, januari 1991

[2] *Sep Warmtekaart 1991*, in: Elektriciteitsplan 1991-2000, Samenwerkende Elektriciteitsproduktiebedrijven (Sep), 1991

[3] *Industriële proceswarmte in relatie tot het temperatuurniveau*, rapport ESC-21, Energie Studie Centrum, Petten, juni 1982

[4] *Energie in cijfers*, ministerie van Economische Zaken, Directoraat-Generaal Energie, augustus 1989

[5] *De Nederlandse energiehuishouding*, Centraal Bureau voor de Statistiek, diverse jaren

4.2 WARMTE-KRACHTKOPPELING IN DE PRAKTIJK

ir. A. Wondergem

4.2.1 DE VRAAG NAAR PROCESWARMTE

Bij de overweging of men elektriciteit decentraal zal opwekken, is de warmtevraag van een bedrijf of industrie van doorslaggevend belang. Minder belangrijk is hoe groot de elektriciteitsvraag is. Om tot een zo groot mogelijke energiebesparing te komen, dient de warmte-krachtinstallatie te worden gedimensioneerd op de warmtevraag. Door uit te gaan van een minimum aantal draaiuren en afhankelijk van het elektriciteits- en thermisch rendement van de warmte-krachtinstallatie, komt men tot een bepaald op te stellen elektriciteitsvermogen. Dit vermogen wordt dus niet bepaald door de feitelijke elektriciteitsvraag van het bedrijf waar de warmte-krachtinstallatie wordt geplaatst. Gezien de grote warmtevraag van de Nederlandse industrie is een grote decentrale elektriciteitsproduktie theoretisch mogelijk. Schattingen lopen uiteen van 10.000 tot 20.000 MW. In werkelijkheid zijn deze getallen niet haalbaar, omdat economische factoren mede bepalen of warmte-krachtkoppeling rendabel is.

De twee belangrijkste redenen voor een bedrijf om tot warmte-krachtkoppeling over te gaan, zijn:
- energiebesparing, met een positief effect op het milieu door vermindering van voornamelijk CO_2-uitstoot, NO_x-uitstoot en koelwatergebruik;
- verlaging van de bedrijfskosten.

Uit milieu-oogpunt zal druk op de industrie worden uitgeoefend om warmte-krachtinstallaties te installeren. Maar dit hoeft niet altijd te leiden tot verlaging van de bedrijfskosten. Bij de huidige lage elektriciteits- en gasprijzen is een investering in een warmte-krachtinstallatie conform de gangbare industriële investeringsnormen (terugverdientijden korter dan 3 tot 4 jaar) niet rendabel. Onder druk van de overheid om die normen te verruimen, zal de industrie in de komende jaren meer op warmte-krachtvermogen overgaan. Ook het sluiten van convenanten om tot energiebesparing te komen, en het introduceren van samenwerkingsverbanden [3] tussen elektriciteitsdistributie- en -produktiebedrijven zal het warmte-krachtvermogen doen toenemen.

Het alternatief voor warmte-krachtkoppeling is het inkopen van elektriciteit en het opwekken van stoom met behulp van stoomketels (gescheiden opwekking). In principe bepalen de kosten van dit alternatief of een warmte-krachtinstallatie rendabel is.

De vraag naar proceswarmte wordt meestal gedekt door stoom van vaak verschillende druk en temperatuur. Daarnaast bestaat er ook een warmtevraag die alleen kan worden gedekt met directe ondervuring. Denk hierbij bijvoorbeeld aan chemische processen in de petrochemische industrie. Deze warmtevraag is voor warmte-krachtkoppeling niet van belang en laten we hier buiten beschouwing.

4.2.2 POTENTIËLE ENERGIEBESPARING

Vergelijken we het gebruik van gescheiden opwekking (huidige gemiddelde rendement van elektriciteitscentrales is 40%) met warmte-krachtkoppeling, dan kan een energiebesparing worden bereikt van 29%. Indien wij een vergelijking maken met de 'best technical means' (moderne STEG-installaties met een rendement van 52% – 54%), dan komen we uit op een mogelijke besparing van 17%. In fig. 4.3 is deze besparing grafisch weergegeven met behulp van brandstofeenheden en omzettingsrendementen.

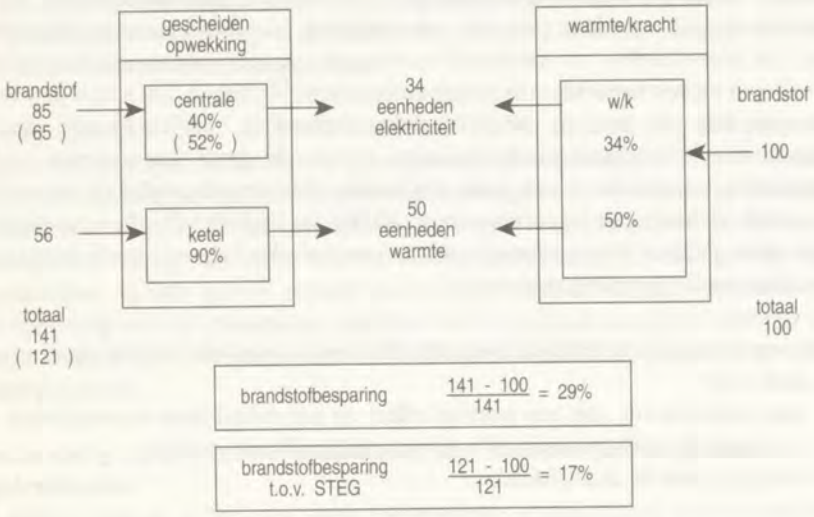


Fig. 4.3 Brandstofbesparing in procenten bij gebruik van warmte-krachtkoppeling

4.2.3 MOGELIJKE WARMTE-KRACHTCONFIGURATIES

Er zijn verschillende ontwerpen van warmte-krachtinstallaties mogelijk (zie fig. 4.4). De schema's in deze figuur zijn van opklimmende complexiteit. Behalve een hoog energetisch rendement is ook het exergetisch rendement van belang. Bij een hoog exergetisch rendement wordt uit de beschikbare energie een kwalitatief zo hoogwaardig mogelijk produkt gehaald. Omdat elektriciteit een hoogwaardiger produkt is dan stoom (in kostprijs een factor 2,5 tot 3), zal men ernaar moeten streven met een warmte-krachtinstallatie zoveel mogelijk elektriciteit te produceren.

De stoomvraag zal de inzet van vermogen dicteren. Welk systeem (a, b of c) kan worden gekozen, hangt af van de gevraagde stoomcondities en de meestal variërende stoomvraag. Aan de voorwaarden kan met a) en b) worden voldaan door in de vaste ketel bij te stoken en met c) door meer of minder stoom te condenseren.

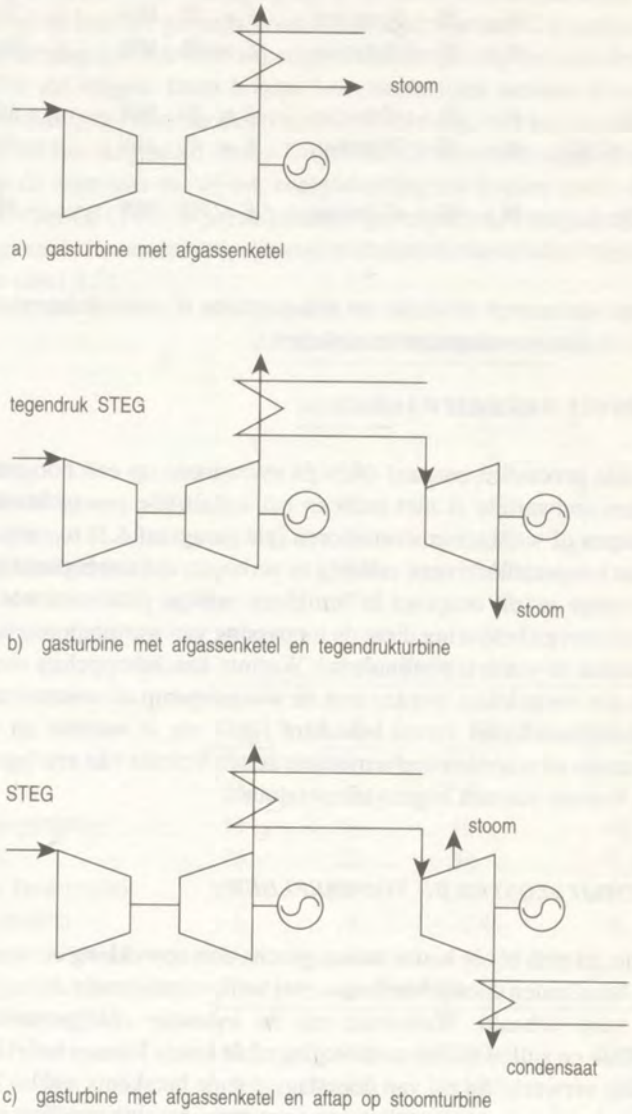


Fig. 4.4 Schema's van warmte-krachtconfiguraties

Per bedrijf is de proceswarmtevraag anders; voor elke situatie zal de warmte-krachtinstallatie op maat moeten worden ontworpen. Tabel 4.4 geeft enige veel voorkomende installaties met stoomproduktie, elektriciteitsproduktie en elektrische rendementen. De configuratie b. komt tot nu toe alleen voor bij grotere warmtekrachtinstallaties, en indien de stoomdruk beneden circa 8 bar ligt (vanwege de extra investeringskosten in de stoomturbine). Configuratie c. is alleen geschikt bij een grote stoomvraag. We moeten dan denken aan een warmtevraag van meer dan 100 ton stoom per uur, waardoor meer dan 100 MW elektriciteitsproduktie mogelijk is.

a. GT-AK	W = 10 – 25 ton/uur	E = 3,7 MW	r_e = 30%
	W = 25 – 50 ton/uur	E = 22 MW	r_e = 34%
	W = 60 – 120 ton/uur	E = 35 MW	r_e = 32 – 38%
b. GT-AK-TD	W = 25 – 40 ton/uur	E = 26 MW	r_e = 40%
(tegendruk STEG)	W = 40 – 70 ton/uur	E = 46 MW	r_e = 42%
c. GT-AK-aftap (STEG)	W > 100 – 40 ton/uur	E > 100 MW	r_e = 40 – 48%

Tabel 4.4 Veel voorkomende installaties met stoomproduktie W, elektriciteitsproduktie E en het bijbehorende elektrische rendement r_e

4.2.4 GEBRUIK VAN RESTWARMTE

Bij industriële processen ontstaat dikwijls restwarmte op een hoog temperatuurniveau. Deze restwarmte is niet meer in het industriële proces bruikbaar. Door warmtepompen of warmtetransformatoren (zie paragraaf 4.3) toe te passen, is het mogelijk het temperatuurniveau zodanig te verhogen dat een bepaald gedeelte van deze restwarmte wordt omgezet in bruikbare nuttige proceswarmte. Gezien de noodzaak tot energiebesparing dient de toepassing van warmtepompen en warmtetransformatoren te worden gestimuleerd. Warmte-krachtkoppeling mag in aard en toepassing niet vergeleken worden met de warmtepomp of warmtetransformator. Warmte-krachtinstallaties zetten brandstof (gas) om in warmte en elektriciteit. Warmtepompen en warmtetransformatoren zetten warmte van een lagere temperatuur om in warmte van een hogere temperatuur.

4.2.5 BEDRIJFSKOSTEN EN VOORBEELDEN

De industrie zal zich bij de keuze tussen gescheiden opwekking en warmte-krachtkoppeling laten leiden door te berekenen met welke configuratie de laagste bedrijfskosten worden behaald. Weliswaar zal de industrie ook gevoelig zijn voor overheidsdruk en zullen milieu-overwegingen de keuze kunnen beïnvloeden, maar de financiële verwachting zal van doorslaggevende betekenis zijn.
De lasten en baten van een installatie voor warmte-krachtkoppeling worden enerzijds bepaald door de besparing op de warmteopwekking en op de elektriciteitsafname, en anderzijds door de extra lasten: kapitaallasten, brandstofkosten, bediening en onderhoud. Afhankelijk van de winst (baten minus lasten) en de investering zal aan de hand van bepaalde criteria (bijvoorbeeld terugverdientijd netto contante waarde) worden bepaald of in energiebesparing met warmte-krachtkoppeling zal worden geïnvesteerd. Bij de huidige lage energieprijzen is zonder subsidie een investering in warmte-krachtvermogen niet rendabel. Om deze investering rendabel te maken, zou de overheid subsidie op kapitaalinvesteringen moeten geven [2] en/of de energieprijzen moeten verhogen.

Ter illustratie zijn een kleinere (13 MW) en een grotere warmte-krachtinstallatie (40 MW) op rentabiliteit doorgerekend [1]. Er zijn vier varianten onderzocht.

Variant A is gebaseerd op de huidige gasprijs en 25% SES-subsidie [2]. Variant B is gebaseerd op de huidige gasprijs zonder subsidie. Variant C is gebaseerd op de aanname dat de gasprijs met 70% zal stijgen met als gevolg dat ook de kolenprijs met circa 20% zal stijgen. Deze hogere brandstofprijzen werken door in de gemiddelde brandstofprijs voor de elektriciteitsopwekking. Verder is in deze variant aangenomen dat het Regionaal Basis Tarief (RBT) met 10% stijgt. Variant D is gebaseerd op de aanname dat er een energieheffing zal komen zodat de gasprijs stijgt tot *f* 15,– per GJ (*f* 0,475 per m^3) met als gevolg dat de energieprijs tot *f* 0,16 per kWh stijgt en de brandstofmixprijs van de elektriciteitproduktie stijgt tot *f* 0,10 per kWh (zie tabel 4.5).

	Gasturbine met afgassenketel	
	Installatie I	Installatie II
vermogen (MW_e)	13	40
warmteproduktie (MW_t)	20	50
eigen gebruik (MW_e)	6	20
investering (miljoenen guldens)	26,4	80
looptijd (jaren)	10	10

	Variant			
	A	B	C	D
subsidie (%)	25	0	0	0
elektriciteitsprijs (ct/kWh)	11	11	15	16
gasprijs (ct/m^3)	23	23	34	47,5
Regionaal Basis Tarief (*f*/kW)	251	251	275	251
brandstofprijs (ct/kWh)	5	5	7,45	10
	Installatie I			
opbrengst eigen beheer (Mf)				
- cash flow	14,5	10,2	18,9	15,8
- netto contante waarde	0,6	-2,8	1,9	0,2
opbrengst joint venture				
- netto contante waarde	6,5	1,3	9,5	6,3
	Installatie II			
opbrengst eigen beheer (Mf)				
- cash flow	47	34	61,6	63,1
- netto contante waarde	3,8	-6,9	8	12,1
opbrengst joint venture				
- netto contante waarde	22,3	6,5	32,1	36,5

Tabel 4.5 Illustratie van de rentabiliteit van warmte-krachtinstallaties

Er zijn twee beheersvarianten berekend: eigen beheer en beheer door een joint venture [3]. Uit bestudering van de resultaten blijkt dat de netto contante waarde van de joint venture hoger is. Dit komt doordat deze beheersvorm gebruik maakt van externe financiering. Het rentepercentage dat moet worden betaald, is lager dan de interne rentevoet. Hierdoor ontstaat een 'hefboomeffect' ten gunste van het rendement op het geïnvesteerde eigen vermogen.

Het blijkt dat bij de huidige energieprijzen warmte-krachtkoppeling zonder subsidie (variant B) in eigen beheer niet, en in een joint venture slechts marginaal rendabel is. Verder blijkt dat verhoging van het RBT en verhoging van de gasprijs met 50% een minstens even positief effect heeft op de rentabiliteit als verhoging van de gasprijs met 100%.

4.2.6 SLOTOPMERKINGEN

Energiebesparing moet worden vertaald in een kostenbesparing. De industrie zal namelijk pas bereid zijn tot investeren indien deze investering op redelijke termijn kan worden terugverdiend. Dit geldt dus ook voor warmte-krachtinstallaties.

Exergie is een thermodynamisch begrip en zal alleen kunnen bijdragen in het technisch optimaliseren van processen. Exergie is geen grondslag voor een economisch rekenschema, maar dient te leiden tot energiebesparing (en dus tot besparing op grondstofkosten). De procesoptimalisatie zal pas worden uitgevoerd als de investering zich door zo'n besparing terugbetaalt.

De rentabiliteit van de investering in warmte-krachtkoppeling kan worden verbeterd door extern te financieren, bijvoorbeeld door middel van joint ventures.

Samenwerking tussen elektriciteitsdistributiebedrijven, elektriciteitsproduktiebedrijven en warmtegebruikers bevordert het dimensioneren van warmte-krachtinstallaties op de warmtevraag en leidt uiteindelijk tot een grotere energiebesparing.

Literatuur

[1] *De rentabiliteit van Warmte/Krachtcycli*, Projektbureau Warmte/Kracht in opdracht van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Driebergen, februari 1991

[2] *Subsidieregeling energiebesparing en stromingsenergie*, ministerie van Economische Zaken, directie Voorlichting, rapport WJA/JZ 901/121841, 1991

[3] *Het bedrijven van een W/K-installatie in een joint venture*, Projektbureau Warmte/Kracht, deel 1, Driebergen, juni 1991

4.3 WARMTEPOMPEN IN DE INDUSTRIE

ir. P.A. Oostendorp

4.3.1 INLEIDING

Sinds de eerste energiecrisis nu bijna twintig jaar geleden spreken warmtepompen sterk tot de verbeelding. Na een teruggang in de belangstelling aan het begin van de jaren tachtig die vooral een gevolg was van de dalende energieprijzen, is op het ogenblik zeker in Nederland, maar ook daarbuiten een hernieuwde belangstelling waar te nemen door een toenemende zorg voor het milieu. Omdat warmtepompen primaire energie besparen, kunnen zij aanzienlijk bijdragen tot vermindering van de emissies die ontstaan bij verbranding van fossiele brandstoffen.

De warmtepomp dankt deze interesse in belangrijke mate aan het – zeker theoretisch – zeer hoge rendement. Afhankelijk van de definitie kan dit ver boven de 1 liggen. Daarnaast zijn warmtepompen in veel uitvoeringen denkbaar, waardoor er veel toepassingen mogelijk zijn.

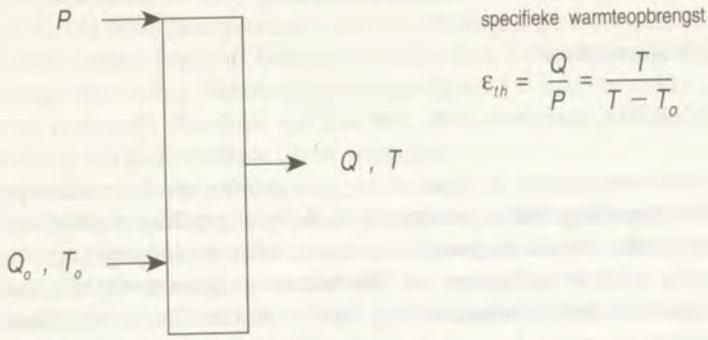
In dit hoofdstuk zal worden gepoogd te schetsen wat het perspectief is van warmtepompen in industriële toepassingen en welke problemen daarbij dienen te worden opgelost.

4.3.2 WARMTEPOMPEN, EEN OVERZICHT

In zijn meest eenvoudige vorm is een warmtepomp een omgekeerde krachtcyclus. In een krachtcyclus wordt arbeidsvermogen opgewekt in een proces dat op hoge temperatuur warmte opneemt en op lagere (omgevings)temperatuur warmte afstaat. De warmtepomp doet het omgekeerde: hij genereert warmte op hoge temperatuur onder opname van omgevingswarmte en mechanische energie. We kunnen ook zeggen dat de exergieloze omgevingswarmte wordt opgewaardeerd door de exergie van de aandrijfenergie eraan toe te voegen, hetgeen leidt tot een toegenomen temperatuur van de aldus geproduceerde warmte.

Er bestaan zeer veel soorten warmtepompen. Thermodynamisch zijn ze eenvoudig samen te vatten in twee hoofdsoorten. Fig. 4.5 laat het energiestroomdiagram van de mechanisch aangedreven warmtepomp zien.
Fig. 4.6 toont de thermisch aangedreven warmtepomp. In deze figuren zijn de warmtestromen geordend naar de hoogte van hun temperatuur. Zo wordt in fig. 4.5 omgevingswarmte Q_0 bij temperatuur T_0 en mechanische energie P (equivalent met warmte van oneindig hoge temperatuur) toegevoerd. Nuttige warmte Q wordt afgestaan bij temperatuur T. In fig. 4.6 treedt de aandrijfwarmte Q_h in de plaats van P.

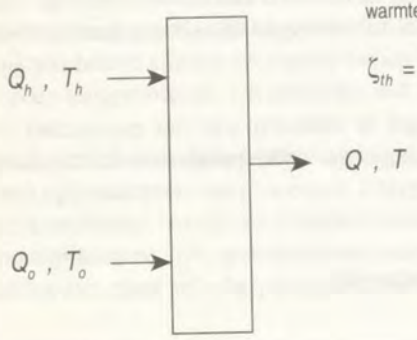
Het eenvoudig toepassen van de eerste en tweede hoofdwet van de thermodynamica leidt tot de theoretische waarden van de specifieke warmteopbrengst ε_{th} van de mechanisch aangedreven warmtepomp en de warmteverhouding ζ_{th} van de ther-



specifieke warmteopbrengst

$$\varepsilon_{th} = \frac{Q}{P} = \frac{T}{T - T_o}$$

Fig. 4.5 Mechanisch aangedreven warmtepomp



warmteverhouding

$$\zeta_{th} = \frac{Q}{Q_h} = \frac{T_h - T_o}{T_h} \cdot \frac{T}{T - T_o} = \eta_i \cdot \varepsilon_{th}$$

Fig. 4.6 Thermisch aangedreven warmtepomp

misch aangedreven warmtepomp zoals in deze figuren is aangegeven. Aan deze formules is te zien dat de specifieke warmteopbrengst inderdaad gelijk is aan de reciproke waarde van het Carnot-rendement van een krachtcyclus. Bij de thermische warmtepomp wordt duidelijk dat deze bestaat uit de combinatie van een krachtcyclus en een mechanisch aangedreven warmtepomp.

In de figuren 4.7a en 4.7b is de warmteverhouding van een thermische warmtepomp aangegeven als functie van de temperaturen T, T_o (= 6 °C) en T_h. Daarbij valt het volgende op te merken:

- De curve voor $T_h \to \infty$ geeft de theoretische specifieke warmteopbrengst van de mechanisch aangedreven warmtepomp weer.
- De werkelijk haalbare waarden van de warmteverhouding liggen natuurlijk beduidend lager. Dit is het gevolg van allerlei verliezen die optreden in de compressor, de warmtewisselaars en de aandrijfmotor. Voor mechanisch aangedreven compressiewarmtepompen liggen de in de praktijk gerealiseerde waarden van goed ontworpen systemen tussen 55 en 65% van de theoretische waarden.

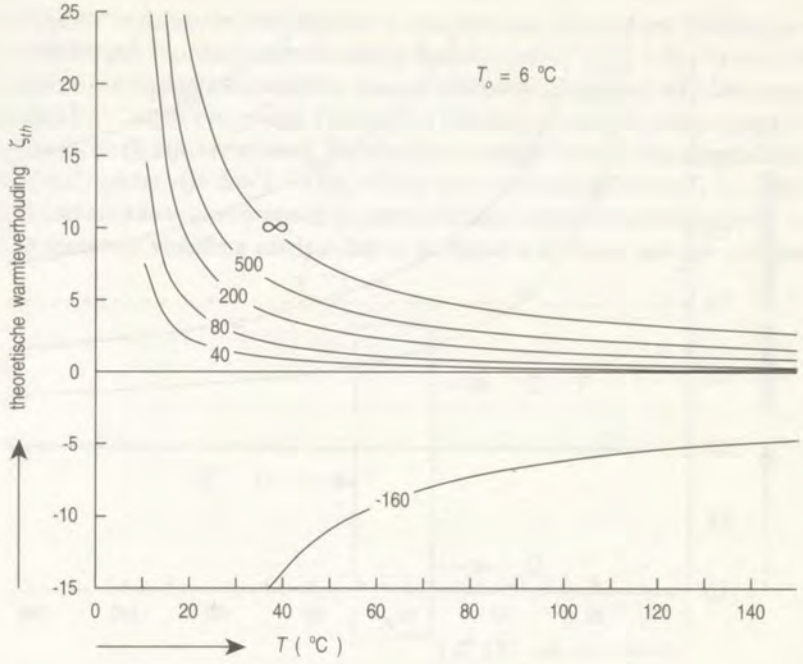


Fig. 4.7a Warmteverhouding van thermische warmtepompen als functie van T bij verschillende waarden van T_h

– Het spreekt vanzelf dat bij warmtepompen de temperatuur T waarop de nuttige warmte wordt afgegeven boven de omgevingstemperatuur T_o ligt. De aandrijftemperatuur T_h kan daarentegen binnen een aantal bereiken liggen die hieronder afzonderlijk worden beschouwd.

$T_h > T$
Hier is sprake van normaal warmtepompbedrijf, waarbij de warmteverhouding groter dan 1 is. In fig. 4.7 komt dit overeen met het gebied $\zeta_{th} > 1$.

$T_h = T$
Hier is de warmteverhouding gelijk aan 1. De aandrijfwarmte en nuttige warmte zijn in temperatuur en hoeveelheid aan elkaar gelijk en de omgevingswarmte verdwijnt uit de balans: de ideale warmtewisselaar.

$T_o < T_h < T$
De temperatuur van de aandrijfwarmte ligt onder het temperatuurniveau van de nuttige warmte. Men spreekt in dit geval van een warmtetransformator (fig. 4.8). Ook deze kan worden beschouwd als de combinatie van een mechanisch aangedreven warmtepomp en een krachtcyclus: een deel van de warmte Q_h levert onder afgifte van warmte Q_o aan de omgeving mechanische energie; daarmee wordt een warmtepomp aangedreven die het andere deel van Q_h opvoert naar temperatuurniveau T.

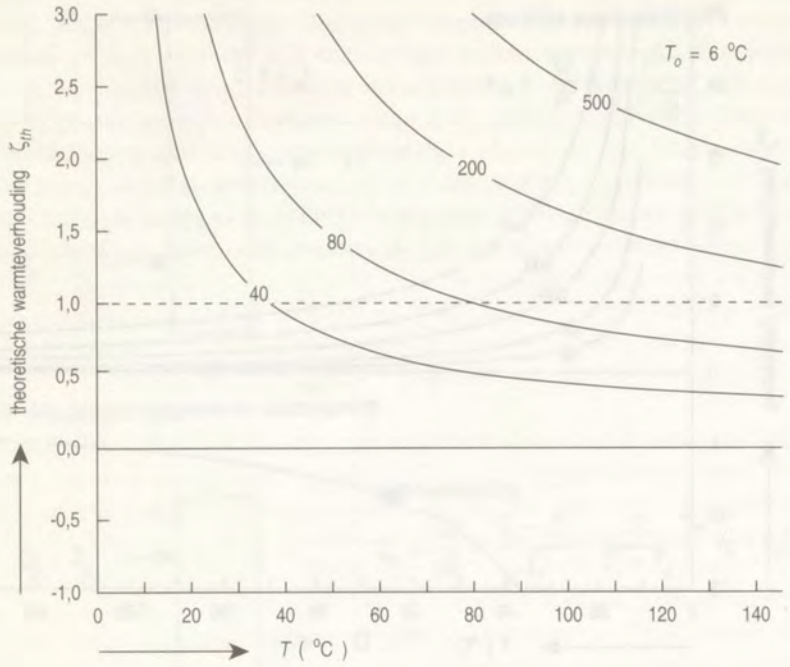


Fig. 4.7b Deelvergroting van fig. 4.7a

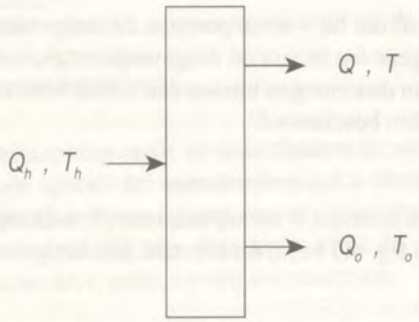


Fig. 4.8 Warmtetransformator

De warmteverhouding is nu niet hoog; deze ligt tussen 0 en 1. Daar staat tegenover dat de aandrijfenergie laagwaardige warmte is. Afgezien van elektriciteit voor circulatiepompen en regeltechniek gebruikt de warmtetransformator geen primaire energie.

$T_h = T_o$
Dit geval is zonder betekenis. De aandrijfwarmte bevat geen exergieaandeel en kan dus niets aandrijven.

$T_h < T_o$

In dit geval is de aandrijfwarmte een warmtestroom die door het warmtepompsysteem wordt afgestaan aan een extern koudereservoir (fig. 4.9). Zij keert dus van teken om en daarmee wordt de warmteverhouding negatief. Alle inkomende warmte komt uit de omgeving. Deze opzet lijkt enigszins op de warmtetransformator: Q_h en Q_o zijn verwisseld. De (absolute) waarde van de warmteverhouding kan (veel) groter zijn dan 1. In fig. 4.7a is als voorbeeld de curve $T_h = -160\ ^\circ C$ getekend om aan te geven wat de toepasbaarheid zou zijn van een koudereservoir in de vorm van vloeibaar aardgas dat na transport weer moet worden verdampt.

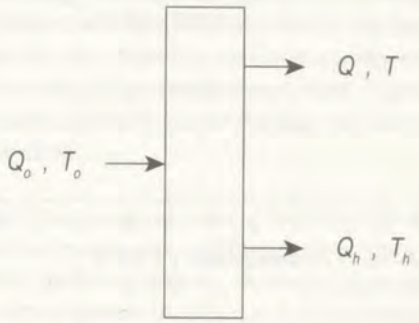


Fig. 4.9 Thermisch aangedreven warmtepomp ($T_h < T_o$)

- Bij een aantal typen thermisch aangedreven warmtepompen zijn de temperaturen niet vrij te kiezen. Bij absorptiewarmtepompen zijn de temperaturen T_o, T en T_h gekoppeld. Kiest men bijvoorbeeld T_o en T, dan ligt T_h min of meer vast. Het gevolg is dat bij dit type warmtepompen de warmteverhouding minder sterk afhankelijk is van de temperatuurverhoging dan bij bijvoorbeeld elektrisch aangedreven compressiewarmtepompen. Bij eenvoudige, eentrappige absorptiewarmtepompen ligt de theoretische beperking van de warmteverhouding bij de waarde 2. Gerealiseerde systemen hebben warmteverhoudingen tussen 1,2 en 1,65.

Voor industriële toepassingen is een meer algemene eigenschap van warmtepompen interessant: niet alleen temperatuurverschillen tussen vraag- en aanbodwarmtestromen rond processen kunnen ermee worden overbrugd, maar ook warmtestromen die in plaats en/of tijd niet samenvallen, kunnen ermee worden gekoppeld. Dat betekent dat er gecombineerd met het temperatuurverhogende vermogen van warmtepompen, ook varianten bestaan die tegelijkertijd warmte kunnen transporteren en/of opslaan. Van dit potentieel wordt nog nauwelijks gebruik gemaakt.

Warmtepompen kunnen in de industrie een belangrijke rol vervullen bij de voorziening in de vraag naar lage-temperatuurwarmte. Dat wordt duidelijk uit fig. 4.10 [4]. Hieruit is af te leiden dat in de Nederlandse industrie veel warmte wordt

gevraagd bij relatief lage temperaturen: ongeveer 75% beneden 400 °C en 60% beneden 200 °C.

