

Energie- besparing

door Stuurgroep en Werkgroepen voor Energiebesparing
Redactie: ir. J. A. Over en ir. A. C. Sjoerdsma

19

De STICHTING TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK
is op 6 februari 1968 opgericht door het Koninklijk
Instituut van Ingenieurs met als doelstelling:

het initiëren, begeleiden en ondersteunen van studies die
beogen, vanuit verschillende gebieden van de techniek,
bij te dragen tot meer integrale visies op de samenleving
van de toekomst;
voorlichting te geven of mede te werken bij het geven van
voorlichting, in het bijzonder aan de Nederlandse
samenleving, over de mogelijke toekomstige ontwikkelin-
gen der techniek met het oogmerk hierdoor bij te dragen
tot het op harmonische wijze invoegen van die
ontwikkeling in de samenleving. De voorlichting, zowel
van de Stichting zelf als van de Stichting in samenwerking
met andere organisaties, zal geschieden in algemeen
toegankelijke wetenschappelijke publikaties.

Een overzicht van reeds verschenen publikaties is gegeven
aan de binnenzijde van het achterblad.

De Stichting is gevestigd in het gebouw van het
Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Prinsessegracht 23,
's-Gravenhage, tel. 070-646800.

Aan de studie Energiebesparing is richting gegeven door
een Stuurgroep bestaande uit:
prof. dr. E.W. Hofstee, Landbouwhogeschool Wageningen
dr. ir. H. Hoog, Shell Internationale Research Maat-
schappij, Reactor Centrum Nederland
prof. dr. L.H. Klaassen, Nederlands Economisch Instituut
Rotterdam
prof. ir. D.G.H. Latzko, Technische Hogeschool Delft
prof. ir. H.W. Slotboom, Technische Hogeschool
Eindhoven
ir. K. Swart, Kon. Shell Groep
ir. J.A. Over, Stichting Toekomstbeeld der Techniek
(secretaris)

De Nederlandse vertaling van de in 1974 in het Engels
verschenen publikatie no. 19 van de Stichting Toekomst-
beeld der Techniek is op enkele plaatsen iets gewijzigd of
aangevuld. Deze wijzigingen zijn bij de tekst aangegeven
in de kantlijn met het teken *.

Auteursrechten: Stichting Toekomstbeeld der Techniek,
1974.

Uit deze uitgave mag niets worden gereproduceerd met
welk medium dan ook zonder haar schriftelijke toestem-
ming.

STICHTING TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

Serie Toekomststudies uit de Ingenieurswetenschappen

Energiebesparing

door Stuurgroep en Werkgroepen voor Energiebesparing

Redactie: ir. J. A. Over en ir. A. C. Sjoerdsma



Staatsuitgeverij 's-Gravenhage 1975

Voorwoord

Tegen het einde van 1971 begon onze Stichting Toekomstbeeld der Techniek de eerste besprekingen waarvan de resultaten nu in de vorm van deze studie voor u liggen. Dit initiatief was een rechtstreeks gevolg van eerdere Stichtingsstudies over energievoorziening, waaruit reeds was gebleken dat een voortgezette groei van het energieverbruik in geïndustrialiseerde landen als Nederland tot ernstige technische, economische en politieke problemen zou kunnen leiden omdat de vraag naar energie wel eens groter zou kunnen worden dan het aanbod uit conventionele energiedragers. Omdat bovendien het ontwikkelen en op grote schaal toepassen van nu nog onconventionele energiebronnen tientallen jaren vergt, was het lang niet onmogelijk dat we aan het begin stonden van een periode van structurele spanning tussen het aanbod van en de vraag naar voor verbruik beschikbare hoeveelheden brandstoffen. Een eerste analyse leerde dat deze discrepantie binnen tien jaar een realiteit zou kunnen zijn.

Een dergelijke situatie zou niet zozeer toegeschreven moeten worden aan werkelijke uitputting van de bruikbare voorraden aan fossiele brandstoffen — waarvan 90% bestaat uit steenkool — maar aan het feit dat de geïndustrialiseerde wereld en Nederland in het bijzonder zich praktisch geheel heeft gericht op het zoveel gemakkelijkere en goedkopere verbruik van aardolie en aardgas, die samen de resterende 10% vormen.

Aangezien het veel tijd zal kosten het evenwicht te herstellen door het ontwikkelen van andere energiedragers, leek het ons de moeite waard te onderzoeken of wij die tijd niet zouden kunnen 'kopen', teneinde ons, door bezuiniging op het energieverbruik, een adempauze te verschaffen. Daarom hebben wij de onderhavige studie ondernomen, waarin de mogelijkheden tot energiebesparing worden onderzocht. De resultaten stellen ons in staat tot vaststelling van de grenzen tussen een rationeler verbruikspatroon en het — uit bittere noodzaak — opgeven van bepaalde verbruiksvormen.

In Hoofdstuk 1 worden de wereldenergietoestand en de verdere ontwikkelingsmogelijkheden bekeken en besproken. Daarbij wordt een analyse gemaakt van de wereldvraag naar energie, de lijnen waarlangs die vraag zich zal ontwikkelen en de rol die verbruiksbeperking kan spelen.

Hoofdstuk 2 biedt een raming van het Nederlandse energieverbruik tot 1985. Hierbij is uitgegaan van de veronderstelling dat veranderingen en aanpassingen in de maatschappij op geleidelijke en natuurlijke wijze plaatsvinden en zijn alleen die energiebesparingen in beschouwing genomen welke optreden als rechtstreeks gevolg van sociaal-economische ontwikkelingen. Zoals voor alle ramingen geldt ook hier dat alleen maar de huidige inzichten tot uitdrukking komen, die als zodanig niet pretenderen een scherp beeld van de toekomst te geven. Bij dit soort afwegingen zijn altijd onverwachte dingen mogelijk, bijvoorbeeld sociale en politieke ontwikkelingen die de hele zaak op zijn kop zetten. Maar een ruwe schatting is beter dan geen.

De hoofdstukken 3-7 behandelen belangrijke besparingsmogelijkheden in vijf verbruikssectoren: industrie, elektriciteitsopwekking, woningen en andere gebouwen, verkeer en vervoer, en milieuzorg. Teneinde enig idee te geven van hun relatieve betekenis worden de besparingen gerelateerd aan de in Hoofdstuk 2 gegeven geraamde verbruiken. Het afsluitende Hoofdstuk 8 bevat nog een algemene economische en sociologische beoordeling van energiebesparing.

De opzet van de hele studie is zodanig dat zij kan bijdragen tot de formulering van een energiebeleid op lange termijn. Daarbij zij nogmaals met nadruk gesteld dat overheidsorganen bij het nemen van maatregelen niet afhankelijk zijn van de toekomst zelf, maar van het beeld van de toekomst dat wij nu hebben. De invoering van besparende maatregelen zal ongetwijfeld verschillende reacties veroorzaken, welke naar hun aard, tijdstip en gerichtheid niet zijn te voorspellen. Dit maakt het des te noodzakelijker een beeld te krijgen van een aantal ter beschikking staande mogelijkheden en zich niet te binden aan het voeren van een enkele vorm van beleid met uitsluiting van alle andere.

Met nadruk dient te worden vermeld dat het grootste deel van de publikatie reeds was opgesteld toen de vijandelijkheden in het Midden-Oosten uitbraken (eind 1973). Het was toen te vroeg — en dat is het nog steeds — om de invloeden op langere duur van de ontwikkelingen die o.m. hebben geleid tot produktiebeperkingen, de instelling van een olieboycot en prijsverschuiving te kunnen overzien, maar als die gevolgen wat duidelijker zijn geworden, geloven we dat het mogelijk zal zijn de in de studie verstrekte gegevens aan te vullen met nieuwe prognoses en met suggesties voor een aantal nieuwe beleidsvarianten.

Wanneer deze publikatie bijdraagt tot de vorming van een duidelijker begrip van de energiesituatie op lange termijn, dan zal dat vooral te danken zijn aan de belangrijke inzet van een groot aantal deskundigen die bereid waren een aanmerkelijk deel van hun vrije tijd op te offeren voor het meewerken aan onze studies. Het betreft mensen uit verschillende disciplines, met uiteenlopende levensbeschouwingen. Maar zij hebben een overtuiging gemeen: het doel van energiebesparing en energiebeheer behoort te zijn het in stand houden van de voorwaarden waaronder het voor ons nageslacht mogelijk zal zijn de wereld leefbaar in te richten. Onder een leefbare wereld wordt dan verstaan een samenleving die haar leden vrijwaart tegen de primitieve ongemakken die wij hebben leren overwinnen: honger, kou, zeer zware lichamelijke arbeid, te eentonig werk, maar ook tegen een te beperkte persoonlijke actieradius en gebrekkige communicatie. De maatregelen die onze overheden gaan treffen moeten op dat kompas worden gericht.

Door het inzicht en de kennis van de studiedeelnemers kon een publikatie tot stand komen die naar wij hopen niet alleen van Nederlandse, maar ook van internationale betekenis kan zijn.

ir. L. Schepers, voorzitter

Inhoud

Voorwoord

door ir. L. Schepers 3

Inhoud 5

Hoofdstuk 1. Energie – Huidige situatie en vooruitzichten

door de werkgroep "Achtergronden en Oriëntatie"

I.	Inleidende opmerkingen	9
II.	Energie – Vraag en aanbod	9
	1. Beeld van de wereldsituatie	9
	1. De groeiende vraag	9
	2. Voorraden	11
	3. Toekomstige verbruiks- en productiepatronen	12
	2. De situatie in Nederland	14
III.	Andere energiebronnen voor Nederland dan olie en aardgas	15
	1. Steenkool	15
	2. Kernsplijting	16
	3. Zonne-energie	17
	4. Kernfusie	18
	door prof. dr. C.M. Braams	18
	5. Technologie voor de omzetting van energie	21
	6. Conclusies	23
IV.	Energiebesparing. Het probleem – en een vraag die de kern raakt	23
V.	Samenstelling van de werkgroep	26
VI.	Literatuur	26

Hoofdstuk 2. Nationale Energiebalansen

door de werkgroep "Energiebalansen"

I.	Inleiding	28
II.	Het patroon van het aanbod en verbruik van energie in Nederland sedert 1957	28
	1. Achtergrond – de achteruitgang van steenkool	28
	2. De introductie van het aardgas	28
III.	Energieverbruik – verleden en toekomst	29
	1. Industrieel energieverbruik	30
	2. Openbare elektriciteitsbedrijven	31
	3. Raffinaderijen	32
	4. Niet-industrieel gebruik	33
	5. Ramingen van het totaal	35
IV.	Samenvatting en conclusies	36
V.	Samenstelling van de werkgroep	37
VI.	Verwijzingen	37

Hoofdstuk 3. Mogelijkheden tot besparing op industrieel energieverbruik

door de werkgroep "Industrieel Energieverbruik"

I.	Inleiding	38
II.	Olieraffinage	39
	1. De door Nederlandse raffinaderijen verbruikte energie	39
	2. Mogelijke verschuivingen in het energieverbruikspatroom	39
	3. Mogelijke energiebesparingen	40
	4. Verwachte verschuivingen in het energieverbruik	43
III.	Ammoniaksynthese	44
	1. Inleiding	44
	2. De bereiding van ammoniak uit methaan en het bijbehorend theoretisch energieverbruik	44
	3. Ammoniaksynthese – het feitelijke proces	45
	4. Besparingsmogelijkheden voor energie	45
IV.	IJzer- en staalindustrie	46
	1. Inleiding	46
	2. Het huidige proces en de energiebehoefte	46
	3. Mogelijkheden tot energiebesparingen bij de huidige installaties	47
	4. Flexibiliteit	48
	5. Nieuwe ijzer- en staalbereidingsprocessen	48
V.	Verpakkingsindustrie	49
	1. Inleiding	49
	2. Blik	49
	3. Glas	49
	4. Papier en karton	50
	5. Plastic	50
	6. Totaal energieverbruik voor verpakkingsmateriaal	51
VI.	Aluminiumbereiding	51
	1. Energieverbruik bij het huidige proces	51
	2. Mogelijkheden tot energiebesparing	51
	3. Nieuwe processen	52
	4. Recycling	53
VII.	Energieverbruik in de voedings- en genotmiddelenindustrie	53
	1. Inleiding	53
	2. Energieverbruik bij de produktie van eetbare oliën, vetten en margarine	53
	3. Energieverbruik bij de produktie van zeep en wasmiddelen	55
VIII.	Fermentatieprocessen en hun bijdrage aan de energiebesparing	55
	1. Inleiding	55
	2. Produktie via het proces met de laagste energiekosten	55
	3. Energie winnen uit verloren afval	57
	4. De grondstoffenfactor	57
IX.	Samenvatting en conclusies	57
X.	Samenstelling van de werkgroep	61
XI.	Literatuur	61

Hoofdstuk 4. Besparingen in de elektriciteitsopwekking

door de werkgroep "Opwekking Elektriciteit"

I.	Inleiding	62
II.	De elektriciteitsvoorziening in de toekomst door prof. ir. J.J.C. van Lier	62
	1. Inleiding	62
	2. Welke primaire energie?	63
	3. Minimaal verlies bij energie-omzetting	66
	4. Produktie van elektrische energie met behulp van fossiele brandstoffen	67
	5. Produktie van kernenergie	70
	6. Gecombineerde produktie van elektriciteit en warmte	71
III.	De brandstofcel door dr. G.H.J. Broers	72
	1. Inleiding	72
	2. Toepassingen van de brandstofcel	75
	3. Nog te onderzoeken problemen	76
	Bijlage 1. Enkele technische gegevens over brandstofcellen	77
IV.	Gecombineerde produktie van elektriciteit en warmte door ir. H. Hondius en ir. K. Wassenaar	81
	1. Kracht/warmtesystemen	82
	1. Gecombineerde produktie van elektriciteit en warmte in de industrie	83
	2. Stedelijke voorziening	83
	3. Gastuinbouw	85
	4. Installaties in de utiliteitsbouw	86
V.	Samenvatting en conclusies	88
VI.	Samenstelling van de werkgroep	88
VII.	Literatuur	89

Hoofdstuk 5. Besparingsmogelijkheden bij het energieverbruik in woningen en andere gebouwen

door de werkgroep "Verbruik in woningen en gebouwen"

I.	Inleiding	91
II.	Huishoudelijk energieverbruik	92
	1. Woningverwarming	92
	1. Inleiding	92
	2. Uitgangspunten scenario	92
	3. Besparingsmogelijkheden door thermische isolatie	93
	4. Besparingsmogelijkheden door andere maatregelen	94
	5. Mogelijke besparingen in 1985	95
	6. Financiële aspecten	95
	2. Gasverwarmingapparatuur	96
	1. Inleiding	96
	2. Rendementen	96
	3. Maatregelen ter verbetering van gebruiksrendementen	96
	4. Mogelijke besparingen in 1985	98
	5. Kostenaspect	100
	3. Elektrische huishoudelijke apparatuur door dr. ir. E.T. Ferguson	100
	1. Inleiding	100
	2. Mogelijke besparingen in 1985	101
	3. Discussie	104

III.	Energieverbruik in andere gebouwen	105
	1. Inleiding	105
	2. De besparingsmogelijkheden	105
	1. Bouwkundige maatregelen	105
	2. Installatietechnische maatregelen	106
	3. Maatregelen van "huishoudelijke" aard	107
	3. Mogelijke besparingen	107
IV.	Niet-conventionele verwarmingsmogelijkheden (zonnestraling)	108
	1. Inleiding	108
	2. Het opvangen van de zonnestraling	109
	3. Toepassing in een doorsnee woning	109
	4. Financiële aspecten	110
	5. Invloed op het Nederlands energieverbruik	110
V.	Samenvatting en conclusies	111
VI.	Samenstelling van de werkgroep	114
VII.	Literatuur	114

Hoofdstuk 6. Besparingsmogelijkheden in verkeer en vervoer

redactie door ir. J. Overeem

I.	Verkeer en vervoer als maatschappelijk verschijnsel	115
II.	Enkele besparingsmogelijkheden door indirecte beïnvloeding van het verkeer	117
	1. De verdeling van activiteiten in de ruimte	117
	2. Spreiding van activiteiten in de tijd	117
	3. Vermindering van de vervoersbehoefte	118
	1. Noodzaak van verplaatsingen	118
	2. Mogelijkheden van telecommunicatie door dr. F.W. de Vrijer	118
III.	Directe besparingsmogelijkheden in verkeer en vervoer	118
	1. Directe beïnvloeding van het verkeer en vervoer	119
	1. Energieverbruik van de vervoermiddelen	119
	2. Mogelijke verschuivingen in het voertuiggebruik	119
	3. Verhoging van bezettings- en beladingsgraad	122
	4. Wijzigingen in de verkeersafwikkeling	123
IV.	Ontwikkelingen in de voertuig- en voortstuwingstechniek	124
	1. Historische ontwikkeling door prof. ir. J.J. Broeze	124
	2. Voertuigtechniek	126
	3. Voortstuwingstechniek	129
	1. Wegvoertuigen	129
	2. Railvoertuigen	131
V.	Conclusies	132
VI.	Samenstelling van de werkgroep	133
VII.	Literatuur	133

Hoofdstuk 7. Energiebehoefte voor het milieu

door prof. dr. ir. N.W.F. Kossen

I.	Inleiding	134
II.	Energiebehoefte voor het treffen van milieumaatregelen	136
	1. Luchtverontreiniging	136
	2. Waterverontreiniging	140
	3. Bodemverontreiniging	142

4. Milieuverontreiniging in de vorm van geluid	142
5. Milieuverontreiniging in de vorm van warmte	142
6. Algemene ramingen	143
III. Conclusies en aanbevelingen	143
IV. Samenstelling van de werkgroep	144
V. Literatuur	144

Hoofdstuk 8. Economische en sociale aspecten van energiebesparing

door de werkgroep "Sociaal-Economische Facetten"

I. Economische aspecten van het energie- vraagstuk door drs. J.A. Bourdrez en prof. dr. L.H. Klaassen	146
1. Inleiding	146
2. Het probleem van de energieschaarste	146
3. Verband tussen prijs van en vraag naar energie	147
4. De energieprijis als instrument	148
5. Vraagelasticiteiten	148
6. Geaccumuleerd energieverbruik per bedrijfstak door drs. S. Koorn en drs. M.J. Stoffers	149

7. Energiebesparing en investering door ir. G.W. van Stein Callenfels	153
8. De oliecrisis van 1973/74	154
9. Een wereldenergiepolitiek	155
10. Samenvatting en conclusies	155
II. Energiebesparing als maatschappelijk vraagstuk door prof. dr. H.M. Jolles	155
1. Inleiding	155
2. Ontwikkelingen in het denken over natuurlijke hulpbronnen	156
3. Maatschappelijke kanten van resultaten der studie	157
4. De energieverbruiker	158
5. Samenwerking tussen wetenschappen	160
6. Afsluitende opmerkingen	160
III. Samenstelling van de werkgroep	162
IV. Literatuur	163

Energiebesparing: mogelijkheden tot besparing en tot het afremmen van de groei van het verbruik (Samenvatting van de studieresultaten)

door dr. ir. W.J. Beek	164
Eenheden en omzettingsfactoren	192

Hoofdstuk 1. Energie – Huidige situatie en vooruitzichten

door de werkgroep **Achtergronden en Oriëntatie**¹⁾

I. Inleidende opmerkingen

In de afgelopen paar jaren zijn een groot aantal studies gepubliceerd over energie, waarvan enkele, te weten [1, 2 en 3], de voornaamste aspecten van het onderzoek uitvoerig en diepgaand belichten. Wanneer we aan deze steeds langer wordende lijst nog een titel toevoegen, dan moet daar wel een rechtvaardiging voor zijn. Eén argument ontlenen wij aan het feit dat slechts een paar van deze studies uitsluitend zijn gericht op *energiebesparing in haar totaliteit* en dat er zelfs geen enkele bestaat die zich in het bijzonder bezig houdt met de situatie in Nederland. Wij hopen daarom dat de onderhavige studie een bijdrage zal leveren aan de formulering van een nationaal energiebeleid voor Nederland.

Deze studie is tevens een logisch vervolg op de studies die de Stichting al eerder heeft gewijd aan de opwekking [4, 5] en transmissie [6] van elektriciteit. In dit verband moet eraan worden herinnerd dat besparing van de meest schaarse primaire brandstoffen de rol van de elektriciteit nog belangrijker zal maken, althans tot aan het einde van deze eeuw. Ten slotte menen wij dat de studie oorspronkelijk materiaal van internationale betekenis bevat, in het bijzonder ten aanzien van de sociale gevolgen van de besparingsmaatregelen.

Als grondslag voor de eigenlijke studie, wordt in dit inleidende hoofdstuk begonnen met het schetsen van een beeld van de vraag naar en het aanbod van energie op mondiaal niveau en het daarmee corresponderende patroon voor Nederland. Daarna volgt een kort overzicht van de technische mogelijkheden voor het verminderen van de druk, uitgeoefend op die energiedragers waarvoor een direct tekort dreigt en die tezelfdertijd moeten voldoen aan het grootste deel van de vraag: vloeibare en gasvormige koolwaterstofbrandstoffen. De laatste paragraaf geeft een aanduiding van de problemen die zich in de toekomst bij de energievoorziening zullen voordoen en de rol die energiebesparing bij de oplossing daarvan kan spelen.

Aard en perspectief van een werk als dit worden groten-deels bepaald door het tijdvak waarover het zich uitstrekt. De bij soortgelijke studies gebruikelijke praktijk wordt ook hier gevolgd en zij houdt verband met de tijd die nodig is, voordat wezenlijke technologische, economische en sociaal-economische veranderingen zich hebben voltrokken.

De vooruitzichten voor de energiehuishouding zijn daarom als volgt onderverdeeld:

- op korte termijn (1973-1985);
- op middellange termijn (1985-2000);
- op lange termijn (na 2000).

In deze studie zullen wij ons vooral bezighouden met de vooruitzichten op korte termijn voor Nederland. Relevante ontwikkelingen op middellange termijn zullen een enkele maal worden gezien, maar koffiedikkijkerij voor de jaren na 2000 zal vrijwel geheel worden vermeden.

II. Energie – Vraag en aanbod

II. 1. Beeld van de wereldsituatie

II.1.1. De groeiende vraag

Men beseft algemeen dat het welzijn van de mens nauw is verbonden met de beschikbaarheid en het gebruik van energiebronnen. Het gebruik van energie is altijd een sleutel geweest tot de voedselvoorziening, tot fysieke gemakken en tot de kwaliteit van het bestaan in het algemeen.

De onmiddellijke energiebron van de mens is zijn voedsel, waarvan hij per dag een calorische waarde tot zich moet nemen die gelijk is aan ca. $8,4 \times 10^6$ J (2000 kcal) en als hij zware lichamelijke arbeid verricht, heeft hij tweemaal zoveel nodig. Ongeveer 25% wordt omgezet in mechanische arbeid – de menselijke spierkracht levert dus $2,1 \times 10^6$ J (500 kcal) per dag. Wanneer er in vroeger tijden een overvloed aan voedsel was, vermeerderde de mens de hem ter beschikking staande mechanische arbeid door gebruik te maken van de spierkracht van slaven en van trek- en lastdieren.

Toen de mens niet langer als nomade leefde, leerde hij doelmatig gebruik te maken van de krachten van wind, water en vuur¹⁾. Tegen het einde van de Middeleeuwen had de voor die tijden moderne Westeuropese landbouwer niet alleen de kracht van water- en windmolens en wat steenkoolenergie tot zijn beschikking, maar hij was ook in staat tot het bouwen van bewapende zeilschepen, waarmee hij afgelegen delen van de wereld veroverde.

De ontwikkeling van de mens kwam echter in een stroomversnelling door de ontdekking dat met behulp van het vuur arbeid kon worden verricht. Van hout ging hij over op steenkool – de energiebron die de drijfveer vormde voor de Industriële Revolutie.

Met de komst van de elektriciteit tegen het einde van de 19e eeuw stond vervolgens de weg open voor een ongekend veelzijdige industriële ontwikkeling. Sedert die tijd is het energieverbruik in de wereld (maar vooral in de geïndustrialiseerde landen) gegroeid in een tempo dat alleen maar wordt geëvenaard door het toenemen van de materiële rijkdom (zie Tabel 13).

¹⁾ Paragraaf III.4 is een bijdrage van prof. dr. C.M. Braams.

¹⁾ Volgens Kretzoi c.s. [7] dateren de oudste bewijzen van het gebruik van vuur door de mens van 450.000 jaar terug.

Intussen kwamen er andere brandstoffen — aardolie in het begin van deze eeuw en aardgas in het begin van de dertiger jaren — die de steenkool aanvulden en haar naderhand vervingen.

Sedert het midden van deze eeuw heeft de groei van de vraag naar energie een soortgelijk karakter aangenomen als de bevolkingsexplosie. Maar hoewel er stellig verband tussen die beide bestaat, is dit zeker geen eenvoudige relatie. De hoog geïndustrialiseerde gebieden, met een geringe bevolkingsaanwas, tonen het beeld van een hoog — en nog altijd stijgend — verbruik per hoofd van de bevolking. In de ontwikkelingslanden, waar de bevolkingsaanwas de meest invloedrijke factor is, vertoont het verbruik per hoofd van de bevolking — nog altijd op een laag niveau — slechts een matige toename. In 1970 varieerde het energieverbruik per hoofd van de bevolking in de rijke landen van 300×10^9 J per jaar in de Verenigde Staten tot 115×10^9 J in Europa en de Sowjet-Unie en 86×10^9 J in Japan. In tegenstelling hiermee bereiken de bevolkingsmassa's van bijvoorbeeld India of Brazilië slechts een verbruik per hoofd van de bevolking van ca. 15×10^9 J per jaar — een niveau dat vergelijkbaar is met dat van de meer ontwikkelde samenlevingen in het Europa van de Middeleeuwen [5]. In het algemeen is een hoog energieverbruik per hoofd van de bevolking een voorwaarde voor een hoge produktie van goederen en diensten. Dit blijkt in verband te staan met het economische niveau van een land, de nadruk welke ligt op de zware industrie en de doeltreffendheid waarmee energie wordt omgezet in arbeid.

Tegen deze achtergrond zal het duidelijk zijn dat, zelfs indien de grote verbruikers hun energiehonger zouden matigen en hun groeitempo verlagen, de wereld als geheel naar alle waarschijnlijkheid nog altijd een voortdurend toenemende vraag naar primaire energie te zien zou geven.

Van dit vermoedelijke groeitempo zijn verscheidene ramingen gemaakt voor de nabije en verdere toekomst. Gezien de vele potentiële invloedsfactoren — bijvoorbeeld de mogelijkheid van een aanzienlijke afvlakking in de groei van de vraag als gevolg van sociaal-economische ontwikkelingen aan de ene kant en het extra energieverbruik voor milieubescherpende maatregelen aan de andere kant — is het niet te verwonderen dat de

ramingen nogal sterk uiteenlopen. Daarom is het enigszins bevreemdend dat goed gedocumenteerde organen als de Europese Commissie en het Secretariaat van de Verenigde Naties zich blijken te beperken tot het extrapoleren van de bestaande trend, gebaseerd op een bijna constante gemiddelde jaarlijkse toename en weinig aandacht schenken aan de hierboven genoemde (verzachtende) invloedsfactoren.

Een analyse van deze ramingen op basis van het energieverbruik per hoofd van de bevolking in de vrije markteconomieën, de centraal geleide economieën en de ontwikkelingsgebieden (zie Tabel 1) laat zien dat de EEG-ramingen voor 1985 overeenkomen met een verondersteld verbruik per hoofd van de bevolking van 320×10^9 J in de gebieden met een vrije markt — het huidige peil van het verbruik in de Verenigde Staten. In het licht van de sterk stijgende prijs van primaire energie lijkt dit zeer de vraag.

De in de raming van de VN voor het jaar 2000 veronderstelde verdere verdubbeling is nog twijfelachtiger. Daarom komt de vraag aan de orde of het niet realistischer zou zijn rekening te houden met een vertraging van de groei in het energieverbruik na 1985, hoewel sommige groepen van mening zijn dat hiervoor een ernstige economische recessie of een vele sectoren omvattend regeringsdirigisme nodig zal zijn.

Ten behoeve van deze studie is aangenomen dat de landen met een vrije markteconomie een verzadigingsniveau van energieverbruik bereiken in 1985 of iets eerder (als de regeringen gerichte maatregelen nemen voor energiebesparing en bepaalde milieubescherpende maatregelen die veel energie zouden kosten achterwege laten) en dat de landen met een centraal geleide economie een groei per hoofd van de bevolking realiseren van 50% tussen 1985 en 2000, terwijl de ontwikkelingslanden voor dezelfde periode een groei doormaken van 150% per hoofd van de bevolking. Dan ontstaat het volgende beeld:

Tabel 2. Raming van de wereldvraag naar energie

	Vraag in 10^{18} J
1970	200 (bij benadering)
1985	400-470
2000	680-790
2030	1450-1550

Tabel 1. Gegevens en ramingen voor de toekomst van het energieverbruik per hoofd van de bevolking in de drie hoofdgebieden van de wereld

	Vrije markteconomie			Centraal geleide economie		
	1970 ¹⁾	1985 ²⁾	2000 ³⁾	1970 ¹⁾	1985 ²⁾	2000 ³⁾
Bevolking (10^9)	0,76	0,85	1,0	1,13	1,45	1,7
Primaire energie						
— Totaal (10^{18} J p.j.)	119	270	569	58	137	374
— Per hoofd (10^9 J p.j.)	157	318	569	51	95	220
	Ontwikkelingslanden			Wereldtotaal		
	1970 ¹⁾	1985 ²⁾	2000 ³⁾	1970 ¹⁾	1985 ²⁾	2000 ³⁾
Bevolking (10^9)	1,74	2,55	3,8	3,6	4,85	6,5
Primaire energie						
— Totaal (10^{18} J p.j.)	22	54	108-194	199	461	1.051-1.137
— Per hoofd (10^9 J p.j.)	13	21	28-51	55	95	162-175

¹⁾ Cijfers VN en Shell.

²⁾ Raming Europese Commissie.

³⁾ Raming Secretariaat VN.

Wegens de veronderstelde sterke afremmende invloeden is de geraamde vraag aanzienlijk lager dan het cijfer dat in een voorgaande studie van de Stichting is genoemd ([5], Hoofdstuk 1, Figuur 2).

Tegen de achtergrond van het in Tabel 2 gegeven groeipatroon zullen wij de omvang bezien van de wereldvoorraden aan primaire energie.

Het belangrijkste aspect van het verbruikspatroon is het op grote schaal vervangen van steenkool door olie en aardgas als primaire energiedragers gedurende de afgelopen vijftig jaar. Olie en aardgas zijn nu de voornaamste leveranciers van primaire energie (resp. voor ca. 50% en 15%) aan de landen met een vrije markteconomie. De betekenis en de invloed van deze verschuiving kunnen worden afgeleid uit het feit dat de bijdrage van vaste brandstoffen aan het wereldenergieverbruik in 1950 61,5% bedroeg. Aangezien de productie van aardgas in de Verenigde Staten technisch gesproken haar hoogtepunt nadert, terwijl naar verwacht wordt ditzelfde in de tachtiger jaren in Europa zal geschieden, zal de rol van aardolie in het totaal der energiedragers relatief gesproken in de komende jaren nog verder in betekenis toenemen. Europa en Japan betrekken het grootste deel van hun aanvoer van deze economisch vitale grondstof uit het Midden-Oosten en Afrika, en zelfs de Verenigde Staten, vanouds de grootste olieproducent, dient zich nu al op deze zelfde markten als belangrijke koper aan.

Gezien het bovenstaande zullen de omvang van de

wereldvoorraden aan ruwe olie en het tempo waarin ze worden aangesproken, in de volgende paragraaf nader worden onderzocht.

II.1.2. Voorraden¹⁾

Schattingen van de wereldvoorraden aan fossiele brandstoffen lopen, al naar de toegepaste definitie, sterk uiteen.

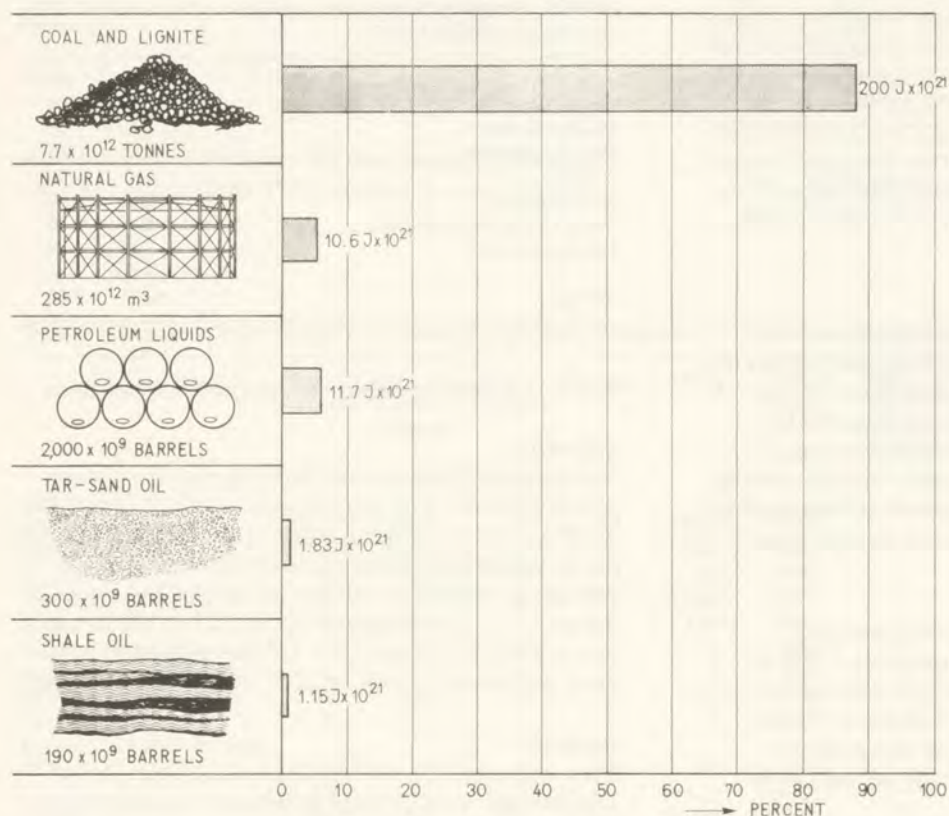
'Bewezen reserves' zijn die hoeveelheden, waarvan men weet, dat zij zich in onderzochte aardlagen bevinden en dat zij door middel van de huidige technieken en op het huidige kostprijsniveau commercieel ontginbaar zijn.

'Uiteindelijk winbare reserves' bestaan bovendien uit:

- fossiele brandstof waarvan men kan aannemen dat zij zich in de reeds onderzochte aardlagen bevindt, maar waarvan de produktie thans oneconomisch of technisch onmogelijk zou zijn;
- fossiele brandstof waarvan mag worden verondersteld dat zij in formaties waarvan het bestaan wordt verwacht aanwezig is, maar die tot nu toe nog niet is geïdentificeerd.

Figuur 1 geeft een algemeen beeld van 's werelds oorspronkelijk aanwezige reserves aan uiteindelijk winbare fossiele brandstoffen.

¹⁾ Opmerking: voorraden = alles wat er is;
reserves = dat deel van de voorraden waarvan met min of meer waarschijnlijkheid kan worden aangenomen dat zij ook winbaar zijn.



Figuur 1. Energie, aanwezig in 's werelds oorspronkelijk aanwezige reserves aan uiteindelijk winbare fossiele brandstoffen, uitgedrukt in eenheden van 10²¹J. Steenkool en bruinkool bijvoorbeeld bevatten 200 x 10²¹J aan energie en vertegenwoordigen 88,8% van de winbare energie.

In het licht van dit totaal generaal van 225×10^{21} J zou het in de tabellen 1 en 2 gegeven verbruikspatroon geen reden voor onmiddellijke bezorgdheid zijn, ware het niet dat slechts 11,2% van dit totaal bestaat uit olie en aardgas, de brandstoffen dus waarnaar de grootste vraag is. En de vooruitzichten worden nog somberder als men kijkt naar de geografische spreiding van de reserves aan fossiele brandstof.

Steenkool

De wereldreserves aan steenkool zijn tamelijk goed af te leiden uit de bestaande geologische kaarten. Averitt [8] houdt hierbij de volgende beperkingen aan ten aanzien van de steenkoollagen:

- minimum dikte van 0,3 m;
 - maximum diepte van 1.200 m;
- en komt dan op een cijfer van $15,3 \times 10^{12}$ ton voor de totale oorspronkelijke steenkoolvoorraden in de wereld. Ongeveer 50% van dit totaal wordt beschouwd als uiteindelijk winbare reserves aan steenkool en bruinkool, door Averitt geraamd op $7,7 \times 10^{12}$ ton (ca. 200×10^{21} J). Dit is ruw geschat 14 maal de wereldreserves aan aardolie. Averitt's ramingen van de uiteindelijk winbare steenkool en bruinkool in de verschillende delen van de wereld worden weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3. Wereldreserve aan uiteindelijk winbare steenkool en bruinkool [8]

	10^{12} ton	10^{21} J	%
Sowjet-Unie (incl. Europees Rusland)	4,3	114	56
Noord-Amerika	2,1	56	27
Azië (excl. Sowjet-Unie)	0,7	18,4	9
West-Europa	0,4	10,6	5
Overige gebieden	0,2	5,0	3
Totale reserves	7,7	204	100

Met andere woorden, 83% van de wereldreserve aan winbare steenkool bevindt zich in de Sowjet-Unie en Noord-Amerika¹⁾.

Olie

Over de omvang van de wereldreserves aan aardolie bestaat veel verschil van mening. Dit ligt aan het feit dat aardolie wordt aangetroffen in sedimentaire bassins van beperkte omvang en op uiteenlopende diepten. Er worden statistische methoden gebruikt voor het vaststellen van de uiteindelijk winbare hoeveelheden op basis van uit bewezen reserves afgeleide stellige gegevens. Recente cijfers over bewezen reserves worden gegeven in de eerste kolom van Tabel 4.

Een recent onderzoek [11] geeft ramingen voor uiteindelijk winbare reserves van tussen de 1.300 en 2.500×10^9 barrels. King Hubbert die zich daarbij beroept op Ryman (Standard Oil Company of New Jersey, 1967), geeft de geografische spreiding van uiteindelijk winbare oliereserves zoals vermeld in de tweede kolom van Tabel 4.

Hoewel de vondsten in de Noordzee (de uiteindelijk

Tabel 4. Wereldreserves aan ruwe olie

	Bewezen reserves [9] 10^9 barrels	Uiteindelijk winbare reserves [10] 10^9 barrels
Midden-Oosten	345,0	600
Sowjet-Unie, Oost-Europa en China	67,1	500
Noord-Amerika	46,4	295
Afrika	50,9	250
Latijns-Amerika	29,1	225
Verre Oosten/Australazië	14,2	200
West-Europa	7,1	20
Totaal	559,8	2.090

winbare reserves werden in 1974 geraamd op 20×10^9 barrels [12]) Ryman's cijfer voor West-Europa zijn waarde hebben doen verliezen, is het nieuwe totaal nog altijd niet groot genoeg om verandering te brengen in het algemene patroon. De oliebronnen voor West-Europa liggen voornamelijk in het Midden-Oosten en Afrika.

Aardgas

Hoewel de ramingen van de wereldreserves aan uiteindelijk winbaar aardgas een aanwijzing vormen dat zij van dezelfde orde van grootte zijn als die aan olie, dient men wel te bedenken, dat het vervoer van aardgas over zee heel wat ingewikkelder en kostbaarder is [5]. Een raming van de wereldreserve aan uiteindelijk winbaar aardgas geeft ca. 285×10^{12} m³. [10]. Een van de ramingen stelt de bewezen wereldreserves aan aardgas op 53×10^{12} m³ met een geografische spreiding als gegeven in Tabel 5.

Tabel 5. Geografische spreiding van de bewezen wereldreserves aan aardgas [13]

	10^{12} m ³	%
Sowjet-Unie, Oost-Europa en China	18,8	36
Midden-Oosten	9,8	18
Noord-Amerika	9,2	17
Afrika	5,0	10
West-Europa	5,0	10
Verre Oosten/Australazië	3,0	5
Latijns-Amerika	2,2	4
Totaal	53,0	100

II.1.3. Toekomstige verbruiks- en productiepatronen

Steenkool

Het wereldverbruik van steenkool en bruinkool steeg tussen 1950 en 1970 met iets meer dan 50%: van $1,5 \times 10^9$ tot $2,3 \times 10^9$ ton per jaar [14]. Verwacht wordt dat de wereldproductie van steenkool en bruinkool jaarlijks zal toenemen met een percentage van tussen de 1,5 en 2,5 — of tot ongeveer $3,1$ tot $3,7 \times 10^9$ ton per jaar in 1985 en $4,0$ tot $4,5 \times 10^9$ ton per jaar in 2000. Deze productie zal voor ca. 90% uit steenkool bestaan.

Aardolie

Twee gebieden (Noord-Amerika en de Sowjet-Unie) leverden een grote bijdrage zowel aan de productie als aan het verbruik van (hun eigen) olie in de wereld, terwijl het Midden-Oosten en Afrika 's werelds voornaamste olie-exporteurs zijn geweest. Latijns-Amerika en het Verre Oosten zorgen voornamelijk voor een evenwicht (zie Tabel 6).

¹⁾ In 1973 is door Shell medegedeeld dat zich op Sumatra (Indonesië) meer dan 10^{12} ton aan steenkoollreserves bevinden.

Tabel 6. Wereldproductie van ruwe olie, verdeeld over de voornaamste gebieden (10⁶ barrel per dag)

	1950	1960	1970	1972
	[14]	[14]	[14]	[15]
Midden-Oosten	1,8	5,3	14,0	18,0
Noord-Amerika	5,5	7,6	10,9	13,0
Sowjet-Unie, Oost-Europa en China	0,8	3,3	7,9	9,0
Afrika	—	0,3	6,0	5,8
Latijns-Amerika	2,0	3,7	5,2	4,9
Verre Oosten/Australazië	0,2	0,6	1,5	1,9
West-Europa	—	0,2	0,3	0,4
Totaal	10,3	21,0	45,8	53,0

Gezien de kennelijke afhankelijkheid van de grote olie-importeurs (West-Europa, Japan en in toenemende mate de Verenigde Staten) van de olie uit het Midden-Oosten en Afrika (zie Tabel 7), is het van belang dat in deze beide gebieden nog hogere produktieniveaus technisch mogelijk worden geacht (zie Tabel 8).

Tabel 8. Technisch mogelijke produktieniveaus voor de voornaamste olie-exporterende landen (10⁶ barrel per dag) [16]

	1973	1976	1980	1985
Saoedi-Arabië	6,6	10	14	23
Iran	5,6	8	9	10
Irak	1,8	3	5	8
Koeweit	3,3	3,5	3,5	3,5
Aboe Dhabi	1,2	2,5	4,5	5,5
Libië	2,2	2,5	3	2,5
Nigeria	2	2,5	3	3
Venezuela	3,3	3,4	2,5	2,5
Indonesië	1,4	2,5	2,5	3
Totaal	27,4	37,4	47,0	61,0

Het is van grote betekenis dat deze mogelijke niveaus voor de periode 1980-1985 aanzienlijk hoger zijn dan

uit enige voorgaande raming is gebleken en in feite dicht bij hun technisch hoogtepunt zouden kunnen liggen. Bovendien vormt de mogelijkheid van een monetair oververzadiging in de producerende landen een politiek-economische belemmering voor het bereiken van deze niveaus.

De Noordzee-productie is weliswaar van belang, maar er wordt niet verwacht dat zij vóór 1980 een bijdrage van betekenis levert. Geraamd wordt dat zij in 1985 een niveau bereikt van omstreeks 4,5 X 10⁶ barrel per dag [17]. Met de productie in Alaska zal vóór 1978 een begin worden gemaakt en naar verwachting zal zij ca. 5 X 10⁶ barrel per dag kunnen gaan bedragen (een speculatieve raming van de hoeveelheid uiteindelijk winbare olie in Alaska geeft een cijfer van 30 tot 50 X 10⁹ barrel).

Aardgas

Gezien de bijzondere kenmerken (buitengewoon hoge investerings- en transportkosten in vergelijking met een hoeveelheid olie van gelijke calorische waarde) vond de productie van aardgas in eerste instantie plaats in de meer directe nabijheid van grote verbruikscentra. Vervolgens werden door een verbeterde techniek ten aanzien van pijpleidingen grotere gebieden bereikbaar, zodat in 1972 het aardgas kon voldoen aan 31% van de totale energiebehoefte van de Verenigde Staten [15] en aan ca. 25% van die van de Sowjet-Unie. Een soortgelijke ontwikkeling vond enige tijd later in Europa plaats. Daar voorzag aardgas in 10% van de totale energiebehoefte in 1972 [15].

Het vervoer overzee van aardgas in vloeibare vorm heeft overzeese bronnen opengesteld voor gebieden die het gas dringend nodig hebben — met name Japan, West-Europa en de Verenigde Staten.

Het wereldverbruik van aardgas steeg van 134 X 10⁹ m³ per jaar in 1950 tot 480 X 10⁹ m³ per jaar (1960) en tot 1090 X 10⁹ m³ per jaar in 1972 [14, 15]. Tabel 9 toont de geografische spreiding van dit verbruik in 1972. (Het produktiepatroon was soortgelijk).