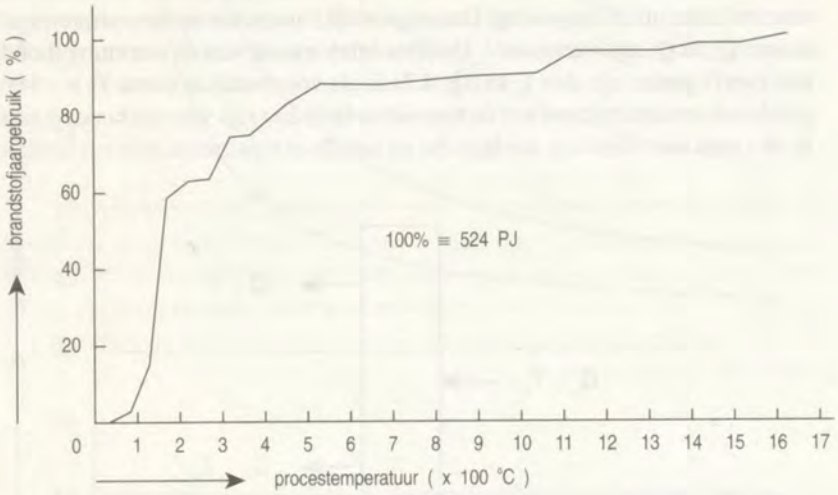


Fig. 4.10 Het jaargebruik van brandstof in de Nederlandse industrie (cumulatief op basis van procestemperatuur)

4.3.3 MOGELIJKE UITVOERINGSVORMEN VAN WARMTEPOMPEN

In fig. 4.11 is in een hiërarchisch schema aangegeven hoe de verschillende typen warmtepompen zich tot elkaar verhouden. Ook binnen de genoemde categorieën kunnen weer talloze onderverdelingen worden aangebracht.

Buiten Nederland gebeurt de aandrijving van mechanische warmtepompen vooral met elektromotoren. In Nederland met zijn infrastructuur voor aardgas bestaan veel systemen met gasmotoren (vooral in de gebouwde omgeving). Gasmotorwarmte-

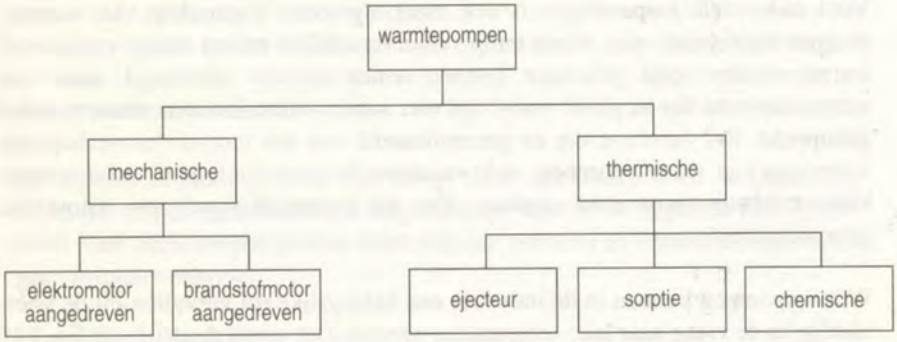


Fig. 4.11 Overzicht van de belangrijkste typen warmtepompen

pompen hebben relatief hoge warmteverhoudingen, omdat de restwarmte uit koelwater en uitlaatgassen nuttig kan worden gebruikt. Dit voordeel moet worden afgewogen tegen de opgave een hoge NO_x-emissie te vermijden. Duidelijk is dat met een toenemend rendement van de centrale elektriciteitsopwekking – zeker wanneer deze gepaard gaat met nuttig gebruik van restwarmte – de positie van elektrische warmtepompen ten opzichte van gasmotorwarmtepompen sterker wordt. Motoren met uitwendige verbranding, zoals bijvoorbeeld de Stirling-motor, zijn een aantrekkelijk alternatief, omdat daarbij de emissies principieel beter te beheersen zijn.

De meeste mechanisch aangedreven warmtepompen werken met een verdampend koudemiddel (Rankine-cyclus). Dat betekent dat het bij lage druk verdampende koudemiddel warmte uit de omgeving opneemt en bij hoge druk die warmte condenserend op een nuttig temperatuurniveau weer afgeeft. Andere cycli zijn eveneens denkbaar, zoals bijvoorbeeld de Stirling- en Brayton-cyclus, die beide geheel in de gasfase werken.

Er bestaan veel verschillende compressoren in mechanische warmtepompen (onder andere zuiger-, schroef-, schotten- en centrifugaalcompressoren). Waar de industrie veel te maken heeft met grote vermogens, de ermee gepaard gaande grote dampvolumina en relatief stabiele procescondities, zullen veel centrifugaalcompressoren worden aangetroffen. Zuigercompressoren daarentegen vertonen eigenschappen (goed rendement over een groot regelbereik en tot in de kleinste capaciteiten te koop) die in een industriële omgeving minder vaak zullen worden gevraagd.

In eerste benadering verschillen thermische warmtepompen slechts van mechanisch aangedreven warmtepompen, omdat zij met een 'thermische compressor' zijn uitgerust. Als dat een dampstraalejecteur is, spreekt men van een ejecteurwarmtepomp. Deze pomp is geschikt voor grote vermogens, een kleine temperatuurverhoging en bedrijfscondities die slechts weinig van het ontwerppunt afwijken. Bij sorptiesystemen bestaat de 'compressor' uit een vloeistof- of vastestofsysteem dat bij lage druk koudemiddel ab- of adsorbeert en bij hoge druk weer desorbeert, onder afvoer, respectievelijk toevoer van warmte. Sorptiesystemen vertonen in het algemeen een uitstekend deellastgedrag, omdat het grote (interne) warmte- en stofoverdragend oppervlak bij lage belastingen minder verliezen oplevert (het rendement wordt dan zelfs groter). Onder gunstige externe omstandigheden (bijvoorbeeld bij een kleine temperatuurverhoging) valt de warmteverhoudig soms tegen, vooral als aandrijfwarmte van hoge temperatuur beschikbaar is. Zij bieden echter uitstekende mogelijkheden om restwarmte van middentemperatuurniveau te gebruiken.

Alle genoemde thermische warmtepompen hebben als groot voordeel dat zij geen bewegende delen hebben en derhalve geruisloos werken en geen mechanische slijtage vertonen. Aan de andere kant zijn de corrosieproblemen die de stofparen (combinatie van koudemiddel en absorptiemiddel) soms veroorzaken nog niet in alle gevallen opgelost.

Chemische en absorptiewarmtepompen hebben veel gemeen. Het onderscheid is

gebaseerd op de aard van de omkeerbare warmteprocessen. Bij chemische en absorptiewarmtepompen zijn deze processen respectievelijk chemisch en fysisch van aard. Tot nu toe zijn de hoogste temperaturen die in absorptiewarmtepompen en -transformatoren kunnen optreden beperkt tot circa 180 °C. Deze grens heeft te maken met de stabiliteit van de stofparen enerzijds en de corrosie anderzijds. In de VS ontwikkelt men een stofpaar waarmee temperaturen tot 260 °C haalbaar zouden zijn [7].

Thermische warmtepompen met vloeibare absorptiemiddelen kunnen continu functioneren: het absorptiemiddel wordt in de warmtepomp rondgepompt tussen het hogedruk- en lagedrukdeel en passeert daarmee de plaatsen waar het koudemiddel damp moet opnemen, respectievelijk afstaan. Wanneer het sorptiemiddel voortdurend in de vaste fase verkeert, is circuleren niet mogelijk en moet het onderdeel van de warmtepomp dat het adsorptiemiddel bevat, periodiek van functie veranderen. Natuurlijk geeft dat verliezen, maar zodra men bereid is die verliezen te accepteren, heeft men er wel een warmteopslagfaciliteit bij. Dat laatste kan voordelig zijn indien de aandrijfwarmte niet beschikbaar is op het moment dat de warmtepomp warmte moet leveren.

In principe kunnen alle typen warmtepompen in 'open' of 'gesloten' vorm voorkomen. 'Open' betekent dat het medium dat in de warmtepomp circuleert, ook in het industrieel proces een functie vervult. 'Gesloten' betekent dat er geen massauitwisseling is tussen industrieel proces en warmtepompproces. De voor- en nadelen zijn duidelijk: bij gesloten warmtepompen zijn warmtewisselaars nodig om de warmte over te dragen tussen het warmtepomp- en het procesmedium. Dat kost geld en levert verliezen op. Bij open warmtepompen kan de bedrijfszekerheid in het geding komen door vervuiling en door een meer directe koppeling met het industriële proces.

In principe lenen alle warmtepompuitvoeringen zich voor toepassing als warmtetransformator. In de praktijk worden alleen warmtetransformatoren uitgevoerd op basis van het absorptieprincipe. Dit heeft vooral te maken met de energiestromen rond transformatoren, die alle thermisch van aard zijn en lage temperaturen hebben.

Niet in het schema (fig. 4.11) opgenomen zijn thermische warmtepompen die bestaan uit combinaties van krachtcycli en omgekeerde krachtcycli, zoals bijvoorbeeld de Stirling/Rankine-, de Stirling/Stirling-, en de Villeumier-warmtepomp. Aan diverse varianten is in de loop der jaren aandacht besteed, maar betrouwbare, betaalbare systemen zijn nog niet op de markt. Een zeer belangrijk voordeel van deze systemen is dat de drie temperaturen die bij thermische warmtepompen een rol spelen, niet gekoppeld zijn. Bij een kleine temperatuurverhoging en een hoge temperatuur van de beschikbare aandrijfwarmte kan de warmteverhouding dus navenant groot zijn.

4.3.4 TOEGEPASTE WARMTEPOMPEN IN DE NEDERLANDSE INDUSTRIE

Over aantallen van en ervaringen met de installaties is geen gedetailleerde infor-

matie voorhanden. De meest recente inventarisatie is medio 1991 [8] uitgevoerd, op basis van bestanden bij onderzoekinstellingen, adviseurs en overheid. Het blijkt zeer moeilijk, zo niet onmogelijk, zich uit die bestanden een duidelijk beeld te vormen over de stand van zaken in Nederland. Globaal kan echter wel het een en ander worden afgeleid. Ervaringen met een aantal demonstratieprojecten in de industrie zijn beschikbaar [5].

In Nederland zijn tot nu toe slechts weinig industriële warmtepompen toegepast. Systemen voor mechanische damprecompressie (MDR) komen nog het meest voor. Van de 17 getraceerde systemen staat bij 12 vast dat zij goed functioneren, van de overige ontbreken gepubliceerde gegevens. De MDR-systemen staan in de voedingsindustrie [10] en in de chemische industrie [7]. Deze MDR-systemen zijn alle gekoppeld aan indampprocessen. Door het recomprimeren van de oplosmiddeldamp kan de condensatiewarmte ervan worden teruggevoerd naar het kookvat. Dankzij de kleine temperatuurverhoging en het ontbreken van warmtewisselende oppervlakken van verdamper en condensor zijn de warmteverhoudingen gemiddeld zeer hoog (6,5 tot 30) en dat verklaart natuurlijk de aantrekkelijkheid voor de industrie. Wanneer tevens het terugwinnen van oplosmiddelen of de reductie van geur-emissies relevant zijn, zijn deze systemen extra interessant. Het gemiddelde geïnstalleerde thermische vermogen is ongeveer 8 MW. Het is niet ondenkbaar dat een aantal MDR-systemen in de industrie in bedrijf is dat niet als warmtepomp wordt herkend. De gedachte om damp bij energie-intensieve destillatieprocessen te recomprimeren voor warmteterugwinning ligt namelijk zeer voor de hand. Er zou dus sprake kunnen zijn van warmtepompen 'avant la lettre'.

In Nederland zijn naar schatting 10 compressiewarmtepompen in industrieel gebruik, voor het merendeel elektrisch aangedreven. Dit verschilt nogal van de gebouwde omgeving, waar veel systemen met gasmotoren werden geïnstalleerd (die veel problemen vertoonden met betrekking tot de interactie tussen gasmotor en compressor: compressorschades). Aantrekkelijk zijn droogtoepassingen, omdat de warmtepomp tegelijkertijd lucht kan ontvochtigen (door koeling) en kan verwarmen. Een warmtepomp functioneert zo in de houtindustrie. De meeste compressiewarmtepompen worden gebruikt om restwarmte uit processen geschikt te maken voor fabriekshal- en kantoorverwarming en voor de produktie van warm water.

Twee elektrische warmtepompen worden gebruikt om industriële restwarmte geschikt te maken voor gebruik 'buiten de poort'. Het betreft hier geen zuiver industriële toepassingen: de warmte wordt gebruikt voor een zwembad, respectievelijk een stadsverwarmingsysteem. Toch wijzen deze toepassingen op ontwikkelingen die in de toekomst van grotere betekenis zullen worden. Het integreren van het industrieel restwarmte-aanbod en de warmtevraag uit de gebouwde omgeving vertegenwoordigt een groot energiebesparingspotentieel.

In de industrie zijn slechts enkele sorptiesystemen gerealiseerd. Het betreft onder meer een warmtetransformator in de chemische industrie (6,5 MW) die lagedrukstoom produceert uit restwarmte, en een absorptiewarmtepomp voor de gecombineerde opwekking van koude en warmte. Een tweede warmtetransformator in

Nederland, eveneens voor de produktie van lagedrukstoom, wordt binnenkort in de staalindustrie in bedrijf gesteld.

4.3.5 MARKT EN POTENTIEEL, KNELPUNTEN VOOR IMPLEMENTATIE

In een marktstudie in 1988 [1] werd vastgesteld dat de chemische industrie het grootste potentieel biedt voor open warmtepompsystemen, zowel in aantal als in op te stellen vermogen. Voor gesloten warmtepompen is het potentieel in de sectoren chemie en voedings- en genotmiddelen ongeveer even groot (zie tabel 4.6).

	Open systemen			Gesloten systemen		
	aantal	capaciteit (MW)	besparing (10^6 m^3 gas)	aantal	capaciteit (MW)	besparing (10^6 m^3 gas)
– voedings- en genotmiddelen	100	300	100	75	250	50
– chemie	220	1.050	460	50	200	10
– textiel en papier				125	425	120
totaal	320	1.350	560	250	875	180

Bron: [1]

Tabel 4.6 Potentieel van warmtepompen in de Nederlandse industrie

Vergelijking van dit potentieel met de bestaande aantallen (zie vorige paragraaf) geeft aan dat in Nederland nog geen 5% van het potentieel is gerealiseerd.

Veel thans bestaande warmtepompen in de industrie hebben een terugverdientijd van minder dan 1 jaar; bij de meeste wordt de grens van 5 jaar niet overschreden. De belangrijkste oorzaak voor deze goede rentabiliteit is een combinatie van veel bedrijfsuren en een klein temperatuurtraject waarover de warmte moet worden opgevoerd. Voor een deel van het genoemde potentieel zal de economie ongetwijfeld minder gunstig zijn.

Niettemin bestaat de indruk dat knelpunten, anders dan in de gebouwde omgeving, niet in de eerste plaats in de economie van de systemen liggen. Belangrijke andere belemmeringen zijn:
- de nodige kennis om betrouwbare warmtepompen te bouwen, te installeren en in bedrijf te houden;
- de kennis van processen en hoe een warmtepomp daarin te passen, en het ontbreken van een geïntegreerde benadering;
- de risico-perceptie bij degenen die verantwoordelijk zijn voor een storingvrij verloop van de processen. Zij zijn beducht voor problemen met betrekking tot regelbaarheid, flexibiliteit, gelijktijdigheid en bedrijfszekerheid. Niet zozeer bij

de introductie van nieuwe energiebesparende technieken, maar bij technieken waarbij voorheen onafhankelijke energiestromen aan elkaar worden gekoppeld.

In te veel gevallen is de warmtepomp geïntroduceerd als een toevoeging aan een bestaand proces. Een principieel betere benadering is een integrale proces-optimalisatie binnen goed gekozen systeemgrenzen (een dergelijk systeem omvat dan minimaal een totaal produktieproces, maar kan ook een geheel bedrijf omvatten). In de praktijk blijkt dan dat de volgende volgorde van maatregelen in veel gevallen optimaal is:

1. Het veranderen van procesparameters.
2. Directe overdracht van warmte tussen deelprocessen met behulp van warmtewisselaars.
3. Warmteoverdracht tussen deelprocessen met behulp van warmtepompen.
4. Het optimaliseren van de 'utilities' (de leveranciers van de nog resterende vraag naar warmte, stoom en elektriciteit), bijvoorbeeld door inzet van warmte-krachtkoppeling.
5. Het zoeken van toepassingen voor de dan nog resterende restwarmte buiten het systeem of bedrijf, bijvoorbeeld verkoop aan een stadsverwarmingnet.

Deze geïntegreerde procesoptimalisatie wordt aangeduid met procesintegratie. Daarin bestaan op het ogenblik twee belangrijke benaderingswijzen, te weten 'pinch technology' en 'exergie-analyse en optimalisatie'. De benadering via exergie-analyse is principieel het breedst; niet alleen de energiestromen rondom processen, maar ook de processen zelf kunnen ermee worden onderzocht. Commercieel wordt de methode nog niet optimaal ondersteund. Pinch technology wordt commercieel krachtig ondersteund, maar concentreert zich vooral op warmtestromen rond processen. Het is nog niet gebleken dat deze beperking een doorslaggevend nadeel voor veel industriële processen is.

Bron: [1]

4.3.6 TOEKOMSTPERSPECTIEF

In Nederland bezint de overheid (het ministerie van Economische Zaken en Novem) zich op nieuw beleid ten aanzien van warmtepompen, ook voor de industrie. In dat kader werd door het Nederlands National Team van het International Energy Agency (IEA) Heat Pump Center een workshop gehouden om de meningen van Nederlandse experts te peilen [6]. In het nieuwe beleid zal vermoedelijk een belangrijke plaats worden ingeruimd voor de volgende onderwerpen:

- kennisontwikkeling en -verspreiding (onder andere via demonstratieprojecten);
- het stimuleren van geïntegreerde benadering van processen;
- het volgen van internationale ontwikkelingen van nieuwe technische opties;
- het scheppen van financiële en economische randvoorwaarden.

Vooral in de VS wordt voortvarend gewerkt aan de introductie van warmtepompen in de industrie. Het verdient aanbeveling de ontwikkelingen daar nauwlettend te volgen (zie onder andere [2, 3]).

4.3.7 CONCLUSIES

Ten aanzien van warmtepompen in de industrie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Mede door de aard van de warmtevraag in de Nederlandse industrie (60% wordt gevraagd bij temperaturen onder 200 °C) is het potentieel voor warmtepomptoepassingen groot.
- Van dit potentieel is op het ogenblik minder dan 5% gerealiseerd.
- Van de meeste thans werkende warmtepompsystemen is de terugverdientijd minder dan 5 jaar; bij vele is de terugverdientijd nog beduidend korter (rond 1 jaar).
- Een van de belangrijkste belemmeringen voor een verdere invoering van warmtepompen in de industrie is onvoldoende kennis van systeemontwerp, interactie tussen warmtepomp en proces en onderhoud.
- De tot nu toe succesvolle varianten zijn damprecompressiesystemen en gesloten elektrische warmtepompen. Deze technieken kunnen als uitontwikkeld worden beschouwd. Voor andere typen levert de stand der techniek nog problemen op, zoals bijvoorbeeld de standtijd van gasmotor-compressorcombinaties en de corrosie bij sorptiesystemen (vooral bij hogere temperaturen).
- In het algemeen past het warmte-aanbod niet zonder meer op de warmtevraag. Dit probleem staat feitelijk los van de warmtepomptechnologie: bij procesintegratie dient hoe dan ook een optimale keuze uit warmte-terugwinapparatuur te worden gemaakt. Afhankelijk van de warmteverhoudingen van de alternatieven varieert dan de verhouding tussen opgenomen en afgestane warmte. In toenemende mate zal de uitwisseling van restwarmte over de grenzen van het bedrijf heen belangrijk worden (naar en van andere bedrijven, naar stadsverwarming).
- Er is behoefte aan een aantal succesvolle demonstratieprojecten van warmtepompen in de industrie. Indien deze projecten degelijk worden opgezet en onafhankelijk worden geëvalueerd, zullen zij bijdragen tot een beter begrip van deze techniek bij potentiële gebruikers.

Literatuur

[1] *Actualisatie marktstudie warmtepompen in de industrie*, E3T, maart 1988

[2] *Application of heat pumps in industry*, report R5, IEA Heat Pump Centre, december 1988

[3] *Opportunities for industrial chemical heatpumps in process industries*, United States Department of Energy OIT, augustus 1990

[4] BOOT, A.H., F.G.H. VAN WEES, *Industriële restwarmte in relatie tot het temperatuurniveau*, ECN-rapport ESC-21, juni 1982

[5] BOUMA, J.W.J., *Zeven demonstratieprojecten met warmtepompen in de industrie*, in: PT/Procestechniek nr 11, 1987, pp. 52-59

[6] *Advies aan het ministerie van Economische Zaken en samenvatting van de discussies tijdens de Workshop Warmtepompen of Verzuipen ...?*, Rotterdam, 22-23 mei 1991, Nederlands National Team van het IEA Heat Pump Center

[7] HOWE, L.A., D.C. ERICKSON, *260 °C Absorption working pair ready for*

field test, in: Newsletter IEA Heat Pump Center, Vol. 8, nr. 4, december 1990, pp. 7-9
[8] NIEUWENHUIZEN, G.H. VAN, *Inventarisatie warmtepompen 1991*, Nederlands National Team van het IEA Heat Pump Center, oktober 1991

4.4 MILIEU-ASPECTEN VAN WARMTE-KRACHTKOPPELING

drs. D. Dijk

4.4.1 INLEIDING

Warmte-krachtkoppeling staat volop in de belangstelling. Momenteel wordt in Nederland een aanzienlijke hoeveelheid warmte-krachtvermogen gebouwd [1, 2]. Dit is niet zomaar een modegril: de energie- en milieuvoordelen van gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit zijn aanzienlijk. Niettemin blijkt kwantificering van die voordelen in de praktijk niet eenvoudig te zijn. Globaal genomen bemoeilijken drie complicaties deze studies:

1. Afhankelijk van de gekozen warmte-krachttechniek zijn er behoorlijke verschillen in warmte- en elektriciteitsproduktie. Deze verschillen komen vooral tot uiting in de zogenaamde warmte-krachtverhouding. Dit getal is een maat voor de verhouding waarin een warmte-krachtinstallatie nuttige warmte en elektriciteit (beide gemeten in GJ) produceert. Verschillen op dit punt zijn niet zonder consequenties voor de energie- en milieuprestaties van warmte-krachtinstallaties.
2. Afhankelijk van de concrete toepassing en de lokatie zijn er verschillen in warmtetechnische en elektrotechnische inpassing en kan ook de schaalgrootte variëren. Dit kan tot grote verschillen in kosten leiden.
3. Ten slotte maakt het uit of warmte-krachtkoppeling primair benaderd wordt vanuit de elektriciteitsvoorziening, dan wel vanuit de warmtevoorziening, of dat een integrale benadering wordt gevolgd, waarin kosten en milieu-aspecten worden bekeken vanuit de landelijke elektriciteitsvoorziening enerzijds, en de lokale of regionale warmtevoorziening anderzijds.

Het is goed onderscheid te maken tussen kostenaspecten enerzijds en energie- en milieu-aspecten anderzijds. Over de laatste twee aspecten kunnen – omdat het vooral om de techniek gaat – heldere en algemeen geldige uitspraken worden gedaan. Dit geldt niet voor de kosten omdat deze zeer projectgebonden zijn [3, 4]. Deze bijdrage beperkt zich daarom tot de presentatie van een eenvoudige methode waarmee de energie- en milieuprestaties van warmte-krachtkoppeling overzichtelijk op een rij kunnen worden gezet.

4.4.2 ENERGIE EN MILIEU

De hier gevolgde methode neemt de beide produkten van een warmte-krachtinstallatie, warmte en elektriciteit als uitgangspunt. Eerst wordt de situatie bekeken

waarin een standaardhoeveelheid elektriciteit wordt geproduceerd (en de daarbij behorende hoeveelheid warmte), en vervolgens de situatie waarin een standaard hoeveelheid warmte wordt geproduceerd (met de daaraan gekoppelde hoeveelheid elektriciteit). De hierna volgende rekenvoorbeelden hebben betrekking op deze twee situaties:

1 TWh elektriciteit: de warmte-krachtinstallatie produceert 1 TWh (1 miljard kilowattuur) elektriciteit en de daarbij behorende hoeveelheid warmte.

1 PJ warmte: de warmte-krachtinstallatie produceert 1 PJ warmte (ongeveer 31 miljoen m^3 aardgasequivalenten) en de daarbij behorende hoeveelheid elektriciteit.

Door in beide benaderingen de energie-inzet en de emissies bij gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit te vergelijken met die bij afzonderlijke opwekking, ontstaat een beeld van de energie- en milieuprestaties.

4.4.3 UITGANGSPUNTEN

In het nu volgende voorbeeld is gekozen voor een warmte-krachtcentrale met stoomaftap ten behoeve van industriële warmtelevering. Uiteraard zijn de technische uitgangspunten voor de gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit in de gekozen warmte-krachtinstallatie, en die van de afzonderlijke produktie van warmte en elektriciteit (die gelden als referentie) bepalend voor de uitkomsten. De hier gehanteerde uitgangspunten zijn samengevat in tabel 4.7 en worden daarna kort toegelicht.

	Rendement		Emissies	
	elektriciteit (%)	warmte (%)	CO_2 (kg/GJ)	NO_x (g/GJ)
a. stoomketel	–	90	56	30
b. STEG-E	52	–	56	45
c. STEG-WKC	41	38	56	45

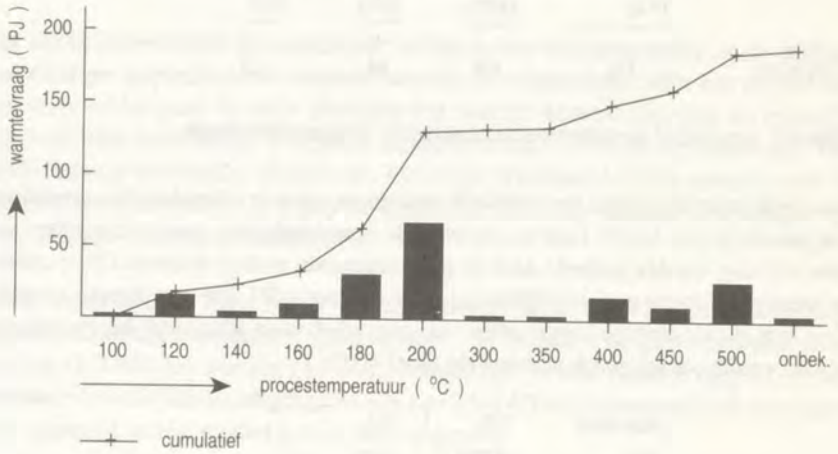
Tabel 4.7 Uitgangspunten voor de gecombineerde en afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit

a. Als referentie voor de afzonderlijke warmteopwekking is gekozen voor een moderne aardgasgestookte stoomketel met een omzettingsrendement van 90% en een NO_x-emissieniveau van 30 g/GJ.
b. Als referentie voor de afzonderlijke opwekking van elektriciteit wordt eveneens uitgegaan van de best mogelijke techniek. Met aardgasgestookte STEG-eenheden wordt thans een omzettingsrendement van 52% bereikt. Het Besluit Emissie-Eisen Stookinstallaties (BEES) schrijft met ingang van 1992 een NO_x-uitstootnorm van 65 g/GJ voor. Op grond van in de praktijk opgedane ervaringen wordt voor nieuwe eenheden in het 'Plan van aanpak ter uitvoering van het

convenant over de bestrijding van SO_2 en NO_x' echter een waarde van 45 g/GJ gehanteerd [5]. In de berekeningen is met deze waarde gerekend.

c. Voor de STEG warmte-krachtcentrale (STEG-WKC) is uitgegaan van een gasgestookte eenheid van 235 MW_e; opgebouwd uit een gasturbine van 144 MW_e en een stoomturbine van 91 MW_e. De opgewekte hogedrukstoom (500 °C, 120 bar) wordt na expansie in de hogedrukturbine (40 bar) herverhit tot 500 °C voordat verdere expansie plaatsvindt. De oververhitte stoom wordt bij 10 bar en 340 °C afgetapt. Hiermee is een verzadigde stoomtemperatuur van 180 °C te bereiken. Uit fig. 4.12 blijkt dat veel industriële toepassingen op, of onder dit temperatuurniveau liggen. De bovengenoemde condities komen overeen met een thermisch rendement van 38% en een elektrisch rendement van 41%. Het totaal rendement van het gecombineerde proces bedraagt derhalve 79% bij maximale warmtelevering. De NO_x-emissie is in de berekeningen evenals bij de STEG zonder warmte-aftap op 45 g/GJ gesteld. Voor de STEG-WKC is voorts 3% warmteverlies voor transport van de stoom in de berekeningen meegenomen.

Omdat alle beschouwde installaties gasgestookt zijn, is gerekend met een CO_2-uitstoot van 56 kg per GJ brandstof.



Bron:
Sep warmtekaart 1991

Fig. 4.12 De warmtevraag van de industrie op basis van de procestemperatuur

4.4.4 MILIEU-ASPECTEN BIJ GELIJKE ELEKTRICITEITSPRODUKTIE

We kijken eerst naar de resultaten wanneer een hoeveelheid elektriciteit van 1 TWh wordt geproduceerd. In tabel 4.8 worden de belangrijkste kengetallen vergeleken met die van gescheiden opwekking van 1 TWh in een moderne STEG-eenheid.

	Brandstof (PJ)	CO_2 (kton)	NO_x (ton)	Warmte (PJ)
STEG-WKC	8,8	492	395	3,3
STEG-E	6,9	388	311	-

Tabel 4.8 Kengetallen van verschillende opties voor produktie van 1 TWh elektriciteit

De STEG-WKC gebruikt uiteraard meer brandstof dan een STEG die alleen elektriciteit maakt. In ruil daarvoor wordt echter een hoeveelheid nuttige warmte verkregen ter grootte van 3,3 PJ (na aftrek van warmteverliezen). Om een zinvolle vergelijking van de geproduceerde warmte te kunnen maken, is het nuttig eerst de geproduceerde elektriciteit uit de vergelijking te elimineren. Dit kan door de energie-inzet en de bijbehorende emissies van afzonderlijke opwekking van 1 TWh elektriciteit in een STEG-E in mindering te brengen op die van de STEG-WKC. Dit leidt tot de kengetallen in tabel 4.9.

	Brandstof (PJ)	CO_2 (kton)	NO_x (ton)	Warmte (PJ)
STEG-WKC	1,9	104	84	3,3

Tabel 4.9 Kengetallen warmteproduktie na eliminatie elektriciteitsproduktie

Hoe verhouden de cijfers van tabel 4.9 zich nu tot die van afzonderlijke opwekking van stoom in een ketel? Daartoe moeten de brandstofinzet- en emissiecijfers van tabel 4.9 nog worden gedeeld door de geproduceerde nuttige warmte. Dit resulteert in energie-inzet- en emissiecijfers per geproduceerde PJ, die een directe vergelijking met gelijksoortige kengetallen van een ketel voor afzonderlijke opwekking van processtoom mogelijk maken (zie tabel 4.10).

	Brandstof (PJ)	CO_2 (kton)	NO_x (ton)
STEG-WKC	0,6	31	25
stoomketel	1,1	62	33

Tabel 4.10 Energie-inzet en emissie per PJ warmte

Uit tabel 4.10 blijkt dat per geproduceerde eenheid warmte de STEG-WKC in brandstofgebruik en CO_2-uitstoot ongeveer een factor twee beter scoort dan de stoomketel.