Tabel 7. Geraamd wereldaanvoerpatroon van olie, per zone, gedurende 1972 (10³ barrel per dag) [15]

Van:	Noord-Amerika	Cari-bische gebieden	Zuid-Amerika	Europa	Afrika	Midden-Oosten en Levant	Vaste-land India/Pakistan	Verre Oosten	Austra-lazië	Sowjet-Unie/Oost-Europa/China	Totaal
Naar:											
Noord-Amerika	1.350 ¹⁾	2.650	35	195	800	830	1	200	5	25	6.091
Caribische gebieden	15	1.050 ¹⁾	35	5	340	150	—	55	—	120	1.770
Zuid-Amerika	10	155	25 ¹⁾	5	85	435	—	—	1	1	717
Europa	70	470	5	2.420 ¹⁾	4.200	8.500	1	20	10	1.005	16.701
Afrika	2	45	—	100	130 ¹⁾	680	—	5	3	60	1.025
Midden-Oosten en Levant	—	2	—	8	5	625 ¹⁾	1	—	—	4	645
Vasteland India/Pakistan	3	—	—	—	3	450	1 ¹⁾	10	—	10	477
Verre Oosten	50	20	1	1	105	5.080	7	1.185 ¹⁾	30	20	6.499
Australazië	8	3	—	—	1	335	1	75	20 ¹⁾	—	443
Sowjet-Unie/Oost-Europa/China	—	—	—	40	50	115	—	—	—	2)	205
Totaal	1.508	4.395	101	2.774	5.719	17.200	12	1.550	69	1.245	34.573
Netto import (-)/export (+)	-4.583	+2.625	-616	-13.927	+4.694	+16.555	-465	-4.949	-374	+1.040	

¹⁾ Internationale interzonale bewegingen.

²⁾ Niet beschikbaar.

Tabel 9. Wereldverbruikspatroon van aardgas in 1972 [15]

	10 ⁹ m ³	%
Noord-Amerika	630	58
Sowjet-Unie	210	19
West-Europa	120	11
China en Oost-Europa	60	6
Rest van de wereld	70	6
Totaal	1.090	100

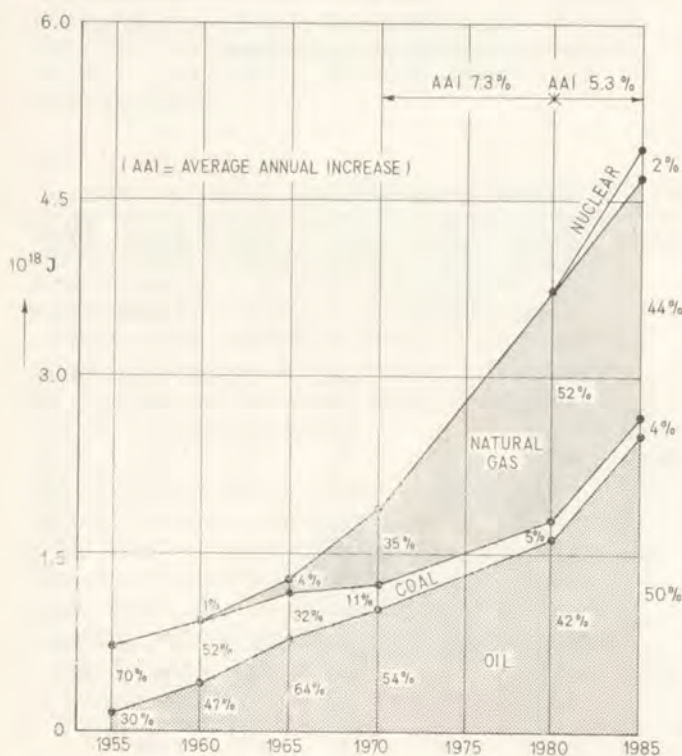
Gezien het feit dat de Europese produktie waarschijnlijk in de tachtiger jaren met een verdubbeling van de 1972-produktie haar hoogtepunt zal bereiken [17], zijn reeds grote contracten aangegaan met de Sowjet-Unie en enige Noord-Afrikaanse landen. Aldus ontwikkelt zich opnieuw het patroon van de afhankelijkheid van Europa van derde landen.

De in deze paragraaf geschetste situatie laat zien dat de wereld, en in het bijzonder de landen met een vrije markteconomie, de voorraden vloeibare en gasvormige koolwaterstoffen in een snel tempo uitputten en dat zij aldus in toenemende mate afhankelijk worden van een zeer beperkt aantal leveringslanden.

We zullen nu bezien in hoeverre de situatie in Nederland verschilt van dit algemene beeld.

11.2. De situatie in Nederland

Volgens in 1971 gemaakte ramingen zou het verbruik van primaire energie in Nederland een ontwikkelingspatroon en een spreiding over primaire energiedragers kunnen vertonen zoals is aangegeven in Figuur 2 [5].



Figuur 2. Geraamd energieverbruik in Nederland. Bron: Shell, 1971.

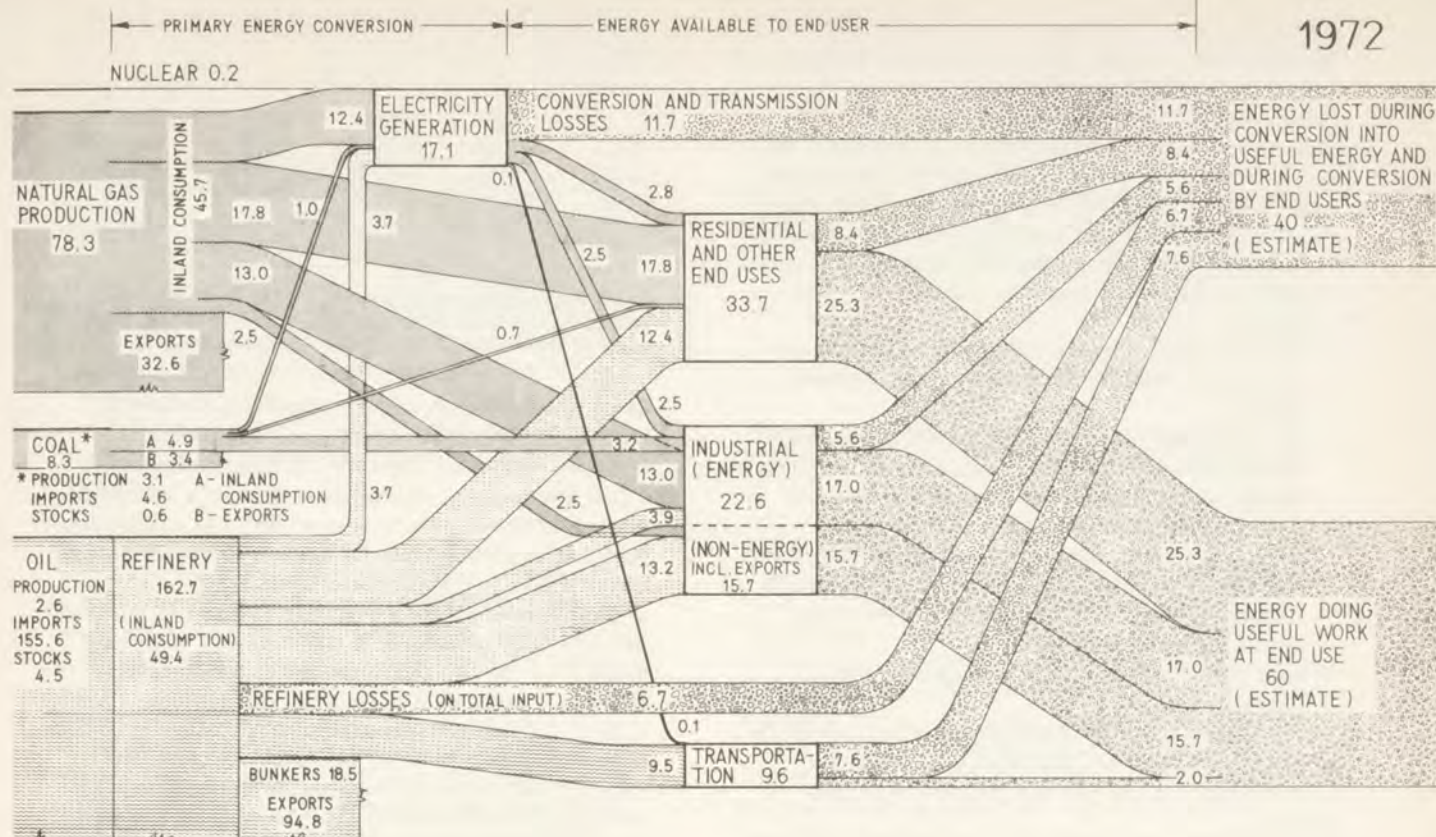
Aangezien de winbare reserves aan aardgas in Nederland thans worden geschat op ongeveer $2.500 \times 10^9 \text{ m}^3$ (dat is 5% van de bewezen wereldreserves) is het duidelijk dat deze brandstof een ongewoon belangrijke rol speelt in het totale beeld. In 1972 bedroeg de produktie $57,5 \times 10^9 \text{ m}^3$. Verwacht wordt, dat mogelijke bijkomende reserves op het Nederlandse vasteland gering zullen zijn vergeleken met het veld van Groningen en het algemene beeld weinig zullen beïnvloeden. Reserves onder het continentaal plat behoren uiteraard tot de 'uiteindelijk winbare' categorie, maar tot nu toe zijn de resultaten niet te bemoedigend geweest. Er is gas gevonden en er zal nog meer worden gevonden, maar er is geen reden om aan te nemen dat de totale bijkomende reserves ook maar in de buurt van die van het voorkomen van Groningen komen. Zij zullen een bijdrage leveren aan de aardgasvoorziening van Nederland en van West-Europa, maar die zal niet van grote betekenis zijn [17]. Maar ook de aardolie is van vergelijkbare betekenis en het totale olieconsumptie zal tussen de jaren 1970 en 1980 toenemen, zij het in een enigszins verlaagd tempo; daarna zal het zich evenwel weer in sterk opgaande lijn moeten bewegen wegens het zich stabiliseren van de binnenlandse produktie van aardgas. Waar aardolie moet voorzien in tussen de 40 en 50% van de jaarlijkse behoefte aan primaire energie gedurende de periode tot 1985 (en dit percentage zal waarschijnlijk eerder hoger dan lager worden, zoals men in Hoofdstuk 2 zal zien) is het nauwelijks verbazingwekkend dat de energiepositie van Nederland zeer gevoelig zal zijn en blijven voor internationale ontwikkelingen die van invloed zijn op de olievoorziening.

Deze afhankelijkheid, op dramatische wijze beklemtoond door het Arabische olie-embargo jegens Nederland in 1973, maakt een vermindering van de druk op de olie- en gasreserves wenselijk. Dit zou kunnen geschieden op een of meer van de volgende manieren:

1. Door het stimuleren van het zoeken naar en het produceren van olie en gas in minder toegankelijke gebieden of zelfs uit ongebruikelijke bronnen, zoals teerzand en oliehoudende leisteen.
2. Door het gebruik van andere primaire energiebronnen, indien en zodra zij beschikbaar komen.
3. Door het nemen van verliesbeperkende maatregelen, hetzij bij omzetting vanuit de primaire vorm ten behoeve van het uiteindelijk gebruik, hetzij bij de verbruiker.
4. Door het afremmen van de groei van de vraag.

De eerste manier ligt op het gebied van de petroleumtechnologie en zij wordt hier niet besproken. De tweede wordt in het kort behandeld in de volgende paragraaf. De laatste twee vormen het onderwerp van deze studie. Een illustratie van het potentieel van de derde mogelijkheid wordt gegeven door het feit dat ca. 20% van het binnenlandse energieverbruik in 1972 werd besteed aan de behandeling van primaire energiedragers en aan hun omzetting in een vorm die hen geschikt maakt voor praktisch gebruik (zie Figuur 3). Men moet bovendien bedenken dat tijdens het eindverbruik nog verdere verliezen zullen optreden.

Figuur 3 toont het patroon van de energiestroom in 1972 in Nederland en illustreert de verschillende vormen van het gebruik dat van de primaire energiedragers wordt gemaakt. Uit dit patroon blijkt dat een



Figuur 3. De energiestroom in Nederland. De cijfers zijn percentages van het totale binnenlandse verbruik aan primaire energie ($2.628 \times 10^{15} \text{ J}$)¹⁾ in 1972 (excl. brandstof voor internationaal scheepsverkeer).

¹⁾ Definitief cijfer voor 1972 (Centraal Bureau voor de Statistiek)

onderzoek van de onder 3 en 4 genoemde mogelijkheden zich zou moeten richten op: de industriële sector, de opwekking en het gebruik van elektriciteit, de sector van het huishoudelijk gebruik (en andere verwante toepassingen) en de vervoerssector. Deze sectoren zullen achtereenvolgens in de komende hoofdstukken worden behandeld.

III. Andere energiebronnen voor Nederland dan olie en aardgas

In deze paragraaf houden we ons in het kort bezig met de mogelijkheid van het gebruik van andere primaire energiedragers dan olie en aardgas en onderzoeken wij enkele daarmee samenhangende ontwikkelingen in de technologie voor de omzetting van energie.

Indien wij afzien van in Nederland niet beschikbare bronnen, zoals geothermische warmte, waterkracht, getijstroom en oceanische warmtestromen en als we andere bronnen die onbruikbaar of van weinig betekenis zijn bleken voor toepassing op grote schaal in een (post-) industriële samenleving (zoals windkracht en organisch afval) [18] terzijde laten, dan blijven ons de volgende mogelijkheden:

- steenkool en bruinkool;
- uranium en thorium (kernsplijting);
- zonnestraling;
- lithium en deuterium (kernfusie).

Alleen de beide eerstgenoemde lijken enige vooruitzichten op korte termijn te bieden. Zonne-energie kan bij het in Nederland heersende klimaat, op zijn hoogst worden beschouwd als een kandidaat op middellange termijn, terwijl alle deskundigen het er over eens schijnen te zijn, dat van energie uit kernfusie vóór het begin van de volgende eeuw geen noemenswaardige bijdrage mag worden verwacht.

Binnen het in deze studie vooral behandelde tijdvak (tot 1985) moet zelfs de invloed van steenkool en uranium op de behoeften aan olie en aardgas minimaal worden geacht. Verschillende moeilijk tot uitdrukking te brengen, maar niettemin op elkaar inwerkende factoren belemmeren het doordringen op de markt van deze vervangingsmiddelen.

III.1. Steenkool

In 1974 is de laatste Nederlandse kolenmijn gesloten. De redenen voor het geleidelijk beëindigen van de steenkoolwinning in Nederland waren:

- de lage prijs van ruwe aardolie;
- de aanzienlijk lagere prijs van uit de Verenigde Staten en Polen via Westeuropese Atlantische havens ingevoerde steenkool;
- de ontdekking van het aardgasvoorkomen in Groningen met een reserve van ca. $2.500 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Gezien de problemen welke in de voorafgaande para-

grafen zijn uiteengezet, kan men zich stellig afvragen of Nederland geen nieuwe mijnen zou moeten gaan ontginnen (herontginning van gesloten mijnen is om technische redenen praktisch onmogelijk). Hoewel dergelijke mijnen gedurende een aantal jaren ca. 8 tot 10 miljoen ton steenkool per jaar zouden kunnen opleveren (ca. 10% van het huidige Nederlandse energieverbruik), bestaan er een aantal belangrijke hinderpalen:

- het openen van een nieuwe mijn op een diepte van 500 tot 1000 meter zou tussen de 10 en 15 jaar kosten;
- investeringen, tegen een hoge rente gedurende een aantal jaren, zouden wel eens al te duur kunnen blijken;
- een behoorlijk investeringsrendement zou moeten worden gewaarborgd over een periode van ten minste 30 jaar na het in productie brengen van de mijn;
- arbeidskrachten zullen schaars en duur zijn;
- de nieuwe mijnen, die op grote diepte en dus onder een zware bovenlaag zouden worden geëxploiteerd, zouden meer arbeidsintensief zijn dan de meeste mijnen elders in de wereld;
- de arbeidsomstandigheden ondergronds zouden uiterst zwaar zijn.

Het is daarom hoogst waarschijnlijk dat nog gedurende lange tijd de import van steenkool voor Nederland economischer zal zijn dan het openen van nieuwe mijnen.

Bovendien zijn de bewezen reserves aan buitenlandse steenkool nog voldoende voor verscheidene eeuwen. Aan de andere kant wordt de doordringing van steenkool op de markt belemmerd door milieuproblemen, veroorzaakt door dagbouw (V.S.) en door de technische en economische problemen van de ontzweveling.

III.2. Kernsplijting

III.2.1. Besparing op fossiele brandstoffen door gebruik van kernenergie

Het is nauwelijks aan twijfel onderhevig dat alleen de uit kernsplijting verkregen energie in staat is een belangrijke rol te spelen bij de besparing op fossiele brandstoffen op korte en middellange termijn, hoewel de omvang van haar bijdrage wel eens niet voldoende zou kunnen blijken voor de feitelijke behoeften.

Om verscheidene redenen (technische, economische en het milieu betreffende) is de verwezenlijking van kernenergie een langzaam proces geweest. Zelfs zo zeer dat, in tegenstelling tot eerdere verwachtingen, in 1970 niet meer dan 10% van de in het Verenigd Koninkrijk (de pionier op dit gebied) opgewekte elektriciteit afkomstig was van kerncentrales. Op het Europese vasteland en in de Verenigde Staten was dit aandeel slechts enkele procenten.

Maar de Amerikaanse oliecrises van 1970–1971 en de wijzigingen die zij in het economisch beeld aanbrachten, hebben sindsdien geleid tot opstelling van een massaal wereldomvattend bouwprogramma van kerncentrales, waarvan enkele cijfers zijn vermeld in Tabel 10.

Hoewel dit er in termen van groei indrukwekkend uitziet, maakt het nog maar een zeer bescheiden indruk binnen het kader van het totale energiepatroon. De elektriciteit, opgewekt uit fossiele brandstoffen, correspondeert met 25% of minder van de totale behoefte

Tabel 10. In bedrijf gestelde kernenergetische capaciteit ¹⁾ (GW_e) [19]

	1970	1975	1980	1985
V.S.	5 (2%)	59 (12%)	150 (22%)	300 (30%)
Japan	1 (2%)	6 (5%)	27 (17%)	60 (27%)
EEG				
(vergroot)	9 (4%)	23 (9%)	62 (9%)	132 (27%)

¹⁾ De tussen haakjes aangegeven cijfers zijn het procentuele aandeel van de totaal in gebruik zijnde kernenergetische capaciteit in de dekking van de totale elektriciteitsbehoefte.

aan primaire energie, de door kernenergie geleverde bijdrage aan de totale behoefte zou in 1985 ca. 7% bedragen. Niettemin dient men te beseffen dat iedere 1.000 MWe aan kernenergetische capaciteit, indien geëxploiteerd met een gemiddelde van 85% van vollast, een jaarlijkse besparing betekent van 11–15 miljoen barrels olie of 2,5–3 miljoen ton steenkool.

Er zijn tekenen dat de V.S., evenals Japan niet ver onder het voor 1980 gestelde doel zullen blijven. Maar voor de EEG zijn de vooruitzichten minder veelbelovend. Rekening houdende met de tot en met september 1973 in bedrijf gestelde kernenergetische capaciteit (11.700 MWe netto), de toen in aanbouw zijnde capaciteit (18.009 MWe netto) en de geplande en bestelde capaciteit (18.134 MWe netto) [20], en veronderstellende dat de laatste categorie op de bestelde tijd gereed komt en dat voorts een zeer forse verdere ontwikkeling plaatsvindt; zou de totale kernenergetische capaciteit van de vergrote EEG het streefcijfer van 57.600 MWe in 1980 kunnen bereiken, maar het zou ook maar 46.600 MWe kunnen zijn – dat wil zeggen 11.000 MWe te weinig. Dit is daarom zo belangrijk, omdat de EEG-landen – volgens [21], zie Tabel 11 – een streefcijfer aanhouden van tussen de 112.000 MWe en 148.000 MWe voor 1985. Er zijn dus jaarlijks aanvullingen nodig van gemiddeld ten minste 12.000 MWe na 1980.

De Europese landen die niet tot de EEG behoren, stellen zich voor dezelfde periode een gemiddelde jaarlijkse aanvulling van 6.000 MWe ten doel.

III.2.2. Beletsels

Vorbereidingsperiode voor de oplevering van kerncentrales

De materiële problemen die optreden bij de uitvoering van een programma van deze omvang, kunnen op zichzelf al voldoende zijn voor een achterstand op de geplande capaciteit. Een recente studie [22], waarin de omstandigheden in de V.S. worden behandeld, komt tot de conclusie dat het bereiken van de oorspronkelijke streefcijfers van de AEC¹⁾, zelfs het verhogen daarvan voor 1985 en daarna, fysiek mogelijk zou zijn, al zouden zich moeilijkheden voordoen met de bijbehorende personeelsvoorziening en met de materiële uitrusting. Maar een verkorting van de huidige voorbereidingsperiode aldaar van 9 à 10 jaar zou een aanzienlijke wijziging en een vereenvoudiging noodzakelijk maken van de procedures waaronder een licentie voor reactoren wordt afgegeven.

¹⁾ Commissie voor Atoomenergie.

In Europa liggen de perioden van voorbereiding tussen de 6 en 7 jaar, maar ze zouden langer kunnen worden als de bezorgdheid van het publiek niet naar bevrediging wordt weggenomen.

Weerstand van het publiek tegen kernenergie

Deze weerstand — die in enkele Europese landen zeer groot is en die in andere praktisch niet bestaat — kan alleen maar worden verminderd door betere voor- en toelichting, gekoppeld aan krachtige inspanning tot oplossing van de volgende nog hangende problemen:

- coördinatie van de Europese normen voor emissies;
- coördinatie van de Europese veiligheidseisen voor nucleaire systemen;
- coördinatie van het Europese beheer over radio-actief afval en de bevordering van ter zake dienende research.

Beschikbaarheid van uranium

Vóór 1985 zal er geen knelpunt ontstaan. De vereiste capaciteit voor de productie en de fabrieksmatige verwerking zullen praktisch beschikbaar komen als de prijsontwikkeling dit mogelijk en uitvoerbaar maakt.

Verrijking van uranium

In het licht van het huidige programma voor de bouw van krachtcentrales en de geplande uitbreiding van de diffusie-installaties in de Verenigde Staten zou in het begin van de tachtiger jaren een wereldomvattend tekort aan verrijkingcapaciteit kunnen optreden [23]. In de Verenigde Staten en Europa worden studies ondernomen voor de bouw van nieuwe verrijkinginstallaties; het gaat hierbij in Europa om een diffusie-installatie en een centrifuge-scheidingsinstallatie.

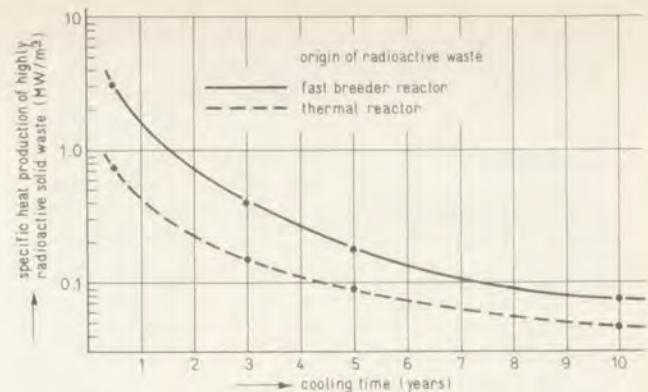
Verwacht wordt dat de in Europa voor de tachtiger jaren vereiste verrijkingcapaciteit tijdig beschikbaar zal komen [21].