4.4.5 MILIEU-ASPECTEN BIJ GELIJKE WARMTEPRODUKTIE

Kijkt men vervolgens naar de resultaten van de andere benadering waarbij na

verrekening van transportverliezen 1 PJ nuttige warmte wordt gemaakt, dan krijgt men op overeenkomstige wijze een eindresultaat zoals weergegeven in tabel 4.11.

	Brandstof (PJ)	CO_2 (kton)	NO_x (ton)
STEG-WKC	5,2	290	287
STEG-E	6,9	388	312

Tabel 4.11 Energie-inzet en emissie per TWh elektriciteit

Ook uit deze benadering blijkt dat warmte-krachtkoppeling tot een lagere specifieke brandstofinzet leidt dan afzonderlijke opwekking van elektriciteit. Een geheel andere invalshoek leidt niet tot wezenlijk andere conclusies. Wel moet worden opgemerkt dat de verschillen voor elektriciteit minder groot zijn dan voor warmte.

4.4.6 EEN NADERE BESCHOUWING VAN DE MILIEU-EFFECTEN

Tot zover gaven beide benaderingen inzicht in het energiegebruik en de milieu-aspecten per geproduceerde eenheid warmte en elektriciteit. Men kan echter nog een stap verder gaan en zich afvragen wat warmte-krachtkoppeling nu eigenlijk oplevert. Om deze vraag te kunnen beantwoorden, wordt de bovenstaande vergelijking nog iets verder uitgewerkt. De totale brandstofinzet en emissies van de warmte-krachtinstallatie worden nu vergeleken met die van de afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit.

Eerst wordt daartoe weer het geval beschouwd waarin 1 TWh elektriciteit wordt geproduceerd. De kengetallen staan in tabel 4.8. Wanneer de geproduceerde elektriciteit (1 TWh) en warmte (3,3 PJ) afzonderlijk zouden worden opgewekt, zou daarmee op basis van de uitgangspunten van tabel 4.7 een brandstofinzet en emissie zijn gemoeid, zoals in tabel 4.12 is weergegeven.

Elektriciteit (TWh)	Warmte (PJ)	Brandstof (PJ)	CO_2 (kton)	NO_x (ton)
1	3,3	10,5	593	420

Tabel 4.12 Energie-inzet en emissie bij afzonderlijke opwekking

Vergelijking van deze cijfers met de kengetallen voor de gecombineerde opwekking in tabel 4.8 leidt tot de integrale milieubalans zoals weergegeven in tabel 4.13.

	Brandstof (PJ)	CO_2 (kton)	NO_x (ton)
STEG-WKC	– 1,7	– 101	– 25

Tabel 4.13 Milieuprestatie warmte-krachtkoppeling ten opzichte van gescheiden opwekking bij 1 TWh elektriciteit en 3,3 PJ warmte

Ten opzichte van afzonderlijke opwekking wordt in het gekozen rekenvoorbeeld een aanzienlijke brandstofbesparing en beperking van de CO_2-uitstoot bereikt, terwijl de NO_x-uitstoot met 25 ton is gereduceerd. Indien wordt uitgegaan van een warmteproduktie van 1 PJ en 0,31 TWh elektriciteit, wordt op analoge wijze de milieubalans uit tabel 4.14 verkregen.

	Brandstof (PJ)	Broeikasgas (kton CO_2)	Verzuring (ton NO_x)
STEG-WKC	– 0,5	– 30	– 7

Tabel 4.14 Milieuprestatie warmte-krachtkoppeling ten opzichte van gescheiden opwekking bij 1 PJ warmte en 0,31 TWh elektriciteit

De STEG-WKC vermijdt in deze benadering 0,5 PJ brandstof en 30 kton CO_2 ten opzichte van afzonderlijke opwekking van warmte en elektriciteit. Bovendien levert de STEG-WKC ten opzichte van afzonderlijke opwekking een netto vermindering van de NO_x-uitstoot op.

Uiteraard kan de hier gevolgde methode nog op andere warmte-krachtopties worden toegepast. Ook kan het effect van andere rendementen en specifieke emissies worden doorgerekend. Het blijkt dat de resultaten vooral gevoelig zijn voor wijzigingen in de warmte-krachtverhouding.

4.4.7 CONCLUSIES

Anders dan over de kosten, kunnen over de energie- en milieu-aspecten van warmte-krachtkoppeling duidelijke algemeen geldende uitspraken worden gedaan. Het is belangrijk dat elektriciteit en warmte integraal in de beschouwingen worden betrokken. In dit hoofdstuk is een eenvoudige en transparante rekenmethode aangereikt die de energie- en milieu-aspecten van warmte-krachtkoppeling integraal benadert. Uit het gekozen rekenvoorbeeld blijkt dat de energie- en milieuvoordelen van industriële warmte-krachtkoppeling aanzienlijk zijn. Daarbij moet worden aangetekend dat de omvang van dit voordeel in belangrijke mate afhangt van de verhouding tussen hoeveelheden elektriciteit en warmte die door de warmte-krachtinstallatie worden geproduceerd. Het maakt uit of er relatief weinig kracht aan veel warmte is gekoppeld, of juist relatief weinig warmte aan veel kracht. De combinatie van stoom- en gasturbine, zoals in een STEG-installatie is gereali-

seerd, biedt dank zij het hoog elektrisch rendement uitstekende mogelijkheden voor warmte-krachtkoppeling [6].

Literatuur

[1] *Milieu Aktie Plan van de energiedistributiesector*, 1991
[2] *Elektriciteitsplan 1991-2000*, Sep, Arnhem, 1990
[3] *De toekomst van warmte*, Symposiumverslag VESTIN, Arnhem, november 1990
[4] *Het warmteplan van Sep: een rendabele milieu-investering*, in: De Ingenieur, jaargang 103, nr. 5, mei 1991
[5] *Plan van aanpak ter uitvoering van het convenant over de bestrijding van SO_2 en NO_x*, Sep, Arnhem 1991
[6] BUIJTENEN, J.P. VAN, *De gasturbine een intrigerend object*, in: De Ingenieur, jaargang 103, nr. 6/7, juni/juli 1991

4.5 EXERGIE: DE KWALITEIT VAN ENERGIE

ir. G. Peppink

4.5.1 ACHTERGRONDEN

In de elektriciteitssector krijgt besparing op het gebruik van primaire energiedragers al geruime tijd veel aandacht. In dit verband heeft Sep in het Elektriciteitsplan 1991-2000 het Warmteplan gelanceerd, gericht op het terugdringen van het primaire energiegebruik. Dat plan beoogt niet alleen een zo efficiënt mogelijke opwekking van elektriciteit (via bouw van hoogwaardige eenheden, opvoering van rendementen, toepassing van voorgeschakelde gasturbines, enz.), maar ook een zo efficiënt mogelijke inzet van de primaire energiebronnen.

De vraag naar elektriciteit blijft in Nederland voortdurend stijgen. Deze stijgende vraag kan voor een deel samenhangen met het ervaringsgegeven dat energiebesparingen vaak gepaard gaan met een stijging van het gebruik van elektriciteit. Diverse buitenlandse statistieken geven deze relatie duidelijk aan.

De discussies in Nederland over de mogelijkheden van een efficiënter energiegebruik richtten zich tot nu toe vooral op het voorkomen van energieverliezen. Een geheel ander aspect blijft nogal onderbelicht. Dat aspect is de kwaliteit van de beschikbare energie, met daaraan direct gekoppeld het voorkomen van onnodig kwaliteitsverlies.

4.5.2 KWALITEITSVERSCHIL

Als men niet alleen let op het energiegebruik van een bepaald apparaat of proces, maar ook op de energievoorziening in zijn geheel, komen nieuwe mogelijkheden

tot besparing aan het licht. Het gaat daarbij om de mogelijkheden opeenvolgende energieomzettingen in een zodanige volgorde te plaatsen dat daaruit als totaal eindresultaat een optimaal nuttig effect resulteert.

De thermodynamica vertolkt de algemene, menselijke ervaring met energieomzetting in twee hoofdwetten. De eerste luidt populair verwoord: 'energie kan niet verloren gaan en ook niet uit het niets ontstaan'. De tweede hoofdwet luidt: 'arbeid kan zonder meer in warmte worden omgezet, maar omgekeerd is dit niet mogelijk'. Deze twee principes zijn verder uitgewerkt in diverse – vaak abstracte – begrippen en formules.

De tweede hoofdwet geeft aan dat omzetting van de ene vorm van energie in de andere niet altijd even gemakkelijk is. Dat kan niet worden veroorzaakt door energieverliezen bij de omzetting, want volgens de eerste hoofdwet zijn dergelijke verliezen in principe niet mogelijk. Het gaat bij energieomzetting dus niet om verlies van kwantiteit, maar om verlies van kwaliteit van energie! Hieruit blijkt dat een aparte uitdrukking voor de energiekwaliteit noodzakelijk is. Twee uitersten van deze energiekwaliteit zijn intussen al aan de orde gekomen, namelijk arbeid (als hoogste) en warmte op omgevingstemperatuur (als laagste energiekwaliteit).

4.5.3 EXERGIE ALS KWALITEITSMAAT

In het voorgaande is aangegeven dat het kwaliteitsverschil tussen arbeid en warmte tot uiting komt in het feit dat deze energievormen niet volledig in elkaar kunnen overgaan. De Franse natuurkundige Carnot heeft aangetoond dat warmte – zelfs in het meest ideale geval – slechts voor een bepaalde fractie in arbeid kan worden omgezet. Deze fractie of factor (f) wordt daarom de 'Carnot-factor' genoemd. De formule luidt:

$$f = 1 - \frac{T_0}{T}$$

Hierin is T_0 de omgevingstemperatuur en T de temperatuur van de beschikbare warmte (beide uitgedrukt in kelvin). Met andere woorden: hoe lager de temperatuur van de warmte is, hoe minder arbeid uit deze warmte kan worden gewonnen. Ook de hiervoor genoemde uitersten zijn in de Carnot-factor te herkennen. Bij omgevingstemperatuur is de Carnot-factor – en daarmee ook de energiekwaliteit – gelijk aan nul. Aan de andere kant kan slechts in het theoretische geval van een oneindig hoge temperatuur, warmte gelijkwaardig zijn aan arbeid ($f = 1$).

Om dàt deel van de warmte – of van de energie in het algemeen – aan te duiden dat volledig in arbeid is om te zetten, is de term 'exergie' bedacht. Het restant aan niet in arbeid om te zetten energie wordt 'anergie' genoemd. De anergie is dus de warmte, die op omgevingstemperatuur wegvloeit. Voor een warmtestroom Q geldt dat $f \times Q$ het exergiedeel vormt en $(1 - f) \times Q$ het anergiedeel. Op deze wijze kan met de Carnot-factor een continue en eenduidige kwaliteitsschaal worden gevormd als functie van het temperatuurniveau, waarop de warmte beschikbaar is.

Ook de energetische waarde van eventuele chemische produkten kan in exergie worden uitgedrukt. Dit aspect is hier niet van wezenlijk belang, zodat het hier verder buiten beschouwing blijft.

4.5.4 DE RELEVANTIE VAN EXERGIE VOOR WARMTELEVERING

Het zou een misvatting zijn te denken dat het exergiebegrip alleen van belang is voor levering van arbeid, en niet van warmte. Alle energieomzettingen gaan gepaard met verliezen, die in de vorm van warmte naar de omgeving worden afgevoerd. Besparingen op de gebruikte hoeveelheid primaire energie zijn dan ook mogelijk als ook deze restwarmte weer nuttig wordt gebruikt, bijvoorbeeld voor ruimteverwarming. Alleen zo wordt een minimaal verlies aan exergie bereikt.

Om op deze wijze het exergieverlies te kunnen beperken, moet men zich wel realiseren dat energiebesparing niet alleen een individuele, maar ook (en vooral) een nationale en zelfs mondiale opgave is. Dit betekent dat niet slechts een enkel apparaat, bijvoorbeeld een CV-ketel, zuiniger moet worden – hoe nuttig deze verbetering overigens ook is – maar dat de gehele energievoorziening op rationele gronden moet worden geoptimaliseerd. Met behulp van het Warmteplan van de Sep is het mogelijk de restwarmte van een centrale met een zo laag mogelijk, maar net voldoende, exergie- of temperatuurniveau nog nuttig toe te passen voor de verwarming van bijvoorbeeld gebouwen of kassen, en voor de opwekking van processtoom.

Bij de onderlinge vergelijking van allerlei opties voor de energievoorziening, dus ook de warmtevoorziening, betekent de minste inzet van exergie een minimaal gebruik van primaire energiebronnen en daardoor (meestal) ook een minimale milieubelasting. Zo mogelijk moet bij omzetting van energie een nieuwe vorm van energie ontstaan met een zo groot mogelijk aandeel exergie.

4.5.5 METEN MET DE JUISTE MAAT

In de huidige discussies over energie wordt nog onvoldoende aandacht besteed aan de kwalitatieve verschillen tussen de verschillende energievormen. Omdat steenkool, aardgas, elektriciteit, warm water, stoom en hete lucht moeiteloos kunnen worden herleid tot hun respectieve warmte-equivalenten (uitgedrukt in joules), ontstond het idee dat alle energiedragers met elkaar kunnen worden vergeleken, zolang deze omrekening maar kwantitatief correct wordt uitgevoerd. Een GJ (gigajoule) warm water van 70 °C is in die visie gelijk aan een GJ aardgas of een GJ elektriciteit.

Hoe correct een dergelijke omrekening van de ene energiedrager naar de andere ook mag zijn, men moet er wel voor zorgen dat de kwaliteisniveaus van de vergeleken joules gelijk zijn. Voor het omrekenen van energiebronnen (bijvoorbeeld: een ton steenkool naar kubieke meters aardgas) kan deze methode zonder bezwaar worden gebruikt. Wel kleven er bezwaren aan het aldus vergelijken van

de omzettingsrendementen bij de produktie van warm water, processtoom of elektriciteit, dus bij het vergelijken van warmte op verschillende temperatuurniveaus en arbeid. Indien hierbij de kwaliteitsverschillen tussen de verschillende produkten over het hoofd worden gezien, worden energiehoeveelheden met uiteenlopende toepassingsmogelijkheden vergeleken.

4.5.6 EEN VOORBEELD

Het energetisch omzettingsrendement van de opwekking van warm water in een CV-ketel of van elektriciteit in een moderne elektriciteitscentrale kan eenvoudig worden bepaald als het quotiënt van het na omzetting verkregen aantal joules nuttige warmte, respectievelijk elektriciteit, en het daarvoor benodigde aantal joules brandstof (zie fig. 4.13). Zo komt de elektriciteitscentrale vergeleken met de CV-ketel slecht ervan af. Slechts de helft van de toegevoerde joules brandstof wordt uiteindelijk omgezet in elektriciteit. De rest gaat verloren via de schoorsteen en het koelwater. De CV-ketel scoort veel beter met een omzettingsrendement van 90%. Dergelijke energetische beschouwingen hebben tot het misverstand geleid dat centrales minder efficiënt zouden zijn dan moderne CV-ketels.

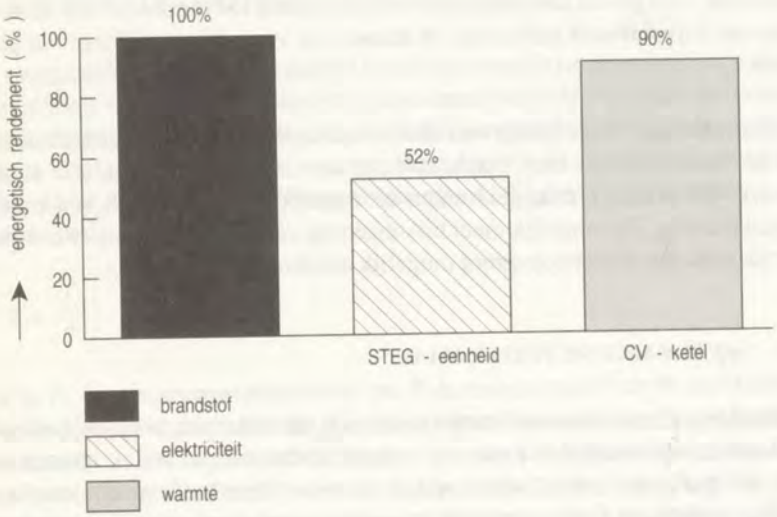


Fig. 4.13 Het energetisch rendement bij omzetting van energie

Met het exergiebegrip is het nu mogelijk om de vergelijking fundamenteel correcter uit te voeren door van de verschillende produkten alleen het exergieaandeel, en niet het anergieaandeel in de berekening te betrekken. Anergie is immers in de omgeving per definitie onuitputtelijk beschikbaar. Het exergetisch rendement van de omzetting in de CV-ketel kan eenvoudig worden bepaald door de geproduceerde warmte te vermenigvuldigen met de Carnot-factor en te delen door de primaire energie, die bijna geheel uit exergie bestaat. Het exergierendement van de centrale is gelijk aan

het energierendement omdat het exergieaandeel van elektriciteit 100% is. De CV-ketel en centrale kunnen dus alleen aan de hand van het exergierendement op de juiste wijze worden vergeleken. Het rendement blijkt hoog voor een moderne elektriciteitscentrale en verrassend laag voor een CV-ketel (fig. 4.14). Het is in dit kader interessant dat de elektriciteitsopwekking in moderne centrales van alle vormen van krachtopwekking thans het hoogste rendement oplevert en dat er nog steeds vooruitgang wordt geboekt, vooral op het terrein van hoge procestemperaturen.

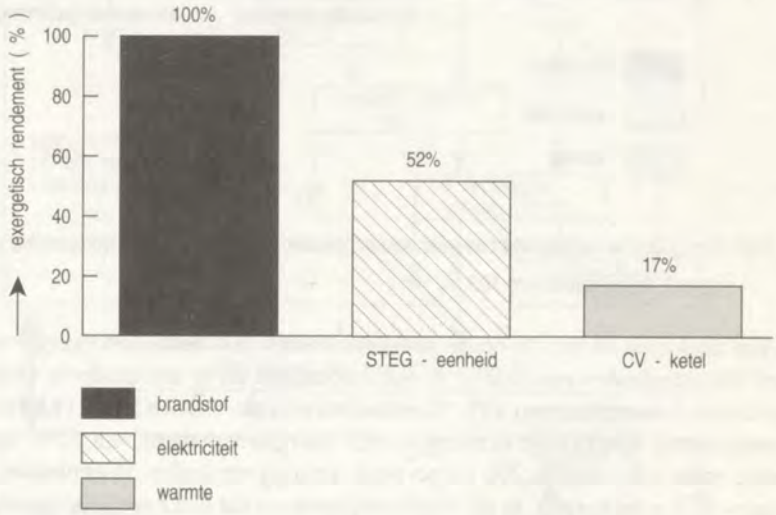


Fig. 4.14 Het exergetisch rendement bij omzetting van energie (warmte op een temperatuur van 80 °C)

4.5.7 WARMTE-KRACHTKOPPELING

Hiervoor is al beschreven dat de restwarmte van een elektriciteitscentrale nuttig kan worden toegepast. Men mag daarbij echter niet uit het oog verliezen dat het temperatuurniveau (en dus ook het kwaliteitsniveau) van deze restwarmte bijzonder laag is. Door iets van de exergie van de elektriciteitsproduktie op te offeren, kan de kwaliteit van de restwarmte echter aanzienlijk worden opgevoerd; in ieder geval voldoende om ruimteverwarming, tapwaterbereiding of levering van proceswarmte mogelijk te maken. Het exergierendement van het totaal van elektriciteit en warmte komt zo iets hoger uit dan het exergierendement van de elektriciteitsproduktie alleen. Men dient wel te streven naar het zoveel mogelijk omzetten van de primaire energie in de energiedrager van de hoogste kwaliteit, namelijk elektriciteit.

In fig. 4.15 wordt een vergelijking gemaakt op basis van exergierendementen tussen industriële warmte-krachtkoppeling enerzijds, en het gescheiden opwekken van elektriciteit en processtoom anderzijds. Hiervoor is uitgegaan van verzadigde stoom

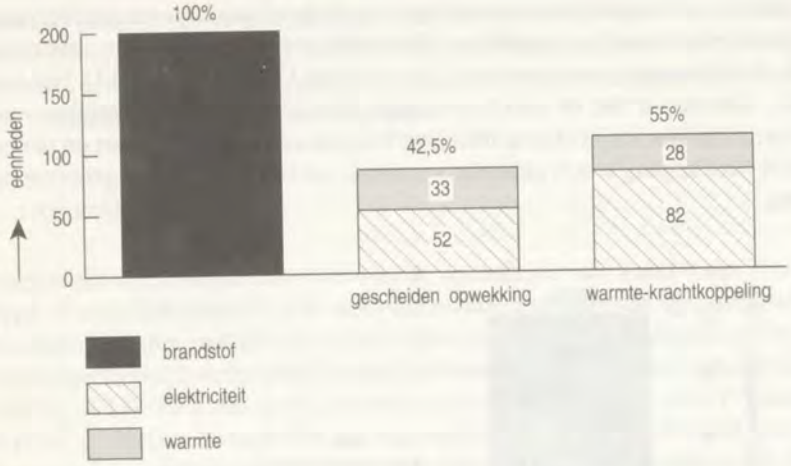


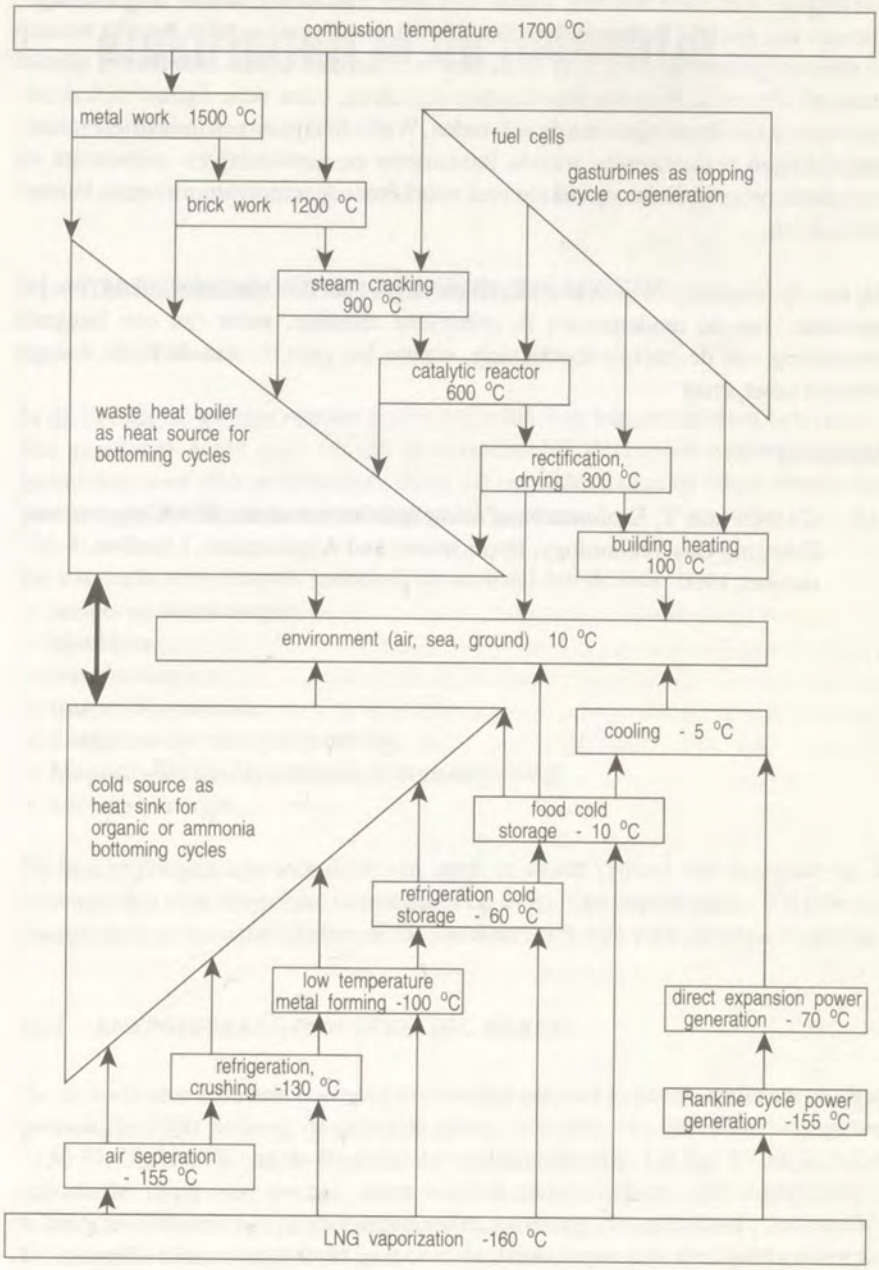
Fig. 4.15 Exergetische vergelijking van gescheiden opwekking en warmte-krachtkoppeling (warmte op een temperatuur van 180 °C)

met een druk van 10 bar. In beide gevallen worden 200 eenheden exergie toegevoerd. Bij gescheiden opwekking in een stoomketel en in een moderne elektriciteitscentrale kunnen hiervan 33 + 52 eenheden exergie worden benut (42,5%). Bij gecombineerde opwekking echter kan een exergierendement van 55% worden bereikt, zodat uit dezelfde 200 toegevoerde exergie-eenheden 25 eenheden meer exergie worden verkregen. In dit voorbeeld betekent dat een exergiebesparing van circa 22% en een rendementsverbetering van circa 29% ten opzichte van de best mogelijke gescheiden produktie van processtoom en elektriciteit.
Nog steeds telt men bij warmte-krachtkoppeling het elektrisch rendement op bij het warmterendement; de som van beide wordt dan beschouwd als het totaalrendement. Bovenstaand voorbeeld maakt echter duidelijk dat deze berekeningswijze niet correct is en aanleiding geeft tot misverstand: alleen het exergierendement vormt een juiste maatstaf.

4.5.8 OPGAVE VOOR DE TOEKOMST

Als men de gehele energievoorziening op rationele wijze wil optimaliseren, zal meer aandacht moeten worden besteed aan de kwaliteitsverschillen tussen de diverse energievormen. Exergie is hiervoor de juiste maatstaf. De afweging van alle mogelijke opties in de energievoorziening – warmte, kracht, en in de toekomst wellicht chemische produkten (kolengas, methanol, waterstof) of combinaties hiervan – moet geschieden op basis van een eenduidig, thermodynamisch criterium: minimaal exergieverlies. Dit heeft consequenties voor de volgorde waarin energieomzettingen moeten plaatsvinden.

Fig. 4.16 [1] schetst een ideaal beeld van de schakeling tussen maatschappelijke activiteiten en minimaal exergieverlies. Primaire energiebronnen moeten bij voor-



Bron:
[1]

Fig. 4.16 Ideale schakeling van maatschappelijke activiteiten met minimaal energieverlies

keur eerst worden ingezet om elektriciteit of hoogwaardige warmte te produceren. Vervolgens kan men via een aantal cascades kwalitatief steeds laagwaardiger vormen van energie benutten. Uiteindelijk zal een niveau worden bereikt waarop de aanwezige energie niet meer bruikbaar is. Uiteraard zullen zich hierbij allerlei economische en technische beperkingen voordoen, maar deze figuur blijft desalniettemin als leidraad zijn waarde behouden. Wellicht zijn op een industriële lokatie ringleidingen te realiseren, waarin industrieën en nutsbedrijven restwarmte en benodigde proceswarmte op enkele veel voorkomende temperatuurniveaus kunnen uitwisselen.

Bij een op besparingen gericht energiebeleid gaat het dus niet (uitsluitend) om het opvoeren van de rendementen in specifieke situaties, maar om een integrale benadering van de energievoorziening, waarin het gebruik van de totale exergie centraal moet staan.

Literatuur

[1] KASHIWAGI, T, *Exploitation of low-grade heat sources*, IEA Congress on Energing Gas Technology, Implications and Applications, Lissabon, 8-10 oktober 1990

5. Nieuwe produktietechnieken van elektriciteit in de industrie

5.1 INLEIDING DOOR DE DISTRIBUTIESECTOR

ir. P. Willemsen

In dit hoofdstuk worden nieuwe produktietechnieken van elektriciteit beschreven. Het geschetste beeld geeft inzicht in voornamelijk decentrale toepassingen van technieken voor elektriciteitsopwekking die op middellange en lange termijn hun positie in de elektriciteitsvoorziening zullen opeisen.

De volgende onderwerpen komen in dit verband aan de orde:
- zonne- en windenergie;
- biomassa;
- brandstofcellen;
- waterstofeconomie;
- thermionische energieomzetting;
- Magneto-Hydro-Dynamische energieomzetting;
- nucleaire energie.

De beschrijvingen zijn technisch van aard: er wordt vrijwel niet ingegaan op de voorwaarden voor dergelijke systemen of op mogelijke beperkingen. Wij schetsen daarom kort enige ontwikkelingen die karakteristiek zijn voor de jaren negentig.

5.1.1 ENERGIEVRAAG INDUSTRIE (DE MARKT)

De Nederlandse industrie heeft een aanzienlijk aandeel in het binnenlands energiegebruik. In 1990 bedroeg de primaire energiebehoefte van de industrie ongeveer 1150 PJ. Dit is 45% van de Nederlandse energiebehoefte. Uit fig. 5.1 blijkt dat de industriële vraag naar energie moet worden onderscheiden naar elektriciteit en warmte ten behoeve van produktieprocessen, en energie als grondstof ('feedstock'). In financiële termen uitgedrukt gaat er in de industrie per jaar 6 miljard gulden aan energie om (exclusief feedstock).

In de Nota Energiebesparing [1] is het energiebeleid voor een aantal sectoren, waaronder de industrie, voor de komende jaren geformuleerd. Er wordt gestreefd naar een energiebesparing van 20% (exclusief feedstock) in het jaar 2000. Uit een recent door TNO uitgevoerde studie [2] blijkt dat deze besparing vooral is te vinden bij het thermisch gebruik (fig. 5.2) en in mindere mate bij het elektriciteitsgebruik

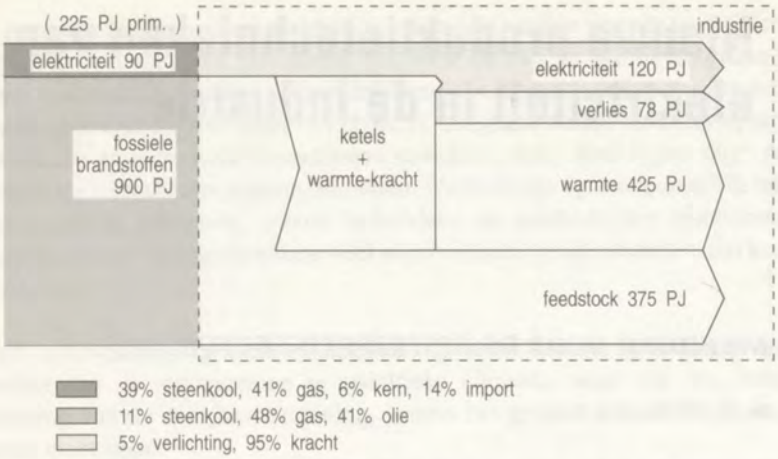


Fig. 5.1 Energiegebruik in de industrie in 1990

Bron: CBS, TNO

(fig. 5.3). De respectieve besparingsprognosen bedragen 33% en 9% in het jaar 2015.

Daar de besparing op elektriciteit sterk achterblijft bij de besparing op warmte, mag worden verondersteld dat er enige druk staat op het beschikbaar komen van efficiënte opwekkingstechnieken. Het rendement van het openbare elektriciteitsnet bedraagt ongeveer 40%.