III.2.3. Vervalwarmte van radio-actief afval

Tegenwoordig wordt vrijwel alle radio-actief afval uit kernreactoren chemisch behandeld alvorens in opgeloste vorm te worden opgeslagen in roestvrij stalen tanks. Na een paar jaar wordt het opnieuw chemisch behandeld en worden de splijtingsproducten in vaste vorm omgezet. Dit afval in vaste vorm wordt dan overgebracht naar speciaal uitgeruste opslagplaatsen om daar te wachten op de beslissing inzake de uiteindelijke bestemming. Tijdens deze wachtperiode wordt door dit zeer sterk radio-actieve afval zoveel warmte opgewekt, dat het voortdurend moet worden gekoeld.

Bij de huidige herbewerkingstechnieken heeft dit afval in vaste vorm de specifieke warmtecapaciteit weergegeven in Figuur 4.

De kromme laat zien dat de specifieke warmtecapaciteit sterk wordt beïnvloed door het voortschrijden van het radio-actieve verval, in het bijzonder in de vroege fasen. Gedurende de eerste vijf jaar is het afval evenwel een aantrekkelijke warmtebron met een hoge specifieke warmtecapaciteit. Indien het afval op de juiste wijze zou worden behandeld, mogelijk door het met metaal samen te voegen [25], zou de warmte beschikbaar komen bij ca. 400°C. Dit opent een aantal mogelijkheden voor praktische toepassingen.



Figuur 4. Specifieke warmtecapaciteit, resulterende uit het verval van sterk radio-actief afval in vaste vorm (dichtheid: 1,6 g/cm³) [24]

Beschikbare warmte

Tabel 11 voorspelt dat in 1990 de Europese lid-staten van de OESO een capaciteit voor de opwekking van kernenergie zullen hebben van ongeveer 375 GW_e. Indien deze wordt verschaft door thermische reactoren en de afvalproducten worden gekoeld voor zes maanden voorafgaande aan een geschikte bewerking, dan zullen ze een totale warmtecapaciteit hebben van 750 MW (23,7 X 10¹⁵ J/jaar). Verkennende economische onderzoeken [26] wijzen uit dat benutting van deze vervalwarmte grotendeels zou opwegen tegen de kosten van het opslaan van het afval, mits de opslag van alle splijtingsproducten zoveel mogelijk wordt gecentraliseerd.

III.3. Zonne-energie

Ofschoon het hoogst onwaarschijnlijk is dat zelfs een met de hoogste prioriteit en op basis van internationale samenwerking uitgevoerd programma voor de ontwikkeling van zonne-energie nog voor het einde van de eeuw zou kunnen leiden tot invoering op grote schaal, wordt zonne-energie hier volledigheidshalve aan een beschouwing onderworpen.

In de Verenigde Staten is een speciale werkgroep van de National Science Foundation/NASA inzake zonne-energie tot de conclusie gekomen dat een omvangrijk ontwikkelingsprogramma de vereiste technologische en economische doelen in het jaar 2020 zou kunnen bereiken [27]. Aan de Verenigde Staten zou dan op economische wijze zonne-energie kunnen worden geleverd voor:

- 35% van de totale behoefte aan energie van verwarmings- en koelsystemen voor gebouwen;
- 30% van de benodigde gasvormige brandstof;
- 10% van de benodigde vloeibare brandstof;
- 20% van de behoeften aan elektrische energie.

De werkgroep stelde dat indien het programma voor de ontwikkeling van zonne-energie zou slagen, de verwarming van gebouwen binnen 5 jaar praktisch mogelijk zou zijn, koeling voor gebouwen in 5 à 10 jaar, synthetische brandstoffen uit organische materialen in 5 à 8 jaar en elektriciteitsopwekking in 10 à 15 jaar. De werkgroep deed aanbevelingen voor een onderzoek- en ontwikkelingsprogramma op grote schaal, uit te voeren over een periode van 15 jaar, waarvoor totaalbedragen nodig zouden zijn van \$ 100 miljoen voor

Tabel 11. Wereldgroei van de kernenergie (exclusief centraal geleide economieën). Geïnstalleerde capaciteit aan kernenergie aan het einde van elk jaar (GW_e netto), april 1973 [21]

	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1980	1985	1990
België	—	—	—	0,4	1,3	1,7	3,0	5,5	10
Denemarken	—	—	—	—	—	—	0,7	1,5	4
Frankrijk	1,5	2,4	2,6	2,8	3,2	3,8	13,4	32,5	67
Bondsrepubliek Duitsland	0,8	0,8	2,1	2,1	4,9	4,9	19,0	38	75
Italië	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,5	6,0	18	44
Nederland	—	—	—	0,5	0,5	0,5	1,7	3,7	8
Verenigd Koninkrijk	3,4	4,3	4,5	7,0	7,6	8,8	13,8	35	75
Totaal EEG	6,3	8,1	9,8	13,4	18,1	21,2	57,6	134	283
Oostenrijk	—	—	—	—	—	—	1,4	3	6
Finland	—	—	—	—	—	—	1,3	4,6	8
Griekenland	—	—	—	—	—	—	0,7	1,5	3
Noorwegen	—	—	—	—	—	—	1,0	2	4
Portugal	—	—	—	—	—	—	—	2	3
Spanje	0,1	0,6	1,1	1,1	1,1	1,1	8,0	12	24
Zweden	—	0,4	0,4	0,4	2,6	3,2	8,3	16	24
Zwitserland	0,4	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	2,6	8	16
Turkije	—	—	—	—	—	—	0,4	1	2
Totaal OESO Europa	6,8	9,8	12,3	15,9	22,8	26,5	81,3	184	373
Australië	—	—	—	—	—	—	1,0	3	6
Canada	0,2	1,2	2,0	2,5	2,5	2,5	6,5	15	31
Japan	1,3	1,3	1,8	3,1	5,2	8,6	32	60	100
Verenigde Staten	5,2	11,8	15	28,9	42,3	54,2	132	280	508
Totaal OESO	13,5	24,1	31,1	50,4	72,8	91,8	252,8	542	1.018
Andere landen ¹⁾	0,4	0,5	0,7	1,0	1,2	2,0	11,0	25	50
Totaal	14	25	32	51	74	94	264	567	1.068
Hoogste limiet (+%)							5	11	20
Laagste limiet (—%)							5	10	25

¹⁾ Hiertoe behoren: Argentinië, Brazilië, Formosa, India, Israël, Korea, Mexico, Nieuw-Zeeland, Pakistan, Filippijnen, Zuid-Afrika, Thailand.

verwarming voor gebouwen, \$ 370 miljoen voor vervangbare schone energiebronnen en \$ 3.050 miljoen voor opwekking van elektrische energie.

Door zijn noordelijke ligging en vooral door zijn ongunstig klimaat wordt Nederland verhinderd een vooraanstaand gebruiker van zonne-energie te worden. Het jaarlijkse aantal uren zonneshijns is minder dan de helft van dat van landen waar de zonne-energie economisch al aantrekkelijk begint te worden (Japan, delen van de Verenigde Staten, het Midden-Oosten, Australië en westelijk Latijns-Amerika) en die uren zijn hier bovendien ongelijkmatiger over het jaar verdeeld. Niettemin zou een aanmerkelijke verhoging (bijvoorbeeld driemaal het niveau van medio 1973) van de prijs van gebruiksklare energie de toepassing ook voor Nederland aantrekkelijk maken (zie Hoofdstuk 5).

Ruimteverwarming en verwarming van water zijn de enige praktische toepassingen op korte termijn van zonne-energie in Nederland. Daarvoor zijn evenwel aanzienlijke wijzigingen nodig van de manier waarop gebouwen en verwarmingssystemen thans worden geconstrueerd [28] en aangezien de bouwnijverheid groot belang hecht aan praktische ervaring, zal de invoering van het gebruik van zonne-energie nog vele jaren op zich laten wachten. Op korte termijn zal dit derhalve geen wezenlijke verbetering brengen in de nationale energiesituatie.

III.4. Kernfusie

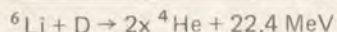
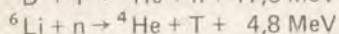
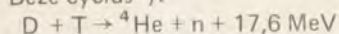
door prof. dr. C.M. Braams

III.4.1. De deuterium-tritium-lithium-cyclus

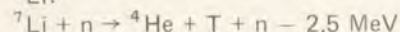
Kernenergie kan niet alleen worden vrijgemaakt door het splijten van zware atomen, bijvoorbeeld die van uranium, maar ook door reacties (vaak op twijfelachtige gronden fusie-reacties genoemd) tussen lichte kernen, in het bijzonder de zware waterstofisotopen. Wegens de elektrostatische afstotende krachten tussen atoomkernen, vereisen deze reacties hoge kinetische energieën van de betrokken deeltjes. Die energieën kunnen worden opgewekt met deeltjesversnellers, maar wegens de onderling tegengestelde werkingen van verstrooiing en reactie zijn gerichte bundels van versnelde deeltjes niet geschikt voor het produceren van bruikbare energie. Bij een voldoende hoge temperatuur evenwel kan de thermische beweging de elektrostatische belemmeringen overwinnen; we spreken dan van thermo-nucleaire reacties.

Er bestaan vele exotherme reacties tussen lichte kernen, maar als men aan deze reacties denkt als energiebronnen voor de voorzienbare toekomst, dan dient men zich met het oog op de huidige stand van de natuurwetenschappen en de technologie te concentreren op de deuterium-tritium-lithium-cyclus, aangezien die de enige is waarvoor een voldoende operationele marge kan worden voorspeld.

Deze cyclus¹⁾):



verbruikt lithium en deuterium. Aangezien deuterium in overvloed beschikbaar is²⁾, is de voorraad lithium de beperkende factor. De energieopbrengst van 22,4 MeV per lithiumatoom komt overeen met $3,6 \times 10^{14}$ J per kg ${}^6\text{Li}$. De energie-inhoud van natuurlijk lithium, waarvan 7% ${}^6\text{Li}$ en 93% ${}^7\text{Li}$ is, kan verder worden verhoogd door de tritium-producerende reactie van ${}^7\text{Li}$:



die gebruik maakt van de hoge neutron-energie van de D + T-reactie zonder het neutron feitelijk te verbruiken. Dit maakt het mogelijk meer tritium te produceren dan in de D + T-reactie wordt verbruikt. De hoeveelheid tritium die uit ${}^7\text{Li}$ kan worden gewonnen hangt af van de precieze samenstelling van de Lithium-mantel; globaal genomen kan de energie-inhoud van natuurlijk lithium worden geraamd op ten minste tweemaal de hoeveelheid die de 7% ${}^6\text{Li}$ voorstelt, wat neerkomt op 5×10^{13} J per kg natuurlijk lithium — en die raming is aan de veilige kant. De ontginbare reserves aan lithium kunnen worden geraamd op 10^{10} kg [29]. De meeste van de bekende reserves bevinden zich op het vasteland van Noord-Amerika en van Afrika, maar aangezien er nooit een sterke prikkel tot nadere exploratie heeft bestaan, is deze raming aan de globale en waarschijnlijk aan de lage kant. De voorraad zou een energie vertegenwoordigen van 5×10^{23} J of 2.000 maal het huidige jaarlijkse wereldenergieverbruik. De wereldzeeën bevatten 10.000 maal zoveel en ofschoon er tot nog toe geen economische extractiemethode is ontworpen, is het denkbaar dat er een zou kunnen worden ontwikkeld als de noodzaak daartoe zich zou voordoen. De klaarblijkelijk ongelijke verdeling van lithium over de continenten heeft slechts een beperkte betekenis en dit geldt te meer omdat een grote thermonucleaire reactor van 5.000 MW_{th} bij volle belasting slechts 3–4 ton lithium per jaar behoeft (de juiste hoeveelheid hangt af van het opbranden van de ${}^7\text{Li}$). Tegen een prijs van \$ 20,— per kg zou gemakkelijk een brandstofvoorraad kunnen worden gevormd voor de gehele levensduur van een reactor, indien de aanvankelijke inhoud van de mantel al niet ruim voldoende zou blijken te zijn. Kort gezegd: indien een thermonucleaire reactor zou kunnen worden ontwikkeld, dan zou lithium een goedkope brandstof zijn voor een paar miljoen gigawattjaren aan elektrische energie.

¹⁾ D = deuterium = ${}^2\text{H}$ = waterstof met een kern, bestaande uit één proton en één neutron.

T = tritium = ${}^3\text{H}$ = waterstof met een kern, bestaande uit één proton en twee neutronen.

⁴⁾ He = de helium isotoop met kernmassanummer 4.

⁶⁾ Li = de lithium isotoop met kernmassanummer 6.

n = neutron.

MeV = Mega-electron volt = $1,6 \times 10^{-13}$ J.

²⁾ De wereldzeeën bevatten 10^{21} kg H_2O en aangezien 1 op de 7000 waterstofatomen deuterium is, bevindt zich 3×10^{16} kg deuterium in de zeeën en oceanen.

III.4.2. Reactorparameters

De theoretische ontbrandingstemperatuur van een mengsel van deuterium en tritium is 4 keV^1); onder een bepaalde druk ligt de optimale verbrandingstemperatuur tussen 10 en 20 keV. Nog een vereiste voor een positieve energieopbrengst is dat het produkt van de brandstofdichtheid n en de verbrandingstijd τ voldoet aan het Lawson-criterium: $n\tau > 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$.

Nogmaals, de optimale waarde is hoger: voor de meeste reactorontwerpen ligt zij rond $10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s}$. De temperaturen die thermonucleair gezien interessant zijn, zijn zo hoog dat de hete brandstof niet in aanraking mag komen met een omhulling van vaste stof. Maar bij deze temperaturen is de materie een plasma, bestaande uit geladen deeltjes en daardoor te beïnvloeden met magnetische velden die worden opgewekt door elektrische stromen, die hetzij door spoelen buiten het plasma, of door het plasma zelf worden gevoerd, hetzij zowel buiten (via de spoelen) als door het plasma worden geleid. De druk van een 20 keV deuterium-tritiumplasma ligt tussen de 6,4 en 640 bar indien de dichtheid tussen de 10^{20} en 10^{22} ionen per m^3 belooft; de magnetische druk, nodig om het plasma binnen de reactor te houden, vereist een magnetische inductie van 1,3 tot 13 Tesla.

III.4.3. Reactormodellen

In beginsel is magnetische insluiting mogelijk met een aantal verschillende veldconfiguraties en wijzen van uitvoering. Men kan onderscheid maken tussen gesloten en open systemen, al naar gelang de gedaante van het magnetisch veld. Voorts is een nadere onderverdeling mogelijk aan de hand van de precieze vorm van het veld. Bovendien leiden stabiele of pulserende brandstofverbruikscycli tot onderling verschillende reactorontwerpen. Wij zullen de onderhavige bespreking van de magnetische insluiting beperken tot een enkel type van het gesloten systeem, de Tokamak, waarop een vrij groot deel van het huidige thermonucleaire onderzoek is toegespitst.

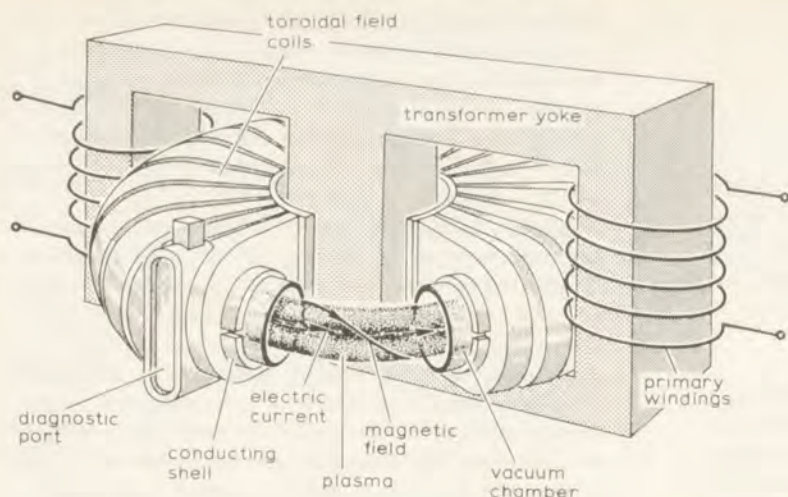
In het tweede deel van deze paragraaf zullen we een methode bespreken voor de ontsteking van nucleaire brandstoffen door middel van een laser, onder omstandigheden die geen andere afsluiting vereisen dan die welke reeds wordt verschaft door de massa-tragheid van de brandstof zelf als die wordt toegestaan na de ontsteking vrijelijk uit te zetten.

III.4.3.1. Magnetische insluiting in Tokamak-systemen

In een Tokamak wordt het magnetisch veld deels geproduceerd door middel van zich buiten het plasma bevindende spoelen en deels door een in het plasma zelf opgewekte elektrische stroom. De voornaamste samenstellende delen zijn aangegeven in Figuur 5. De stroom in het plasma kan hetzij stationair worden gehouden voor een periode die lang is in vergelijking met de verbrandingstijd van de brandstof, hetzij in de vorm van pulsen worden gedoseerd voor een periode die op de verbrandingstijd is afgestemd. In het eerste geval bevindt het systeem zich in een (quasi-) stationaire toestand voor wat betreft de brandstof-cyclus; in het tweede geval wordt het een werkelijk gepulseerd systeem.

¹⁾ 1 kilo-elektron volt komt overeen met een temperatuur van $1,16 \times 10^7$ Kelvin.

Figuur 5. De voornaamste onderdelen van een Tokamak.



De meeste ontwerp-studies van Tokamak-reactoren zijn gebaseerd op stroomstoten van relatief lange duur, dat wil zeggen op een quasi-stationaire operatie. Alles bijeengenomen wordt verwacht dat de eerste demonstratie van het nucleair verbranden van tritium in een magnetische omhulling zal plaatsvinden in een Tokamak-reactor. Maar wat betreft de verdere mogelijkheden voor de ontwikkeling van bruikbare reactoren dienen nog belangrijke vragen door nader onderzoek te worden beantwoord. Het is daarom te vroeg om te voorspellen welke soort reactor uiteindelijk zal worden gekozen.

Om te kunnen begrijpen wat de doorbraak in het plasma-onderzoek is geweest die heeft geleid tot de huidige gerichtheid op de ontwikkeling van de Tokamak, dient men het vraagstuk van de plasma-stabiliteit in ogenschouw te nemen. In de eerste plaats was in de beginfase van het thermonucleaire onderzoek aangetoond, dat vele magnetische insluitingssystemen instabiele drukevenwichten opleveren, en wel in die zin dat kleine verstoringen in de veldconfiguratie snel in omvang toenemen en daardoor de plasmakolom vernietigen. In de tweede plaats resteerden er nadat deze macroscopische instabiliteiten onder controle waren gebracht, nog microscopische instabiliteiten die in het plasma wisselingen in het elektrisch veld veroorzaakten, welke, ofschoon dit geen aanleiding gaf tot een ernstige instabiliteit, wel snelle plasma-verliezen veroorzaakten door het afsluitende magnetisch veld heen. Dit verschijnsel van abnormale verliezen, veroorzaakt door de turbulentie van het plasma, voor het eerst beschreven door Bohm en naar hem genoemd, trad steeds meer op de voorgrond naarmate de plasma's op hogere temperaturen werden gebracht en op een gegeven ogenblik begon het er zelfs op te lijken dat dit verschijnsel een voldoende afsluiting van thermonucleair plasma geheel onmogelijk zou maken.

Maar tegen het einde van de zestiger jaren had men toch voldoende bewijs gevonden van plasma's die veel langer ingesloten bleven dan de tijd welke overeen kwam met de diffusie volgens Bohm. Diens uitspraak kon dus niet langer als een algemeen geldende natuurwet worden beschouwd. Dit opende de weg naar magnetische insluiting van plasma's van voldoende

hoge temperaturen en $n\tau$ -waarden om te voldoen aan de vereisten voor een reactor en het Tokamak-systeem bleek de eenvoudigste en meestbelovende manier te zijn om te voldoen aan de normen voor macroscopische en microscopische stabiliteit.

Waar thans een nieuwe generatie van Tokamak-experimenten in verschillende delen van de wereld wordt ontworpen [30], hoopt men de omstandigheden te benaderen welke nodig zijn voor een bruikbare reactor en de voorwaarden te scheppen voor proefnemingen die gericht zijn op het ontsteken van een deuterium-tritium-mengsel. Als deze experimenten slagen — hopelijk in het begin van de tachtiger jaren — hetgeen zou inhouden dat de invloed van de productie van energie-rijke α -deeltjes (^4He -kernen) op het gedrag van het plasma is zoals men dat verwacht, dan kan worden gesteld dat de productie van thermonucleaire energie van het standpunt van de fysicus gezien, uitvoerbaar is. Het staat daarna aan de technologische ontwikkeling om te laten zien of dit wetenschappelijk principe kan worden omgezet in een technisch en economisch levensvatbare bron van nuttige energie.

III.4.3.2. Ontsteking met een laser van door massa-traagheid tezamen gehouden plasma

De theorie inzake het plasma laat zien dat thermonucleaire brandstof kan worden ontstoken door middel van een geconcentreerde laserstraal. Als de daaruit ontstane vuurbal zich vrijelijk kan uitzetten, zonder magnetische of andere afsluiting, dan is de tijd welke als een van de factoren van het Lawson-criterium moet worden ingevuld, in de orde van duur van de tijd waarin het volume van het plasma merkbaar is toegenomen en zijn dichtheid merkbaar is afgenomen. Voor een bolvormige brandstofpil kan het Lawson-criterium dus worden geïnterpreteerd als een vereiste minimale waarde voor het produkt van de dichtheid en de straal. Bij de dichtheid van vaste waterstof is een straal nodig van ongeveer een centimeter en een ontstekingsenergie van honderd megajoule. Indien de pil echter kan worden samengeperst tot een duizend maal hogere dichtheid, dan kan de straal in verhouding kleiner zijn, zodat volgens deze vereenvoudigde schaalwet, de voor het ontsteken van de gecompriëerde pil benodigde energie wordt verminderd met een factor van een miljoen.

Volgens meer gedetailleerde berekeningen is de verbetering niet helemaal zo opzienbarend, hoewel nog altijd zeer groot. Men raamt dat een netto energieproductie zou kunnen worden bereikt met een efficiënte laser, die ca. 10^5 J levert in de vorm van een puls, die voor het grootste deel verloopt binnen 10^{-10} s. De noodzakelijke toename van de dichtheid vindt plaats doordat de reactie-impuls van de aan het oppervlak verdampende materie een bolvormige symmetrische compressiegolf naar het centrum veroorzaakt. Ontsteking van de pil zonder een netto energiewinst kan waarschijnlijk worden verkregen met behulp van een nauwkeurig afgestemde laserpuls in de orde van grootte van één kilojoule, hetgeen bij de huidige stand van de lasertechnologie mogelijk lijkt te zijn. Indien ontsteking door middel van een laser kan worden gedemonstreerd, dan zal dat ongetwijfeld worden gebouwd als een van de belangrijkste vorderingen in wetenschap en technologie. Nog maar een paar jaar geleden zou het denkbeeld van het in een laboratorium comprimeren van materie tot duizendmaal zijn normale dichtheid bij een temperatuur van honderd miljoen graden en een druk van 10^{12} atmosfeer en dan nog het opwekken van een fliets van 10^{15} neutronen binnen een nanoseconde uit een volume van een duizendste kubieke millimeter tot het gebied van de pure science fiction hebben behoord. Maar nu kan dat ieder ogenblik werkelijkheid worden. Het zou evenwel verkeerd zijn aan te nemen dat hierdoor onmiddellijk een nieuwe weg zou worden opengesteld naar de produktie van thermonucleaire energie. In feite bestaan er, voor zover we dat nu kunnen beoordelen, twee belangrijke hindernissen: de ontwikkeling van lasers met een voldoende opbrengst aan energie, doeltreffendheid, herhalings-tempo en levensduurverwachting, en de ontwikkeling van een optisch systeem dat in staat is de thermische, mechanische en stralingsinvloeden waaraan het in dit systeem wordt blootgesteld te doorstaan. Terwijl de meeste aan de magnetische insluiting verbonden problemen vóór het punt van de ontsteking lijken te liggen, geldt voor de inperking door middel van massa-traagheid precies het omgekeerde.

III.4.4. De ontwikkeling van de fusie-reactor

Als we de temperaturen en de dichtheden die met de huidige thermonucleaire experimenten worden verkregen, zouden vergelijken met die welke — soms door middel van brute kracht — rond 1960 werden bereikt, dan zou dat gemakkelijk de indruk kunnen wekken dat er in de plasma-fysica slechts langzaam vorderingen zijn gemaakt. Maar als de vorderingen worden gemeten in termen van het inzicht in plasmaverschijnselen en het in staat zijn tot het voorspellen van de resultaten van nieuwe experimenten, dan ziet de zaak er heel anders uit. Als we een vooruitberekening maken voor de toekomst, dan kunnen we verwachten dat misschien over een jaar of tien, als met recht thermonucleair te noemen plasma's voor onderzoek beschikbaar komen, theoretische en rekenkundige modellen zullen zijn ontwikkeld tot een punt waarop redelijk nauwkeurige beschrijvingen en voorspellingen van het gedrag van plasma mogelijk zullen zijn. Zelfs in onze dagen, zoals reeds is aangetoond door de Tokamak, zijn reeds voldoende kennis en zelfvertrouwen verworven voor het opzetten van nieuwe ambitieuze

experimenten op een schaal die nodig is om thermonucleaire stelsels in praktijk te brengen. Intussen denkt men reeds over een volgende fase: de problemen van de reactor-ontwikkeling. Er zijn ontwerpstudies verricht van verscheidene reactortypen en daarbij zijn belangrijke onderwerpen voor technologische research en ontwikkeling onder de aandacht gekomen. Daartoe behoren ondermeer:

- stellen supergeleidende spoelen;
- stralingschade aan supergeleiders;
- materiaalschade door 14-MeV neutronen;
- spetteren van materialen die in contact komen met heet plasma;
- beïnvloeding van plasma door contact met wanden;
- ontwikkeling van brandstofinjectoren;
- neutronenhuishouding van mantelsystemen;
- opnieuw in omloop brengen van magnetische energie;
- rechtstreekse omzetting van plasma-energie;
- het pompen van vloeibare metalen in magnetische velden;
- de chemische eigenschappen van tritium;
- het vermijden van tritiumverlies;
- het hanteren van radio-actief geworden onderdelen.

Aangezien al deze vraagstukken thans in onderzoekcentra over de hele wereld worden aangepakt, zal geleidelijk de nadruk van de plasma-fysica naar de technologie verschuiven en zullen de studies inzake het ontwerpen van reactoren steeds dichter bij de realiteit komen. Dit proces zal aanzienlijk worden versneld door de grote druk die daar achter wordt gezet, met name in de Verenigde Staten. Terwijl nog kort geleden de programma's in de V.S., in de Sowjet-Unie en in Europa erop waren gericht in het begin van de volgende eeuw de eerste demonstratie-reactoren in werking te stellen, tracht thans het Amerikaanse programma dit doel reeds in 1995 te bereiken.

Er wordt derhalve een zeer grote inspanning geleverd voor de technologische ontwikkeling, zodat kan worden verwacht dat thermonucleaire energie al in het begin van de 21ste eeuw zal kunnen gaan bijdragen aan de wereldenergie-voorziening.

III.5. Technologie voor de omzetting van energie

III.5.1. Vloeibare en gasvormige brandstoffen uit steenkool

Tegen de in 1973 geldende steenkoolprijzen van rond de \$ 7,50 per ton ¹⁾ zouden de kosten voor de grondstof voor synthetisch gas in de Verenigde Staten ongeveer \$ 0,47 per 10^9 J bedragen. Aan dit cijfer dient nog eens \$ 0,94 per 10^9 J te worden toegevoegd voor de kapitaal- en exploitatiekosten van een thans toepasbaar steenkoolvergassingsproces. Dit brengt de totale kosten voor de bereiding van synthetisch gas uit steenkool op \$ 1,40 per 10^9 J [31].

Maar in Nederland zou, uitgaande van een prijs van \$ 22,50 per ton geïmporteerde steenkool, de grondstof-

¹⁾ Zoals de zaken medio 1973 in de Verenigde Staten stonden, is steenkool af mijn ongeveer 2,5 maal goedkoper dan aardolie. Niettemin neemt aardolie steeds meer de plaats in van steenkool op de energiemarkt om redenen van flexibiliteit, hygiëne, comfort, invloed op het milieu, gemakkelijke vervoerbaarheid en opslag, enz.

fenprijs voor synthetisch gas \$ 1,40 bedragen, zodat de kostprijs van gas op \$ 2,35 per 10^9 J zou komen (aannemende dat de kapitaal- en exploitatiekosten dezelfde zouden zijn als in de V.S.). Dit bedrag mag worden vergeleken met de in maart 1974 geldende stookolieprijzen van \$ 9,35 per barrel (\$ 1,63 per 10^9 J).

Hoewel de vergassing van steenkool technisch uitvoerbaar is, en research en ontwikkeling zouden kunnen leiden tot lagere prijzen, lijkt de vergassing van geïmporteerde steenkool thans geen verstandige oplossing voor de energie-voorziening, gezien de omzettingsverliezen van ca. 40%.

Het op grote schaal vervaardigen van vloeibare brandstoffen uit steenkool in een technisch en economisch aanvaardbare vorm staat nog in de kinderschoenen. Als het proces eenmaal is vervolmaakt, zou de installatie bij voorkeur moeten worden gevestigd bij de mijn, aangezien het vervoer van de vloeibare brandstof veel goedkoper is dan dat van de steenkool waaruit die brandstof wordt vervaardigd. Ook moet worden bedacht, dat deze brandstoffen in het algemeen zullen worden gebruikt voor voortstuwingdoeleinden; juist het gebied waar steenkool slechts zeer beperkt inzetbaar is.

Er bestaan een aantal fundamentele redenen, waarom de produktie van brandstoffen voor voortstuwing uit aardolie verscheidene malen goedkoper is dan het maken van vloeibare brandstoffen uit steenkool. De maximale hoeveelheid aan deze brandstoffen (benzine, vliegtuigbrandstof, dieselolie) die aan ruwe aardolie kan worden onttrokken is 55 à 65%, een peil dat in de Verenigde Staten reeds is bereikt. Maar in West-Europa bedraagt de overeenkomstige extractie slechts 30 à 35%. Dienengevolge moet Europa allereerst trachten het percentage voortstuwingbrandstoffen uit ruwe olie te verhogen en tegelijkertijd meer gebruik maken van steenkool. Het ligt daarom in de rede dat het maken van vloeibare brandstoffen uit steenkool van veel groter belang is voor de Verenigde Staten dan voor West-Europa, althans op korte en middellange termijn. Niettemin zou Europa kunnen profiteren van het vermindere van de druk op schaarse energiebronnen, hetgeen het resultaat van deze ontwikkeling zou kunnen zijn. Aangezien steenkool in de Verenigde Staten goedkoper is dan in West-Europa zou het daar kunnen worden gebruikt voor het vervangen van een deel van de olie- en gasbehoeften. In een rapport van het presidentiële Office of Emergency Preparedness werd aangetoond dat het gebruik van steenkool voor opwekking van elektriciteit zou kunnen worden verhoogd van het huidige niveau van 55% van de opwekkingscapaciteit op basis van fossiele brandstof tot niet minder dan 75% in 1985, afhankelijk van de economische politiek en het milieubeleid in de Verenigde Staten. Bovendien zou de ontwikkeling van geavanceerde technieken op het gebied van gasvormige en vloeibare brandstoffen uit steenkool op middellange termijn een duidelijk merkbare invloed hebben [32].

III.5.2. Waterstof

De hiernavolgende bespreking over waterstof wil niet meer zijn dan een korte inleiding tot het onderwerp. Voor verdere gegevens wordt de lezer verwezen naar de

daarop betrekking hebbende literatuur¹⁾ [bijv. 33 tot 36]. Strikt genomen ligt dit onderwerp buiten het raam van een studie op korte termijn als de onderhavige, aangezien er ten minste 20 jaar nodig zouden zijn voor de oplossing van de technische en economische problemen die in de weg staan van een systeem voor het toepassen van waterstofenergie op grote schaal. Niettemin wordt er hier over gesproken teneinde een indruk te geven van het belang van dit systeem als een mogelijk eerste ver-eiste voor een werkelijke vervanging op grote schaal van olie en gas door andere primaire energiedragers. Met uitzondering van het maken van gasvormige en vloeibare brandstoffen uit steenkool — en van bepaalde toepassingen van zonne-energie — zouden steenkool, kern-splijting, zonnestraling en kernfusie in grote trekken worden gebruikt voor de opwekking van elektrische energie. Volgens Tabel 12 werd slechts 17% van het totale olie- en gasverbruik gedurende 1972 in Nederland gebruikt voor de opwekking van elektriciteit door openbare nutsbedrijven en dit percentage zal waarschijnlijk niet zo erg veel toenemen, tenzij er fundamentele wijzigingen worden aangebracht in bestaande fabriek- en vervoerstechnieken. Derhalve zal de invoering van de hierboven vermelde energiebronnen de behoefte aan olie en gas nog niet in werkelijk hoge mate doen afnemen.

Tabel 12. Primair energieverbruik voor elektriciteitsopwekking in Nederland (1972) Bron: Centraal Bureau voor de Statistiek.

	10^{15} J	%
Totaal binnenlands energieverbruik ¹⁾	2.628	100
Waarvan		
olie	1.297	49,4
aardgas	1.200	45,7
steenkool	130	4,9
kernenergie	1	—
Totaal verbruik van energie door centrales ²⁾	448	17,0
waarvan		
aardgas	326	12,4
aardolie	94	3,6
steenkool	27	1,0
kernenergie	1	—

¹⁾ Met inbegrip van niet-energetisch gebruik van olie; excl. internationale afname voor scheepsvortstuwing.

²⁾ Exclusief industriële elektriciteitsopwekking.

Daarom houdt het zoeken naar een wezenlijke vervanging op grote schaal van aardolie en gas tevens in het vinden van een intermediaire energiedrager die het zo belangrijke voordeel heeft dat de elektriciteit biedt, namelijk dat het schoon is en eenvoudig in het eindgebruik. Waterstof lijkt aan deze beschrijving te voldoen, omdat het kan worden toegepast voor het verrichten van de taken van koolwaterstofbrandstoffen in de industrie en — mogelijk — bij het vervoer, terwijl het tegelijkertijd de verontreiniging van de atmosfeer vrijwel tot nul terugbrengt. Aangezien de produktie ervan geen verbruik met zich dient te brengen van olie of gas — die het moet vervangen — is de enige thans reëel lijkende mogelijkheid voor toepassing op grote schaal de rechtstreekse thermische ontleding van water met gebruikmaking van kernsplijtingswarmte. De waterstof kan

¹⁾ Voor een vollediger analyse van de thermodynamische aspecten van de produktie en het verbruik van waterstof als energiedrager zij verwezen naar [37].

worden opgeslagen in vloeibare vorm en als vloeistof of gas worden vervoerd [38]. Het kostenpatroon van het fabriceren, opslaan en vervoeren van waterstof is op het ogenblik nog niet duidelijk [39].

Het gebruik op grote schaal van waterstof als intermediaire energiedrager zou verscheidene technologische ontwikkelingen op lange termijn met zich kunnen brengen, bijvoorbeeld:

- waterstofbrandstofcellen — met een tweemaal zo hoog rendement als dat van inwendige verbrandingsmotoren, en zonder geluidsoverlast — voor stedelijk verkeer;
- rechtstreekse reductie van ijzererts met de gelijk-tijdige beschikbaarheid van goedkope zuurstof voor de staalproductie. Het eerstgenoemde zou de luchtvervuiling aanzienlijk beperken en tevens de afhankelijkheid van cokes elimineren;
- verbeterde vooruitzichten voor het vervaardigen van vloeibare en gasvormige brandstoffen uit steenkool;
- oplossing van het probleem van de opslag bij toepassing van zonne-energie.

III.6. Conclusies

De conclusies met betrekking tot mogelijke toepassing van andere primaire energiebronnen dan aardolie en aardgas luiden als volgt:

- geen van hen zal op korte termijn een aanmerkelijke invloed op de energiesituatie hebben;
- willen steenkool en uranium op middellange termijn (1985–2000) een belangrijke plaats op de markt veroveren ten koste van aardolie en aardgas, dan dient aan de volgende voorwaarden te worden voldaan:

Steenkool

1. toenemend gebruik van steenkool in bepaalde industriële sectoren (ruwruwproductie) en efficiëntere processen voor het verkrijgen van vloeibare en gasvormige brandstoffen;

Uranium

1. oplossing van het probleem van het lozen van radio-actief afval;
2. aanvaarding door het publiek van splijtingsreactoren als een veilig middel voor elektriciteitsopwekking;
3. produktie op grote schaal van waterstof; met het oog op het opslagprobleem zal de invoering op grotere schaal van de zonne-energie op lange termijn voornamelijk afhangen van de voorafgaande verwezenlijking van een op waterstof gerichte energiemarkt.

Ten slotte zij er de nadruk op gelegd dat elk van de verschillende manieren waarop aan de wereldenergievraag op middellange termijn kan worden tegemoet gekomen — het aanboren van nieuwe olie- en gasbronnen, het versnellen van het programma voor kernsplijting, het verbeteren van de methoden voor de produktie en de veredeling van steenkool, het scheppen van een markt voor waterstof en het mogelijk gebruik van zonne-energie — enorme kapitaalinvesteringen vereist, waarvan het totaal een te zware last zou zijn voor zelfs de sterkste nationale economie. Om een voorbeeld te geven: men verwacht dat de totale kapitaalinvestering per eenheid aan de eindverbruiker geleverde energie zal toenemen met een

factor 2 à 4 voor synthetische benzine uit steenkool en met een factor 15 voor waterstof uit water (indien dit proces is gebaseerd op elektrolyse), vergeleken met benzine uit ruwe olie, afkomstig uit de Noordzee, of uit het Midden-Oosten [40]. En hierbij blijven de kosten voor research en ontwikkeling dan nog buiten beschouwing. Het is daarom van het allergegrootste belang dat er prioriteiten worden gesteld en hiertoe zijn politieke beslissingen vereist, welke vóór 1985 op internationaal niveau moeten worden genomen.

IV. Energiebesparing. Het probleem — en een vraag die de kern raakt

Kort geleden hebben wij een tijdperk achter ons gelaten waarin het Nederlandse volk kon beschikken over net zoveel energie als het wilde en dan bovendien in onderscheidene aantrekkelijke vormen. Op het moment dat deze woorden worden neergeschreven, voelen wij de kille wind van een embargo dat de aanvoer afsnijdt van de belangrijkste leveranties van onze voornaamste energiebron: ruwe olie. Maar het plan voor deze studie was al opgezet vóór we dit keerpunt bereikten en beziet de problemen meer in het perspectief van een langere termijn. Het gaat uit van het feit dat fossiele brandstoffen zoals ruwe olie en aardgas (waarvan we tijdelijk veel bezitten) en zelfs steenkool eindig zijn en dat ze op een bepaald moment in de toekomst zullen zijn uitgeput, terwijl adequate vervangingsbronnen van energie nog moeten worden ontwikkeld.

In een dergelijke situatie gaan de gedachten als vanzelfsprekend uit naar besparing. Al was het alleen maar omdat zij ons tijd geeft om langs de bestaande wegen nog wat door te gaan. Maar in feite doet zij veel meer — het geeft ons een adempauze tijdens welke we nieuwe wegen kunnen vinden. Dit meer strategische doel van energiebesparing is uniek in de geschiedenis van de mensheid, want het is gebaseerd op een wereldomvattende situatie. Men zou zich inderdaad kunnen afvragen hoe het mogelijk is dat praktisch de hele wereld zich zo lang in slaap heeft kunnen sussen met de gedachte dat fossiele brandstoffen onuitputtelijk zouden zijn. Als men evenwel let op de fantastische vorderingen die zij mogelijk hebben gemaakt: massaproductie van de meest begerenswaardige goederen, een grote verscheidenheid van wijzen van vervoer, een eertijds ondenkbaar huiselijk comfort, vrije tijd — dan realiseert men zich dat wij te zeer hebben gestreefd naar de bevrijding uit gebrek en armoede om aan iets anders te kunnen denken (zie Tabel 13). Maar het is een begoocheling en die moet worden verbroken — hopelijk tijdig genoeg voor het nemen van de juiste maatregelen.

Plotseling was er geen olie!

Wij Nederlanders hebben meer dan één brandstoffen-crisis moeten doorstaan. De ergste was die van de Tweede Wereldoorlog en zij vond haar dieptepunt in de lange laatste winter. Ze was alleen maar door te komen door het feit dat men de schuld kon geven aan de Duitse bezetting en omdat men zich kon troosten met de optimistische gedachte — die naderhand juist

Tabel 13. De invloed van fossiele brandstoffen op de leefwijze in Nederland

	1900-1925	1925-1950	1950-heden
<i>Burgerwoning</i>			
— Verwarming	1 à 2 kamers verwarmd door kachel of open haard (turf, hout, steenkool). Stookseizoen beperkt ('grote schoonmaak'). Kil voor- en najaar geaccepteerd. Slaapkamers onverwarmd; wollen ondergoed; kou lijden.	Zelfde patroon, aangevuld met gas- of elektrische bijverwarming; begin c.v. voor welgestelden (kolen, later beperkt olie).	Oliehaarden; centrale verwarming-olie; na 1965 centrale verwarming-gas.
— Verlichting	Gaslicht, later beperkt aangevuld met elektrisch licht. Naar bed met blaker op het platteland.	Elektrisch (1 lamp per kamer).	Elektrisch, gedecentraliseerd, royaal.
— Koken	Turf-kolen-fornuizen; in de steden geleidelijk gas.	Elektrisch koken komt op in gemoderniseerde provincies.	Elektrisch, stadsgas, na 1965 aardgas.
— Gerief	Mobiele stofzuig-installaties voor welgestelden.	Een zekere verspreiding van elektrische apparaten zoals stofzuigers.	Veel apparatuur zoals koelkast, wasmachine, vruchtenpers, enz., enz.
<i>Vervoer</i>			
— Te land	Lopen, in de stad paarden-, later elektrische tram, sleeperswagen. Fiets komt op (scholieren). Stoomtrein, -boot, -tram. Een enkele streekbus en auto (forensen komt op).	Fietsen, motorfietsen, bussen, elektrische trams (streekverkeer). Wat meer auto's (voor stadverkeer), vracht- en bestelauto's, elektrische treinen, later ook dieseltreinen.	Bromfiets; auto preferent voor huiswerk-vervoer; tram veelal door bus vervangen. Tram, bus en trein worden noodlijdend door auto-preferentie. Dieselmotor voor bus en vrachtwagen.
— Ter zee	Stoomschip, begin van de turbine en van de diesel (vrachtvaart). Steenkool geleidelijk vervangen door olie.	Stoomturbine en diesel, op basis van olie.	Sterk verhoogde snelheden.
— In de lucht	Pioniers (militair).	Bescheiden begin van de luchtvaart.	Expansieve ontwikkeling. Na 1950 komt ook het straalvliegtuig op. Wereldnet met thans dagelijks tienduizenden passagiers. Geautomatiseerd telefonisch en telegrafisch verkeer, satellieten, straalzenders, radio, televisie (direct volgen van gebeurtenissen in de wereld).
<i>(Tele)communicatie</i>	Post, telegraaf (voor ijlbodeschappen), een enkele telefoon met handbediening via centrale.	Uitbreiding telefoon (automatisch), radio.	Ver doorgevoerde centralisatie, soms aangevuld met kracht-warmte installaties (proces-industrie). Sterke mechanisatie (straten).
<i>Industrie</i>	Stoommachines met drijfwerk, geleidelijk vervangen door elektromotoren; elektriciteit deels vanuit stedelijke centrale.	Elektrificering, hoge spanning vanuit centrale voorzieningen, opkomst tractor en gemotoriseerde aannemerswerktuigen.	Sterke uitbreiding in actieradius en duur van vakanties. Kamperen (luxueuzer). Trek naar de zon met auto en vliegtuig. Wintersport met auto, trein, vliegtuig.
<i>Recreatie</i>	Woord onbekend; beperkt tot regio; pension; arbeiders plaatselijk een vrije dag.	Geleidelijke uitbreiding tot buitenlands reisje; kamperen van (jonge) arbeiders; fietstochten; autotochten (voor beter gesitueerden).	

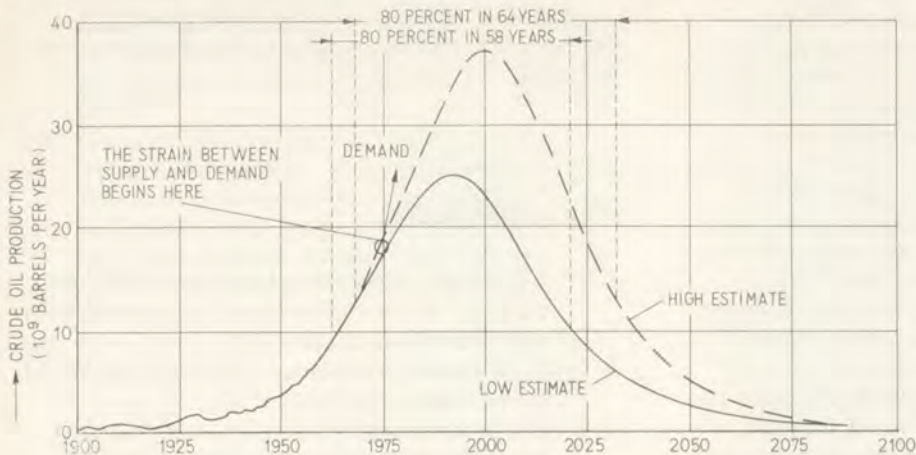
bleek te zijn — dat zij niet eeuwig kon duren. Niettemin was die crisis buitengewoon onaangenaam zolang zij duurde en zij bracht ernstige schade toe aan de economie. Naderhand, tijdens de Suez-oorlog, was de crisis korter en veroorzaakte zij minder ongemak.