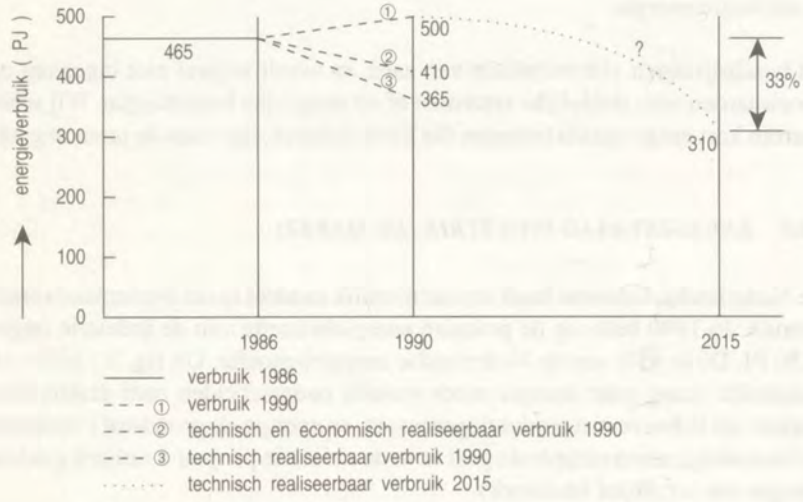
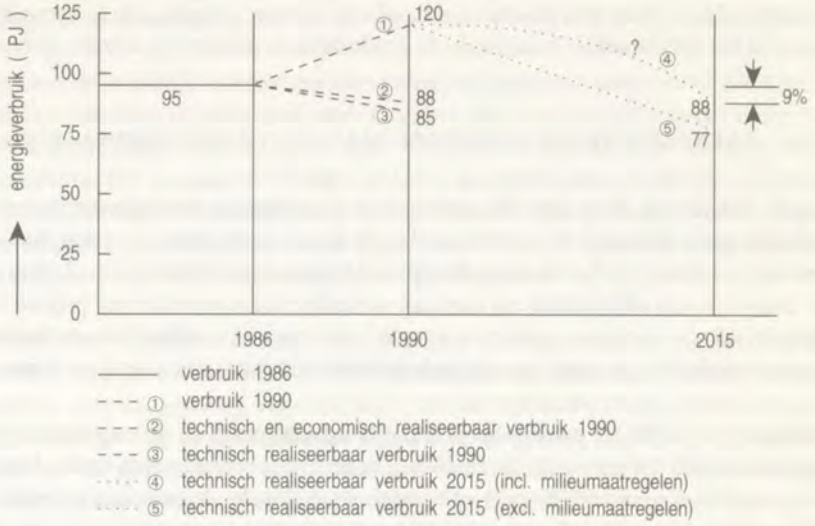


Fig. 5.2 Warmtegebruik en besparingsmogelijkheden (exclusief feedstock) in de industrie in 1990

Bron: CBS, TNO



Bron:
CBS, TNO

Fig. 5.3 Gebruik van elektriciteit en besparingsmogelijkheden in de industrie in 1990

Uit de in de volgende paragrafen beschreven decentrale produktietechnieken blijkt dat verbeteringen mogelijk zijn en dat nieuwe technieken met een verwacht opwekkingsrendement van circa 65% beschikbaar komen. De toekomstige investeringsen exploitatiegegevens zullen uiteindelijk moeten uitmaken of er sprake zal zijn van een economisch verantwoorde situatie.

5.1.2 MILIEUWENSEN OVERHEID (EEN RANDVOORWAARDE)

In 1989 verscheen het veelbesproken Nationaal Milieubeleidsplan (NMP) [3]. Dit plan schetst de strategie voor het milieubeleid op de lange termijn. Aan de hand van enkele centrale thema's worden doelgroepen, waaronder de industrie en de elektriciteitssector, aangesproken op hun verantwoordelijkheid. Er wordt een stabilisatie van de CO_2-emissie in het jaar 2000 nagestreefd (ten opzichte van 1990); de verzurende emissie dient aanzienlijk te zijn teruggebracht en de uiteindelijk te storten afvalstroom zal tot het hoogst noodzakelijke beperkt moeten blijven.

Inmiddels is het NMP al weer aangescherpt in de vorm van het NMP-plus [4]. We mogen verwachten dat de aanscherping zich nog verder zal doorzetten. Voor de elektriciteitssector betekent dit dat er naast efficiënte produktietechnieken ook emissievrije of emissie-arme produktietechnieken (met betrekking tot CO_2, NO_x en SO_2) moeten komen. Op het punt van emissiereductie mogen we de komende jaren veel verwachten.

Na de economische levensduur komen de elektriciteitsproduktiesystemen als afval in de samenleving terug. Er zal nog veel onderzoek nodig zijn om deze systemen uit dusdanige grondstoffen en materialen samen te stellen dat hergebruik van

kritische onderdelen mogelijk is. In de rentabiliteitsberekeningen zullen integrale ketenbeschouwingen een positieve uitwerking hebben. Immers, de te verwachten baten in het afvalstadium kunnen op de exploitatie in mindering worden gebracht.

5.1.3 ENERGIEVERKEER IN EUROPA (MARKT EN RANDVOORWAARDE)

Het begint ernaar uit te zien dat monopolies op nationale energiemarkten tot het verleden gaan behoren. Al geruime tijd is de Europese Commissie bezig het vrije verkeer van energie te bevorderen. Er zijn richtlijnen en procedures verschenen over de doorvoer van elektriciteit en aardgas, volledige transparantie van prijzen voor elektriciteit en aardgas voor de industrie, commerciële vrijheid voor ondernemingen op de energiemarkt en toegankelijkheid van infrastructuur voor derden.

Uiteindelijk zal dit tot gevolg hebben dat er concurrentie op de energiemarkt zal ontstaan en dat het nationale diversificatiebeleid voor brandstoffen in de elektriciteitssector in een ruimer perspectief komt te staan. Omdat de planning op basis van de 'autarke' nationale infrastructuur (suboptimalisatie) kan worden verlaten, mag worden verwacht dat een aanzienlijke kostenbesparing optreedt (studies gaan uit van enkele miljarden ECU) met alle gunstige gevolgen van dien voor de elektriciteitsprijzen. Als vervolgens de huidige spreiding van brandstoffen in de elektriciteitssector wordt verlaten en een Europese strategie zou worden ontwikkeld, zullen lokale (nationale) voordelen hun uitwerking kunnen hebben.

Voor Nederland zou dit een verhoogd aandeel aardgas betekenen. Een eventuele daling van de elektriciteitsprijs zal de introductie van nieuwe technieken niet bevorderen. De extra beschikbaarstelling van aardgas echter heeft een positief effect. Immers, de in de volgende paragrafen beschreven technieken zijn voor een groot deel op deze brandstof gebaseerd.

5.1.4 ENERGIEHEFFING (EEN RANDVOORWAARDE)

Er is al enige tijd sprake van de invoering van een progressieve toeslag op CO_2-houdende energiedragers (energieheffing). De CO_2-emissie is afhankelijk van de soort brandstof die wordt verbrand. Zo is de emissie van CO_2 bij steenkool een factor 1,7 hoger dan bij bijvoorbeeld aardgas (bij vergelijkbare hoeveelheden). Dientengevolge mag worden verwacht dat energiedragers die geheel of gedeeltelijk zijn gebaseerd op kolen (zoals elektriciteit), in prijs zullen stijgen. Dit is gunstig voor duurzame, aan wind en zon ontleende energie en voor op aardgas gestookte systemen.

5.1.5 ROL DISTRIBUTIEBEDRIJVEN

Het is niet voor niets dat juist de energiedistributiebedrijven op dit moment met ambitieuze milieu-actieplannen aan de weg timmeren. De distributiesector heeft een bijzondere positie door de koppeling met de afnemers van energie. Bij deze

afnemers liggen de mogelijkheden om milieubeschermende en energiebesparende maatregelen in te voeren.

Samen met de industrie worden warmte-krachtprogramma's uitgevoerd. De distributiesector verricht haalbaarheidsonderzoeken, doet aan projectontwikkeling en neemt in toenemende mate de exploitatie van deze warmte-krachtinstallaties voor zijn rekening. De installaties worden zodanig gedimensioneerd dat een zo groot mogelijke warmtelevering kan plaatsvinden (dimensionering op de warmtevraag). Het overschot aan elektriciteit wordt opgenomen door het openbare elektriciteitsnet. Op deze wijze wordt maximaal op energie bespaard.

De installaties bezitten daardoor een elektrisch vermogen dat een factor 3 tot 5 groter is dan strikt noodzakelijk voor de desbetreffende industrie. Hierdoor wordt de warmte-krachtkoppeling een onderdeel van de openbare elektriciteitsvoorziening. De meeste van deze installaties zijn STEG-eenheden. Met STEG-eenheden worden op dit moment de hoogst haalbare rendementen bereikt en is er enige flexibiliteit in de stoom- en elektriciteitslevering. De STEG's hebben in het algemeen een vermogen tussen de 20 MW_e en 100 MW_e. In uitzonderlijke gevallen zijn grotere vermogens (tot 300 MW_e) mogelijk. Elektrische rendementen van 52% blijken haalbaar. Met betrekking tot het milieu zijn op dit moment de volgende getallen voor industriële warmte-krachtkoppeling karakteristiek: energiebesparing 30%, CO_2-reductie 40% en de verzuringsreductie 60%.

De rentabiliteit van warmte-krachtkoppeling is marginaal. Projecten die worden uitgevoerd bij de Provinciale Noordbrabantse Energie-Maatschappij (PNEM) hebben een interne rentevoet van 12% – 14%. Een betere rentabiliteit kan worden verkregen wanneer hogere elektrische rendementen beschikbaar komen. In dat verband bieden vooral brandstofcellen en thermionische omzetters perspectief. De vertrouwensrelatie die de distributiebedrijven in Nederland nu met hun industriële afnemers opbouwen, is de basis voor de toekomstige verwezenlijking van steeds efficiëntere produktietechnieken in een vrije Europese energiemarkt.

Literatuur

[1] *Nota Energiebesparing*, ministerie van Economische Zaken, 1990

[2] *Energiebesparingspotentiëlen 2015*, TNO-rapport, 1990

[3] *Nationaal Milieubeleidsplan*, ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 1989

[4] *Nationaal Milieubeleidsplan-plus*, ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 1990

5.2 ZONNE- EN WINDENERGIE VOOR DE INDUSTRIE

ir. H.J.M. Beurskens en dr. W.C. Sinke

5.2.1 INLEIDING

Het is inmiddels een bekend gegeven dat zonne-energie en windenergie een belangrijke bijdrage zouden kunnen leveren aan de algemene Nederlandse elektriciteitsvoorziening. Het is echter de vraag in hoeverre deze duurzame bronnen van betekenis kunnen zijn voor één bepaalde sector, zoals de industrie. Om die vraag te kunnen beantwoorden, is het nuttig eerst enkele algemene kenmerken van zonne- en windenergie op een rijtje te zetten.

5.2.2 KENMERKEN VAN WINDENERGIE

De onderste 100 meter van de atmosfeer boven Nederland bevat een grote hoeveelheid energie in de vorm van luchtbeweging (lees: wind). Het totale Nederlandse primaire energiegebruik zou ruim drie maal ermee gedekt kunnen worden. Helaas kan hiervan slechts een klein gedeelte daadwerkelijk worden gebruikt. De beperkingen worden bepaald door:
- het aantal beschikbare en geschikte lokaties voor windturbines;
- wettelijke en planologische regels;
- integratiemogelijkheden met andere energieopwekkers;
- kosten;
- geluidoverlast.

Het windaanbod in Nederland is goed gedocumenteerd door het KNMI. Dit maakt een betrouwbare voorspelling van het gemiddelde vermogen mogelijk dat een turbine op een bepaalde lokatie zal leveren. Er is in de afgelopen jaren een zekere consensus ontstaan dat in Nederland zonder ingrijpende aanpassingen van het huidige park van opwekeenheden, het distributienet en de wetgeving tussen 1.000 en 2.000 MW windvermogen kan worden geplaatst. Dat komt overeen met 3 tot 6% van het Nederlandse elektriciteitsgebruik. Wanneer de wetgeving en het elektriciteitsnet worden aangepast, en het windvermogen en de centrales beter kunnen worden geregeld, kan dit percentage minstens worden verdubbeld.

Duurzame energiebronnen, zoals windenergie, hebben in het algemeen een lage vermogensdichtheid. Dat wil zeggen dat een groot oppervlak nodig is om een significante hoeveelheid energie op te wekken. De vermogensdichtheid van windenergie kan op twee verschillende manieren worden uitgedrukt. Kijkt men op het niveau van een turbine (al dan niet in een park) dan kan de dichtheid worden uitgedrukt per vierkante meter bestreken rotoroppervlak. De beste turbines in Nederlandse windparken leveren gemiddeld ruim 100 watt/m^2 rotoroppervlak (1.000 kWh/m^2jaar). Op het niveau van een park is het zinvol te spreken over het vermogen per vierkante meter landoppervlak. Dit wordt bepaald door het specifieke vermogen, gedefinieerd door het geïnstalleerd vermogen per m^2 bestreken rotor-

oppervlak, en de onderlinge afstand van de turbines. De heersende windsnelheid en het specifieke vermogen bepalen de zogenaamde capaciteitsfactor, dat is de fractie van de tijd dat de turbine op vollast draait. De capaciteitsfactor kan variëren door bij een bepaald rotoroppervlak de grootte van de elektrische generator te veranderen. In Nederland zijn capaciteitsfactoren tussen 0,15 en 0,2 gangbaar, terwijl in het buitenland waarden van 0,25 (Denemarken) en boven 0,30 (VS) worden gehaald. Een vuistregel voor de gemiddelde vermogensdichtheid in een goed windpark is ruim 2 watt/m^2 landoppervlak (20 kWh/m^{2}jaar). Men dient zich te realiseren dat slechts ongeveer 1% van het landoppervlak in een windpark fysiek wordt bezet door turbines en de bijbehorende infrastructuur. Het resterende deel kan, zoals de praktijk laat zien, worden benut voor bijvoorbeeld landbouw of veeteelt.

Door de sterke fluctuaties in het windaanbod, onder meer tot uitdrukking gebracht in de lage capaciteitsfactor, is windenergie alléén niet geschikt als basis voor een opweksysteem met hoge betrouwbaarheid. De meest voor de hand liggende oplossing is windenergie te combineren met opweksystemen met een hoog 'gegarandeerd vermogen'. Koppeling aan een elektriciteitsnet waaraan ook conventionele centrales zijn gekoppeld, is daarvan een voorbeeld. Dit kan worden gezien als een vorm van 'virtuele energieopslag' met de uitgespaarde brandstof als opslagmedium. De 'vermogenswaarde' (capacity credit) van een windenergiesysteem (of zonne-energiesysteem) dat aan het arsenaal van opwekeenheden wordt toegevoegd, is ruwweg gelijk aan het produkt van de capaciteitsfactor en het geïnstalleerde vermogen. Dit geldt als de penetratiegraad niet te groot wordt (%), omdat in die situatie vrijwel alle geproduceerde energie daadwerkelijk aan het net kan worden geleverd.

5.2.3 KENMERKEN VAN ZONNE-ENERGIE

Het gemiddeld vermogen van de zonnestraling dat het Nederlandse aardoppervlak bereikt, overtreft het primair energiegebruik met een factor 50. Mondiaal is dit ruwweg een factor 5.000. Hoewel deze getallen weinig praktische betekenis hebben, illustreren deze wel het enorme potentieel van zonne-energie. Zonne-energie is in feite een verzamelnaam voor een groot aantal verschillende technieken om energie op te wekken. Zelfs als we ons beperken tot elektriciteitsproduktie, is er nog een scala aan opties.

Onder deze opties neemt fotovoltaïsche zonne-energie (photovoltaic, PV) echter een speciale plaats in, omdat daarmee zonlicht in één stap wordt omgezet in elektriciteit. Het rendement van PV is daarom hoger dan dat van andere vormen van zonne-energie. Verder is de techniek van PV eenvoudig: er zijn geen bewegende delen en er stromen geen vloeistoffen. Niettemin zijn er ook beperkingen aan het gebruik van PV. De installatiekosten van het systeem zijn op dit moment verreweg de belangrijkste beperking. Daarnaast kan bij grootschalige inzet ook integratie met andere energieopwekkers een probleem zijn.

Evenals het windaanbod is ook het zonaanbod in Nederland vrij goed gedocumenteerd en is er een redelijke voorspelling van de opbrengst van een PV-systeem te maken. De discussie over het aantal beschikbare en geschikte plaatsen voor de

installatie van PV-systemen is nog niet afgerond. Er is veel aandacht voor integratie van systemen in bestaande constructies en gebouwen. Benutting van daken (en muren) in Nederland kan al een belangrijke bijdrage leveren aan het elektriciteitsgebruik. Om een indruk te geven: bij een systeemrendement van 12% kan met 70 km^2 zonnecellen ongeveer 10% van het elektriciteitsgebruik worden gedekt. Dit oppervlak is gemakkelijk beschikbaar op daken van huizen en gebouwen.

De capaciteitsfactor van een PV-systeem wordt op een andere manier bepaald dan die van een windenergiesysteem. De grootte van een PV-systeem wordt uitgedrukt in watt-piek: het vermogen dat wordt geleverd bij '1 zon' = 1.000 watt per vierkante meter. Dat is ruwweg de intensiteit op een zonnige dag, waar ook ter wereld. Onder Nederlandse omstandigheden is de capaciteitsfactor 0,11 tot 0,13, afhankelijk van de lokatie (en niet van de PV-installatie!). Bij een systeemrendement van 12% betekent dit een gemiddeld vermogen van ongeveer 14 watt/m^2 (125 kWh/m^2 jaar).

Evenals het windaanbod is ook het zonaanbod aan sterke fluctuaties onderhevig. Uiteraard tussen dag en nacht, maar – voor toepassing belangrijker – tussen zomer en winter. Op een horizontaal vlak is het verschil in maandelijkse instraling tussen zomer en winter een factor 10, op een hellend vlak dat op het zuiden is gericht, ongeveer een factor 5. Wanneer geen energie wordt opgeslagen, zal PV dus altijd moeten worden gecombineerd met een ander opweksysteem om een betrouwbare elektriciteitslevering te garanderen. Netkoppeling is ook voor PV de goedkoopste manier om de elektriciteit volledig bruikbaar te maken. Tot een penetratiegraad van ongeveer 10% zijn vermoedelijk geen grote regeltechnische problemen te verwachten. Dat wil zeggen dat PV-vermogensfluctuaties kunnen worden opgevangen door de elektriciteitscentrales.

5.2.4 DE STAND VAN ZAKEN

Windturbines in de vermogensklasse van 50 tot 500 kW (rotordiameters van 15 tot 35 meter) zijn in Nederland onder gunstige omstandigheden economisch rendabel. Met andere woorden: de prijs van elektriciteit uit wind is van dezelfde orde van grootte als die van elektriciteit uit het net. De nadruk bij het onderzoek ligt op een verdere reductie van de kosten per opgewekte kWh en op een verhoging van de betrouwbaarheid van de systemen. Vooral de elektriciteitsbedrijven echter hebben een voorkeur om grote(re) opwekeenheden te gebruiken, vandaar de ontwikkeling van turbines in de MW-klasse (rotordiameter groter dan 45 meter). De ontwikkeling van grote windturbines wordt verder in de hand gewerkt door het feit dat bij in Nederland vaak voorkomende lijnopstellingen, het geïnstalleerde vermogen per lengte-eenheid evenredig is met de rotordiameter. Turbines in de MW-klasse zullen ook een belangrijke rol spelen bij toekomstige toepassingen offshore. Ze zullen naar verwachting pas na 1995 commercieel beschikbaar zijn.

PV-systemen zijn in de afgelopen jaren technisch volwassen geworden, dat wil zeggen dat goed ontworpen en gebouwde systemen probleemloos werken. Dit geldt voor de systemen op basis van zonnecellen van kristallijnsilicium. De prijs van elektriciteit uit PV is echter nog enige malen hoger dan die van elektriciteit uit het

net. Vrijwel alle onderzoekinspanningen zijn dan ook direct of indirect gericht op een verbetering van de verhouding tussen prijs en prestatie op systeemniveau. In dit verband moet ook het werk aan dunne-film-zonnecellen van amorf silicium of andere materialen worden gezien.

Geïntegreerde, netgekoppelde systemen zijn vanwege hun simpele opzet het goedkoopst. Overigens is op plaatsen zonder elektriciteitsnet PV (zelfs inclusief opslag) ook nu al vaak de goedkoopste en betrouwbaarste manier om elektriciteit op te wekken.

Het rendement van goede PV-systemen anno 1991 is maximaal 10%. Naar verwachting zullen technische verbeteringen in de komende 10 of 20 jaar een rendement van 20% mogelijk maken. Op de lange termijn is zelfs 30% denkbaar. Daarbij zal gebruik worden gemaakt van zogenaamde tandemzonnecellen, dit zijn stapelingen van verschillende typen cellen.

Daarnaast zullen wellicht nieuwe generaties zonnecellen opkomen, bijvoorbeeld gebaseerd op organische materialen in plaats van halfgeleiders.

5.2.5 MILIEU-ASPECTEN

Wind- en zonne-energie leveren tijdens gebruik geen emissies van NO_x, CO_2 of andere probleemstoffen. Uiteraard is de fabricage van dergelijke systemen niet vrij van vervuiling. De kunst is deze bijdrage tot een minimum te beperken. De 'energieterugverdientijd' zou een maat voor het milieu-effect van wind- en zonne-energie kunnen zijn. Voor windturbines is die ongeveer 3 maanden, voor moderne PV-modulen naar schatting 2 jaar. Door uitgekiend materiaalgebruik en toepassing van optimale processen kan dat laatste getal nog belangrijk omlaag. Behalve de fabricage is ook de verwerking of het hergebruik van afgedankte systemen een punt dat aandacht verdient. In geval van windenergie zijn het vooral de vezelversterkte kunststoffen waarvan moderne bladen zijn gemaakt, die problemen zouden kunnen geven. Bij PV kunnen zware metalen of kunststoffen voor problemen zorgen. Het onderwerp 'integraal ketenbeheer' staat sinds kort ook op de lijst van onderwerpen voor PV-onderzoek. Het is waarschijnlijk dat in de toekomst strenge wettelijke eisen zullen worden gesteld aan het hergebruik van PV-systemen en windturbines.

Bij de milieu-aspecten van windenergie moeten verder geluidoverlast, landschapsaantasting en (subjectieve) risico-ervaring worden genoemd. Hoewel PV-systemen over het algemeen minder nadrukkelijk aanwezig zijn dan windturbines, zal grootschalige introductie van PV toch ingrijpende consequenties hebben voor het aanzien van Nederland. Een belangrijk voordeel van PV is de afwezigheid van bewegende delen en geluid. Dit maakt integratie in de gebouwde en bewoonde omgeving eenvoudiger.

5.2.6 DE INDUSTRIE

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat windenergie of PV geen bijzonder interessante optie is voor de industrie die haar elektriciteit zelf wil opwekken met één technologie. In combinatie met een andere techniek kunnen wind en zon echter wel degelijk worden toegepast. Voorwaarde is dat het bedrijf over voldoende land- of dakoppervlak beschikt en dat de aanvullende opwektechniek elektriciteit kan leveren met een hoge betrouwbaarheid.

Een bijzonder aardig voorbeeld van een industrie die zich in hoge mate afhankelijk heeft gemaakt van duurzame energie, is de zogenaamde 'solar breeder' in de VS. Dit is een zonnecellenfabriek die voor de produktie gebruik maakt van elektriciteit uit zonnecellen op het dak. In een breder kader is het echter duidelijk dat zon en wind een belangrijke bijdrage aan de totale elektriciteitsproduktie kunnen leveren en daarmee tevens aan de produktie voor de industrie.

5.3 ENERGIE UIT BIOMASSA

drs. G.J.J. Smakman

5.3.1 INLEIDING

Biomassa is te beschouwen als een grondstof van organische oorsprong die niet behoort tot de fossiele brandstoffen. Biomassa is een bron van energie met een belangrijk potentieel; elektriciteitsproduktie in de industrie vormt één van de mogelijkheden.

Biomassa wordt in verschillende industrietakken op decentraal niveau reeds toegepast als warmtebron. Hierbij wordt doorgaans gebruik gemaakt van de eigen bedrijfsafvalstoffen (vooral in de houtverwerkende en -bewerkende industrie).

5.3.2 TECHNIEKEN

De energieproduktie uit biomassa kan op twee manieren plaatsvinden: thermische conversie en biologische conversie. Bij thermische conversie gaat het om verbranden, vergassen en pyrolyse. Bij verbranden wordt de brandstof onder toevoer van overmaat zuurstof bijna volledig ontleed in CO_2 en water. Bij vergassing wordt de brandstof ontleed in verschillende componenten, waaronder laagcalorisch gas. Tijdens het vergassingsproces wordt minder zuurstof toegelaten. Pyrolyse vindt plaats bij lagere temperatuur en nagenoeg zonder zuurstof. Hierdoor blijven de in de brandstof aanwezige koolstofketens (in gewijzigde vorm) bestaan. Het eindprodukt kan pyrolyse-olie zijn, maar ook vaste of gasvormige eindprodukten komen voor.

In de industrie zal vooral verbranding toepassing vinden. Belangrijk bij deze

thermische technieken zijn efficiënte, schone en bedrijfsvriendelijke systemen die voor een deel op specifieke stromen zijn toegesneden. Vergassen biedt de mogelijkheid direct elektriciteit op te wekken met behulp van een gasmotor of gasturbine. Hiervoor moet evenwel nog een aantal technische problemen worden overwonnen.

Bij biologische omzetting ontstaat biogas door vergisting. Bacteriën zetten de biomassa voornamelijk om in methaan en CO_2. Biologische omzetting wordt meestal gebruikt bij 'natte stromen' (bijvoorbeeld veilingafval). De biologische conversietechniek is volop in ontwikkeling, vooral door de bruikbaarheid van gescheiden huisvuil (GFT).

Onmisbaar voor de toepassing van biomassa als energiebron is de ontwikkeling van 'voorbereidingstechnieken'. Hieronder worden alle bewerkingsstappen verstaan waarmee uit biomassa of afval de uiteindelijke brandstof wordt vervaardigd. Zo is het efficiënt drogen van stromen met restwarmte een aandachtspunt. Verkleinen, mengen, pelletiseren en briquetteren van de grondstof moeten de kwaliteit van de stroom vergroten. Niet alleen kan de grondstof daardoor meer handelbaar worden, ook moeten ten behoeve van de betrouwbaarheid en de kwaliteit van het conversieproces vaak buffervoorraden worden aangelegd.

5.3.3 TOEPASBAARHEID IN DE INDUSTRIE

In de industrie kunnen afvalstromen en residuen van geheel verschillende aard en verontreinigingsgraad vrijkomen. Hoogwaardig hergebruik van de verschillende reststromen wordt sterk bepaald door enerzijds de mogelijkheden van scheiding aan de bron, en anderzijds de kwaliteitseisen die aan de reststromen worden gesteld.

Bedrijfsinterne milieuzorg kan veel bijdragen aan 'schone', herbruikbare produkten. In een zo vroeg mogelijk stadium van de produktie moet worden geprobeerd rekening te houden met de latere bruikbaarheid van de afvalstromen. Het scheiden aan de bron is voornamelijk een organisatieprobleem. Voor het scheiden van reststromen 'achteraf' bestaan verschillende technieken. Bij droge scheiding kan worden gedacht aan zeven en ballistische technieken. Bij natte scheiding wordt vaak flotatie toegepast, gebaseerd op het drijfvermogen van materialen.

De kwaliteitseisen aan de marktzijde zullen strenger worden als meer produkten van verschillende kwaliteit worden aangeboden. Voor veel bedrijven vormt de afzet van reststoffen een toenemend probleem. Enerzijds door de toenemende eisen bij hergebruik (bijvoorbeeld voor veevoeder), anderzijds door de sterk oplopende kosten van afvalverwerking bij een verbrandingsinstallatie of stortplaats.

Bedrijven vertonen een toenemende neiging om, waar mogelijk, de eigen residuen om te zetten in energie voor eigen gebruik. Er zijn verschillende opties:
- verbranding;
- verbranding met inbegrip van warmte-krachtkoppeling;
- vergisting en biogasproduktie met gebruik van het gas voor elektriciteits- of warmteproduktie.

Grotere installaties zijn meer rendabel. Het voordeel wordt in hoge mate bepaald door de vermeden kosten voor verwerking elders. Omdat de verwerkingskosten de komende jaren sterk zullen stijgen, zal het voordeel in de toekomst toenemen. Daarbij komt dat de overheid kleinschalige initiatieven lijkt te ontmoedigen. Vooral voor grotere bedrijven met grote continue stromen organisch afval met een laag verontreinigingsniveau is het voordeel groot.

In veel gevallen verdient het de voorkeur met een groep bedrijven een gemeenschappelijke opzet uit te werken en het elektriciteitsdistributiebedrijf daarbij te betrekken (dit bedrijf is in een aantal gevallen geïnteresseerd in decentrale warmte-krachtkoppeling). Op deze wijze kan eenvoudiger worden voldaan aan de eisen op het gebied van emissies en kan de investering per deelnemer worden beperkt. Reeds in een aantal gevallen is de nutssector ertoe overgegaan de exploitatie van industriële ketels op zich te nemen. Het kan interessant zijn een standaardcontract uit te werken om de samenwerking tussen distributiebedrijven en particuliere industrieën te vergemakkelijken.

Industrietakken waarvoor het gebruik van biomassa interessant kan zijn, zijn de papierindustrie, de houtverwerkende en houtbewerkende industrie, de agrarische industrie en de afvalverwerking. De biochemische conversie kan vooral interessant zijn voor de verwerking van agrarisch afval en de groente-verwerkende industrie (veilingen, conservenbedrijven).

5.3.4 KNELPUNTEN

Belangrijke knelpunten bij eigen energieproduktie uit residuen zijn:
- De ontwikkeling van de techniek. Het probleem bij de kleinschalige systemen tot 5 MW ligt vooral op het gebied van de rookgasreiniging: hoe kan worden voldaan aan de milieu-eisen in de Richtlijn Verbranden (RV 1989)? In Nederland gelden zeer strenge emissie-eisen.
- De afzet van warmte bij de bedrijven. Er is een tendens afval steeds meer te verbranden om de hoge stortkosten te vermijden. De warmte wordt hierdoor niet altijd efficiënt gebruikt, vooral als in de zomer minder behoefte aan warmte bestaat. Om dit te vermijden, kan worden gedacht aan een warmte-krachtinstallatie met meer nuttige warmte-afzet op een industrieterrein (multi-client-installaties).
- De afzet van andere restprodukten, zoals compost bij de biologische conversie. Er bestaat nog grote onduidelijkheid over de afzetmogeljkheden voor deze compost.
- De geringe kennis van het proces en de bediening. Vooral bij vergassingsprocessen luistert de beheersing zeer nauw. Er is behoefte aan scholing en specifieke kennis bij de bediening van het proces. Nog te vaak wordt 'het er even bijgedaan'. Een belangrijk deelprobleem is zorg voor een constante invoer. Het verdient de voorkeur met geautomatiseerde voedingsystemen te werken.

Referenties

- *Afvalhoutvergassing in Nederland*, Biogas Technology Group, Universiteit Twente, april 1990
- *Ethanolproduktie uit afval*, Haskoning, 1990
- *Studie naar de haalbaarheid van kleinschalige afvalverbranding*, Instituut voor Milieu- en Energietechnologie TNO, 1990
- *Milieuverantwoorde verwerking van afvalhout, deel 1: De beschikbaarheid van bouw- en sloophout; deel 2: De technische, milieu-technische en economische haalbaarheid*, Biogas Technology Group, Universiteit Twente, 1991
- *Verwerking van papierresiduslib en verwerking van de asrest*, Scott-Page, 1991
- *Pyrolyse van metaal-kunststofcombinaties en kunststofblends, internationale stand van zaken*, CIVI Consultancy, 1991
- *Houtafval van kleine houtverwerkende bedrijven*, Interfacultaire vakgroep Milieukunde, Universiteit van Amsterdam, 1988
- *Onderzoeksprojekt gescheiden inzameling van bedrijfsafvalstoffen*, Van Gansewinkel, 1988
- *Verwerkingsmogelijkheden bedrijfsafvalstoffen. Indicatie voor onderzoek naar perspectiefrijke verwerkingsmogelijkheden voor bedrijfsafvalstoffen*, Tebodin, 1984
- *Internationale ervaringen op het gebied van het pyrolyseren van afvalstoffen*, Broers en Partners, 1987
- *Milieu-aspecten van RDF-verbranding*, ECN, 1986
- *Biogas technology in the Netherlands*, Novem brochure, 1989

5.4 BRANDSTOFCELLEN

drs. J.H.C. van der Veer

5.4.1 ALGEMEEN

Brandstofcellen behoren evenals batterijen en accu's tot de elektrochemische systemen. Hier wordt chemische energie direct omgezet in elektrische energie. In zijn eenvoudigste vorm bestaat een elektrochemisch systeem uit twee elektroden, ruimtelijk gescheiden door een elektrolyt. Chemische reacties aan de elektroden bouwen een potentiaalverschil op tussen de elektroden, waardoor elektrische energie kan worden afgenomen.

De chemische reacties in batterijen en accu's treden op tussen actieve stoffen die ingebracht worden bij de fabricage van het systeem. In batterijen zijn de elektroden veelal van chemisch actief materiaal gemaakt. De chemische energie die het elektrodemateriaal vertegenwoordigt, wordt eenmalig omgezet in elektrische energie. Bij accu's is niet de elektrode zelf actief, maar is het actieve materiaal op de elektroden aanwezig. Het elektrochemische proces is hier omkeerbaar. Dat wil zeggen dat de chemische reactie door toevoer van elektrische energie omgekeerd kan verlopen. Daardoor worden de oorspronkelijke actieve stoffen weer gevormd,

zodat chemische energie wordt opgeslagen voor een volgende cyclus van elektriciteitsproduktie. Bij brandstofcellen worden de actieve stoffen continu van buiten af aan de elektroden toegevoerd. Daardoor kunnen brandstofcellen continu elektriciteit leveren in tegenstelling tot batterijen en accu's.

De huidige brandstofcellen berusten voornamelijk op waterstof en lucht (of zuurstof) die, met de elektrolyt als medium, met elkaar reageren tot water. De ruimtelijke scheiding van de waterstof en de zuurstof zorgt ervoor dat de reacties aan de elektroden onder invloed van het transport van elektrische lading geordend verlopen. Daardoor kan het rendement van brandstofcellen veel hoger zijn dan het rendement bij directe reactie van waterstof en zuurstof in een verbrandingsproces. Bij dit laatste proces komt energie als warmte beschikbaar, die slechts ten dele in arbeid kan worden omgezet.

5.4.2 HISTORIE

In 1791 rapporteert de medicus Luigi Galvani de waarneming van spierbewegingen bij proeven op dode kikvorsen. Hij verklaart de verschijnselen door 'dierlijk magnetisme'. Volta maakt duidelijk dat het plaatsen van metalen elektroden in het spierweefsel tot elektrische stimulatie van de spieren leidt. Daarmee geeft hij de juiste elektrochemische interpretatie. Hij bouwt ook de eerste elektrochemische cel: het element van Volta. In 1839 bevestigt Sir William Grove zijn veronderstelling dat na elektrolyse van water in een elektrochemische cel kortstondig een elektrische stroom kan bestaan tussen de platina elektroden van de cel. Hij interpreteert dit terecht als een gevolg van de reactie van fijn verdeelde waterstof (oxydatie) en zuurstof (reductie) op de elektroden, waarbij elektronen door de verbindingsdraad lopen. Uit deze basisgedachte is de brandstofcel ontwikkeld. In 1842 demonstreert Grove een 'batterij' van 50 in serie geschakelde cellen.

Mond en Langer werken in 1889 een meer praktische benadering uit. De koolstofelektrode doet zijn intrede, evenals lucht als oxydatiemiddel. Onderkend wordt dat stadsgas als brandstof kan dienen. Verder onderzoek richt zich op het ontwikkelen van een brandstofcel met koolstof als brandstof (Jaques 1896 en Haber/Brunner 1904), echter zonder opzienbarende resultaten. In 1910 worden door Bauer en medewerkers uitgebreide metingen aan verschillende celconfiguraties gedaan. Zij construeren de eerste gesmolten-carbonaatcel. De werkelijke start van de ontwikkeling tot bruikbare systemen wordt gegeven door Bacon in 1932. Uitgaande van alkalisch elektrolyt en nikkelelektroden wordt in 1959 een werkende brandstofcel met een vermogen van 5 kW gedemonstreerd. Deze cel is de basis voor het ontwerp van de brandstofcellen in het ruimtevaartprogramma Apollo. Aan het begin van de jaren zeventig wordt in de VS het 'TARGET'-programma gelanceerd dat de commerciële ontwikkeling van brandstofcellen definitief op gang brengt.

5.4.3 KARAKTERISTIEKEN VAN BRANDSTOFCELLEN

De ontwikkeling van brandstofcellen voor elektriciteitsproduktie wordt vooral

gestimuleerd door het hoge theoretische rendement. Dit intrinsieke rendement wordt ontleend aan de totale energie die bij de chemische reactie ter beschikking komt in verhouding tot het verschil in vormingsenergie van de reactieprodukten voor en na de reactie. In termen van thermodynamica is dit de verhouding tussen de verschillen in Gibbs-energie en de verschillen in enthalpie voor en na de reactie. Voor een aantal brandstoffen geeft tabel 5.1 een overzicht van de reactievergelijkingen en de intrinsieke rendementen. In deze tabel is naast het gebruikelijke waterstof ook aardgas en koolmonoxyde opgenomen, omdat in geavanceerde brandstofcellen deze brandstoffen in principe door middel van elektrochemische reacties direct kunnen worden omgezet.

	Reactievergelijking	Intrinsiek rendement		
		25 °C 1 atm	500 °C 1 atm	500 °C 5 atm
waterstof	$H_2+{}^1/_2O_2 \longrightarrow H_2O$	82,7%	71,7%	73,5%
methaan	$CH_4+2O_2 \longrightarrow CO_2+2H_2O$	91,7%	89,9%	89,9%
koolmonoxyde	$CO+{}^1/_2O_2 \longrightarrow CO_2$	90,8%	76,1%	78,0%
methanol	$CH_3OH+1{}^1/_2O_2 \longrightarrow CO_2+2H_2O$	96,6%	97,9%	97,2%

Tabel 5.1 Intrinsiek rendement van brandstofcellen voor verschillende brandstoffen

Voor koolmonoxyde is dit van belang omdat koolmonoxyde een component is van het produkt van kolenvergassing. Ten slotte is ook methanol opgenomen, omdat deze brandstof vooral in de vervoerssector een belangrijke rol kan gaan spelen. De meningen hierover zijn echter verdeeld. De omzetting van methanol kan in principe direct plaats vinden (direct methanol fuel cell). Vooralsnog wordt methanol echter indirect – na een omzetting in waterstof – in brandstofcellen toegepast. Zoals uit tabel 5.1 blijkt, is het intrinsieke rendement afhankelijk van de brandstof, de toestand van de reactieprodukten en de temperatuur en de druk in de brandstofcel.

In de praktijk worden brandstofcellen met enige tientallen tot enige honderdtallen in serie geschakeld en gestapeld in een zogenaamde stack. Deze stacks vormen de basismodulen voor een praktisch systeem van elektriciteitsopwekking. Het totale systeemrendement van elektriciteitsopwekking met brandstofcellen wordt in de praktijk door de volgende factoren bepaald:
- het intrinsieke rendement van de brandstofcel;
- de energieverliezen in de celconstructie afhankelijk van het celtype;
- de energieverliezen in de stackconstructie;
- het rendement van een nageschakelde stoomcyclus;
- het rendement van randsystemen voor brandstofconditionering, warmteterugwinning en elektrische conversie.

Fig. 5.4 toont een overzicht van de totaalrendementen die van verschillende vormen van elektriciteitsopwekking worden verwacht. Het blijkt dat brandstofcelsystemen het hoge rendement van STEG-eenheden mogelijk nog zullen overtreffen. Vooral in situaties waarin niet het volle vermogen van de opwekinstallatie wordt gevraagd,

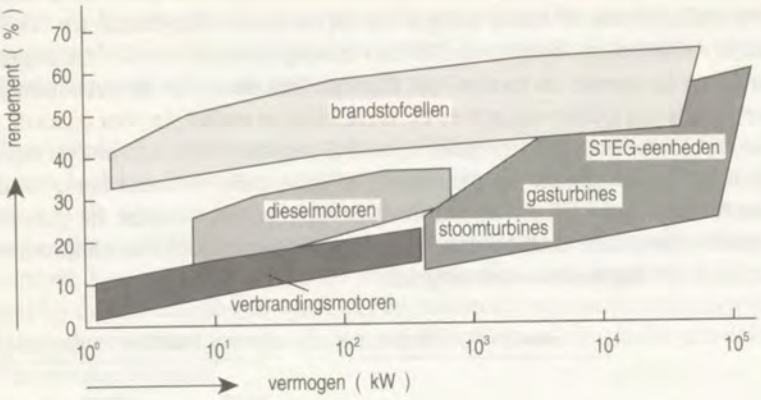


Fig. 5.4 Rendement van verschillende opweksystemen

is de brandstofcel in het voordeel: het rendement van brandstofcellen verandert slechts weinig bij belasting tussen 50 en 100%. Naast een hoog rendement is ook de zeer lage emissie van stikstof- en zwaveloxyden een belangrijke stimulans voor toepassing en verdere ontwikkeling. In tabel 5.2 wordt een vergelijking gegeven van de emissie bij verschillende vormen van conventionele elektriciteitsopwekking in Nederland en opwekking met brandstofcellen.

	Opwekeenheid			
	gasgestookt	oliegestookt	kolengestookt	brandstofcel
SO_x	–	1,6	1,8 (0,18)[1]	0 – 0,0003
NO_x	0,2	0,5	0,7	0,03 – 0,2
vaste stof	0	0,1	0,05	0 – 0,00003

1) Met rookgasontzwavelingsinstallatie

Tabel 5.2 Vergelijking van emissie in Nederland (kg/1.000 kWh) zonder verwijdering van SO_x en NO_x

Overige eigenschappen van brandstofcellen:
- de brandstofcel heeft geen bewegende delen;
- elektriciteitsproduktie met brandstofcellen is geluidarm;
- brandstofcellen zijn modulair opgebouwd zodat de grootte van het opwekvermogen in principe naar wens kan worden gekozen en aangepast;
- de vermogensdichtheid van brandstofcellen loopt uiteen van 50 W/kg tot 500 W/kg. Bij nieuwe ontwikkelingen loopt dit zelfs op tot 1 kW/kg.

Het geheel van technische eigenschappen van brandstofcellen vormt een gunstig uitgangspunt voor toepassingen in de energievoorziening. Er zal nog onderzoek nodig zijn naar de verwerking van gebruikte brandstofcellen. De restprodukten

behoren tot de chemische afvalstoffen. Verwerking van dit afval zal sterk afhangen van het type brandstofcel.

5.4.4 TYPEN BRANDSTOFCELLEN

De brandstofcellen die momenteel in ontwikkeling zijn, worden onderverdeeld in vijf typen:
- de alkalische brandstofcel (Alkaline Fuel Cell, AFC);
- de fosforzure brandstofcel (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC);
- de vaste-polymeerbrandstofcel (Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell, SPEFC of SPFC, tegenwoordig aangeduid met PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell);
- de gesmolten-carbonaatcel (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC);
- de vast-oxydebrandstofcel (Solid Oxyde Fuel Cell, SOFC).

Bij de beschrijving van de verschillende typen komen de volgende aspecten aan de orde:
- celconstructie en materialen;
- brandstof(fen);
- werktemperatuur;
- verwacht elektrisch en thermisch rendement;
- fabricageproces;
- ontwikkelingsstadium wereldwijd;
- technische problemen.

5.4.5 DE ALKALISCHE BRANDSTOFCEL (AFC)

De AFC is ontwikkeld vanwege de minder corrosieve eigenschappen van de alkalische elektrolyt in vergelijking met een zuur elektrolyt. Tegelijk kon bij de keuze voor een hoge bedrijfstemperatuur de kostbare platina katalysator worden vervangen door nikkel. De eerste cellen werkten bij 200 °C. Om koken van de elektrolyt te voorkomen, werd een werkdruk tot 4 MPa toegepast. Een belangrijk nadeel van deze uitvoering was de zware drukomhulling. Voor het gebruik van de cellen in het ruimtevaartprogramma Apollo moest het drukvat lichter worden. Dit betekende dat ook de bedrijfsdruk moest worden verlaagd.

De huidige AFC bestaat uit twee plaatvormige nikkelgaaselektroden, bedekt met een poreuze koollaag waarin fijn verdeeld platina als katalysator is gemengd. Tussen de platen bevindt zich de elektrolyt, die bestaat uit een oplossing van 30% kaliumhydroxyde in water (kaliloog). Ter bevordering van het contact tussen elektrolyt, brandstof en elektrode is een poreuze teflonlaag op de koolstoflaag aangebracht. In een nu verkrijgbare uitvoering zijn 24 cellen in een kunststof-omhulling geplaatst. De elektrische verbindingen tussen de cellen zijn uitwendig aangebracht. Het vermogen van een dergelijke stack bedraagt 0,5 of 1 kW. Een spanning van 4 of 8 Volt is gebruikelijk. De brandstof voor de AFC is zeer zuivere waterstof. Zuurstof of zuivere lucht, ontdaan van restgassen als CO, CO_2 en

zwavelverbindingen, wordt als oxydatiemiddel toegevoerd. De gangbare gasdruk is atmosferisch, de gangbare werktemperatuur van de cel is circa 70 °C. Er zijn uitvoeringen waarbij de kaliloog continu wordt rondgepompt, en uitvoeringen waarin de elektrolyt in een poreuze matrix wordt vastgehouden.

Het elektrisch rendement van de AFC ligt in de orde van 60%. Zij wordt toegepast in de ruimtevaart en in de transportsector. Wanneer waterstof in een toekomstige samenleving een belangrijke energiedrager wordt, zal de AFC ook kunnen worden toegepast in grootschalige elektriciteitsproduktie. De AFC is commercieel verkrijgbaar. De beperkte levensduur is nog een technisch probleem.

5.4.6 DE FOSFORZURE BRANDSTOFCEL (PAFC)

Het ontwerp van de PAFC komt voort uit de wens minder zuivere waterstof als brandstof te kunnen gebruiken. Vooral kooldioxyde mag niet van invloed zijn op de werking van de cel. Aan deze voorwaarde voldoet de PAFC. Nadeel is echter dat alleen platina als katalysator in aanmerking komt. Dit kan ten dele worden ondervangen door hogere bedrijfstemperaturen, zodat minder katalysatormateriaal nodig is. Het stabiele fosforzuur is dan de meest bruikbare elektrolyt.

In de PAFC zijn de constructiematerialen op de sterk corrosieve eigenschappen van het zuur afgestemd. De elektroden bestaan uit poreuze koolstofdragers (vilt, papier) met een oppervlak tot 1 m^2. In het oppervlak is fijn verdeeld platina als katalysator aangebracht. Tussen de elektroden bevindt zich een poreuze siliciumcarbideplaat waarin het fosforzuur wordt vastgehouden. Enige tientallen tot enige honderden van deze sandwiches worden – gescheiden door separatorplaten – op elkaar gestapeld en samengedrukt tot een stack. De separatorplaten zijn van grafiet, zodat een elektrische serieschakeling van de cellen ontstaat. Voor de toevoer van brandstof en lucht zijn in sommige constructies groeven in de onderzijde en in de bovenzijde van de separatorplaten aangebracht. Andere constructies hebben vlakke separatorplaten en gegroefde elektroden. Daardoor ontstaan bij het bouwen van de stack kanalen die uitmonden in kasten voor brandstof en lucht, die op de zijden van de stack zijn gemonteerd. Deze wijze van aansluiten wordt externe manifolding genoemd.

De bedrijfstemperatuur van de PAFC bedraagt circa 200 °C. Het elektrisch rendement is 35% – 40%. Ongeveer 40% kan als warmte worden teruggewonnen; het arbeidsrendement is echter laag. De brandstof is waterstof. In de praktijk wordt deze waterstof met behulp van reforming uit een veelheid van brandstoffen bereid. De belangrijkste zijn aardgas, LPG en methanol. Om chemische aantasting van de cel te vermijden, moet het koolmonoxydegehalte bij deze bereiding lager worden gehouden dan 2 volumeprocent. Dit heeft een negatieve invloed op het systeemrendement.

De grootte van PAFC-systemen is op dit moment gemiddeld 250 kW. Kleine systemen (50 – 70 kW) bevinden zich in het proefstadium voor elektrisch vervoer. Grotere systemen worden toegepast als warmte-krachtsysteem of voor elektrici-

teitsopwekking. De grootste eenheid die op dit moment wordt gebouwd, heeft een elektrisch vermogen van 11 MW.

Net als de AFC is de PAFC commercieel verkrijgbaar. De huidige ontwikkelingen zijn gericht op het vergroten van de levensduur tot meer dan 4 jaar en het verhogen van de bedrijfsdruk van 0,1 naar 0,5 MPa.

5.4.7 DE VASTE-POLYMEERBRANDSTOFCEL (PEMFC)

Op basis van de betrouwbaarheid en de eenvoud van de constructie koos NASA bij het ruimtevaartprogramma Gemini aan het begin van de jaren zestig voor de PEMFC. In principe is de cel opgebouwd uit een protonengeleidend membraan van kunststof (polymeer) dat wordt ingeklemd tussen twee elektroden. Het polymeer heeft door de binding met sulfonzuurgroepen een zuur karakter en is dus vergelijkbaar met een zure elektrolyt in vaste vorm. De eerste elektroden bestonden uit niobium, bedekt met fijn verdeeld platina als katalysator. Voor deze cellen was relatief veel platina nodig, terwijl de energieopbrengst en de levensduur van de cellen beperkt was. In volgende ruimtevaartprogramma's werd de PEMFC verdrongen door de AFC en kwam de ontwikkeling van de PEMFC nagenoeg stil te liggen. Onder invloed van militaire interesse kwam de ontwikkeling van de PEMFC in 1983 weer op gang (Ballard Power Systems).

In de huidige cellen wordt gebruik gemaakt van sterk verbeterde membranen. De elektroden bestaan uit grafietpapier of uit een weefsel van grafietdraden. Aan de membraanzijde bevindt zich fijn verdeeld platina. De elektroden worden geïmpregneerd met teflon en aan de membraanzijde bestreken met een vloeibare monomere vorm van Nafion. Door bij het samenpersen te verhitten, vindt polymerisatie plaats. Daardoor ontstaat een goed contact tussen het vaste polymeer, de platina katalysator en het elektrodemateriaal. Met deze constructie is het mogelijk de benodigde hoeveelheid platina met een factor 20 terug te brengen. De werktemperatuur van de cel is ongeveer 80 °C. Om het elektrolytische gedrag van het membraan te waarborgen, moet het membraan een zekere hoeveelheid vocht bevatten. Het bewaken van deze vochthuishouding is essentieel voor een goede werking.

De brandstof voor de PEMFC is waterstof dat eventueel via een reformingsproces wordt verkregen. Een duidelijk voordeel van de PEMFC is de resistentie voor CO_2. Dit is van groot belang als methanol in de reformer wordt omgezet in H_2 en CO_2. Methanol is vooral van belang als brandstof in de vervoerssector. Daarmee is de PEMFC tevens een potentiële krachtbron voor toekomstige elektrische auto's. Verwacht wordt dat het rendement van de PEMFC rond 50% zal liggen. Bij zware belasting van de cellen daalt dit rendement echter sterk.

Op dit moment worden door Ballard systemen van 3 kW op de markt gebracht. Cijfers over de levensduur van de cellen lopen nog sterk uiteen; bedrijfstijden tot 60.000 uur worden gemeld. De belangrijkste beperking voor de PEMFC is de hoge kostprijs, al hebben zich de laatste jaren aanzienlijke kostprijsdalingen voorgedaan.

De ontwikkelingen gaan in de richting van een verdere vermindering van de platinabelading, en een verlaging van de kostprijs van de kunststofmembranen.

5.4.8 DE GESMOLTEN-CARBONAATCEL (MCFC)

Evenals de PAFC is de MCFC ontwikkeld voor toepassing van minder zuivere waterstof. Daarnaast wordt van dit type cel een hoger rendement verwacht, terwijl geen platina voor de katalysator nodig is. In de MCFC is de anode van een poreus nikkel-chroommengsel en de kathode van poreus nikkeloxyde gemaakt. Het elektrodeoppervlak kan tot 1,2 m^2 bedragen. Tussen de elektroden bevindt zich een poreuze lithium-aluminiumoxydeplaat; de zogenaamde elektrolytmatrix. Daarin bevindt zich de elektrolyt die in de bedrijfstoestand uit een mengsel van gesmolten lithiumcarbonaat en kaliumcarbonaat bestaat. De stack wordt op verschillende manieren samengesteld. Er bestaat een methode met geribbelde separatorplaten zoals in de PAFC. Dan geschiedt de aanvoer van brandstof en lucht via externe manifolds.

Een andere methode is dat de anode en de kathode aan weerszijden van een roestvast-stalen separatorplaat worden aangebracht. In de randen van de plaat zijn gaten opengelaten. Vervolgens worden deze platen gestapeld met daartussen de elektrolytmatrix en de nog in vaste vorm verkerende elektrolyt. Bij het opstarten van de stack tot de bedrijfstemperatuur van ongeveer 650 °C vormt zich de uiteindelijke elektrode-samenstelling en wordt de elektrolyt in de matrix en in de elektroden geabsorbeerd. De randen van de platen vormen met de tussenliggende elektrolytmatrix de afdichting van de stack. De op elkaar aansluitende gaten vormen kanalen voor brandstof en lucht. Deze constructie wordt interne manifolding genoemd.

De MCFC kan onder druk worden bedreven. Als brandstof kan reformed aardgas en kolengas worden gebruikt. Pure waterstof is ook mogelijk, maar dan moet wel de CO_2 van het anode-uitlaatgas worden teruggevoerd naar de kathode van de cel. Net als bij de PAFC kunnen ook verschillende koolwaterstoffen als basis voor de benodigde brandstof dienen. Het bereiden van deze brandstof buiten de brandstofcel wordt aangeduid met externe reforming (ER). De hoge bedrijfstemperatuur van de carbonaatcel en het feit dat deze cel koolmonoxyde goed verdraagt, maken een goede warmte-integratie van de stack en de reformer mogelijk, waardoor systeemrendementen rond 60% kunnen worden verwacht. Deze eigenschappen zorgen ervoor dat een veelheid van koolwaterstoffen zoals methaan, aardgas en LPG direct katalytisch in de cel worden omgezet in een waterstofrijk gasmengsel. Deze zogenaamde directe interne reforming (DIR), waarbij gebruik wordt gemaakt van de in de cel opgewekte warmte, leidt tot een verdere verhoging van het elektrische rendement met circa 5%.

Een tussenvorm waarin de reforming van de brandstof weliswaar in de brandstofcelstack plaatsvindt, niet per cel, maar per groep cellen, wordt op dit moment beproefd. Dit proces staat bekend als indirecte interne reforming (IIR). Hier kan met een nageschakelde stoomcyclus de verlieswarmte nuttig worden gebruikt.

De MCFC bevindt zich nog in het experimentele stadium. Wereldwijd zijn momenteel stacks tot 25 kW gebouwd en beproefd. Op dit moment worden stacks van 100 kW gebouwd voor beproeving in een industriële omgeving. Het zwaartepunt van de ontwikkelingen ligt bij het oplossen van materiaalproblemen, waaronder de corrosie van de metalen celcomponenten, de kruip van de anode en het oplossen van de kathode in de elektrolyt.

5.4.9 DE VAST-OXYDEBRANDSTOFCEL (SOFC)

De SOFC berust op het idee dat oxyden zoals zirconiumoxyde zich bij temperaturen van meer dan 1.000 °C als elektrolyt gedragen, en in staat zijn zuurstofionen te geleiden. Deze zuurstofionen vormen de basis voor de elektrochemische omzetting van een breed scala brandstoffen.

De hoge bedrijfstemperatuur van de oxydische brandstofcel maakt toepassing van elektrisch geleidende keramische materialen noodzakelijk. De anode van de cel wordt gevormd door een cermet van nikkel en yttrium-gestabiliseerd zirconiumoxyde dat redelijk poreus is en voldoende katalytisch. De kathode bestaat uit strontium-gedoteerd lanthaanmanganiet dat naast de gewenste poreusheid een halfgeleiderwerking vertoont, die noodzakelijk is voor de elektrische geleiding.

Yttrium-gestabiliseerd zirconium bevindt zich als elektrolyt tussen de elektroden. Er zijn voor de SOFC verschillende geometrieën ontwikkeld. De belangrijkste zijn een vlakke cel en een buisvormige cel. De vlakke cellen worden geconstrueerd door sintering van op een band uitgegoten suspensies van poeders van de gewenste materialen, vermengd met bindmiddelen. Zowel het afzonderlijk sinteren van de celonderdelen als het integraal sinteren worden toegepast. De laatste celtypen staan bekend als monolithische cellen.

De buisvormige cellen zijn op dit moment het verst ontwikkeld in Amerika. Bij de nieuwste fabricagemethode wordt uitgegaan van een gesinterde poreuze buis van lanthaanmanganiet met een diameter van 1,25 cm en een lengte van 70 cm. Deze buis vormt de kathode van de cel. In de lengterichting van de buis wordt het elektrisch contact van strontium-gedoteerd lanthaanchromiet opgedampt. Vervolgens wordt door opdampen de elektrolyt aangebracht, waarbij het elektrisch contact vrij wordt gehouden. Door sintering wordt de poreuze nikkel-cermet-anode aangebracht, waarbij wederom het kathodecontact wordt vrijgehouden. Ten slotte worden de buizen met een actieve lengte van 50 cm met een nikkelvilt tussen anode en opvolgende kathode in de lengterichting aaneen gesinterd. Op dit moment worden blokken van steeds 18 buizen gemaakt.

Het directe elektrische rendement van de SOFC ligt rond 50%. Met een combinatie van interne reforming en een nageschakelde stoomcyclus kunnen grootschalige, thermodynamisch geïntegreerde systemen worden ontworpen, waarvan systeemrendementen van meer dan 65% worden verwacht. Het ontwikkelingsstadium van buisvormige cellen is wat betreft het vermogen gelijk aan dat van de MCFC. Een autonoom computergestuurd systeem met aardgas als brandstof en elektrische

omzetting naar wisselspanning met een vermogen van 19 kW is gerealiseerd. Twee systemen met hetzelfde vermogen zijn in aanbouw en worden begin 1992 afgeleverd. Een eerste demonstratiesysteem van 100 kW wordt in 1992 verwacht. Het belangrijkste probleem van de SOFC zijn de hoge produktiekosten. Een pas ontwikkelde fabricagemethode betekent een belangrijke verlaging van deze kosten.

5.4.10 ECONOMISCHE PERSPECTIEVEN

De introductie van brandstofcellen geschiedt op grond van een vergelijking van technische en economische factoren tussen brandstofcellen, en bestaande en nog te ontwikkelen vormen van energievoorziening. Daarbij moet onderscheid worden gemaakt tussen kleinschalige opwekking (ruimtevaart, vervoerssector), decentrale opwekking tot vermogens van enkele tientallen MW, en centrale opwekking met grotere vermogens.

Technische factoren die moeten worden beoordeeld, zijn onder andere: het voorzieningsgebied, de brandstoffen, de milieutechnische voorwaarden, het rendement, de betrouwbaarheid en de levensduur. Economische factoren zijn de verkrijgbaarheid van brandstofcellen, de kostprijs per kW en per kWh, milieuheffingen en overige regelgeving.

In de ruimtevaart heeft de genoemde afweging van factoren ertoe geleid dat zowel in het verleden als in de toekomst de AFC een belangrijke rol in de energievoorziening speelt. Dit wordt vooral ingegeven door de aard van het voorzieningsgebied. De kleinschalige opwekking voor de vervoerssector zal in toenemende mate worden beheerst door milieutechnische factoren. Daarbij zullen verschillen in kostprijs van brandstofcellen en conventionele verbrandingsmotoren moeten worden afgewogen tegen verschil in milieubelasting.

Verwacht mag worden dat de emissie-eisen vooral in stedelijke gebieden zodanig zullen zijn dat elektrische tractie, aangedreven door AFC's, PAFC's of PEMFC's met hun uiterst lage emissie, ten minste gaan concurreren met verbrandingsmotoren.

Voor decentrale opwekking, van belang voor de elektriciteitssector en de industrie, is de vergelijking met verbrandingsmotoren en kleine gasturbines van belang. Een afweging leert dat op louter technische gronden de inzet van de nu reeds beschikbare PAFC aantrekkelijk is. Deze brandstofcel is modulair en kleinschalig en heeft een elektrisch rendement van 40% zowel in deellast als bij vollast. De hoge prijs per kilowatt staat grootschalige introductie van de PAFC in de meeste situaties nog in de weg. Voor de MCFC en de SOFC geldt dit in versterkte mate, ondanks het hogere rendement van deze celtypen. Prijsdalingen enerzijds en heffingen op schadelijke emissie anderzijds zullen ertoe leiden dat brandstofcellen primair zullen penetreren in de decentrale opwekking. Dit geldt het eerst voor de PAFC, waarvan de serieproduktie nu op gang komt. In een later stadium kunnen ook de MCFC en de SOFC hun intrede doen. Nog onduidelijk is in hoeverre de ontwikkeling van geavanceerde gasturbines deze introductie kan vertragen.

Grootschalige centrale elektriciteitsopwekking wordt op dit moment gedomineerd door relatief goedkope kolen- en gasgestookte centrales, voorzien van emissiebeperkende voorzieningen. Het rendement van deze systemen is zodanig dat alleen MCFC's of SOFC's in deze markt gaan concurreren. Ter vergelijking: het verwachte rendement van kolenvergassingsinstallaties ligt rond 45%. Het rendement van opwekking met STEG-eenheden van nu reeds meer dan 50% (in de toekomst mogelijk 60%), zal de penetratie van de MCFC sterk belemmeren. Wanneer de berekende hoge systeemrendementen van MCFC en SOFC worden gerealiseerd, en de kostprijs voldoende kan worden verlaagd, kunnen deze concurrerend zijn. Echter, in de komende jaren zal de opwekking van elektrische energie steeds meer plaatsvinden in installaties met een lage milieubelasting. Dit verklaart de wereldwijde belangstelling voor elektriciteitsproduktie volgens de elektrochemische energieomzetting.

Japan en Amerika

In Japan zijn het voorzieningsgebied (eilandstructuur), milieutechnische voorwaarden en de kosten van brandstoffen belangrijke argumenten voor de inzet van brandstofcellen. Vooral de Japanse overheid streeft naar een totaal van 2.000 MW decentraal geïnstalleerd vermogen in het jaar 2000 in de vorm van PAFC. Ongeveer de helft van dit vermogen staat in de industrie opgesteld. De Japanse industriële produktiecapaciteit voor PAFC-systemen omvatte eind 1990 reeds 25 MW per jaar.