En thans? We kunnen niet voorspellen hoe de situatie zal zijn als deze studie verschijnt, maar één ding is zeker: wat ook de oorzaak moge zijn, tijdens een acute crisis van deze soort ontdekt men gauw genoeg hoe afhankelijk we zijn geworden van de olie, en men staat dan voor het blote feit dat de hardste noodmaatregelen moeten worden genomen en de buikriem moet worden aangetrokken. Evenals tijdens de Tweede Wereldoorlog is de crisis ons van buitenaf opgelegd, zodat we iets of iemand kunnen beschuldigen, laken en haten. Psychologisch is dat natuurlijk heel nuttig. Ongemak en gebrek kunnen veel gemakkelijker worden gedragen en het leidt tot vruchtbaarder denken dan mogelijk zou zijn in tijden van overvloed — namelijk toen met deze studie een aanvang werd gemaakt. Want toen vonden de meeste mensen het onderwerp te abstract, om niet te zeggen belachelijk.

Op lange termijn

Ook reeds voor de huidige kritieke situatie ontstond, groeide er in verantwoordelijke kringen een toenemend besef dat de economische groei niet eindeloos kon worden voortgezet. Korthedshalve moge worden volstaan met te zeggen dat de kwestie zou kunnen worden teruggebracht tot de blijvende beschikbaarheid van nuttige energie tegen een redelijke kostprijs. Zoals in de voorgaande bijdragen aan dit hoofdstuk is aange-toond, wordt de situatie in Nederland vooral bepaald door de ruwe olie, terwijl het aardgas een tijdelijke ruggesteun biedt. Nu wordt vaak gesteld dat er in de wereld een voldoende voorraad aan steenkool is voor enige eeuwen en genoeg olie voor ten minste een eeuw. Maar laten wij laatstgenoemde stelling eens toetsen aan de beste beschikbare gegevens. Figuur 6 laat zien dat de wereldproductie van ruwe olie die van het begin af exponentieel is geweest, naar verwachting in de naaste toekomst in een langzamer tempo zal toenemen wegens de geleidelijke uitputting van de meer toegankelijke voorraden. Alleen om deze reden al moet een verhoging van de kostprijs worden verwacht. De plaats waar de piek zich zal bevinden, is afhankelijk van die kostprijs

Figuur 6. Raming van het verloop van de produktie uit de oliereserves in de wereld in de periode 1970-2100 [10].



en van de beschikbare technologie (bijvoorbeeld diepzee-ontginning). De beide curves laten zien dat, niet-tegenstaande de belofte dat er over een eeuw nog altijd ruwe olie zal zijn, wij dan wel bezig zullen zijn de laatste druppels uit de aarde te wringen. Zelfs nu zijn er al moeilijkheden te over – technische, maar ook financiële en politieke – bij het voorzien in de gestadig toenemende vraag. Het is dus duidelijk dat binnen enkele decennia aanzienlijke hoeveelheden energie op andere manieren beschikbaar moeten worden gemaakt. De situatie waarin de omstandigheden een kopersmarkt veranderen in een verkopersmarkt, staat al voor de deur.

Het zal hieruit duidelijk zijn dat we, indien we althans in onze huidige staat van betrekkelijke welvaart willen blijven leven, moeten uitzien naar een adequate en betaalbare vervanging voor de thans beschikbare energiebronnen. Materiële welvaart wordt geschapen door het ordenen van de materie met behulp van energie [41]. De redenen waarom de door fossiele brandstoffen verschaft verbrandingsenergie daarbij bijzonder effectief is gebleken, zijn de volgende:

- Het is een energie die tot een hoog niveau van intensiviteit kan worden gebracht, waardoor het technisch mogelijk wordt bijzonder compacte verbrandingsreactoren te bouwen.
- De hoge temperaturen maken het mogelijk warmte-energie te benutten over een uitgebreid temperatuurgebied, en mechanische energie op te wekken met een redelijk rendement.
- Verbrandingsenergie is op elk tijdstip beschikbaar en zij is nauwkeurig en gemakkelijk te beheersen. Dit elimineert het vraagstuk van de opslag van energie.
- Verbranding is overal in de atmosfeer mogelijk. Aangezien de verbrandingsreactie is gebaseerd op de zuurstof in de atmosfeer, behoeft alleen maar de geringste van de benodigde bestanddelen – de brandstof – te worden meegevoerd.
- Zuivere thermische apparatuur, evenals thermo-mechanische apparaten, bestrijken een indrukwekkende variatie van vermogens.
- En ten slotte misschien wel het belangrijkste: dit is allemaal beschikbaar (of was het tot voor kort) tegen een gering offer en weinig inspanning voor winning, raffinage en distributie.

Nu zouden de meeste mensen zeker willen dat het huidige welvaartspeil in de wereld zou blijven bestaan (afgezien van de vraag of die welvaart niet billijker kan worden verdeeld). Willen we dit verwezenlijken, dan dienen we binnen een redelijke tijd over adequate vervangende energiebronnen te kunnen beschikken. En met adequaat bedoelen we dat de hierboven vermelde eigenschappen aanwezig dienen te zijn en dat aan de totale behoefte dient te worden voldaan, indien nodig door het gebruik van meer dan één vervangingsmiddel. In feite is kernsplijting het enige vervangingsmiddel dat in aanmerking komt voor een redelijk deel van de taak en dat alleen nog maar een omvangrijke verdere uitbreiding behoeft. Indien dit zou kunnen worden gecombineerd met de opwekking van waterstof en met een technologie voor de fabricage van bepaalde vloeibare koolwaterstoffen, dan zouden we ons in beginsel op de goede weg bevinden. Op een wat langere termijn – laten we zeggen ongeveer in het jaar 2000 – zouden deze en andere mogelijkheden kunnen worden verwezenlijkt. Maar tussen nu en 1985 valt er kwantitatief weinig te doen.

In feite is het denkproces inzake vervangende energie tamelijk laat op gang gekomen. Van nu af aan is het van het allergrootste belang *tijd te winnen* – en de enige manier waarop dat in de huidige situatie kan worden gedaan, is om op alle vormen van energieverbruik zoveel mogelijk te bezuinigen en tegelijkertijd te arbeiden aan de meestbelovende vervangende technologieën. Ongetwijfeld zijn er mensen die erop wijzen dat dit een wereldomvattend probleem is en dat energiebesparing in een klein land als het onze geen zoden aan de dijk zet. Daar is veel voor te zeggen en stellig moet alles worden gedaan om tot een gezamenlijke actie te komen. Maar de Verenigde Staten bijvoorbeeld zijn reeds de weg naar de besparing ingeslagen en dit voorbeeld zal zeker door andere landen worden gevolgd. Het is daarom buitengewoon belangrijk dat wij de zaak pragmatisch aanpakken om te zien wat er kan worden gedaan om met zo weinig mogelijk uitstel te komen tot een doeltreffend optreden. Energie wordt zowel in produktieve als in consumptieve zin toegepast [41] en als we op die tweede toepassing geld uitsparen dan zal dat bespaarde geld dringend nodig zijn voor de ontwikkeling van vervangende energie. Er zal stellig een middel kunnen worden gevonden om dit

geld te verzamelen en het in de goede richting te laten vloeien.

Problemen — en een vraag die de kern raakt

De situatie waarmee we worden geconfronteerd is uitermate onplezierig. Er moeten beslissingen worden genomen — en zelfs heel gauw. Als we de toekomst op haar beloop laten, dan bestaat op zijn minst de mogelijkheid van een energietekort: het verdwijnen van energie uit fossiele brandstoffen nog voordat er adequate opvolgers zijn gevonden. En als dit gebeurt, dan kan de hele economische structuur van onze samenleving ineensstorten, waardoor het verder arbeiden aan vervangende energiebronnen steeds moeilijker wordt. Maatregelen om de bevolking te dwingen energie te besparen zullen moeilijk uitvoerbaar en impopulair zijn — des te meer naarmate zij sterker het leven raken waaraan wij gewoon zijn geraakt. Tezelfdertijd geven zij geen waarborg voor het welslagen — alleen maar een betere kans. Het probleem ligt daarin, dat het juiste evenwicht moet worden gevonden: de beste kans, afgewogen tegen de ongemakken die we ons moeten getroosten. En het is een probleem waarvan door gebrek aan harde cijfers geen concrete oplossing mogelijk is. Dit laat aan de Staat de ondankbare taak het ongemak van een verminderd energieverbruik aan de mensen op te leggen. Maar met het oog op het erfdeel dat wij aan ons nageslacht zullen nalaten, dient een vraag te worden gesteld die de kern van de zaak raakt. Kunnen wij niet geleidelijk afstand doen van ons huidige overvloedige verbruik van energie? We vrezen dat het gemakkelijkste antwoord ontkenkend zal luiden, maar wij zijn van mening dat een diepgaander bestudering van deze vraag de hoogste prioriteit verdient. Als we het met minder energie zullen moeten doen, dan zouden we kunnen leren niet ongelukkiger te zijn dan nu. Dan zouden we de toekomstige ontwikkelingen goedschiks kunnen aanvaarden.

V. Samenstelling van de werkgroep

De werkgroep die Hoofdstuk 1 heeft samengesteld, bestond uit de volgende leden:

prof. ir. D.G.H. Latzko	Technische Hogeschool Delft (voorzitter)
drs. J.A. Bourdrez	Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam
dr. ir. H. Hoog	Koninklijke Shellgroep; Nederlands Reactorcentrum
prof. dr. L.H. Klaassen	Nederland Economisch Instituut, Rotterdam
prof. ir. T.R. Seldenrath	Emeritus hoogleraar, Technische Hogeschool Delft
ir. J.A. Over (secretaris)	Stichting Toekomstbeeld der Techniek
Voorts werden bijdragen gevraagd en verkregen van:	
prof. dr. C.M. Braams	Instituut voor Plasma Fysica Jutphaas
prof. ir. J.J. Broeze	Emeritus hoogleraar, Technische Hogeschool Delft
dr. J.N. van Geel	Eurochimique Mol, België

prof. ir. C.W.J. van Koppen
ir. K. Swart

Technische Hogeschool Eindhoven
Koninklijke Shellgroep

Bovengenoemde personen hebben alle gegevens in Hoofdstuk 1 verstrekt, waarvoor niet een andere bron is aangegeven.

VI. Literatuur

- [1] S.H. Schurr; Energy research needs. PB-207 516, US Dept. of Commerce, National Technical Information Service, October 1971.
- [2] A. Hammond, en anderen; Energy and the future. AAAS, Washington D.C., 1973.
- [3] H.J. Schürmann; Die Energiewirtschaft in ihrer ökonomischen und sozialen Umwelt 1975 bis 1985 (17. Arbeitstagung Energie Wirtschaftlich Institut Köln). BWK 25 (1973), No. 7, 282-3.
- [4] J.H. Bakker en anderen; Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future. Publikatie 7, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag, 1971.
- [5] H. Hoog en anderen; Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening: mogelijkheden en consequenties. Publikatie 12, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag, 1972.
- [6] J.J. Went en anderen; Transmissiesystemen voor elektrische energie in Nederland. Publikatie 11, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag, 1972.
- [7] M. Kretzoi and L. Vertes; Current anthropology, 6 (1965), 74-87.
- [8] P. Averitt; 1969 Coal resources of the United States. US Geological Survey Bulletin, 1275, Table 8, p. 82.
- [9] World Oil, 15 augustus 1972.
- [10] M. King Hubbert; The energy resources of the earth. Scientific American, 224 (1971), No. 3, 61-70.
- [11] Warman; Petroleum Times, 21 sept. 1973.
- [12] Inlichtingen afkomstig van Shell.
- [13] Oil and Gas Journal, december 1972.
- [14] Second Interim Report, National Commission on Materials Policy, januari 1973. US Govt. Printing Office, Washington DC.
- [15] Information Handbook 1973-4, Shell International Petroleum Company Ltd, London.
- [16] G. Chandler; Institute of Petroleum Summer Meeting Keynote Address, 7 juni 1973.
- [17] A. Hols; The future energy supplies to The Netherlands. Verhandelingen Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen. 29 (1973), 9-18.
- [18] D.G.H. Latzko; Alternatieven voor energieopwekking en -transport. De Ingenieur, 85 (1973), No. 28/9, 604-14.
- [19] United Nations Conference, Genève 1971.
- [20] Power and Research reactors in Member States, 1973 edition, IAEA, Wenen, september 1973.
- [21] Uranium Resources, Production and Demand. A joint report published by the OECD Nuclear Energy Agency, OECD, Parijs, augustus 1973.
- [22] Atomic Industrial Forum, Inc., juli 1973.

- [23] International Atomic Forum Conference, Washington, 14 november 1972.
- [24] K.J. Schneider; Solidification and disposal of high-level radioactive wastes in the United States. *Reactor Technology*, 13 (1971), No. 4.
- [25] J.N. van Geel; Radioactive waste management in Europe. *Atoomenergie*, 16 (1974), No. 12 281-6.
- [26] Siting of fuel reprocessing plants and waste management facilities. Report Oak Ridge National Research Laboratories No. 4451 (1970).
- [27] NSF/NASA Solar Energy Panel; Solar energy as a national energy resource. US Dept. of Commerce, National Technical Information Service, december 1972.
- [28] *Solar Energy*, Quarterly Journal, Pergamon Press Ltd., Oxford. Editor-in-Chief: Peter E. Glaser, Arthur D. Little Inc. Vrijwel ieder nummer bevat gegevens omtrent werkende installaties en/of onderdelen.
- [29] M. King Hubbert, *Resources and Man*. W.H. Freeman & Co., San Francisco, 1960, 157-242.
- [30] C.M. Braams, A.M. van Ingen, B. Brandt; The Joint European Tokamak. *Atoomenergie*, 15 (1973), No. 12, 3-7.
- [31] H.M. Siegel and T. Kalina; Technology and cost of coal gasification. *Mechanical Engineering*, mei 1973, 23-8.
- [32] J. de Carlo en anderen; The potential for energy conservation - substitution for scarce fuels. Executive Office of the President, Office of Emergency Preparedness, januari 1973 (US Government Printing Office, Stock No. 4102-00010).
- [33] H.C. Hottel and J.B. Howard; *New energy technology, some facts and assessments*. MIT Press, 1971.
- [34] Th. van der Plas; Nieuwe taken voor waterstof. *Atoomenergie*, 15 (1973), No. 3, 63-8.
- [35] C. Marchetti; Hydrogen and energy. *Chem. Economy and Engineering Review (Japan)*, 5 (1973), 7-25.
- [36] W.E. Winsche en anderen; Hydrogen, a clean fuel for urban areas. 1971 Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Boston, 3-5 augustus. Uitgegeven door SAE, New York, 1375 pp.
- [37] J.J.C. van Lier; Waterstof als energiedrager in de toekomst? *De Ingenieur*, 86 (1974), No. 15, 284-9.
- [38] L.W. Jones; Liquid hydrogen as a fuel for the future. *Science*, 174 (1971), No. 4007, 367-70.
- [39] A.J. Bogers; Waterstof als brandstof. *TNO-Project*, 1 (1973), No. 8, 288-91.
- [40] G.V. Day; The prospects for synthetic fuels in the UK. *Futures*, 4 (1972), No. 4, 331-43.
- [41] J.J. Broeze; Herkomst en toekomst van onze welvaart. *De Ingenieur*, 85 (1973), No. 14, 279-82.

Hoofdstuk 2. Nationale Energiebalansen

door de werkgroep **Energiebalansen**

I. Inleiding

Zoals reeds in Hoofdstuk 1 werd opgemerkt, bestaan er dringende redenen om de hoogste prioriteit te geven aan energiebesparing, in het bijzonder op korte termijn (tot 1985).

In het onderhavige hoofdstuk worden de ontwikkelingen nagegaan en toegelicht van het Nederlandse energieverbruik in het recente verleden (1960-1972). Hierdoor komt de huidige situatie in haar juiste perspectief en wordt tezelfdertijd enig licht geworpen op waarschijnlijke toekomstige ontwikkelingen. De historische feiten worden gevolgd door een raming voor de periode tot 1985, gebaseerd op de vooronderstelling dat geen invoering plaatsvindt van nieuwe besparingsmaatregelen die een merkbare invloed zouden hebben op de energiesituatie. Deze raming geldt dus als norm voor de omstandigheden die in Nederland in 1972/1973 bestonden en dient als criterium waaraan de kwantitatieve en kwalitatieve resultaten van voorgestelde besparingsmaatregelen kunnen worden getoetst.

Hoewel de ramingen zijn opgesteld met dit als voornaamste doel, omvatten zij bepaalde voorspelbare matigings- en verzadigingseffecten. Deze zullen na 1975 leiden tot lagere groeipercentages van het energieverbruik dan de huidige. Maar dat ligt nog een heel eind verwijderd van een gericht beleid voor energiebesparing.

II. Het patroon van het aanbod en verbruik van energie in Nederland sedert 1957

II.1. Achtergrond — de achteruitgang van steenkool

Hoewel in de meeste overige beschouwingen in dit hoofdstuk wordt begonnen in 1960, moet er aan worden herinnerd dat steenkool, tot dien toe de voornaamste energiedrager waarop de Nederlandse energiehuishouding steunde, gedurende de vijftiger jaren zijn overheersende positie meer en meer was kwijtgeraakt aan de aardolie — vooral in de tweede helft van het decennium. Toch ontstond in 1955 op de steenkoolmarkt een schaarste die in de loop van het volgende jaar zelfs acuter werd. De hoogconjunctuur in de Westeuropese industriële activiteit bracht een grote vraag naar steenkool in combinatie met te geringe verkoopbare voorraden bij de mijnen. Een en ander werd geaccentueerd door de

strengere vorstperiode in februari 1956, een stagnatie in de aanvoer van Belgische kolen en ten slotte de extra vraag naar steenkool als gevolg van de Suezcrisis.

Een rapport van de Europese Gemeenschap voor Kolen en Staal sprak zelfs van een structureel tekort en stelde plannen op tot het regelmatig en in toenemende mate importeren van steenkool van buiten de landen van de Gemeenschap. In de loop van 1957 trad evenwel een kentering in, welke de marktsituatie aan het eind van dat jaar totaal had veranderd. Er ontstond een belangrijk overschot dat zich manifesteerde in een snelle stijging van de voorraden bij de Westeuropese mijnen; namelijk van 7,3 mln ton einde 1957 tot 30,3 mln ton in de loop van 1959. De oorzaken waren te vinden in de omslag van de conjunctuur van de industrie, structurele vermindering van het verbruik door omschakeling op aardoliederivaten en het einde van de extra aankopen in verband met de Suezcrisis. De verbruikers brachten hun te hoog opgelopen voorraden steenkolen terug door beperking van de aankopen. De abnormaal zachte winters van 1956/1957 en 1957/1958 leidden tot grote overschotten van huisbrandkolen. Wat eerst gezien werd als een tijdelijke teruggang werd ten slotte een structurele wijziging in de onderlinge bijdragen van de energiedragers in het geheel van de energievoorziening.

Het verzwakken van de overheersende positie van steenkool binnen de Nederlandse energiehuishouding en de stijging van het aandeel van de aardolie in de periode van 1950 tot 1965 wordt getoond in Tabel 1. De omschakeling van de sterk verouderde koleninstallaties door de industrie op moderne oliestook bracht aanmerkelijke rendementsverbeteringen terwijl van de lage prijs van stookolie kon worden geprofiteerd.

II.2. De introductie van het aardgas

Door de snelle invoering van de aardgasdistributie, mogelijk geworden door de vondst van grote aardgasvoorraden in de provincie Groningen, onderging de Nederlandse energiehuishouding een tweede structurele verschuiving in de onderlinge verhoudingen van de primaire energiedragers. Met het aardgas kwam een derde en zeer hoogwaardige energiedrager binnen onze energiehuishouding. Het aandeel van aardgas in het totale primaire energieverbruik steeg zeer snel van 8,0 % in 1966 tot 45,7% in 1972 (zie Tabel 1), mede door uitbreiding van de potentiële markt.

Met de herstructurering van de Nederlandse energiehuishouding op basis van aardolie nam onze afhanke-

Tabel 1. Het aandeel van verschillende energiedragers in het binnenlands primair energieverbruik in % (1950 t/m 1972) [1]

	1950	1955	1960	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Steenkool	77,7	68,1	49,4	29,1	25,0	22,5	18,6	14,1	9,3	6,6	4,9
Aardgas	0,0	0,6	1,3	4,4	8,0	13,5	19,8	26,0	32,6	40,3	45,7
Aardolie	22,0	31,0	48,4	66,1	66,7	63,9	61,4	59,8	58,0	53,0	49,4
Andere	0,3	0,3	0,9	0,4	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0

Tabel 2. Aandeel van binnenlandse produktie en invoersaldo in het totaal binnenlands primair energieverbruik (in %) [1]

	1950	1955	1960	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Produktie	59,4	46,4	44,8	32,1	31,4	33,2	40,4	46,2	53,0	66,8	74,2
Invoersaldo	40,6	53,6	55,2	67,9	68,6	66,8	59,6	53,8	47,0	33,2	25,8

lijkheid van de buitenlandse produktie meer en meer toe; een ontwikkeling die als vermeld ten tijde van de kolenschaarste in de vijftiger jaren op gang was gekomen. Ook toen was er aanvoer van overzee, voornamelijk uit de Verenigde Staten, maar nu verschoof deze aanvoer naar politiek niet altijd even stabiele gebieden, die bovendien de laatste jaren steeds hogere vergoedingen weten te bedingen. Voor de tweede maal werd de aanvoer via het Suezkanaal onderbroken, nu zelfs voor meer dan acht jaar. De aanvoerlijnen zijn daardoor belangrijk langer geworden.

Met de opkomst van de produktie van het aardgas en de begeleidende sterke ontwikkeling van de uitvoer daarvan is in de laatste jaren de Nederlandse afhankelijkheid van het buitenland aanzienlijk minder geworden (zie Tabel 2).

We zullen naderhand zien dat deze gunstige ontwikkeling tegen het einde van de zeventiger jaren in omgekeerde richting zal gaan als eenmaal de aardgasproduktie haar technisch hoogste niveau heeft bereikt.

III. Energieverbruik – verleden en toekomst

Algemeen ontwikkelingsbeeld

De groei van het energieverbruik vertoont van jaar op jaar een fluctuerend verloop. Hiervoor zijn veel factoren aan te wijzen. De meest belangrijke is wel de wisselvalligheid van het weer. Terwijl deze factor voor een deel ook het verbruik van de energiebedrijven¹⁾ voor de produktie van brandstoffen en elektriciteit beïnvloedt komt hij vooral tot uiting in de ruimteverwarming. Bij het industriële verbruik weegt de ontwikkeling van de produktie zwaarder, vooral sinds de in gebruikstelling van zeer energie-intensieve bedrijven.

Een aantal gegevens over het totale verbruik en de groei, alsmede het aantal graad-dagen als maatstaf voor het koudeverloop²⁾ in het desbetreffende jaar (*niet* alleen in het stookseizoen) zijn gegeven in Tabel 3.

¹⁾ Het begrip 'energiebedrijven' omvat: winningsbedrijven van aardgas, aardolie en steenkool, cokesbedrijven, gasbedrijven, conventionele en nucleaire elektriciteitsbedrijven en aardolie-raffinaderijen.

Tabel 3. Totaal primair energieverbruik (incl. niet-energetisch gebruik van aardolie) en aantal graad-dagen¹⁾ per jaar voor de periode 1960 – 1972 [2]

	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Totaal verbruik (10 ¹⁵ J)	930	955	1.005	1.192	1.255	1.340	1.413	1.504	1.717	1.933	2.163	2.289	2.628
Groei													
– t.o.v. voorafgaand jaar (%)	11,0	2,7	5,2	18,6	5,3	6,8	5,5	6,4	14,2	12,6	11,9	5,8	14,8
– gemiddeld over 10 jaar (%)	4,2	4,0	4,7	6,2	5,9	6,0	5,6	6,6	7,8	8,8	8,9	9,2	10,2
Aantal graad-dagen	2.816	2.726	3.236	3.483	3.075	3.088	2.915	2.756	3.030	3.056	3.060	2.834	3.056

¹⁾ Het aantal graad-dagen per jaar is het totaal van 1 of meer dagen maal het aantal °C per dag, dat de gemiddelde etmaaltemperatuur van de buitenlucht lager is dan 19°C. Daarbij niet meegerekend de temperaturen tussen 19°C (basistemperatuur) en 16,5°C (stookgrens).

Uit de gemiddelden over tienjarige perioden kan men zien dat de vraag naar primaire energie steeds sneller is gestegen, in het bijzonder na 1967. Van 1960 tot 1969, dus in 9 jaar, is de groeisnelheid zelfs verdubbeld. Deze sterke groei van het primair energieverbruik hangt nauw samen met de invoering van de aardgasdistributie. Het aardgas bracht namelijk niet alleen een vervanging van andere energiedragers maar bovendien een aanmerkelijke vergroting van de potentiële markt, wat dan ook leidde tot een belangrijk additioneel verbruik. Dit werd veroorzaakt door verscheidene fysische en technologische factoren, prijsstelling, distributiemethode en technische rendementen in de steenkool- en aardolie-sector enerzijds en de aardgassector anderzijds. De groei was bijzonder markant in de toepassing van gas voor ruimteverwarming, met als voornaamste factoren de uitbreiding van éénkamer- tot meerkamer- of centrale verwarming, gepaard aan hogere eisen ten aanzien van het comfort; verlenging van de verwarmingsperiode; verwarming ook in de zomerperiode bij kille of zelfs koude perioden van korte duur. Dit verhoogde energieverbruik betekent hier tevens een versterkte afhankelijkheid van de weersomstandigheden.

Uitbreiding van de potentiële markt door toepassing van aardgas vond echter ook plaats in de industriële sector. Technologische processen die voorheen niet voor toepassing in aanmerking kwamen werden met aardgas tot ontwikkeling gebracht; verscheidene andere werden op aardgas omgebouwd en uitgebreid. Dit is niet alleen het geval bij de chemische industrie, maar ook bij andere industriegroepen, bijvoorbeeld bij de metallurgische industrie, door de in bedrijfstelling van zeer energie-intensieve processen. Tot op heden gaf deze situatie een extra stimulans aan de groei van het primaire energieverbruik, maar we moeten verwachten dat in de zeer nabije toekomst in dit opzicht een bepaalde verzadiging zal optreden.

Anderzijds heeft in vele gevallen de vervanging van de andere energiedragers door aardgas in de bestaande toepassingsgebieden, zowel bij de industrie als bij de ruimteverwarming, tot – soms zelfs aanmerkelijke – verbetering van het toepassingsrendement geleid en daarmee tot een zekere vermindering van het potentiële totale energieverbruik.

Het spreekt vanzelf dat demografische factoren een belangrijke rol spelen in het nationale patroon van het

Tabel 4. Vooronderstellingen ten aanzien van de bevolkingsaanwas in Nederland [3]

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
Bevolking (X 10 ⁶)	11,5	12,2	13,0	13,3	13,6	13,8	13,9
Gemiddelde jaarlijkse aanwas per periode van 5 jaar (%)	1,55	1,35	1,20	1,16	0,92	0,29	0,15
Geboorten (‰)	21,1	20,0	18,3	16,1	13,2	11,0	11,0
Beroepsbevolking in % van totale bevolking	36,5	—	—	35,9	—	—	39,7 ¹⁾
Aantal gezinnen (X 10 ⁶)	2,8	3,1	3,3	3,4	3,6	3,9	4,1

¹⁾ De stijging ten opzichte van het cijfer voor 1972 is voornamelijk toe te schrijven aan een verwachte toeneming van het aantal werkende vrouwen.

Tabel 5. Verbruik van primaire energie per hoofd van de bevolking (10⁹ J), 1950–1972 [2]

	1950	1955	1960	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Steenkool	46,6	46,4	40,2	31,7	28,4	26,8	25,1	21,3	15,4	11,7	9,6
Aardgas	0,8	1,3	1,6	5,3	9,5	16,3	26,8	38,8	54,3	70,8	90,0
Olie	13,3	21,8	39,5	71,9	75,7	76,2	82,9	89,9	96,2	92,9	98,0
Totaal	60,7	69,5	81,2	108,2	113,6	119,3	134,8	150,0	165,9	175,4	197,6

Tabel 6. Verhouding tussen primair energieverbruik en industriële activiteit (1968–1972) [2]

	Energiebedrijven					Industriële eindverbruikers				
	1968	1969	1970	1971	1972	1968	1969	1970	1971	1972
Gemiddelde productie-index (1963 = 100)	178	221	267	311	378	138	152	163	172	180
Totaal energieverbruik per 3 maanden per indexpunt (10 ¹² J)	758	699	674	615	574	754	779	791	812	858

energieverbruik. In Tabel 4 wordt een opsomming gegeven van de bevolkingsvariabelen die zijn voorondersteld voor het ramen van toekomstige verbruikspatronen. Tabel 5 laat het verbruik aan primaire energie per hoofd van de bevolking zien.

III.1. Industrieel energieverbruik

Elke poging tot voorspelling van het patroon van het industriële energieverbruik zal moeten worden gebaseerd op bepaalde gegevens en vooronderstellingen.

Industriële productie – gegevens en vooronderstellingen
Er is een zekere verandering opgetreden in de verhouding tussen het industrieel energieverbruik en de industriële activiteit, zoals blijkt uit Tabel 6, waarin een onderscheid wordt gemaakt tussen energiebedrijven en industriële eindverbruikers.

Dit onderscheid is gemaakt om aan te tonen dat de productie-index in een sneller tempo stijgt voor de energiebedrijven dan voor de industriële eindverbruikers hetgeen mede is toe te schrijven aan de invoering van het aardgas en het begeleidende verschijnsel van uitbreiding der potentiële markt.

Uit de tabel blijkt tevens dat het energieverbruik per indexpunt een duidelijke daling vertoont voor de energiebedrijven (productie op grotere schaal, stijgende omzettingsrendementen) maar een stijging voor de industriële eindverbruikers (mechanisatie en automatisering).

De gemiddelde jaarlijkse stijging in de industriële productie zal zich, naar wordt verwacht, langs de volgende lijnen ontwikkelen:

1960/65	1965/70	1970/72	1972/75	1975/80	1980/85
6,8 %	6,8 %	5,0 %	5,8 %	5,7 %	6,0 %

De bescheiden toename van de groei tegen het einde van deze periode (nl. 1980/85) valt toe te schrijven aan de cumulatieve effecten van de vooronderstelde groei in de verschillende takken van industrie, waarvan voor elk afzonderlijk wordt verwacht dat zij na 1975 met een constant percentage zullen groeien. Dit verschijnsel ontstaat doordat bepaalde industrieën niet alleen sneller groeien dan het gemiddelde, maar bovendien hun relatieve bijdrage aan de toegevoegde waarde van goederen verhogen.

Industrieel energieverbruik¹⁾ – gegevens en vooronderstellingen

Terwijl het aardgas nieuwe toepassingsgebieden voor de industrie ontsloot, zijn daarnaast grote veranderingen opgetreden in de onderlinge verhoudingen van de aandelen van de verschillende energiedragers in het industrieel verbruik. De stookolie, die in zo belangrijke mate de steenkool had verdrongen, werd op haar beurt vervangen door aardgas. Terwijl in bepaalde industriële sectoren tamelijk snel werd overgegaan op aardgas als daarmee duidelijke rendementsverbeteringen werden

¹⁾ Exclusief energiebedrijven.

verkregen, wachtten andere af tot de tijd was gekomen voor vervanging van de bestaande installaties. Maar deze tweede groep ging toch ook in toenemende mate overschakelen wegens de aanzienlijke prijsstijgingen van stookolie (f 100,— per ton in mei 1971 tegen f 60,— per ton in november 1969). In 1972 is het industriële stookolieverbruik wederom sterk gedaald. Het steenkoolverbruik bleef dalen, hoewel het verbruik van cokes is toegenomen als gevolg van de sterke uitbreiding van de hoogovenindustrie, zulks ondanks het feit dat het specifieke verbruik aanzienlijk is afgenomen¹⁾).

Aangezien energie gewoonlijk een vrij onbelangrijke factor in de fabriekskosten is, bestaat er weinig kans dat hogere energieprijzen zullen leiden tot investeringen op grote schaal, direct gericht op hogere gebruiksrendementen. Daarom is aangenomen dat de voor het directe verleden gevonden ontwikkeling in de verhoudingen tussen energieverbruik en industriële productie per tak van industrie gedurende de ramingsperiode in principe zal blijven optreden. Niettemin wordt verwacht dat de trend tot verhoogd energieverbruik per productie-eenheid (Tabel 6) steeds meer zal afzwakken en vervolgens zal omkeren als in toenemende mate processen worden ontwikkeld waarin de energie met een hoog rendement wordt gebruikt.

De verdere vooronderstellingen zijn per primaire energiedrager als volgt:

Steenkool: Voorondersteld wordt dat geen relatieve toename in het verbruik van steenkool zal optreden. Een absolute verhoging gaat samen met een verhoogde productie van de hoogovenbedrijven.

Aardolie: Voorondersteld wordt dat de stookolie-injectie in hoogovens zal toenemen van 70 kg per ton ruwijzer in 1972 tot 100 kg in 1975 en tot 150 kg in 1980 en daarna.

¹⁾ Het verbruik van metallurgische cokes per ton ruw-ijzer daalde van een aanvankelijk niveau van ca. 1.100 kg tot bijv. 540 kg in 1966 en zelfs 457 kg in 1972.

Aardgas: Nieuwe contracten voor levering van aardgas zullen voor een kortere termijn worden afgesloten, mogelijk met een optie voor tussentijdse opzegging. Bestaande contracten (de eerste lopen in 1975 af) zullen alleen worden verlengd op jaarbasis en mogelijk met een optie voor opzegging.

Chemische en aanverwante procesindustrieën zullen niet in hun afname worden beperkt. Van 1980 af dient het niveau van de aardgasleveranties te worden gestabiliseerd. Injectie van aardgas in hoogovens is buiten beschouwing gebleven.

Al deze vooronderstellingen leiden tot het in Tabel 7 weergegeven patroon van industrieel energieverbruik.

III.2. Openbare elektriciteitsbedrijven

Het eindverbruik van de hoogstontwikkelde energiedrager, elektriciteit, is jarenlang gegroeid in een tempo, waardoor het in 7½ à 8½ jaar is verdubbeld. Het gebruik van huishoudelijke aard is zelfs sneller gegroeid dan het industrieel gebruik hoewel dit door een recente vertraging in de groei van het huishoudelijk verbruik de achterstand weer inloopt. Alleen de groei van het elektriciteitsverbruik door energie-industrieën vertoont een duidelijke vermindering om dezelfde redenen als reeds eerder genoemd (Tabel 6). Zie Tabel 8.

In Tabel 9 wordt een opsomming gegeven van de cijfers in verleden, heden en toekomst voor geïnstalleerde opwekkingscapaciteit, verbruik van primaire energie en het aandeel daarin van de verschillende primaire energiedragers; en de geleverde elektrische energie. De openbare nutsbedrijven produceren niet alle elektrische energie (in 1972 produceerden zij ca. 87% van het totaal). De voor de overige elektriciteitsproductie vereiste primaire energie is in de voorafgaande paragraaf in rekening gebracht.

Tabel 7. Industrieel energieverbruik¹⁾ (10¹⁵J) [4]

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
Steenkool	113,1(48,8%)	96,9(31,1%)	81,4(15,8%)	75,8(12,2%)	93(13%)	95(11%)	120(11%)
Aardgas	te verwaarlozen	17,6(5,6%)	266,4(51,7%)	434,2(70,1%)	490(67%)	505(57%)	505(45%)
Aardolie	118,7(51,2%)	197,5(63,3%)	167,6(32,5%)	109,3(17,6%)	151(20%)	290(32%)	500(44%)
Totaal	231,8	312,0	515,4	619,3	734	890	1.125

¹⁾ — excl. energie-bedrijven;
 — excl. niet-energetische olieproducten, zoals smeermiddelen, bitumen, enz.;
 — excl. nafta en middel-destillaten, voor zover dienende als chemische grondstoffen;
 — excl. een te verwaarlozen hoeveelheid fabrieksgas;
 — incl. aardgas als chemische grondstof;
 — incl. elektriciteit geleverd door openbare nutsbedrijven.

Tabel 8. Groei van het elektriciteitsverbruik in % (1965–1972) [2]

	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Gemiddelde jaarlijkse groei over de voorafgaande periode van 10 jaar								
Energiebedrijven	6,7	6,3	5,8	5,6	4,8	4,4	4,4	4,5
Industrieën	7,8	8,5	8,6	9,6	9,9	9,8	10,2	10,6
Overige eindverbruikers	9,5	9,2	9,4	9,7	10,3	10,2	10,1	9,9
Tezamen genomen	8,4	8,5	8,5	9,1	9,4	9,4	9,5	9,6

Tabel 9. Primair energieverbruik voor opwekking van elektriciteit in openbare nutsbedrijven, geïnstalleerde capaciteit en levering van elektrische energie [5]

	1960	1965	1970	1972	1975 ¹⁾	1980 ¹⁾	1985 ¹⁾
Geïnstalleerde capaciteit (MW _e)	3.630	5.180	9.080	10.900	13.900	18.250	28.000
waarvan kernenergie (MW _e netto)	—	—	50	50	500	1.100	4.100
Energieverbruik (10 ¹⁵ J)							
steenkool	123,1 (80,2%)	112,5 (50,3%)	51,9 (14,3%)	14,2 (3,1%)	5 (0,8%)	—	—
aardgas	1,4 (1,0%)	1,7 (0,8%)	174,8 (48,0%)	327,7 (72,3%)	480 (78,7%)	602 (70%)	480 (40%)
olie	25,2 (16,4%)	103,8 (46,4%)	121,3 (33,2%)	95,0 (20,9%)	87 (14,3%)	154 (18%)	490 (41%)
fabrieksgas	3,6 (2,4%)	5,5 (2,5%)	12,2 (3,4%)	13,1 (2,9%)	—	—	—
kernenergie	—	—	4,0 (1,1%)	3,6 (0,8%)	38 (6,2%)	104 (12%)	230 (19%)
totaal	153,3	223,5	364,2	453,6	610	860	1.200
Geleverde elektrische energie ²⁾ (10 ¹⁵ J)	48,7	73,1	126,3	152,3	230	305	440

¹⁾ De voor 1975, 1980 en 1985 geraamde verbruikscijfers zijn gebaseerd op de geprojecteerde samenstelling van de totale geïnstalleerde opwekkingscapaciteit (Samenwerkende Elektriciteits Productiebedrijven — SEP).

²⁾ Met inbegrip van transmissieverliezen.

Tabel 10. Verbruik van elektrische energie¹⁾ uit openbare nutsbedrijven uitgesplitst naar verschillende industrietakken, diensten en verbruik in huishoudingen (GWh) [5]

	1960	1965	1970	1975	1980	1985
1. Ontginning van mineralen	89	121	143	540	880	1.450
2. Voedings- en genotmiddelen	598	796	1.489	2.460	3.100	4.740
3. Textiel	435	489	573	850	1.020	1.300
4. Kleding-, leer- en schoen-industrie	63	91	98	190	270	420
5. Rubber	89	118	126	160	160	170
6. Hout, kurk, stro	82	119	177	350	470	690
7. Papier en karton	310	406	527	790	950	1.240
8. Drukkerijbedrijf	53	120	185	430	620	1.150
9. Chemicaliën, olie- en steenkoolderivaten	1.480	2.152	4.981	8.210	10.400	9.150
10. Bouwmaterialen en keramiek	316	505	850	1.690	2.330	4.150
11. Grootmetaal	607	1.009	3.208	7.760	11.440	17.550
12. Kleinmetaal	916	1.273	1.811	3.180	4.160	6.270
13. Openbare nutsbedrijven, landbouw, andere diensten, bouw-nijverheid	1.282	2.173	2.759	5.010	6.650	9.950
14. Dienstenverlenende industrie	1.453	2.369	4.171	7.060	9.060	15.700
15. Huishoudingen	2.792	5.018	8.664	16.280	21.920	32.300
16. Vervoer, riolering, openbare verlichting	1.049	1.201	1.547	1.900	1.970	2.570
Totaal	11.614	17.960	31.309	56.800	75.400	108.800

¹⁾ Exclusief verbruik openbare elektriciteitsbedrijven en transmissieverliezen.

Tabel 11. Raffinagecapaciteit van ruwe olie, aanvoer en energiegebruik voor omzetting [4]

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
Gemiddelde capaciteit (10 ⁶ ton)	22,6	30,8	67,4	85,3	101	100	100
Aanvoer (10 ¹⁵ J)	858	1.306	2.604	2.932	3.720	3.935	3.935
Energiegebruik voor omzetting (10 ¹⁵ J) ¹⁾	67	94	173	177	205	215	215

¹⁾ Inclusief verbruik van elektriciteit afkomstig van openbare centrales.

Aangenomen is dat na 1978 geen nieuwe centrales met aardgas als brandstof zullen worden gebouwd. Momenteel worden de mogelijkheden voor opwekking van elektriciteit uit afvalstoffen onderzocht. Er zijn reeds stroomleverende installaties in Den Haag, Amsterdam en Rotterdam en de bouw van een aantal kleinere wordt overwogen. Hun mogelijke bijdrage is gering en hier is er geen rekening mee gehouden. Tabel 10 geeft een verdeling van het verbruik van elek-

tricititeit over een aantal categorieën alsmede een raming voor de periode tot 1985.

III.3. Raffinaderijen

Tabel 11 geeft een beeld van de ontwikkeling van de raffinagecapaciteit voor ruwe olie en van de benodigde energie voor aanvoer en omzetting.

Verwacht wordt dat de benuttingsgraad zal stijgen van 82% van de capaciteit in 1972 tot 88% in 1975 en 94% in de volgende jaren. Het eigen energieverbruik van de raffinaderijen ten behoeve van de omzettingprocessen zal voor de periode tot 1985 ongeveer 5,5% van de aanvoer bedragen.

III.4. Niet-industrieel gebruik

De groep van niet-industriële eindverbruikers is uitermate heterogeen en bestaat uit huishoudens, kantoren, overheidsgebouwen, vervoer, communicatie, landbouw, tuinbouw, bosbouw, vee fokkerij, enz. In het algemeen vinden in deze groep twee voorname toepassingen van energie plaats, namelijk voor verwarming en voor vervoersdoeleinden. Het aandeel van elk van beide kan men zien in Tabel 12.

Tabel 12. Primaire energie, verbruikt door niet-industriële verbruikers, 1960 - 1972 (10^{15} J) [2]

	1960	1965	1970	1972
Ruimteverwarming ¹⁾				
- Steenkool	194,7	158,7	46,1	19,3
- Aardgas	6,3	33,5	306,1	520,9
- Olie	98,0	242,1	305,6	296,8
- Overige ²⁾	6,7	3,8	0,8	1,3
Totaal	305,7	438,1	658,6	838,3
Vervoer				
- Olie ³⁾ ⁴⁾	115,5	172,8	268,0	301,8

¹⁾ Inclusief verbruik van elektriciteit afkomstig uit openbare nutsbedrijven.

²⁾ Inclusief bruinkool, fermentatiegas, netto geïmporteerde elektriciteit, energie uit uranium.

³⁾ Steenkool en aardgas spelen een onbelangrijke rol, ook indien men rekening houdt met de in het vervoer gebruikte elektriciteit die wordt opgewekt door met steenkool en gas gestookte krachtcentrales.

⁴⁾ Exclusief bunkerolie voor de internationale scheepvaart.

Het gebruik ten behoeve van ruimteverwarming in de meest uitgebreide zin omvat al het energieverbruik in woningen, kantoren, winkels en gebouwen en al het verbruik in kassen. Een aantal overige vormen van gebruik (bijv. in de landbouw, de bouwnijverheid, de defensie) is tevens in deze categorie ondergebracht. Zoals blijkt uit Tabel 12 is het verbruik voor ruimteverwarming tussen 1960 en 1972 2,75 maal zo groot geworden, deels als gevolg van de invoering van aardgas. Zoals het er nu uitziet, zal de markt voor ruimteverwarming in de naaste toekomst waarschijnlijk verzadigd raken en vervolgens worden beheerst door het grillige Nederlandse klimaat.

Tabel 13. Aantallen woningen en verdeling van wijzen van verwarming, 1960-1985 [3]

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
Aantal woningen ($\times 10^3$)	2.892	3.261	3.787	4.042	4.400	4.700	4.950
Gemiddelde jaarlijkse nieuwbouw over perioden van 5 jaar ($\times 10^3$)	-	85	122	-	140	100	90
Aantal woningen, aangesloten op aardgasnet (%)	73,0	75,0	82,0	86,0	93,0	93,0	93,0
Centrale verwarming (%)	5,0	10,0	24,0	32,0	54,0	73,0	85,0
waarvan							
% steenkoolverwarming				0,2	-	-	-
% gasverwarming				76,3	83,8	85,6	85,8
% oliestook				23,5	16,2	14,4	14,2

Het gebruik ten behoeve van het vervoer wordt bijna geheel beheerst door olie, waarvan het verbruik tussen 1960 en 1972 2,6 maal zo groot is geworden. Tot nu toe is er weinig of geen aardgas in deze sector toegepast. Het percentage benzine bleef constant op ongeveer 65%.