In Amerika zijn milieutechnische voorwaarden en regelgeving stimulansen voor de invoering van brandstofcellen. Na intensieve testprogramma's in de jaren 1970-1985 is de PAFC in het commerciële stadium gekomen. De industriële ontwikkeling richt zich nu op de commercialisatie van de MCFC als brandstofcel van de tweede generatie. Van drie industriële blokken is de Fuel Cell Commercialisation Group (FCCG) de grootste; zij heeft plannen voor de bouw van 20 IIR eenheden van 2 MW elk in 1993. Het Duitse Messerschmitt participeert in deze groep met het oog op de Europese markt. Naast de FCCG is de Alliance to Commercialize Carbonate Technology (ACCT) actief. Het Gasresearch Institute (GRI) is hierin de belangrijkste deelnemer. Het Europese Asea Brown Boveri participeert in ACCT. In 1991 zal de Amerikaanse produktiecapaciteit voor MCFC ongeveer 5 MW per jaar bedragen. Ook hier stimuleren belangrijke overheidssubsidies de ontwikkelingen.

In 1990 bereikte de technische ontwikkeling van de buis-SOFC een belangrijke mijlpaal: er werd een autonoom werkend demonstratiesysteem met een vermogen van 19 kW opgeleverd. Deze demonstratie heeft aangetoond dat ook de SOFC het commerciële stadium nadert. Gezien de gunstige vooruitzichten voor brandstofinzet, rendement en levensduur zal de SOFC een commercieel succes worden, wanneer de kostprijs van het systeem op een aanvaardbaar niveau kan worden gebracht.

Nederland

De introductie van brandstofcellen in Nederland in de openbare elektriciteitsvoorziening en in de industrie wordt sterk bepaald door de kostprijs. Als gevolg van relatief lage brandstofkosten en het ontbreken van een heffing op de uitstoot van zwavel- en stikstofoxyden wegen het hogere rendement van sommige typen brand-

stofcellen en de extreem lage emissies niet op tegen de hogere systeemkosten. In het algemeen zijn brandstofcellen in Nederland op dit moment niet rendabel. Tabel 5.3 geeft een kostenoverzicht.

	Vermogen	Elektrisch rendement	Investering per kW (in *f*)	
			1991	doelstelling
gasmotor	tot 3 MW	35%	1.500 – 2.500	–
gasturbine	1-10 MW	30%[1]	1.000 – 2.000	–
AFC	1-100 kW	50-60%[2]	15.000[3]	–
PAFC	tot 10 MW	40%	5.600[4]	1.600 – 2.600
MCFC	2 MW	55%[5]	16.000[6]	1.200 – 2.400
SOFC	25-100 kW	60%	> 25.000	1.000 – 2.000[7]

1) 40% voor 'HERON' turbine
2) met waterstof
3) prijsstelling van de stack (Elenco)
4) US$ 2.800 per kW
5) met methaan
6) US$ 8.000 per kW (FCCG demo-eenheid)
7) systeemgrootte > 10 MW

Tabel 5.3 Investeringskosten huidige decentrale opweksystemen en brandstofcelsystemen

Bij substantiële verlaging van de prijs per kW zal de penetratie van brandstofcellen volgens het algemene patroon verlopen. Dat wil zeggen dat de belangrijkste markt in Nederland op het gebied van de warmte-krachtkoppeling en decentrale elektriciteitsopwekking ligt. Het moment waarop de penetratie in deze markt begint, is niet te voorspellen. Dit is onder andere afhankelijk van de regelgeving op milieugebied en van het subsidiebeleid van de overheid.

In de centrale elektriciteitsopwekking neemt Nederland met de ontwikkeling van grootschalige kolenvergassing een unieke plaats in. Omdat MCFC en SOFC geschikt zijn voor het gebruik van kolengas als brandstof kan worden verwacht dat in de tweede helft van de jaren negentig een afweging kan worden gemaakt tussen geavanceerde gasturbines enerzijds, en brandstofcellen anderzijds. Daarbij kunnen veranderingen in de stellingname in de CO_2-problematiek nog tot aanzienlijke complicaties leiden.

Afsluitend kan worden vastgesteld dat de prognosen van de kosten van brandstofcellen, gekoppeld aan de verwachte omzetstijging in het buitenland, goede perspectieven bieden voor introductie in Nederland. Het is echter nog te vroeg een voorkeur uit te spreken voor het type brandstofcel dat zal worden toegepast. Er moet nog een aantal problemen met de huidige brandstofcellen worden opgelost.

Nederlands onderzoek
In Nederland wordt bij verschillende instituten aandacht besteed aan fundamenteel

materiaalonderzoek en aan fabricagemethoden. Daarnaast wordt applicatiegericht onderzoek verricht aan AFC's, PAFC's, en PEMFC's. Sinds 1986 wordt een belangrijke inspanning op het gebied van de MCFC geleverd. Dit in belangrijke mate door de overheid gesteunde, nationale onderzoekprogramma omvat fundamenteel elektrochemisch onderzoek, materiaalontwikkeling voor de poreuze componenten, componentenfabricage, stack-technologie en systeemanalyse.

Vanaf het begin was ECN de hoofdcontractant van dit programma en was vooral de Technische Universiteit in Delft betrokken bij het fundamenteel elektrochemisch onderzoek (reactiekinetica en corrosieverschijnselen).

Het Institute of Gas Technology (IGT) begon de materiaalontwikkeling met een programma van technologie-overdracht aan ECN. Gebaseerd op deze kennis zijn fabricagemethoden ontwikkeld voor verschillende MCFC-materialen. Er is een testlaboratorium opgezet, waarin deze materialen in kleine testcellen onder realistische bedrijfscondities worden beproefd. Door optimalisatie van celmaterialen en bedrijfsprocedures zijn opmerkelijke verbeteringen van celprestaties verkregen en voor de separatorplaat is een uniek concept voor interne manifolding gerealiseerd. Inmiddels zijn bedrijfstijden van meer dan 20.000 uur gerealiseerd.

Op dit moment is een 1 kW stack beproefd en wordt in de nabije toekomst een stack van 10 kW geassembleerd. Samen met de Nederlandse industrie wordt geprobeerd de MCFC te commercialiseren. Er zijn plannen om rond 1994 de bouw van enige MCFC-demonstratie-eenheden op een schaal van 250 kW te realiseren. Het doel is het ontwikkelen van fabricagetechnologie voor deze schaalgrootte en het vaststellen van rendements- en milieukarakteristieken.

Naast de ontwikkelingen op het gebied van de MCFC worden haalbaarheidstudies uitgevoerd naar SOFC-systemen van 100 kW. Daartoe heeft de Provinciale Gelderse Energie-Maatschappij (PGEM) een contract met Westinghouse gesloten. Doel is het opdoen van ervaring met het inzetten van SOFC-generatoren bij decentrale opwekking.

Referenties

- LOVERING, D.G., *Proceedings of the Grove Anniversary Fuel Cell Symposium, 19-21 september 1989, London*, in: Journal of Power Sources, Vol. 29, nrs. 1 en 2, 1990
- APPLEBY, A.J., F.R. FOULKES, *Fuel cell handbook*, Van Nostrand Reinhold, London
- APPLEBY, A.J., F.R. FOULKES, *Fuel Cell Seminar, Program and Abstracts, 25-28 november 1990*, Phoenix, 1990
- APPLEBY, A.J., D.G. LOVERING, *Progress in fuel cell commercialisation, 24-27 september 1991, London*, in: Journal of Power Sources, Vol. 37, nrs. 1 en 2, 1992

5.5 WATERSTOF ALS ENERGIEDRAGER

drs. P.H. van Dijkum

Aan het begin van de jaren zeventig is voor het eerst melding gemaakt van de mogelijkheden van waterstof als universele energiedrager. Waterstof kan voorzien in de energiebehoefte van veel verschillende gebruikers, zoals de industrie, het transport en de huishoudens. Het is duidelijk dat het gebruik van waterstof op grote schaal een ingrijpende herstructurering van de energievoorziening noodzakelijk maakt. De veranderingen zullen slechts geleidelijk kunnen worden ingevoerd. In Nederland worden omvangrijke volumestromen waterstof gebruikt, voornamelijk als grondstof. Mede daardoor wordt de waterstoftechnologie verder ontwikkeld; belangrijke technieken op het gebied van scheiding, compressie en transport komen aan de orde. Daarnaast zijn er in Nederland produktieprocessen waarbij waterstof als restprodukt beschikbaar komt. Het gebruik van restwaterstofstromen in bijvoorbeeld brandstofcellen biedt veel voordelen [2].

5.5.1 PRODUKTIE VAN WATERSTOF

Voor de produktie van waterstof kan uit een aantal trajecten worden gekozen. De meest gebruikte methode is het katalytisch omvormen van koolwaterstoffen (meestal methaan, aardgas) met stoom. In dit proces wordt het voedinggas eerst ontzwaveld, gemengd met stoom, en vervolgens bij hoge temperatuur over een katalysator geleid waarbij waterstof en koolmonoxyde ontstaan. Dit proces kan worden uitgevoerd met een energetisch rendement van 70%, waarbij waterstof ontstaat die voor 97 volumeprocenten (vol%) zuiver is. Er zijn reactoren met capaciteiten van 500 m^3 tot meer dan 50.000 m^3 per uur.

Een andere methode om waterstof te produceren, is het partieel oxyderen van steenkool (vergassing); het produktgas wordt vervolgens in een shiftstap in koolmonoxyde en waterstof omgezet. Een derde mogelijkheid is water met een vloeibare elektrolyt in elektrolyse brengen. In dit geval geven vaste elektrolyten, die worden bedreven bij hoge temperatuur, zicht op een hoog rendement.

Waterstof wordt onder andere als grondstof ingezet in de petrochemische industrie, in het bijzonder in de raffinage (98 vol% zuiver). Zuiverder vormen van waterstof worden toegepast bij vethardingsbedrijven (99,5 vol%) en bij de produktie van computerchips (99,99 vol%).

5.5.2 WATERSTOF ALS RESTPRODUKT

In de industrie worden omvangrijke hoeveelheden waterstof gebruikt en geproduceerd. In de opsomming hierna volgt een korte toelichting op een aantal produktieprocessen, waarbij waterstof van verschillende kwaliteit en bij een verschillend drukniveau vrijkomt.

– Chloorproduktie. Chloor is een produkt dat ontstaat door een verzadigde

zoutoplossing te elektrolyseren. Hierbij komt aan de anode het chloorgas en aan de kathode het waterstofgas vrij. Het waterstofgas is bijzonder zuiver (99 vol% of zuiverder) en kan daarom zonder problemen voor allerlei processen worden gebruikt.

- Styreenproduktie. Styreen wordt geproduceerd door ethylbenzeen te dehydrogeneren. Het afgas van dit proces bevat ongeveer 85 vol% waterstof.
- Cyclo-hexaanproduktie. Cyclo-hexaan wordt geproduceerd door benzeen katalytisch te hydrogeneren. De waterstof komt vrij in een relatief schone spoelgasstroom (75 vol%) bij een druk van 20 bar. In het algemeen vindt dit spoelgas zijn bestemming als brandstof.
- Ammoniakproduktie. Bij de produktie van ammoniak wordt aardgas met stoom omgevormd. Verontreinigingen worden hierbij continu uit de installatie gespoeld. Het spoelgas waarin nog een aanzienlijke hoeveelheid waterstof zit (60 vol% bij een druk van 120 bar), wordt in de meeste gevallen als brandstof gebruikt.
- Methanolproduktie. De produktie van methanol is gebaseerd op het katalytisch omvormen van synthesegas. Waterstof komt vrij bij het wegspoelen van restanten gas, zoals methaan. Het spoelgas bevat 57 vol% waterstof en wordt in het algemeen als brandstof gebruikt.
- De produktie van acetyleen, etheen, butadieen, formaldehyde, aceton, enz.
- De raffinage in de petrochemische industrie. Waterstof komt op verschillende manieren vrij en wordt onder andere via een waterstofpijpleiding in het Botlekgebied weer ingezet.

Een schatting van de omvang van de restwaterstofstromen is gegeven in tabel 5.4. Hergebruik van deze waterstofstromen als brandstof zou de consumptie van aardgas aanzienlijk kunnen verminderen.

raffinage	180
ammoniak	400
chloor	310
overige	240
totaal	1.130 (x 10^6 m^3/jaar)

Tabel 5.4 Schatting restwaterstofstromen in Nederland in 10^6 m^3 per jaar

Zuivering van reststromen

Voor het zuiveren van de vrijgekomen restgassen komen de volgende methoden in aanmerking. Deze methoden hebben hun sterke en zwakke punten. Bij het selecteren van de optimale waterstofscheidingstechniek spelen de karakteristieken van het voedinggas (scheidingscapaciteit, waterstofconcentratie, aanwezigheid van andere gassen), het scheidingsrendement, de kosten en de vereiste zuiverheid van de geproduceerde waterstof een belangrijke rol.

- Cryogene scheiding. De cryogene techniek maakt gebruik van het verschil in condensatietemperatuur van de gascomponenten in een mengsel. De kosten zijn sterk afhankelijk van de gewenste waterstofzuiverheid.
- Pressure Swing Adsorption (PSA). Deze techniek is gebaseerd op de selectieve

adsorptie van verontreinigingen in een kolom onder druk. De geadsorbeerde verontreinigingen desorberen wanneer de druk wordt afgelaten. Deze techniek kan alleen worden toegepast bij waterstofrijke gasstromen.
- Scheiding met behulp van polymeer- of palladium-membranen. Men maakt gebruik van de selectieve diffusie van waterstof door de membranen. Deze methode is ongevoelig voor de waterstofconcentratie in de afgassen.
- Scheiding met metaalhydride-slurries in ontwikkeling bij de Universiteit Twente in samenwerking met DSM. De te zuiveren afgassen worden in een absorptiekolom in contact gebracht met een slurrie waarin metaaldeeltjes zitten. Waterstof wordt in de vloeistof geabsorbeerd en reageert met het metaal tot een metaalhydride, terwijl de andere gassen dat niet doen. Het is een absorptie-desorptiecyclus via metaalhydriden. De warmte die vrijkomt bij het absorberen wordt afgevoerd of in de slurrie opgeslagen. Vervolgens wordt de slurrie naar een desorptiekolom gepompt, waar de waterstof weer wordt vrijgemaakt. Is de desorptie voltooid, dan wordt de slurrie teruggepompt naar de absorptiekolom.

In tabel 5.5 staat een overzicht van verschillende scheidingstechnieken.

Toepassingen van restwaterstofstromen

In de petrochemische industrie worden waterstofhoudende gassen afgefakkeld, gespuid of gebruikt als brandstof in tegendruk-stoomturbines of gasturbines. De restwaterstof wordt slechts voor een klein deel verhandeld. Het terugwinnen van waterstof uit deze gasstromen op industriële schaal kan economisch aantrekkelijk zijn. De waterstof wordt gecomprimeerd en met bijvoorbeeld 'tube-trailers' getransporteerd.

Brandstofcellen zijn bij uitstek geschikt de (rest)waterstof en lucht (zuurstof) elektrochemisch om te zetten in elektriciteit en warmte. De voordelen van brandstofcellen gevoed met reststromen waterstof boven brandstofcellen gevoed met aardgas zijn lagere investeringskosten (circa 60 – 70%), een kleinere storinggevoeligheid door de eenvoud van het systeem, een hoger energieconversierendement en een grotere levensduur van de brandstofcel.

De zuiverheid van reststromen waterstof varieert tussen 62 en 99,5 vol%. Er zijn ook grote verschillen in de druk van de beschikbare waterstof: tussen de 1 en 90 bar. Het merendeel van de waterstof wordt op dit moment ingezet als brandstof in ketels. Reststromen van goede kwaliteit worden in gebieden waar voorzieningen aanwezig zijn, verhandeld via pijpleidingen of tube-trailers. In tabel 5.6 zijn de reststromen waterstof opgenomen, die beschikbaar zijn om gebruikt te worden in energietechnieken. De vuistregel dat voor 1,2 kW elektrisch brandstofcelvermogen circa 1 m^3 waterstof nodig is, levert een elektrisch brandstofcelvermogen op dat hiermee kan worden gevoed.

	Cryogene scheiding	Pressure swing adsorption	Polymeer-membranen	Palladium-membranen	Metaalhydride-slurrie
principe	partiële condensatie bij lage temperaturen	selectieve adsorptie van verontreinigingen	verschil in permeabiliteit	selectieve diffusie van H_2	reversibele reactie van H_2 met metalen
operatie	continu	batch	continu	continu	continu
schaal	groot	groot	klein tot groot	klein tot gemiddeld	klein tot groot
type voeding (H_2-concentratie)	afgassen petrochemie en raffinage (30 – 80 %)	elk H_2-rijk gas (50 %) (> 50%)	raffinage-afgas en NH_3 (> 30 %)	elektrolytisch H_2 en H_2-flessengas	elke gasstroom met H_2
H_2-rendement	95 %	70 – 85 %	> 85 %	> 95 %	> 95 %
H_2-zuiverheid	90 – 95 %	95 – 98 % polybed > 99,9 %	92 – 98 %	> 99,99 %	> 99,9 %
selectiviteit ten opzichte van andere gassen	voorzuivering nodig voor CO_2, H_2S en H_2O	He, Ar, N_2 worden niet geadsorbeerd	He, CO_2 en H_2O kunnen ook diffunderen	S-houdende componenten en oververzadigde koolwaterstoffen verkleinen permeabiliteit	CO, O_2 en H_2O en S-houdende componenten vergiftigen metaalhydriden
opmerkingen	alleen toepasbaar bij zeer hoge debieten	– hoge investeringen – lage druk van bijproduktgas	– grote drukval – korte levensduur membraan	– zeer hoge investeringen – temperatuur > 350 °C	in ontwikkeling

Tabel 5.5 Overzicht van waterstofscheidingstechnieken

Bron: [1]

	Hoeveelheden (10^3 m^3/uur)	Elektrisch vermogen (MW)	Druk (bar)
chloorproducenten	30	35	1 – 1,5
overigen	95	115	1 – 90
totaal	125	150	

Tabel 5.6 Reststroom waterstof en potentieel vermogen aan brandstofcellen in Nederland

Onlangs zijn voor twee soorten brandstofcellen (de PAFC en de MCFC) de break-even-investeringskosten bepaald [2]. Gekozen werd voor de vermogenscategorieën 250 kW, 2 MW en 10 MW. De brandstofcel concurreert met gasturbines in de vermogensrange van 2 en 10 MW en met de gasmotor bij vermogens kleiner dan 1 – 2 MW. In tabel 5.7 zijn de investeringskosten per kW brandstofcelvermogen voor de PAFC en de MCFC opgenomen.

	PAFC	MCFC
250 kW	1.800	2.000
2 MW	3.200	3.400
10 MW	2.050	2.200

Bron: [2]

Tabel 5.7 Break-even-investeringskosten PAFC en MCFC (f/kW) in verschillende vermogenscategorieën

Het marktsegment van 2 MW blijkt voor de brandstofcellen het aantrekkelijkst. De toegestane investeringskosten liggen voor de MCFC iets hoger dan voor de PAFC. In dit onderzoek is geen voordeel toegekend aan de hogere kwaliteit van de restwarmte van de MCFC. Een speciaal punt bij de MCFC-techniek is de CO_2-behoefte aan de kathodezijde. Alleen in situaties waarin naast de reststroom waterstof ook een reststroom CO_2 gratis beschikbaar is, is de MCFC-techniek voordeliger dan de PAFC (zie tabel 5.7).

De reststroom waterstof in Nederland maakt dus een omvangrijke inzet van brandstofcellen mogelijk. Of dit uiteindelijk ook zal gebeuren, is onder meer afhankelijk van:
- de kwaliteit, de kwantiteit en de drukken van de reststroom waterstof en de aanwezigheid van andere stoffen zoals CO_2;
- het aantal draaiuren waarmee een brandstofcellensysteem kracht en warmte kan leveren;
- de investeringskosten en de bedrijfskosten (kostprijs van de restroom waterstof) in vergelijking met de alternatieven;
- milieu-maatregelen, zoals bijvoorbeeld een CO_2-heffing.

Literatuur

[1] BUSSMANN, P.J.T., e.a., *Levering en zuivering van waterstof in één proces*, in: PolyTechnisch Tijdschrift, nr. 4, 1991

[2] *Utilization potential of secundary hydrogen gas in industry as fuel for fuel cell systems in the Netherlands*, Tebodin Consultants in opdracht van Novem, 1991

[3] DIJKUM, P.H. VAN, *Overzicht brandstofcelontwikkeling*, artikel naar aanleiding van een voordracht tijdens de studiedag Brandstofcellen in energieconversiesystemen op 4 december 1991, Novem, 1991

5.6 THERMIONISCHE ENERGIEOMZETTING

dr.ir. L.R. Wolff

5.6.1 INLEIDING

Met een thermionische energieomzetter (TEO) wordt warmte direct (dat wil zeggen zonder bewegende delen) omgezet in elektriciteit. Een TEO is in principe een diode waarvan één elektrode zo hoog wordt verhit (1.450 °C) dat zij thermisch elektronen gaat emitteren. Deze elektronen worden vervolgens ingevangen door een gekoelde tegenelektrode, die op 600 °C wordt gehouden. Hierdoor ontstaat een potentiaalverschil dat uitwendig kan worden belast.

Nu zal een TEO, wanneer hij in vacuüm wordt bedreven, alleen dàn elektriciteit leveren wanneer de afstand tussen de elektroden niet groter is dan ongeveer 5 micron. Dit is een gevolg van het zogenaamde 'ruimteladingseffect'. Een zo geringe elektrode-afstand levert constructieve problemen op. Vandaar dat men in de praktijk meestal cesium in de ruimte tussen de elektroden brengt. Cesium is het element met de laagste ionisatie-energie van alle elementen. Daardoor wordt in de TEO een cesium-plasma gevormd. De positieve ionen van dit plasma neutraliseren de negatieve lading van de ruimteladingswolk. Hierdoor kan de elektrode-afstand tot ongeveer 0,5 mm worden vergroot zonder dat dit nadelige gevolgen heeft voor de stroomdichtheid. Het principe van de TEO wordt geïllustreerd in fig. 5.5. De TEO is een gelijkstroombron met een laag potentiaalverschil tussen de elektroden: 0,5 V. De stroomdichtheid is daarentegen groot: 10 A/cm^2. Door het ontbreken van bewegende delen heeft de TEO het voordeel dat hij geen lawaai maakt en dat hij niet onderhoudgevoelig is. Het elektrisch rendement is (nog) laag: ongeveer 10%, maar toepassing van de TEO als voorschakelsysteem leidt tot een interessante rendementsverbetering.

De TEO is reeds met succes toegepast in de ruimtevaart. In de voormalige Sovjet-Unie zijn daartoe thermionische kernreactoren ontwikkeld. Daarin heeft met name het in Obninsk gevestigde Institute of Physics and Power Engineering (IPPE) een belangrijk aandeel gehad. Twee van deze TOPAZ-systemen zijn in KOSMOS-satellieten ingebouwd en gelanceerd. Zij hebben de satellieten van stroom voorzien

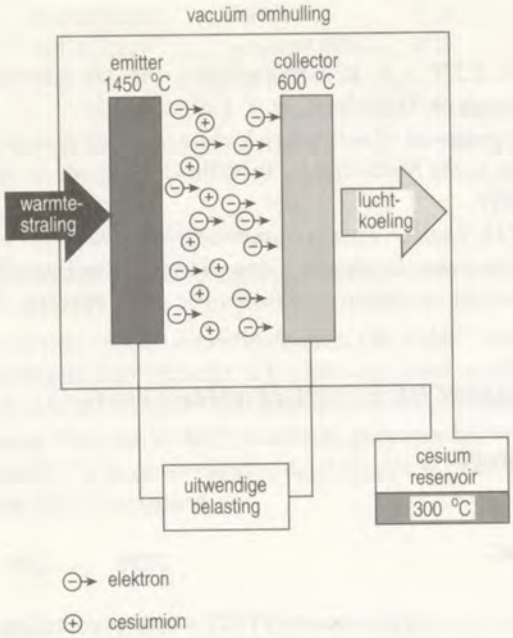


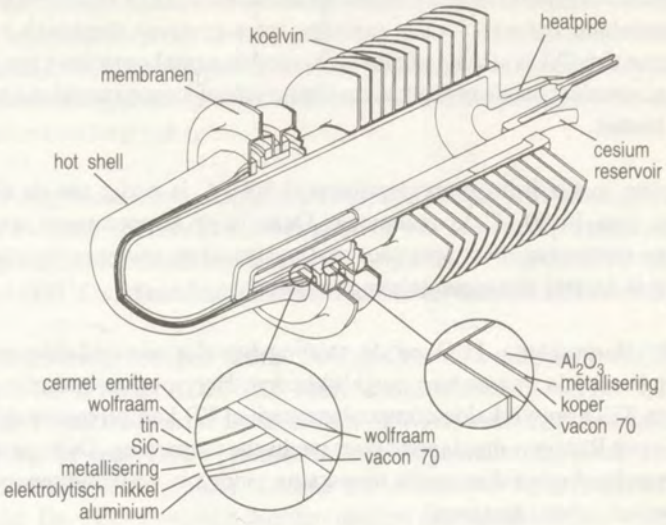
Fig. 5.5 Principe van een thermionische energieomzetter (TEO)

en de beide missies werden met succes voltooid. Toepassing van TEO-systemen in de ruimtevaart is vooral op zijn plaats indien er vermogens van enkele kW worden gevraagd. Men moet daarbij denken aan radarsatellieten en relais-zenders, maar ook aan langdurige, bemande missies, zoals een ruimtestation, een maanbasis of een Mars-missie. Daar hebben TEO-systemen duidelijke (gewichts)voordelen boven bijvoorbeeld fotovoltaïsche systemen.
Thans wordt ook met kracht gewerkt aan toepassing van TEO op aarde. Daarbij wordt in plaats van een kernreactor vlamverhitting ofwel zonne-energie gebruikt. In Nederland is hiervoor baanbrekend werk verricht aan de Technische Universiteit Eindhoven. Daar werd onder andere een vlamverhitte TEO met een heatpipe-collector ontwikkeld [1] (zie fig. 5.6).

Bij aardse toepassing gebruikt men lagere elektrodetemperaturen dan in de ruimtevaart. In de ruimtevaart moet de afvalwarmte namelijk worden weggestraald en dat gaat beter naarmate de temperatuur hoger is (de benodigde radiator is kleiner en dat betekent winst in massa). Een ruimtevaartsysteem werkt dan ook bij elektrodetemperaturen van 1.800 °C voor de emitter en 1.000 °C voor de collector. Daarbij treedt wel stralingsbelasting van de materialen op. Daar staat tegenover dat bij vlamverhitting van de TEO weer specifieke corrosieproblemen optreden.

5.6.2 TECHNISCH POTENTIEEL

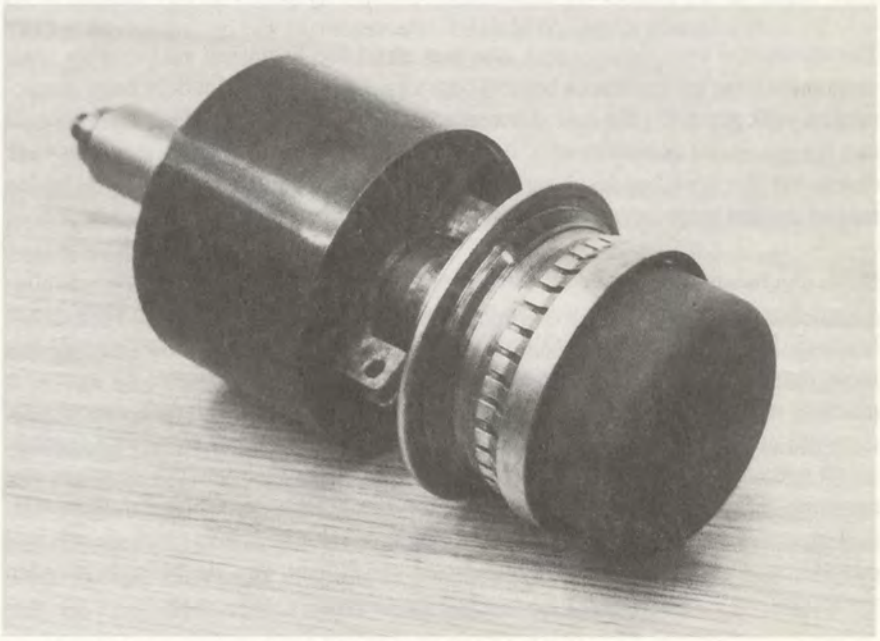
Vlamverhitte TEO-systemen zijn kleine apparaten (orde van grootte van 10 cm diameter en 30 cm lang) met een vermogen in de orde van grootte van 100 W_e. In



Bron:
[1]

Fig. 5.6 Vlamverhitte TEO met heatpipe-collector

fig. 5.7 wordt een voorbeeld van een dergelijke vlamverhitte TEO getoond, die het resultaat is van een gezamenlijke ontwikkeling van het IPPE in Obninsk en het in Eindhoven gevestigde bedrijf ADENCO.



Bron:
ADENCO

Fig. 5.7 Prototype van een vlamverhitte TEO van IPPE en ADENCO

Thermionische energieomzetters worden als modulen in TEO-systemen toegepast. Door de modulaire opbouw kan in principe ieder gewenst elektrisch vermogen worden opgewekt. Dit is slechts afhankelijk van het aantal omzetters per systeem. Dit heeft het voordeel dat de omzetters op kleine schaal kunnen worden ontwikkeld tegen lage kosten.

TEO's werken met vrij hoge temperaturen: 1.800 °C is nodig om de elektrodetemperatuur van 1.450 °C te realiseren. Deze hoge temperaturen worden bij vlamverhitte omzetters door speciale stralingsbranders teweeggebracht. Iedere omzetter heeft daarbij zijn eigen stralingsbrander.

De voor de vlamverhitte TEO en de stralingsbrander ontwikkelde materialen hebben nog een scala van andere mogelijkheden. Het voor de omhulling van de vlamverhitte TEO ontwikkelde composietmateriaal [2] kan bijvoorbeeld worden toegepast in een Röntgen-draaianode voor medische toepassing. De hoge-temperatuurbrandertechnologie zal mogelijk toepassing vinden in verbrandingsovens voor stabiel chemisch afval (dioxinen).

Er zijn dus meer afgeleide toepassingen van deze hoge-temperatuurtechnologie te verwachten. Daarnaast vereisen de hoge temperaturen een rigoreuze aanpak van het NO_x-probleem. Met een aantal gerichte maatregelen is het zonder meer mogelijk de NO_x-uitstoot beneden het wettelijk vereiste niveau te houden. Deze techniek zal zeker een bredere toepassing krijgen dan alleen thermionische energieomzetting.

5.6.3 TOEPASSING VAN THERMIONISCHE ENERGIEOMZETTERS

Thermionische energieomzetters zijn niet altijd toe te passen op plaatsen waar voldoende hoge temperaturen beschikbaar zijn. Enerzijds omdat deze hoge temperaturen vaak gepaard gaan met zeer corrosieve omstandigheden (denk bijvoorbeeld aan hoogovens of cementovens). Anderzijds omdat deze hoge temperaturen vaak essentieel zijn voor het desbetreffende proces. Toepassing van TEO's zou leiden tot een onaanvaardbare verlaging van de procestemperatuur.

In het algemeen is men in de industrie niet bereid de vaak zeer kostbare installaties waarin hoge-temperatuurprocessen plaatsvinden, te modificeren door TEO's in te bouwen. Het is veel beter TEO's vooral daar toe te passen waar warmte met een hoge temperatuur wordt gebruikt voor lage-temperatuurprocessen. Er zijn vele plaatsen waar dit het geval is. Zo kan men denken aan een voorschakelsysteem voor conventionele elektriciteitscentrales. In een met stoomturbines uitgeruste centrale wordt namelijk fossiele brandstof bij hoge temperatuur verbrand om zo stoom van maximaal 550 °C te maken. In het temperatuurtraject tussen verbrandingstemperatuur en stoomgeneratietemperatuur kan men met TEO-systemen extra elektriciteit opwekken. Op deze wijze kan het totaal rendement van de centrale worden verhoogd.

Er zijn nog legio andere plaatsen waar men TEO's met succes zou kunnen toepas-

sen. In de procesindustrie wordt op veel plaatsen hoge-temperatuurwarmte gebruikt voor lage-temperatuurprocessen. Hierbij kan worden gedacht aan de voedingsmiddelenindustrie, maar ook aan de chemische industrie. Vooral elektrolyseprocessen zijn een aantrekkelijke doelgroep, omdat daar onmiddellijk emplooi is voor de grote gelijkstroom van laag voltage.

Een ander uitgebreid toepassingsgebied zijn de centrale verwarmingsketels. Dit is het meest extreme voorbeeld van het gebruik van hoge-temperatuurwarmte voor lage-temperatuurprocessen. Immers, hier wordt fossiele brandstof bij temperaturen boven de 1.000 °C verbrand om daarmee lucht te verwarmen tot kamertemperatuur.

Het in Eindhoven gevestigde bedrijf Energy Conversion Systems (ECS, een joint venture van het IPPE en ADENCO) heeft in samenwerking met het in Driebergen gevestigde Projektbureau Warmte/Kracht (PW/K) een marktstudie uitgevoerd waarin de markt voor TEO-systemen in kaart is gebracht. In eerste instantie gaat het om de Nederlandse markt. Daarna zal echter ook de wereldmarkt worden onderzocht. De TEO-systemen worden daarbij gepropageerd als warmte-krachtsystemen gericht op de warmtebehoefte. Dit in tegenstelling tot conventionele warmte-krachtsystemen, die vrijwel zonder uitzondering op de elektriciteitsbehoefte gericht zijn.

Door de flexibiliteit van de modulaire TEO-systemen is het eenvoudig in te spelen op de warmtebehoefte van de markt. De warmtemarkt is vele malen groter dan de elektriciteitsmarkt. De TEO-systemen vormen door hun geheel andere doelgroep geen bedreiging voor andere warmte-krachtsystemen.

De resultaten van de eerder genoemde marktstudie geven aan dat de markt voor TEO in Nederland op een vermogen van 4.910 MW_e wordt geschat [3].

5.6.4 CONFIGURATIE VAN TEO-SYSTEMEN

Momenteel wordt door ECS gewerkt aan vier TEO-systemen: TECTEM®, TEC-BURNER® GTB-TECTEM® en SUNTEC® (deze vier aanduidingen zijn geregistreerde handelsnamen).

De TECTEM is een verwarmingsketel, uitgerust met een serie thermionische energieomzetters. Gedacht wordt aan een ketel met een thermisch vermogen van 5 kW en een elektrisch vermogen van bijvoorbeeld 0,5 kW. Dergelijke ketels zouden in vrijwel ieder woonhuis kunnen worden toegepast. Het betreft hier een combiketel (bestemd voor huisverwarming en warm-watervoorziening) uitgerust met een indirecte boiler van 200 liter. Hierdoor kan men met een beperkt thermisch vermogen volstaan. Tijdens een strenge vorstperiode kan een brander worden bijgeschakeld. Ondanks het geringe TEO-rendement is deze optie economisch aantrekkelijk. Men moet rekening houden met een terugverdienperiode van vier jaar. De totale Nederlandse markt wordt geschat op 3.000 MW_e.

Een grotere uitvoering van de TECTEM zou als warmte-krachtsysteem op veel

plaatsen kunnen worden toegepast. Men kan daarbij denken aan de utiliteitsbouw, zwembaden, ziekenhuizen, kantoorgebouwen, laboratoria. De grotere TECTEM heeft bestaansrecht waar het benodigde thermisch vermogen te klein is voor toepassing van conventionele warmte-krachtsystemen, zoals gasmotoren. Omdat de TEO geen bewegende delen heeft, vormt het onderhoud geen belemmering voor economische toepassing, zoals bij conventionele warmte-krachtsystemen. De totale Nederlandse markt wordt geschat op 720 MW_e.

De eerste doelgroep van de TECTEM is op dit moment de glastuinbouw in het algemeen en de rozenkwekers in het bijzonder. Bij het onder glas kweken van rozen is niet alleen veel warmte nodig, maar ook elektriciteit voor het kunstmatig verlengen van de dagen, zodat ook in de wintertijd rozen kunnen worden geleverd. Het is daarnaast voor deze doelgroep aantrekkelijk het systeem zo te ontwikkelen dat de afgassen kunnen worden gebruikt voor CO_2-bemesting. De te leveren elektriciteit zal via een opslagsysteem (accu's) en een omvormsysteem als wisselstroom van 220 V en 50 Hz beschikbaar zijn. Een variant van de TECTEM voor de glastuinbouw wordt GTB-TECTEM genoemd. Dit systeem kan tevens stoom produceren voor het steriliseren van de grond. Aangezien de GTB-TECTEM circa 2,3 keer zoveel elektriciteit produceert als in een glastuinbouwbedrijf gemiddeld wordt gebruikt, is teruglevering van de elektriciteit aan het net een voorwaarde voor economische toepassing. De totale Nederlandse markt voor de GTB-TECTEM wordt geschat op 1.015 MW_e.

De TECBURNER is een industriële brander, uitgerust met een serie TEO's. Het is de bedoeling dat deze brander zich verder niet of nauwelijks van conventionele branders onderscheidt. Op die manier kan een conventionele brander eenvoudig tegen een thermionische brander worden uitgewisseld, wanneer hij aan vervanging toe is. Ook hier hebben we te maken met een op ruime schaal inzetbaar warmte-krachtsysteem dat zich van de conventionele systemen onderscheidt omdat het optimaal is toegesneden op de warmtevraag. Ook voor de TECBURNER geldt dat hij is opgebouwd uit een aantal TEO-modulen die elk voorzien zijn van hun individuele stralingsbrander.

Een aantal TECBURNERs zal in de praktijk net zoals bij conventionele industriële branders een aanjager delen. Deze aanjager voorziet de branders van gecomprimeerde lucht. Ook zullen diezelfde branders een gemeenschappelijk besturingsysteem hebben dat onder andere de opgewekte stroom conditioneert en desgewenst omzet in wisselstroom van de gewenste spanning. Eventueel kan ook een opslagsysteem (accu's) deel uitmaken van het systeem, maar dit zal economisch vaak weinig aantrekkelijk zijn.

Omdat bij de bouw van de TECTEM en de TECBURNER dezelfde modulen (TEO en stralingsbrander) worden gebruikt, lenen deze modulen zich bij uitstek voor massaproduktie. De Nederlandse markt voor de TECBURNER wordt geschat op 175 MW_e.

De SUNTEC is het vierde TEO-systeem dat wordt ontwikkeld. Het ontleent de warmte aan de zon. Commerciële toepassing in Nederland is niet goed denkbaar,

maar in warmere streken zal bestaansrecht kunnen blijken. De SUNTEC kan een stand-alone systeem zijn waarbij een parabolische spiegel de zonnewarmte concentreert op één of meer TEO's in een zogenaamde 'cavity'. Daarmee kan een bescheiden hoeveelheid elektriciteit worden opgewekt op plaatsen waar nog geen elektriciteitsnet voorhanden is. Naast deze kleine SUNTEC wordt ook aan een grotere SUNTEC gewerkt.

Grotere SUNTEC-systemen zullen worden voorgeschakeld in zogenaamde zonnetorensystemen (zie fig. 5.8). Bij een zonnetorensysteem wordt door een groot aantal vlakke spiegels die de zon volgen, de zonnestraling gereflecteerd naar een grote parabolische spiegel. Deze centreert op zijn beurt de zonnestraling naar een zonneoven die zich boven op een zonnetoren bevindt. Waar in conventionele systemen met deze zonnewarmte direct stoom wordt opgewekt die een generator aandrijft, kan een serie SUNTECs dienen als voorschakelsysteem en zorgen voor extra elektriciteit. Hoe deze elektriciteit het best kan worden aangewend, is nog in onderzoek. Er bestaan Italiaanse plannen om met deze elektriciteit via elektrolyse waterstof en zuurstof te produceren. Bij afwezigheid van zon zouden deze waterstof en zuurstof dan in de zonneoven kunnen worden verbrand om toch voor elektriciteit te zorgen. Zowel de technische als de economische haalbaarheid dienen echter nog te worden aangetoond. Er bestaat belangstelling voor de SUNTEC-ontwikkeling, met name in de voormalige Sovjet-Unie, maar ook in Israël en Californië.

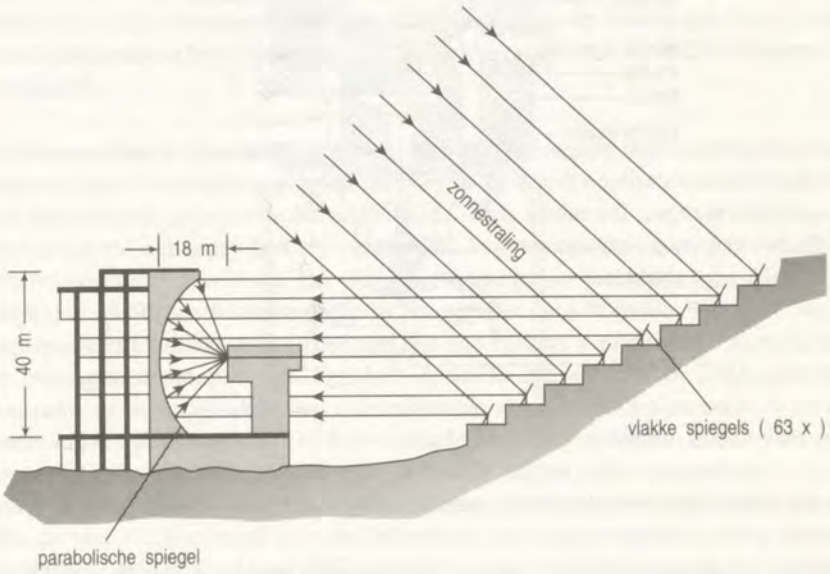


Fig. 5.8 Zonnetorensysteem in Odeillo in de Franse Pyreneeën

5.6.5 *RIJPHEID VAN HET SYSTEEM*

De hiervoor beschreven TEO-systemen dienen nog ontworpen, geconstrueerd, beproefd en gedemonstreerd te worden. Er is op dit moment een aantal prototypen van de vlamverhitte TEO ontworpen, gebouwd en beproefd, en er is zelfs een demonstratiemodel (zie fig. 5.9). Het ligt in de bedoeling dit model bij diverse gelegenheden, zoals internationale exposities en congressen, te demonstreren. Een voorloper van de TECTEM kwam in januari 1992 gereed. Hierin werkt een aantal TEO's in serie. Op dit moment doet men met deze systemen ervaring op.

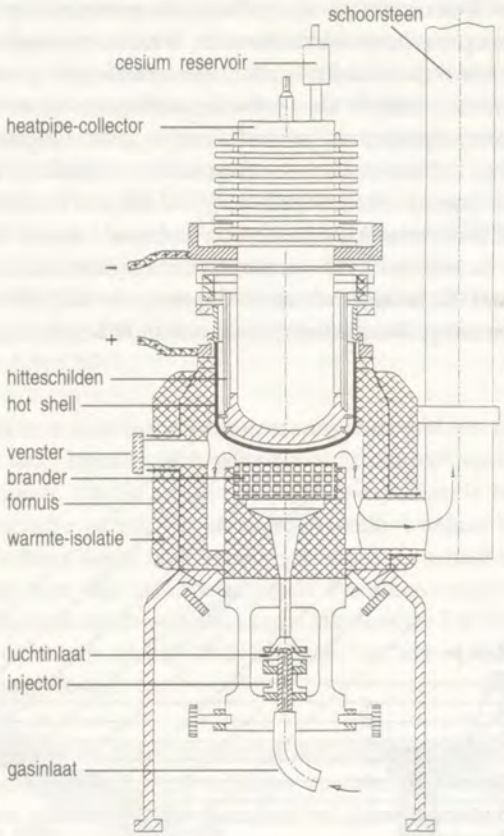


Fig. 5.9 Demonstratiemodel van een vlamverhitte TEO

Volgens de plannen van ECS zal in de komende jaren een aantal TECTEM-, GTB-TECTEM en TECBURNER-systemen worden ontworpen en gebouwd. Deze systemen zullen eind 1993 gereed zijn en in de industrie kunnen worden gedemonstreerd. Daartoe zullen met de huidige technologie zo'n duizend vlamverhitte TEO's annex stralingsbranders worden vervaardigd, die in deze systemen zullen worden verwerkt. Naast de vlamverhitte TEO's zijn kleinschalige SUNTECs ontworpen en gebouwd. Deze moeten nog worden getest.

Tegelijk zal een massaproduktietechniek worden ontwikkeld waardoor de produktiekosten van de TEO's op het gewenste niveau zullen worden gebracht. In opdracht van de Novem is een haalbaarheidstudie gedaan waarvan een kostencalculatie deel uitmaakt [4]. De resultaten zijn bemoedigend.

5.6.6 RENDEMENTSVERWACHTING

Het elektrisch rendement van de vlamverhitte TEO, werkend bij een emittertemperatuur van 1.450 °C ligt momenteel op 10%. Dit elektrisch rendement is gedefinieerd als het geproduceerd elektrisch vermogen gedeeld door het opgenomen thermisch vermogen. Het Carnot-rendement van een cyclisch proces werkend tussen 1.450 °C en 600 °C ligt op 50%. Er is dus nog ruimte voor rendementsverbetering. Uit laboratoriumexperimenten blijkt dat een rendement van 20% technisch haalbaar is.

5.6.7 KOSTENASPECTEN

Hoewel een verdere verbetering van het elektrisch rendement zeker zal worden nagestreefd, is het economisch rendement veel belangrijker. Het thermionische systeem vergt in vergelijking met het conventionele systeem een extra investering. Deze extra investering vormt de basis voor de specifieke kosten van het geïnstalleerd elektrisch vermogen. Deze specifieke kosten en de kosten van de geproduceerde electriciteit bepalen of het economisch verantwoord is een TEO-systeem te installeren.

Het is vooralsnog speculatief de kosten van TEO-systemen te kwantificeren, want deze systemen moeten nog worden ontworpen. Er wordt op dit moment in opdracht van Novem een systeemstudie uitgevoerd. Deze studie zal naar verwachting de ontwerpgereedschappen leveren voor de TEO-systemen. Ook de nog te ontwikkelen massaproduktietechniek zal van doorslaggevende betekenis zijn. De eerder vermelde haalbaarheidstudie biedt in dit opzicht enig houvast. Wanneer we de geprojecteerde kosten vergelijken met die van eerdere Amerikaanse studies, zien de resultaten er hoopvol uit. Een van de sterke punten van de TEO-systemen, wanneer we ze vergelijken met conventionele warmte-krachtsystemen, is de extreem korte installatieduur. Dit komt doordat de TEO-systemen, anders dan conventionele warmte-krachtsystemen, optimaal zullen zijn toegesneden op de warmtevraag. Dit elimineert de vaak zeer tijdrovende procedure van het integreren van de restwarmtestroom met de industriële processen waarvoor deze warmte bestemd is. In het geval van TEO-systemen zal de installatieduur niet veel langer zijn dan die van de conventionele ketels dan wel branders die door de TEO-systemen worden vervangen. Hierdoor wordt belangrijk kapitaalverlies tijdens de installatieperiode vermeden.

Literatuur

[1] WOLFF, L.R., W.B. VELTKAMP, *Warmte/kracht-installatie op basis van thermionische energieomzetting*, in: Energie & Milieutechnologie, pp. 22-25, 1990

[2] WOLFF, L.R., e.a., *Thermal conductivity of a W-TiN-SiC hot shell emitter for a thermionic energy converter*, in: Thin Solid Films, Vol. 198, pp. 109-114, 1991

[3] KLAUW, TH.J.B. VAN DER, *Marktverkenning thermionische energieomzetters*, rapport van het Projektbureau Warmte/Kracht (PW/K), 1991

[4] WOLFF, L.R., *Kostenaspecten bij massaproduktie van thermionische energieomzetters*, rapport nr 90.06 van CEMACON in opdracht van Novem, 1990

5.7 MAGNETO-HYDRO-DYNAMISCHE ENERGIECONVERSIE

ir. R.A. van der Laken

5.7.1 INLEIDING

Magneto-Hydro-Dynamica (MHD) is een geavanceerd energieconversieprincipe. Bij elektriciteitsproduktie worden hiervan aanzienlijk hogere conversierendementen verwacht dan van de in gebruik zijnde systemen. In een aantal landen wordt de MHD-conversie ontwikkeld en in de afgelopen tientallen jaren is aanzienlijke vooruitgang geboekt. Inmiddels is vast komen te staan dat tenminste één MHD-systeem, het 'open MHD-systeem', zeer geschikt is voor het gebruik van poederkool [1]. De bedrijfscondities bij MHD-energieconversie zijn echter zeer zwaar, en er moet nog veel aan componentenontwikkeling worden gedaan om de vereiste levensduur en bedrijfszekerheid voor elektriciteitscentrales te bereiken. Hierna wordt een kort overzicht gegeven van de stand van de ontwikkeling van dit systeem, de toekomstmogelijkheden en de vereiste inspanningen inzake onderzoek en ontwikkeling.

5.7.2 WERKINGSPRINCIPE

Als een elektrisch geleidend medium (gas of vloeistof) met een snelheid v door een magneetveld B stroomt, ontstaat er in dat medium een elektrisch veld E in een richting loodrecht op de richtingen van de snelheid en het magneetveld (zie fig. 5.10). Dit elektrisch veld heeft een potentiaalverschil tot gevolg. Door middel van elektroden aan weerszijden van de gasstroom (de anode en de kathode) kan deze spanningsbron worden aangesloten op een uitwendige weerstand, waardoor dan een stroom gaat lopen. Op deze wijze kan een aanzienlijk vermogen in een klein volume (100 kW per liter gas) worden opgewekt. Er zijn drie MHD-systemen in ontwikkeling: het open systeem, het gesloten systeem en het vloeibaar-metaalsysteem. Ze worden hierna kort besproken.

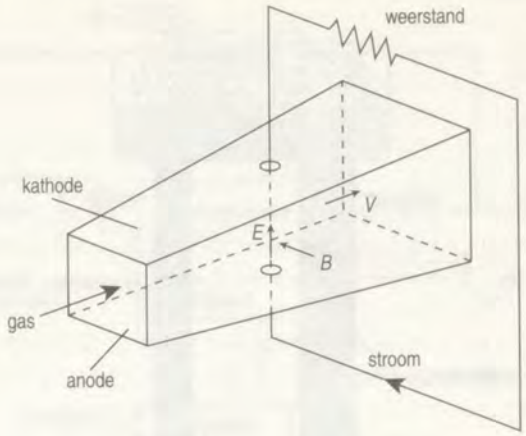


Fig. 5.10 Werkingsprincipe MHD

Open systeem

In het open systeem worden de rookgassen van een fossiele brandstof door een kanaal (de generator) geleid, waarvan twee tegenover elkaar liggende wanden zijn voorzien van elektroden. Het rookgas wordt met een geringe dosis kalium, dat bij de aangegeven temperaturen volledig wordt geïoniseerd, elektrisch geleidend gemaakt. De procescondities zijn globaal:

- temperatuur in/uit: 2.500/2.000 K;
- druk in/uit: 8/1 bar;
- snelheid: 1.000 m/s;
- magneetveld: 5 tesla.

Gesloten systeem

In een gesloten systeem wordt een edelgas (helium of argon) gebruikt. Het gas wordt na de generator weer op druk gebracht en verhit in een warmtewisselaar. De bedrijfscondities zijn:

- temperatuur in/uit: 2.000/1.200 K;
- druk in/uit: 6/1 bar;
- snelheid: 1.000 m/s;
- magneetveld: groter dan 5 tesla.

Vloeibaar-metaalsysteem

Het hoge elektrische geleidingsvermogen van vloeibare metalen maakt het reeds bij kamertemperatuur mogelijk elektriciteit op te wekken met een in verhouding laag magneetveld. Het principe wordt op ruime schaal als stromingsmeter voor vloeibare metalen toegepast. Het is thermodynamisch niet mogelijk de warmte van vloeistoffen langs deze weg om te zetten in elektriciteit. Het is dus nodig het vloeibare metaal te mengen met gas dat via een of andere bron wordt verhit. Er zijn veel schakelingen mogelijk om de toegevoerde warmte in dit systeem om te zetten in elektriciteit (bijvoorbeeld fig. 5.11). Naast fossiele brandstoffen komen ook

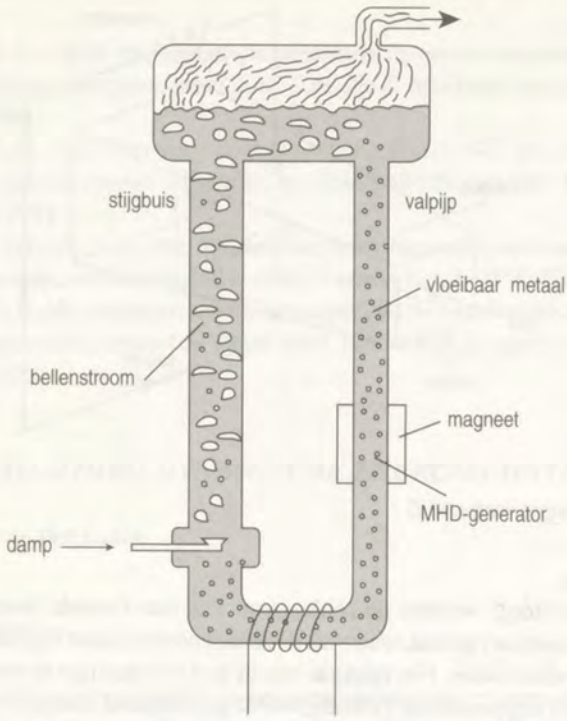


Fig. 5.11 Vloeibaar-metaalsysteem

zonne-energie en afvalwarmte van processen als warmtebron in aanmerking. De bedrijfscondities variëren sterk:
- temperatuur: 400 tot 900 K;
- druk: 1 tot 4 bar;
- snelheid: 10 tot 100 m/s;
- magneetveld: 0,01 tot 0,1 tesla.

In het geval van het open en het gesloten MHD-systeem is de uitlaattemperatuur van het gas nog zo hoog dat naschakeling van een stoomsysteem nodig is voor een hoog rendement. Deze MHD-systemen zijn dus typisch voorschakelsystemen en in dit opzicht vergelijkbaar met gasturbines, hoge-temperatuurbrandstofcellen en TEO's (zie fig. 5.12 en 5.13).

5.7.3 STAND VAN ZAKEN

Het kolengestookte open MHD-systeem kreeg tot nu toe de meeste aandacht. Van het belangrijkste onderdeel van het systeem, de generator zelf, zijn wereldwijd zo'n twintig testinstallaties gebouwd en in bedrijf. De meeste generatoren hebben een thermisch vermogen van 1 – 5 MW en zijn hoofdzakelijk bestemd voor het onderzoek van fysische en elektrochemische verschijnselen. In de VS en de voormalige Sovjet-Unie zijn grote testinstallaties in bedrijf (50 – 100 MW_t), die geschikt zijn

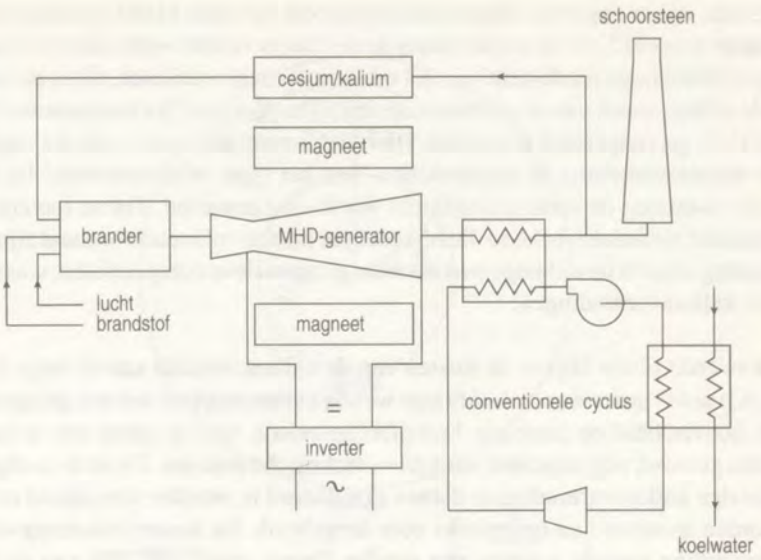


Fig. 5.12 Open MHD-systeem

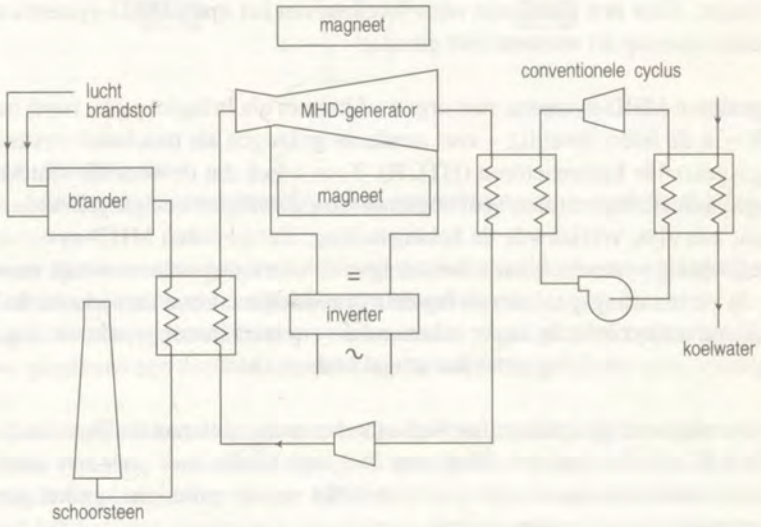


Fig. 5.13 Gesloten MHD-systeem

voor continu-bedrijf en waarmee dus levensduurproeven (kunnen) worden uitgevoerd.

De levensduur van de anode- en kathode-wand van de generator is nog steeds het knelpunt. Op grond van in de VS uitgevoerde proeven wordt op dit moment van nieuwe generatoren een levensduur van ten minste 5.000 uur verwacht. Velen achten dit nog onvoldoende, omdat deze levensduur twee maal per jaar een onderhoudstop van de centrale van verschillende weken noodzakelijk zou maken.

Daarnaast zijn er nog twee andere onderdelen van het open MHD-systeem die veel aandacht vragen [2]. In de eerste plaats de verhitters van de verbrandingslucht. Om het potentieel hoge rendement van het open systeem te realiseren, dient de warmte van de uitlaatgassen van de generator op een zo hoog mogelijke temperatuur (1.700 à 1.800 K) gerecupereerd te worden. Hiervoor komen alleen keramische regeneratieve warmtewisselaars in aanmerking – van het type 'windverhitters' bij hoogovens – waarmee de verbrandingslucht wordt voorgewarmd. Tot nu toe zijn geen keramische materialen bekend die bij redelijke kosten voldoende bestand zijn tegen aantasting door in de uitlaatgassen aanwezige agressieve componenten, waaronder vooral kaliumverbindingen.

In de tweede plaats blijken de kosten van de kalium-injectie aan de hoge kant te zijn. Alhoewel procentueel slechts zeer weinig kalium hoeft te worden geïnjecteerd, is de hoeveelheid op jaarbasis bedrijfseconomisch veel te groot om te kunnen worden geloosd, nog afgezien van milieu-technische redenen. De in de rookgassen aanwezige kaliumverbindingen dienen dus daaruit te worden verwijderd en weer te worden gezuiverd en opgewerkt voor hergebruik. De kosten van terugwinning en opwerking kunnen volgens een recente Duitse studie tot 20% van de kWh-produktiekosten oplopen [3]. Een technische doorbraak op één van de genoemde punten valt niet te verwachten. Hoogstens biedt de vooruitgang op het gebied van keramische materialen uitzicht op verbeterde generatoren en goedkopere warmtewisselaars. Voor een autonome ontwikkeling van het open MHD-systeem zijn de vooruitzichten op dit moment niet gunstig.

Het gesloten MHD-systeem, met argon of helium als kringloopgas, heeft aanvankelijk – in de jaren zeventig – veel aandacht gekregen als naschakel-systeem van HT-gasgekoelde kernreactoren (HTGR). Toen bleek dat de voor dit systeem vereiste gas-inlaattemperaturen veel hoger waren dan waartoe een gasgekoelde reactor in staat zou zijn, verflauwde de belangstelling. Het gesloten MHD-systeem werd als zelfstandig systeem, waarin het edelgas in warmtewisselaars wordt verwarmd door de verbrandingsgassen van fossiele brandstoffen, circa tien jaar in de VS en Nederland onderzocht. In Japan is het onderwerp iets later opgepakt en daar wordt dit systeem nog steeds op redelijke schaal onderzocht.

Speciale vermelding verdient het Nederlandse onderzoek aan de Technische Universiteit Eindhoven onder leiding van Rietjens, omdat hier voor het eerst werd aangetoond dat een aanzienlijk deel (tot 20%) van de enthalpie van het argongas kan worden omgezet in elektriciteit.

De technische mogelijkheden om gesloten MHD-generatoren te maken zijn aanwezig. De kosten van de keramische warmtewisselaars die het volledige thermische vermogen aan de generator moeten leveren, blijven ook voor dit systeem een probleem. Die kosten hangen samen met de omvang van de keramische warmtewisselaars. Bij het open systeem hoeven de warmtewisselaars alleen de verbrandingslucht voor te warmen.

Recent Japans onderzoek en Nederlandse studies geven sterke indicaties dat een ander type generator, de disk-generator (zie fig. 5.14), een beter thermisch rende-

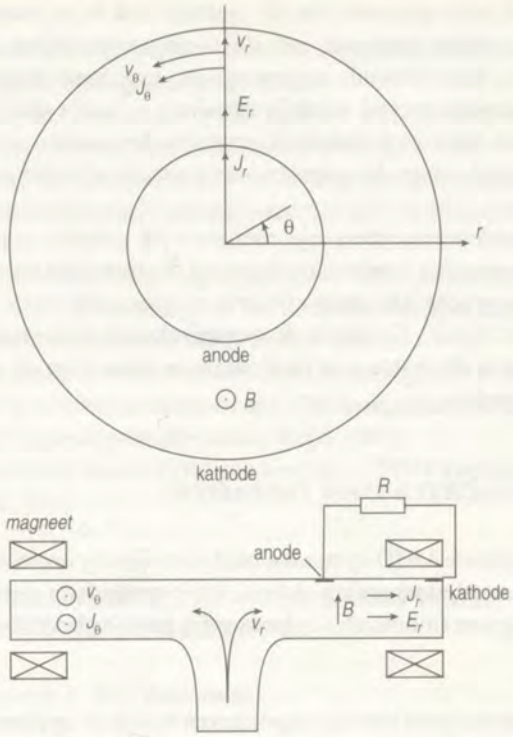


Fig. 5.14 Disk-generator
Elektrische stroomdichtheden J_r en J_θ, gassnelheden v_r en v_θ en elektrisch veld E_r.

ment kan opleveren (mogelijk tot 40%) en een aanzienlijke kostenverlaging van de magneten en het vermogensregelsysteem mogelijk maakt.
Het lijkt de moeite waard in een systeemstudie na te gaan of op basis van deze nieuwe gegevens een rendabel opwekkingssysteem mogelijk is.

De warmteverliezen van de generator zijn kleiner in een gesloten systeem dan in een open systeem, omdat enerzijds het specifieke vermogen hoger kan zijn en anderzijds de plasmatemperatuur aanzienlijk lager is. De consequentie hiervan is dat met het gesloten systeem in combinatie met een gasturbine of stoomsysteem reeds bij een vermogen van enkele tientallen MW een rendement van tegen de 50% kan worden bereikt.
Het vloeibaar-metaal-MHD-systeem wordt op dit moment voornamelijk ontwikkeld aan de Ben Gurion Universiteit in Israël [4, 5]. Een proefinstallatie – Etgar 3 – is daar sinds 1985 in bedrijf. Een demo-installatie – Etgar 5 – zou volgens plan in 1991 in bedrijf zijn gesteld bij een fosfaatmijn in de Negev-woestijn. Deze eenheid is ontworpen voor een elektrisch vermogen van 0,7 MW_e plus een stoomproduktie van 7,5 ton per uur.

De volgende eenheid wordt in de VS gebouwd in de jaren 1991-1993, en zal een

vermogen hebben van 3,2 MW_e en een stoomproduktie van 18,6 ton per uur. Met deze eenheid wil men aantonen dat dit systeem ook in economisch opzicht kan concurreren met andere manieren van elektriciteitsopwekking. In deze systemen wordt gesmolten lood-bismuth toegepast. De maximale temperatuur bedraagt 160 °C. Het gesmolten metaal wordt in circulatie gebracht met een gaslift, aangedreven met stoom. Om voldoende drukverschil in het systeem te krijgen, dient een flink hoogteverschil tussen de warmtewisselaar en de scheider aanwezig te zijn.

Gebruikelijke rendementscijfers zijn niet over dit systeem gepubliceerd. Uit de bovengenoemde getallen voor elektriciteits- en stoomproduktie valt af te leiden dat het rendement ongeveer 20% moet zijn, wat redelijk is bij een maximum systeemtemperatuur van 160 °C. Omdat in de procesindustrie veel warmte op dit niveau beschikbaar is, zou dit systeem in deze industrie misschien als naschakelsysteem mogelijkheden bieden.

5.7.4 VOORUITZICHTEN VOOR TOEPASSING

Van de drie geschetste MHD-systemen biedt het open systeem de minste perspectieven voor decentrale toepassing. Alleen grote eenheden (groter dan 500 MW_e) met naschakeling van stoomturbines kunnen bij basislastbedrijf op papier rendabel zijn.

Het gesloten systeem heeft betere perspectieven omdat dit systeem al bij vermogens van enkele tientallen MW_e goede rendementen belooft, zeker in combinatie met een gas- of stoomturbine.

Over het vloeibaar-metaalsysteem is in Nederland weinig bekend. Gezien de lage procestemperatuur wordt voor dit systeem een hoog rendement bij lage investeringskosten geclaimd. Het is de moeite waard in de toekomst meer aandacht aan dit systeem te besteden. Het systeem kan de afvalwarmte die in ruime hoeveelheden beschikbaar is in de (proces)industrie gebruiken. Arthur D. Little noemt in een rapport uit 1989 een markt voor de komende 10 jaar van 100 – 160 MW_e per jaar voor warmte-krachtinstallaties van dit type beneden 20 MW_e in de VS. Actuele en betrouwbare cijfers voor rendement en kosten van de verschillende systemen zijn vrijwel niet beschikbaar [6]. Uit rapporten van de International Liaison Group for MHD Power Generation kan worden afgeleid dat voor het open en voor het gesloten systeem rendementen boven 50% worden verwacht bij kWh-prijzen die ongeveer gelijk zijn aan die van moderne poederkoolcentrales met rookgasontzwaveling.

5.7.5 ONTWIKKELINGSKOSTEN

In de genoemde volgorde is voor de drie MHD-systemen nog onderzoek en ontwikkeling nodig met respectievelijk een omvang in de orde van 10^3, 10^2 en 10 miljoen gulden. Het ontwikkelingsrisico neemt ook in deze volgorde af.

Literatuur

[1] LAKEN, R.A. VAN DER, *MHD-conversie: recente vorderingen in de ontwikkeling*, in: Energiespectrum, 1980

[2] *Evaluation of the future role of MHD power generation in the European Communities*, report to the Commission of the EC, 1987

[3] MESSERLE, H.K., *Comments on Proceedings of the Extended Faraday*, Working Group Meeting, International Liaison Group on MHD, Sidney, 1990

[4] BRANOVER, H., e.a., *Studies of liquid metal MHD power plant efficiencies and prospectives*, Proceedings of the International Specialist Meeting on Mathematical Modelling of MHD Power Stations, 1986

[5] BRANOVER, H., e.a., *Research and development of single-phase liquid MHD generators*, Proceedings of the 27th Symposium on Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics, Reno, 1989

[6] *Eindrapport Nederlands MHD-project fase 1*, FDO Technische Service, Amsterdam, 1982

5.8 NUCLEAIRE ENERGIE: EEN TOEKOMSTVISIE OP DECENTRALE OPWEKKING

met bijdrage van ir. K.J. Brinkmann

5.8.1 INLEIDING

Een bespreking van de toekomst van de nucleaire energieopwekking in de industrie kan redelijkerwijs worden beperkt tot kernsplijtingsenergie. Het ligt immers niet in de verwachting dat de commerciële haalbaarheid van kernfusie nog voor de jaren dertig van de volgende eeuw zal worden aangetoond. Bovendien is het dan niet erg aannemelijk dat kernfusie voor decentrale energieopwekking in aanmerking zal komen. Alvorens in te gaan op de mogelijkheden van kernsplijtingsenergie voor decentrale toepassingen in een meer nabij gelegen toekomst, wordt hierna een indruk gegeven van de stand van zaken bij kernsplijtingsenergie.

5.8.2 STAND VAN ZAKEN

Bij nucleaire energieopwekking vindt geen uitstoot van broeikasgassen of van verzurende stoffen plaats. Wel komt bij de conventionele winning en reductie van uraan- en thoriumertsen en bij de fabricage van materialen voor de constructie van installaties nog CO_2 vrij. In de toekomst zou de daarvoor benodige energie echter ook van kernenergie of van andere schone energiebronnen afkomstig kunnen zijn. Van de proceskant gezien is kernenergie dus een schone vorm van energie, die effectief kan bijdragen aan een schone mondiale energievoorziening. Het nucleaire aandeel in de elektriciteitsopwekking in de landen van de OECD bedraagt nu circa 23%. Men kan daarom spreken van een bewezen techniek.

Voor uitbreiding van kernenergie is een voldoende breed maatschappelijk draagvlak noodzakelijk. Dit houdt in dat de veiligheid en vooral de ultieme veiligheid bij kernergie overtuigend moet kunnen worden aangetoond. Verder zullen op de wat langere termijn ook duurzaamheidsaspecten een grotere rol gaan spelen. Bij een op duurzaamheid gericht gebruik van splijtstoffen en constructiematerialen kan kernenergie nog veel eeuwen mee. De voorwaarden voor een verdere rol van de kernsplijtingsenergie in de mondiale energievoorziening verschillen niet principieel van die voor andere energievoorzieningen. Zij zijn samen te vatten met de trefwoorden schoon, veilig en duurzaam.

Kernenergie is schoon èn tevens veilig als ervoor wordt gezorgd dat geen radioactieve stoffen in het leefmilieu terechtkomen. Bij de huidige generatie kerncentrales zorgt men voor de veiligheid door onder andere regels, procedures, kwaliteitsborging, training, toezicht en veelsoortige veiligheidsystemen. Kortom, een voor buitenstaanders vrij ontoegankelijke, actieve veiligheidscultuur die in nogal wat landen tot een onvoldoende maatschappelijk draagvlak leidt. Zo is er niet voldoende vertrouwen dat in de praktijk geen calamiteiten kunnen optreden, zolang mensen en systemen in actie moeten komen om ongevallen te voorkomen, dan wel te verhelpen. Een remedie zou zijn de veiligheid van nieuwe kerncentrales door ontwerpwijzigingen op meer passieve wijze te waarborgen, waardoor ingrijpen van mensen en systemen niet meer zo nodig is.

Maatschappelijk gezien bestaat er ook onvoldoende vertrouwen in de ultieme veiligheid als kernsplijtingsafval definitief wordt opgeborgen in geologische formaties. Hier gaat het vooral om de onafzienbaarheid van een opbergtermijn van miljoenen jaren. Dus om de vraag of tijdens zo'n lange periode radiotoxisch materiaal in het leefmilieu terecht zou kunnen komen, bijvoorbeeld omdat zulke geologische formaties niet stabiel blijven. Het eerst omzetten van de toxisch lang levende isotopen in het kernsplijtingsafval in veel korter levende isotopen, zou een antwoord kunnen zijn. Discussies over de veiligheid van ondergrondse opberging kunnen dan worden beperkt tot veiligheid gedurende slechts enkele duizenden, in plaats van miljoenen jaren.

5.8.3 ONTWIKKELINGEN

Er worden op dit moment reactoren ontwikkeld met een vergrote passieve veiligheid (de zogenaamde geavanceerde reactoren). Ook worden reactoren ontworpen waarbij wordt gestreefd naar optimale inherente veiligheid (innovatieve reactoren). De bedoeling van de innovatieve reactoren is dat inherente gevaren zoveel mogelijk worden opgeheven zonder dat systemen worden geactiveerd èn in actie moeten komen, en zonder menselijk ingrijpen. Zo'n reactor is dan inherent veilig met betrekking tot die (opgeheven) gevaren, ongeacht de ongevalsituatie die zich nog van binnen uit kan voordoen. Daarmee wordt ook de mogelijkheid en het effect van foutief menselijk handelen sterk teruggedrongen.

Innovatieve reactoren verkeren in tegenstelling tot geavanceerde reactoren nog in de ontwerpfase, zodat een demonstratie nog wel tot de eeuwwisseling kan duren.

Het optimaliseren naar inherente veiligheid leidt in het algemeen tot een beperking van het vermogen per unit tot circa 100 à 200 MW_e. Dit lijkt allerminst een bezwaar voor decentrale inzet. In een Amerikaans ontwerp kunnen zulke units al naar behoefte in modulen van 1, 2 of 3 units worden gecombineerd met respectievelijk 465, 930 of 1.395 MW_e.

Niet geheel los van deze ontwikkelingen vindt onderzoek plaats naar de meest geschikte methoden om zeer lang levende radionucliden in het kernsplijtingsafval door kerntransmutatie om te zetten in veel korter levende nucliden. Men kan reactorsystemen ontwikkelen die daarvoor èn voor de energieopwekking geschikt zijn, zoals bijvoorbeeld het eerder genoemde Amerikaanse ontwerp.

5.8.4 CONCLUSIES

Het lijkt technisch mogelijk zo niet geheel, maar toch grotendeels tegemoet te komen aan de huidige maatschappelijke bezwaren tegen uitbreiding van kernenergie. De ontwikkelingen zijn er. Het zal in de praktijk echter bijna onmogelijk zijn om aan te tonen, dat de moderne (westerse) kerncentrales met de daarbij behorende veiligheidscultuur minder veilig zijn dan een nieuwe generatie met meer passieve en inherente veiligheid. Dit betekent dat uiteindelijk economische factoren de doorslag zullen geven. In dat opzicht maken op den duur ook innovatieve reactoren een goede kans omdat wordt gestreefd naar een sterke vereenvoudiging van het ontwerp, naar aanzienlijk kortere bouwtijden en naar een aanzienlijk langere technische levensduur.

Organisatie van de studie

Voor het tot stand komen van deze publikatie heeft STT gebruik kunnen maken van de kennis en de ervaring van een groot aantal deskundigen. Zij hebben belangeloos veel van hun tijd en energie aan dit project gewijd. STT is deze deskundigen bijzondere dank verschuldigd.

STUDIE-ADVIESGROEP

De vraagstelling van de studie is bepaald met hulp van een studie-adviesgroep. Deze bestond uit:

mr.drs. C.W.M. Dessens
Ministerie van Economische Zaken, Den Haag

ir. M.E.E. Enthoven
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Leidschendam

mw.drs. M. Epema-Brugman
Algemene Energie Raad, Den Haag

drs. H. Hooykaas
voormalig Shell Nederland, Rotterdam

ir. N.G. Ketting
Samenwerkende Elektriciteits-produktiebedrijven (Sep), Arnhem

prof.ir. C.W.J. van Koppen
voormalig Technische Universiteit Eindhoven

prof.dr.ir. H.H. van den Kroonenberg
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten

dr. P. Winsemius
McKinsey, Amsterdam

WERKGROEPEN

Onderdelen van de studie zijn uitgewerkt door vier werkgroepen. De leden van deze werkgroepen waren:

Energie, milieu en economie

dr. J.J.C. Bruggink
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten

ing. T. van der Does
Projektbureau Warmte/Kracht (PW/K), Driebergen

dr. J.A.M.M. Kops
KEMA, Arnhem

ir. P.A.M. van Luyt
Nederlandse maatschappij voor energie en milieu (Novem), Apeldoorn
drs. H.J.M. Snoep
Ministerie van Economische Zaken, Den Haag
ir. J.P. van Soest
Centrum voor energiebesparing en schone technologie, Delft
drs. P.J. de Wit
DSM, Heerlen

Efficiënte toepassingen van elektriciteit in de industrie
ir. G.H. Bontius
Vereniging van Exploitanten van Elektriciteitsbedrijven in Nederland (VEEN), Arnhem
ir. W. Boone
KEMA, Arnhem
dr.ir. A.A.H. Drinkenburg
DSM Research, Geleen
ir. A.M. van Haagen
Nederlandse maatschappij voor energie en milieu (Novem), Utrecht
prof.ir. R.W.J. Kouffeld
Technische Universiteit Delft

Proceswarmte en energievoorziening in de industrie
prof.dr.ir. J.J.H. Brouwers
Universiteit Twente
ir. J.E. van Buuren
Hoogovens, IJmuiden
prof.ir. J. Claus
Instituut voor Energie- en Milieutechnologie TNO, Apeldoorn
dr. C.A.M. van der Klein
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten
ir. B.A. Kleinbloesem
Samenwerkende Elektriciteits-produktiebedrijven (Sep), Arnhem
ir. A. Wondergem
Projektbureau Warmte/Kracht (PW/K), Driebergen
ir. A.W.M. van Wunnik
KEMA, Arnhem

Nieuwe produktietechnieken van elektriciteit
ir. H.J.M. Beurskens
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten
ing. H.C. Faber
Nederlandse maatschappij voor energie en milieu (Novem), Utrecht
ir. J.A. Over
Raadgevend Ingenieursbureau M+I, Alkmaar
drs. J.H.C. van der Veer
KEMA, Arnhem

ir. P. Willemsen
Provinciale Noordbrabantse Energie-Maatschappij (PNEM), Den Bosch
dr.ir. L.R. Wolff
Energy Conversion Systems, Eindhoven

GESPREKSPARTNERS

Voor het verkrijgen van kennis en gegevens heeft de projectleider gesprekken gevoerd met een groot aantal deskundigen. De partners bij deze gesprekken waren:
drs. F. van den Akker
Directoraat-Generaal Milieubeheer van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Leidschendam
ir. J. Aufderheijde
Gasunie, Groningen
mw.ir. M.H. Blom-Fuhri Snethlage
Commissie Lange Termijn Milieubeleid, Den Haag
ir. H.S.W. Diederen
Provinciale Limburgse Elektriciteits-Maatschappij (PLEM), Maastricht
dr.ir. J.J.T.M. Geerards
DSM, Heerlen
prof. W. van Gool
Rijksuniversiteit Utrecht
drs. B.J.M. Hanssen
Ministerie van Economische Zaken, Den Haag
prof.dr. R.W. Hommes
Erasmus Universiteit, Rotterdam
ir. A.J. de Lint
Albert Heijn, Zaandam
prof.ir. D.G.H. Latzko
voormalig Technische Universiteit Delft
W.J. Lenstra
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Leidschendam
ir. H.L.J. Lindenberg
Stichting Verpakking en Milieu, Rotterdam
dr.ir. N. van Lookeren Campagne
voormalig Shell Nederland, Rotterdam
ir. B. van Nederveen
Hoechst Holland, Amsterdam
prof.dr.ir. J.G. Niesten
voormalig Technische Universiteit Eindhoven
ir. G.J.M. Prieckaerts
Provinciale Limburgse Elektriciteits-Maatschappij (PLEM), Maastricht
ir. Th. Quené
Sociaal-Economische Raad, Den Haag
prof.dr. L.H.Th. Rietjens
Technische Universiteit Eindhoven

prof.ir. M. Tels
Technische Universiteit Eindhoven
prof.dr. W.C. Turkenburg
Rijksuniversiteit Utrecht
dr. R.W. Welschen
Provincie Noordbrabant, Den Bosch
ir. W.K. Wiechers
Provinciale Noordbrabantse Energie-Maatschappij (PNEM), Den Bosch

AUTEURS

De volgende deskundigen leverden als auteur een bijdrage aan deze publikatie:
ir. H.J.M. Beurskens
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten
ir. G.H. Bontius
Vereniging van Exploitanten van Elektriciteitsbedrijven in Nederland (VEEN), Arnhem
ir. W. Boone
KEMA, Arnhem
ing. P.J.M. Brieffies
Nederlandse maatschappij voor energie en milieu (Novem), Sittard
ir. K.J. Brinkmann († december 1991)
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten
dr. J.J.C. Bruggink
Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten
ing. T. van der Does
Projektbureau Warmte/Kracht (PW/K), Driebergen
dr.ir. A.A.H. Drinkenburg
DSM Research, Geleen
drs. P.H. van Dijkum
Nederlandse maatschappij voor energie en milieu (Novem), Utrecht
ir. E.W.L. van Engelen
Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag
ir. B.A. Kleinbloesem
Samenwerkende Elektriciteits-produktiebedrijven (Sep), Arnhem
dr. J.A.M.M. Kops
KEMA, Arnhem
ir. W.G. Kuijpers
KEMA, Arnhem
ir. R.A. van der Laken
Raadgevend Ingenieursbureau M+I, Alkmaar
ir. P.A. Oostendorp
Instituut voor Energie- en Milieutechnologie TNO, Apeldoorn
ir. G. Peppink
Samenwerkende Elektriciteits-produktiebedrijven (Sep), Arnhem
ir. G.J.J. Smakman
Nederlandse maatschappij voor energie en milieu (Novem), Utrecht

ir. P. Willemsen
Provinciale Noordbrabantse Energie-Maatschappij (PNEM), Den Bosch
drs. P.J. de Wit
DSM, Heerlen
dr.ir. L.R. Wolff
Energy Conversion Systems, Eindhoven
ir. A. Wondergem
Projektbureau Warmte/Kracht (PW/K), Driebergen
ir. A.W.M. van Wunnik
KEMA, Arnhem

PROJECTLEIDING

Het project stond onder leiding van ir. E.W.L. van Engelen, projectleider bij STT. Mevrouw T.M.F. van Bergenhenegouwen, projectsecretaresse bij STT, werkte mee aan de organisatie van het project en aan de totstandkoming van de publikatie en het symposium.
Bij de redactie is de projectleider bijgestaan door ir. J.A. Klaassen en mevrouw R.M.P.G. Otten.
De figuren in de publikatie zijn vervaardigd door ir. K.J.H. van Loon.
Ir. A.C. Sjoerdsma gaf vele nuttige adviezen en verleende de projectleider daarmee waardevolle steun.

STT-publikaties

1. Toekomstbeeld der Techniek;
   ir. J. Smit, 1968
2. Techniek en Toekomstbeeld, Telecommunicatie in telescopisch beeld;
   prof.dr.ir. R.M.M. Oberman, 1968
3. Verkeersmiddelen;
   prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1968
4. Hoe komt een beleidsvisie tot stand?;
   ir. P.H. Bosboom, 1969
5. De overgangsprocedures in het verkeer;
   prof.ir. J.L.A. Cuperus e.a., 1969
6. De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland;
   dr. P.J. van Duin, 1971
7. Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future;
   ir. J.H. Bakker e.a., 1971
8. Mens en milieu: prioriteiten en keuze;
   ir. L. Schepers e.a., 1971
9. Het voeden van Nederland, nu en in de toekomst;
   prof.dr.ir. M.J.L. Dols e.a., 1971
10. Barge Carriers: some technical, economic and legal aspects;
    drs. W. Cordia e.a., 1972
11. Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland;
    prof.dr. J.J. Went e.a., 1972
12. Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening: mogelijkheden en consequenties;
    dr.ir. H. Hoog e.a., 1972
13. Communicatiestad 1985: elektronische communicatie met huis en bedrijf;
    prof.dr.ir. J.L. Bordewijk e.a., 1973
14. Techniek en preventief gezondheidsonderzoek;
    dr. M.J. Hartgerink e.a., 1973
15. Technologisch verkennen: methoden en mogelijkheden;
    ir. A. van der Lee e.a., 1973
16. Mens en milieu: beheerste groei;
    Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
17. Mens en milieu: zorg voor zuivere lucht;
    Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
18. Mens en milieu: kringlopen van materie;
    Stuurgroep en Werkgroepen voor Milieuzorg, 1973
19. Energy Conservation: ways and means;
    edited by J.A. Over and A.C. Sjoerdsma, 1974

20. Voedsel voor allen, plaats en rol van de EEG;
prof.dr. J. Tinbergen e.a., 1976
21. Stedelijk verkeer en vervoer langs nieuwe banen?;
Redactie: ir. J. Overeem, 1976
22. Materialen voor onze samenleving;
Redactie: ir. J.A. Over, 1976
23. De industrie in Nederland: verkenning van knelpunten en mogelijkheden;
Redactie: ir. H.K. Boswijk en ir. R.G.F. de Groot, 1978
24. Toekomstbeeld der industrie;
prof.dr. P. de Wolff e.a., 1978
25. Arts en gegevensverwerking;
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1979
26. Bos en hout voor onze toekomst;
Redactie: ir. T.K. de Haas, ir. J.H.F. van Apeldoorn en ir. A.C. Sjoerdsma, 1979
27. Steenkool voor onze toekomst;
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1980
28. Distributie van consumentengoederen; informatie en communicatie in perspectief;
Redactie: ir. R.G.F. de Groot, 1980 (ISBN 90 6275 052 4)
29. Wonen en techniek; ervaringen van gisteren, ideeën voor morgen;
Redactie: ir. J. Overeem en dr. G.H. Jansen, 1981 (ISBN 90 6275 053 2)
30. Biotechnology; a Dutch Perspective;
edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1981 (ISBN 90 6275 051 6)
31. Micro-elektronica in beroep en bedrijf; balans en verwachting;
Samensteller: ir. H.K. Boswijk, 1981 (ISBN 90 6275 064 8)
Deelstudies:
    31-1 Micro-elektronica: de rundveehouderij (ISBN 90 6275 066 4)
    31-2 Micro-elektronica: de grafische industrie en uitgeverijen (ISBN 90 6275 067 2)
    31-3 Micro-elektronica, procesinnovatie in de sector elektro-metaal (ISBN 90 6275 068 0)
    31-4 Micro-elektronica: productinnovatie van consumentenprodukten en diensten voor gebruik in huis (ISBN 90 6275 069 9)
    31-5 Micro-elektronica: het ontwerpproces (ISBN 90 6275 070 2)
    31-6 Micro-elektronica: het bankwezen (ISBN 90 6275 071 0)
    31-7 Micro-elektronica: het kantoor
    31-8 Micro-elektronica: het reiswezen (ISBN 90 6275 073 7)
    31-9 Micro-elektronica: de belastingdienst
32. Micro-elektronica voor onze toekomst; een kritische beschouwing;
Samenstellers: burggraaf E. Davignon e.a., 1982 (ISBN 90 6275 089 3)
33. Toekomstige verwarming van woningen en gebouwen;
Eindredactie: ir. A.C. Sjoerdsma, 1982 (ISBN 90 6275 094 X)
34. Flexibele automatisering in Nederland; ervaringen en opinies;
Redactie: ir. G. Laurentius, ir. H. Timmerman en ir. A.A.M. Vermeulen, 1982
35. Automatisering in de fabriek; vertrekpunten voor beleid
Redactie: ir. H. Timmerman, 1983 (ISBN 90 6275 112 1)

36. Informatietechniek in het kantoor; ervaringen in zeven organisaties; Samensteller: drs. F.J.G. Fransen, 1983 (ISBN 90 6275 135 0)
37. Nederland en de rijkdommen van de zee: industrieel perspectief en het nieuwe zeerecht;
Redactie: ir. J.F.P. Schönfeld en mr.drs. Ph.J. de Koning Gans, 1983 (ISBN 90 6275 111 3)
38. Man and Information Technology: towards friendlier systems; edited by J.H.F. van Apeldoorn, 1983 (ISBN 90 6275 136 9)
39. De kwetsbaarheid van de stad; verstoringen in water, gas, elektriciteit en telefonie;
Redactie: ir. G. Laurentius, 1984 (ISBN 90 6275 145 8)
40. Bedrijf, kennis en innovatie;
Redactie: ir. H. Timmerman, 1985 (ISBN 90 14 03820 8)
41. De toekomst van onze voedingsmiddelenindustrie;
Redactie: drs. J.C.M. Schogt en prof.dr.ir. W.J. Beek, 1985 (ISBN 90 14 03821 6)
42. Techniek voor ouderen;
Redactie: ir. M.H. Blom-Fuhri Snethlage, 1986 (ISBN 90 14 03822 4)
43. Nieuwe toepassingen van materialen;
Redactie: ir. A.J. van Griethuysen, 1986 (ISBN 90 14 03738 4)
44. Onderhoudsbewust ontwerpen nu en in de toekomst;
Redactie: ir. G. Laurentius, 1987 (ISBN 90 14 03716 3)
45. Kennissystemen in het onderwijs;
Redactie: ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1987 (ISBN 90 14 03717 1)
46. Kennissystemen en medische besluitvorming;
ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1987 (ISBN 90 14 03718 X)
47. Kennissystemen in de dienstensector;
Redactie: drs. A.Y.L. Kwee en ir. J.J.S.C. de Witte, 1987 (ISBN 90 14 03719 8)
48. Kennissystemen in de industrie;
ir. J.J.S.C. de Witte en drs. A.Y.L. Kwee, 1988 (ISBN 90 14 03758 9)
49. Grenzen aan techniek;
Redactie: ir. A.J. van Griethuysen, 1989 (ISBN 90 14 03880 1)
50. Opleiden voor de toekomst: onderdeel van bedrijfsbeleid;
ir. H.B. van Terwisga en drs E. van Sluijs, 1990 (ISBN 90 14 04506 9)
51. Plantaardige grondstoffen voor de industrie;
Redactie: drs. W.G.J. Brouwer, 1991 (ISBN 90 14 03882 8)
52. Inspelen op complexiteit: mens, techniek, informatie en organisatie;
Redactie: drs. M.J.A. Alkemade, 1992 (ISBN 90 14 03883 6)

Overige uitgaven:

De innovatienota; een aanvulling;
H.K. Boswijk e.a., 1980

Het belang van STT (toespraak bij het 15-jarig bestaan van STT)
prof.ir. Th. Quené, 1983

Mariene ontwikkelingen in de Verenigde Staten, Japan, Frankrijk, West-Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en Nederland: organisatie, aandachtsgebieden en budgets;
Redactie: ir. J.F.P. Schönfeld en mr.drs. Ph.J. de Koning Gans, 1984
(uitgave van de Voorlichtingsdienst Wetenschapsbeleid, Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen;
distributie: Distributiecentrum Overheidspublikaties, Den Haag)

New applications of materials;
edited by A.J. van Griethuysen, 1988 (ISBN 0 9513623 0 5)

Alle publikaties waarbij het ISBN is vermeld, zijn verkrijgbaar via de boekhandel. De overige publikaties zijn te bestellen bij STT, Postbus 30424, 2500 GK Den Haag, telefoon 070-3919856, gironummer 1609900.

Subsidieverleners STT

Deze studie kwam tot stand dank zij de financiële bijdragen van bedrijfsleven, overheid en Koninklijk Instituut van Ingenieurs.

Aalberts Industries
ABN AMRO Holding
Advanced Semiconductor Materials International
AEG Nederland
Akzo
Alcatel Nederland
Asea Brown Boveri
AT&T Network Systems Nederland
AVEBE
Berenschot Groep
BP Nederland
BSO/Buro voor Systeemontwikkeling
Campina Melkunie
Cap Gemini Pandata
Cebeco-Handelsraad
Comprimo
Control Data
CSM
DAF
Delft Instruments
DHV Beheer
Digital Nederland
Dow Benelux
DSM
Duphar
Du Pont de Nemours (Nederland)
Eerste Nederlandse Cement Industrie (ENCI)
Ericsson Telecommunicatie
Europe Combined Terminals
Gamma Holding
GE Plastics
Getronics
Gouda Vuurvast Holding
Grasso's Koninklijke Machinefabrieken
Hagemeyer
HCS Technology
Heineken Nederland
Hewlett-Packard Nederland

Hoechst Holland
W.A. Hoek's Machine- en Zuurstoffabriek
Holec
Hollandsche Beton Groep
Hoogovens Groep
IBM Nederland
ICI Holland
ICL Nederland
Indivers
Industriële Consulenten Nederland
Internatio-Müller
KEMA
Koninklijke Ahold
Koninklijke Begemann Groep
Koninklijke Gist-brocades
Koninklijk Ingenieurs- en Architectenbureau HASKONING
Koninklijk Instituut van Ingenieurs
Koninklijke Maatschappij 'De Schelde'
Koninklijke Nederlandse Vliegtuigenfabriek Fokker
Koninklijke Nedlloyd Groep
Koninklijke Nijverdal-Ten Cate
Koninklijke PTT Nederland
Koninklijke Wessanen
F. van Lanschot Bankiers
Logica
Ministerie van Economische Zaken
Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
Moret Ernst & Young
Nationale-Nederlanden
Nederlandsche Apparatenfabriek Nedap
Nederlandse Gasunie
Nederlandse Participatie Maatschappij
Nederlandse Spoorwegen
Nederlandse Unilever Bedrijven
NMB Postbank Groep
Norit
Océ-Nederland
Parenco
Philips' Gloeilampenfabrieken
Polynorm
Rabobank Nederland
Rank Xerox Manufacturing (Nederland)
de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij
Sara Lee/DE
Sep
Shell Nederland
Siemens Nederland

Simac Techniek
Siemens Nixdorf Informatiesystemen
Solvay Chemie
Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland
TBI Holdings
Tebodin, Advies- en Constructiebureau
Tulip Computers International
Unisys Nederland
Vereenigde Glasfabrieken
Verenigde machinefabrieken Stork
VNU Verenigde Nederlandse Uitgeversbedrijven
Volmac Software Groep
Volvo Car
Vredestein

Stichting
Toekomstbeeld
der Techniek

In hoeverre kan de toepassing van elektrische energie in industriële processen bijdragen aan de vermindering van de milieubelasting? Kan het gebruik van elektriciteit leiden tot besparing van kosten en verbetering van de kwaliteit van proces en produkt?

De Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT) verkent in deze publikatie de relatie tussen energie en milieu, toegespitst op het elektriciteitsgebruik in de industrie. De mogelijkheden tot besparing op energie en tot vermindering van de belasting van het milieu worden in onderlinge samenhang bezien. STT kijkt daarbij zowel naar het gebruik als naar het opwekken van elektriciteit. De gehele studie is geplaatst tegen de achtergrond van de samenhang tussen economie, techniek en milieu.

Nadat een uitgebreide inventarisatie van efficiënte toepassingen van elektriciteit in industriële processen is gegeven, wordt uitvoerig ingegaan op de mogelijkheden van gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte in de industrie. Ook komen nieuwe produktietechnieken van elektriciteit aan de orde die op termijn een rol kunnen gaan spelen in de industriële elektriciteitsvoorziening.

STT kreeg bij deze studie de medewerking van een groot aantal deskundigen uit de gehele Nederlandse energiewereld.

ISBN 90-14-04715-0
9 789014 047157