III.4.1. Gebruik in de woningsector

De voornaamste variabelen die het verbruik van energie voor de woningsector bepalen zijn weergegeven in Tabel 13.

Verwacht wordt dat de stijging van het aantal woningen niet alleen zal worden bepaald door de bevolkingsaanwas maar ook door de voortgaande teruggang in het gemiddelde aantal personen per woning. Op wat langere duur zal het huizenbouwprogramma worden beïnvloed door de daling van het geboortecijfer. In bijna alle nieuwbouw zal centrale verwarming worden aangebracht.

Ten aanzien van de aardgasdistributie wordt aangenomen dat het huidige beleid zal worden voortgezet, met inbegrip van een vrije ontwikkeling van de verkoop van gas - het gaat hier om de markt met de hoogste gasprijzen. Een beperking van deze markt zou bovendien politiek moeilijk liggen. De voornaamste concurrenten voor de levering van warmte in de woningsector zijn aardgas en olie. Het aandeel van steenkool neemt snel af en er wordt niet verwacht dat elektriciteit in de periode tot 1985 een belangrijke rol zal spelen. Wat de prijsverhoudingen betreft, wordt voor de eerstvolgende jaren verwacht dat de prijs van gas, naar calorische waarde gemeten, lager zal blijven dan die van olie. Een verhoging met 2 à 3 cent per m^3 gas zal waarschijnlijk in de naaste toekomst haar effect verliezen door een verhoging van de olieprijs als gevolg van de belastingharmonisatie binnen de Benelux. ¹⁾ Maar aangenomen wordt dat de gasprijzen in de nabije toekomst (binnen de drie tot vijf jaar) hun reële marktwaarde zullen gaan benaderen. Hoewel zulks tot een meer evenwichtige afwegingsbalans bij keuze tussen olie- en gasverwarming zal leiden, zullen de installatiekosten voor gasverwarming nog altijd lager zijn.

Men verwacht over de komende jaren een verhoging van het gemiddelde verbruik per centraal verwarmde woning van circa 3% per jaar, toe te schrijven aan factoren als

¹⁾ De ontwikkelingen van de oliemarkt tegen het einde van 1973 hebben de stijging der olieprijs versneld. Dit zal de gasprijzen te zijner tijd verder beïnvloeden.

grotere huizen, hogere eisen ten aanzien van de temperatuur, enz. Op langere termijn (na 1980) zal een verbeterde isolatie — ingevoerd wegens de hogere brandstofprijzen — waarschijnlijk tegen deze verhogingen opwegen. Het zou ook kunnen zijn dat er meer kleine huizen worden gebouwd wanneer het aantal personen per woning afneemt. Hoewel er meer kachels per huis zullen komen in huizen zonder centrale verwarming, wordt verwacht dat hun totale aantal zal dalen van 5,1 miljoen in 1972 tot 4,3 miljoen in 1980 en 3,5 miljoen in 1985 als gevolg van de toegenomen marktpenetratie van de centrale verwarming.

Al deze gegevens en vooronderstellingen leiden tot het in Tabel 14 gegeven patroon van het primaire energieverbruik in woningen.

Tabel 14. Verbruik van primaire energie in woningen¹⁾ (10^{15} J) [1, 4]

	1972	1975	1980	1985
Steenkool	8,8 (2%)	5 (1%)	3(—)	3(—)
Aardgas	278,4(59%)	480(86%)	560(86%)	630(85%)
Olie	187,2(39%)	75(13%)	90(14%)	110(15%)
Totaal	474,4	560	653	743

¹⁾ Exclusief elektriciteitsverbruik.

III.4.2. Tuinbouw

Verwacht wordt dat het energieverbruik in deze sector zal toenemen met ongeveer 2% per jaar. Deze bescheiden groei is toe te schrijven aan de waarschijnlijk groter wordende concurrentie van de landen in Zuid- en Oost-Europa (met name Roemenië). De normen voor de kwaliteit van de atmosfeer en de uitbreiding van de gasnetten in de kastreken van het land maken het waarschijnlijk dat het aardgas zal gaan voorzien in het grootste deel van de energiebehoefte in de tuinbouwsector. Aangenomen wordt dat het niveau van de toevoer van aardgas van 1980 af zal zijn gestabiliseerd. Tabel 15 laat het cijfermateriaal hierover zien.

Tabel 15. Verbruik van primaire energie¹⁾ in de tuinbouw (10^{15} J), 1972 — 1985 [3]

	1972	1975	1980	1985
Steenkool	—	—	—	—
Aardgas	41,4(50%)	73(80%)	85(85%)	85(78%)
Olie	41,0(50%)	18(20%)	15(15%)	24(22%)
Totaal	82,4	91	100	109

¹⁾ Exclusief verbruik van elektriciteit.

III.4.3. De sector van de utiliteitsgebouwen

Deze sector omvat diverse categorieën, zoals kantoren, bedrijfspanden, winkels, ziekenhuizen, scholen, enz. De basisgegevens inzake het energieverbruik zijn beperkt en niet betrouwbaar. Naarmate de vraag naar dienstverlening toeneemt, zal zij een steeds belangrijker sector gaan

Tabel 17. Gegevens en vooronderstellingen betreffende het aantal en het gebruik van personenauto's [3]

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
Aantal personenauto's ($\times 10^3$)	526	1.273	2.525	2.900	3.530	4.670	5.610
Aantal inwoners per auto	22	9,7	5,2	4,5	3,8	3,1	2,7
Gereden kilometers (in Nederland) per auto per jaar ($\times 10^3$)	16,4	15,4	14,8	16,0	16,0	15,3	14,3

vormen. Daarom is aangenomen dat het energieverbruik zal stijgen met ongeveer 4% per jaar.

De onderlinge concurrentie der brandstoffen zal zich langs dezelfde lijnen ontwikkelen als in de woningsector. Verwacht wordt dat een relatieve verhoging van de gasprijs zal leiden tot een meer evenwichtige balans bij de keuze tussen olie en aardgas en tot een efficiënter energieverbruik.

Een aanzienlijke hoeveelheid middeldestillaten (in 1972 geraamd op 750.000 ton of 31×10^{15} J), die op de binnenlandse markt was verkocht en dus werd aangemerkt als binnenlands verbruik, werd in feite door de tussenhandel uitgevoerd naar de Bondsrepubliek Duitsland. Aangenomen is dat het prijsverschil tussen West-Duitsland en Nederland zal blijven bestaan en dat deze exporten op hetzelfde niveau zullen worden voortgezet. Indien deze vooronderstelling uitkomt, dienen de ramingen voor olie te worden verminderd met een overeenkomstige hoeveelheid.

De bovengenoemde vooronderstellingen liggen ten grondslag aan de in Tabel 16 gegeven cijfers.

Tabel 16. Verbruik van primaire energie¹⁾ in utiliteitsgebouwen, 1972 — 1985 (10^{15} J) [3]

	1972	1975	1980	1985
Steenkool	—	—	—	—
Aardgas	80(44%)	110(55%)	150(64%)	195(71%)
Olie	100(56%)	90(45%)	85(36%)	80(29%)
Totaal	180	200	235	275

¹⁾ Exclusief verbruik van elektriciteit.

Diverse toepassingen

Naast het verbruik in de woning- en tuinbouwsector en in utiliteitsgebouwen is nog een relatief kleine categorie van diverse toepassingen ondergebracht bij ruimteverwarming (zie Tabel 12). Hiertoe behoren toepassingen als het gebruik voor defensiedoeleinden en in de bouwnijverheid. Ze worden in dit hoofdstuk niet apart behandeld.

III.4.4. Vervoer

Privévervoer

In Tabel 17 worden gegevens en ramingen opgesomd van het aantal personenauto's en de intensiteit van het gebruik hiervan.

De daling tussen 1960 en 1970 van het gemiddelde aantal kilometers per auto was toe te schrijven aan het feit dat de toename in het aantal kilometers, gereden door de reeds langer rijdende bestuurders, meer dan wegviel tegen het lagere begingemiddelde van de nieuwe rijders. Deze dalende trend veranderde in het tegendeel tussen 1970 en 1972 en dit werd veroorzaakt door een wijziging in de verhouding tussen reeds langer rijdende eigenaren en nieuwe rijders. Er is aangenomen dat het huidige cijfer tot 1975 stabiel zal blijven, waarna het

begin van een hernieuwde daling wordt verwacht als gevolg van een toenemende verkeersdichtheid. Er zijn geen cijfers beschikbaar van het verbruik per auto per kilometer (in 1972 was het gemiddelde een liter op elf kilometer).

Op het ogenblik wordt ongeveer 85% van alle benzine voor personenauto's gebruikt.

Beroepsvervoer over de weg

Het verbruik van dieselolie wordt bepaald door het aantal met dieselmotoren aangedreven voertuigen, het gemiddelde motorvermogen en het gemiddelde aantal gereden kilometers.

Verwacht wordt dat het wegvervoer zal doorgaan een groter aandeel in het totale vervoer te verwerven ten koste van het vervoer te water. De ontwikkeling in de richting van zwaardere vrachtwagens zal zich voortzetten, evenals de vermeerdering van de jaarlijks afgelegde afstand. Deze factoren zullen leiden tot een verdere toename van het gebruik van dieselmotoren door het beroepsvervoer. Het aandeel in het totaal van de dieselmotor als krachtbron voor vrachtwagens zal toenemen van 81% in 1972 tot 95% in 1985, maar zal, naar verwacht wordt, voor bestelauto's constant blijven op 6%. Zie Tabel 18.

Vervoer te water

Aangenomen is dat het patroon van het toegenomen vermogen per ton laadcapaciteit zich zal handhaven. Men verwacht dat het brandstofverbruik zich volgens de tot nog toe bestaande trends zal blijven ontwikkelen.

Internationale luchtvaart

Men verwacht dat de pp onze vliegvelden ingenomen

vliegtuigbrandstof in een wat langzamer tempo zal toenemen dan gedurende de meest recente zestiger jaren. De stijging van het aantal passagiers per jaar zal zich voortzetten, maar er wordt gedeeltelijk een tegenwicht gevormd door een tendens naar hogere bezettingsgraden en meer energierendabele vluchten. De vliegtuigmotoren zullen ook hogere rendementen te zien gaan geven.

De brandstof voor eigen voortstuwing in het internationaal scheepsverkeer

Hoewel het verbruik voor internationaal scheepsverkeer gewoonlijk niet wordt beschouwd als binnenlands energieverbruik, wordt deze categorie hier volledigheidshalve vermeld, ook omdat ze een aanmerkelijk deel uitmaakt van de totaal verbruikte energie. Verwacht wordt dat deze sector aanzienlijk minder snel zal groeien dan vroeger het geval was. Dit valt toe te schrijven aan de verwachte vertraging van de groei van de raffinagecapaciteit en van delen van de industriële productie.

Tabel 19 geeft een samenvatting van de gegevens en de ramingen van het energieverbruik in de vervoerssector.

III.5. Ramingen van het totaal

De ramingen van het totaal, zoals die zijn afgeleid uit de bovenstaande analyse per sector, worden samengevat in Tabel 20, te zamen met de gegevens voor 1960 – 1972. Het verwachte aandeel van de diverse primaire energiedragers in het totale Nederlandse energieverbruik wordt gegeven in Tabel 21.

Tabel 18. Gegevens en ramingen voor voertuigen voor beroepsvervoer [3]

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
Voertuigen (X 10 ³)	163	243	255	264	294	343	394
Penetratie van de dieselmotor (%)	20	27	33	35	37	41	43
Jaarlijks brandstofverbruik per dieselvoertuig (X 10 ³ liter)				15,0	15,3	15,6	16,0

Tabel 19. Gegevens en ramingen van het energieverbruik in de vervoerssector, 1960 – 1985 (10¹⁵ J) [6]

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
LPG	2,9	2,2	2,7	3,2	195	240	270
Benzine voor auto's	58,3	94,0	145,5	163,8			
Gasolie voor auto's	18,8	29,1	43,1	53,3			
Totaal wegvervoer	80,0	125,3	191,3	220,3	163	330	385
Vliegtuigbenzine	2,5	1,3	0,7	0,5	51	85	125
Straalmotorenbrandstof	10,6	14,8	31,8	36,4			
Totaal luchtvervoer	13,1	16,1	32,5	36,9	51	85	125
Gasolie voor binnenlands vervoer te water	22,4	31,4	44,2	44,6	50	60	70
Totaal binnenlands verbruik	115,5	172,8	268,0	301,8	363	475	580
Bunkeren van brandstof voor internationaal scheepsverkeer	128,0	252,3	373,5	504,0	485	530	565

Tabel 20. Verbruik van primaire energie ¹⁾ in Nederland per sector (10¹⁵ J)

	1960	1965	1970	1972	1975	1980	1985
Industrie	215	293	468	560	646	770	965
Openbare elektriciteitsbedrijven ²⁾	153	224	364	454	610	860	1.200
Raffinaderijen (gebruik voor omzetting)	66	92	169	173	198	207	207
Woningen	} 283	} 401	} 596	475	560	653	743
Tuinbouw				82	91	100	109
Utiliteitsgebouwen				180	200	235	275
Vervoer	116	173	268	302	363	475	580
Andere toepassingen ³⁾	58	48	34	55	58	65	75
Primaire energie (binnenland)	891	1.231	1.899	2.281	2.726	3.365	4.154
Bunkeren van brandstof voor internationaal scheepsverkeer	128	252	374	504	485	530	565

¹⁾ Exclusief niet-energetisch gebruik van olie.

²⁾ Inclusief alle opgewekte elektriciteit en alle verkochte warmte.

³⁾ Inclusief andere energiebedrijven (gebruik voor omzetting), landbouw, bouwnijverheid, enz.

Tabel 21. Geraamd aandeel van primaire energiedragers in het totale verbruik ¹⁾, 1972 – 1985

	1972		1975		1980		1985	
	10 ¹⁵ J	%	10 ¹⁵ J	%	10 ¹⁵ J	%	10 ¹⁵ J	%
Steenkool	128	5,7	108	4	100	3	124	3
Aardgas	1.199	52,6	1.602	59	1.850	55	1.859	45
Olie	950	41,7	987	36	1.311	39	1.941	47
Kernenergie	4	—	38	1	104	3	230	5
Totaal	2.281		2.726		3.365		4.154	

¹⁾ Exclusief niet-energetisch gebruik van olie en het bunkeren van brandstof voor internationaal scheepsverkeer.

IV. Samenvatting en conclusies

IV.1. De periode tot 1957

Deze periode is gekenmerkt door een gestage groei van gemiddeld 4% per jaar. De steenkoolsector had in het energieverbruik een sterk overheersende positie. Aan het eind van de periode werd een toenemende schaarste aan steenkool bestreden door invoer van overzee (vooral uit de Verenigde Staten). Ook het verbruik in de aardoliesector, vooral in de industrie, nam toe. Het einde van deze periode bracht het begin van een terugslag in de conjunctuur van de Westeuropese industrie.

IV.2. De periode 1957 – 1967

De ingetreden recessie remde het energieverbruik, waarbij de steenkoolsector het ergste te lijden had. Wat aanvankelijk als een tijdelijke terugslag in deze sector werd gezien, bleek een structureel verschijnsel. De aardolie nam de overheersende positie van de steenkool steeds meer over. De groei van het verbruik van primaire energie nam toe tot gemiddeld 6,6% per jaar, hoofdzakelijk als gevolg van de industriële ontwikkeling.

IV.3. De periode 1968 – 1972

De invoering van de aardgasdistributie bepaalde steeds meer het patroon van het totale energieverbruik. Door technologische vooruitgang en een gunstige prijsstelling werd voor het gas een belangrijke vergroting van de potentiële markt voor industriële toepassing verkregen.

Maar het voornaamste effect had de toepassing voor ruimteverwarming. Het waren vooral deze uitbreidingen van de verbruiksmogelijkheden die de jaarlijkse groei van het totale energieverbruik sterk boven het gemiddelde in de zestiger jaren deed stijgen. Gemiddeld (over voorafgaande tienjarige perioden) nam het primair energieverbruik over de tienjarige periode 1963 – 1972 van 6,2% tot 10,2% per jaar toe, derhalve een verdubbeling van het verbruik per 7 jaar. Aan deze versnelde groei – als gevolg van de uitbreiding van de energiemarkt – komt op korte termijn door verzadiging een einde. De ombouw in de tuinbouwsector betekent overigens in hoofdzaak een vervanging die mogelijk door rendementsverbetering leidt tot een lager totaal verbruik in de verzadigings-situatie.

IV.4. Raming voor de periode 1972 – 1985

Het totale verbruik aan primaire energie in Nederland (exclusief het niet-energetisch gebruik van olie en de brandstof voor internationaal scheepsverkeer) zal in 1985 met ongeveer 80% zijn gestegen ten opzichte van het cijfer van 1972. Hierbij is rekening gehouden met bepaalde verzadigingseffecten en andere waarschijnlijke ontwikkelingen zoals de stabilisatie van de aardgasleveringen aan de industrie en de elektriciteitsbedrijven na 1980 en de stijging van de prijs van gas ten opzichte van olie.

Het aandeel van de elektriciteit in het totaal blijft toenemen (van ca. 20% van de primaire energie tot ca. 29% in 1985). Het aandeel van de olie zal stijgen (van 42% tot 47%); gas ondergaat een tijdelijke stijging en zal vervolgens terugvallen (53% in 1972,

59% in 1975, 45% in 1985) en kernenergie komt langzaam in het beeld (met ongeveer 5%).

Aangezien ten behoeve van de raming geen specifiek op besparing gericht beleid was voorondersteld, zou men kunnen redeneren dat de ramingen van de vraag tot en met 1985 aan de lage kant zijn, in zoverre namelijk dat daarin alleen maar ruimte wordt gelaten voor een gemiddeld groeipercentage van tussen de 4 en 5 per jaar. Het wordt echter zeer waarschijnlijk geacht, dat aanvoerbeperkingen zullen verhinderen dat aan een grotere vraag wordt voldaan.

Met de invloeden van de tijdens en na november 1973 door de OPEC-landen opgelegde prijsverhogingen is in de ramingen geen rekening gehouden, behoudens enkele voor de hand liggende correcties (raffinagecapaciteit en -gebruik voor omzetting; vermindering in de groei van het bunkeren van brandstof voor internationaal scheepsverkeer). Bij het ter perse gaan van deze studie was de situatie nog niet voldoende duidelijk voor een waardering van andere mogelijke gevolgen. Maar al zouden enkele van de gemaakte veronderstellingen reeds min of meer achterhaald zijn, dan nog tonen de resultaten van de raming aan, dat een heroriëntatie van het huidige patroon van het energieverbruik een levensbelang is, wil men ernstige verstoringen van het evenwicht in de Nederlandse economie vermijden en wil men de bedreiging van stagnatie of van een economische ontwrichting van grote omvang afwenden.

V. Samenstelling van de werkgroep

De werkgroep die Hoofdstuk II heeft samengesteld bestond uit de volgende leden:

ir. J.H. Bakker	Samenwerkende Elektriciteits-Productiebedrijven, Arnhem
dr. C. Krijgsman	Nederlandse Gasunie, Groningen

ir. drs. M.J. Portegies	Nederlandse Gasunie, Groningen
ing. W.M.M. Schaaper	Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorburg
ir. K. Swart	Koninklijke Shell Groep, 's-Gravenhage
ir. K. Wassenaar	N.V. Samenwerkende Elektriciteits-Productiebedrijven, Arnhem
ir. J.A. Over (Secretaris)	Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 's-Gravenhage

Voorts werd een bijdrage gevraagd en verkregen van:
ir. D. van Hilten Shell Nederland Verkoop Mij, Rotterdam

Het hoofdstuk is een synthese van feiten, cijfers en veronderstellingen die zijn verschaft door de bovengenoemde personen en hun onderscheiden organisaties. Wegens verschillen in de gebruikte statistische methoden en gehanteerde definities kunnen we niet ten volle instaan voor een zeer hoge nauwkeurigheid van alle historische gegevens. In het algemeen is hun nauwkeurigheid echter ten minste 95%.

VI. Verwijzingen

- [1] Centraal Bureau voor de Statistiek. Publikatie: 'De Nederlandse energiehuishouding', No. 4, 1972.
 - [2] Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS).
 - [3] Shell Nederland Verkoop (SNV).
 - [4] Historische gegevens: CBS. Ramingen: SNV.
 - [5] Historische gegevens: CBS en Samenwerkende Elektriciteits-Productiebedrijven (SEP). Ramingen: SEP.
 - [6] Historische gegevens: CBS en SNV (binnenlands vervoer te water). Ramingen: SNV.
- Alle ramingen van het aardgasverbruik zijn gecontroleerd door de Nederlandse Gasunie.

Hoofdstuk 3. Mogelijkheden tot besparing op industrieel energieverbruik

door de werkgroep **Industrieel Energieverbruik**

I. Inleiding

Hoewel zon, wind, water en de in overvloed aanwezige warmte van de aarde ons in principe voor onafzienbare tijden voldoende energie garanderen, is het duidelijk dat het tijdperk van de goedkope energie spoedig tot het verleden zal behoren. De vraag neemt snel toe en de voorraad oude, vertrouwde fossiele brandstoffen is beperkt. Terwijl grote landen om autarkische redenen kunnen overwegen de import van olie te beperken, zouden ook andere verbruikerslanden in de door verscheidene olieproducerende landen opgelegde uitvoerbeperkingen aanleiding kunnen vinden zich te richten op energiebronnen die weliswaar duurder, maar in internationaal politiek opzicht minder kwetsbaar zijn. Tezelfdertijd maken de aan de kwaliteit van het milieu gestelde normen de winning en het verbruik van energie duurder. In dit licht bezien wordt de vraag hoe op energie kan worden bespaard niet gesteld wegens een absoluut tekort, maar wegens een toekomstige prijsstijging en een dreigend bestuurlijk probleem.

Indien energie schaarser en duurder wordt, zal de industrie overschakelen op processen waarvan de kostprijs van de energie per eenheid eindprodukt lager ligt. Het eerste wat gedaan moet worden is dan ook het maken van een analyse van kostenbestanddelen van de industrie.

De produktiekosten worden gevormd door:

- energiekosten (ca. 10-30%);
- arbeidskosten (ca. 40-30%);
- grondstoffen en installaties (ca. 40-30%);
- diversen als afschrijving, rente, enz. (ca. 10%).

Bovengenoemde percentages dienen te worden gezien als globale benaderingen voor die processen waarin de energiekosten een belangrijke rol spelen.

Een relatieve stijging van de energieprijzen ten opzichte van de andere produktiekosten zal uiteraard de neiging doen ontstaan tot een vermindering van het energieverbruik. Bij het ontwerpen van nieuwe installaties zal het afwegen van kapitaalsinvesteringen tegen produktiekosten een verschuiving te zien geven in de richting van een lager energieverbruik. Tevens zal een verhoogde energieprijzen een stimulans zijn voor een zuinige bedrijfsvoering.

De energiekosten van 10-30% (geldende voor de in dit hoofdstuk besproken processen) vormen een aanzienlijke post bij de totale produktiekosten — die zelf de volle aandacht hebben.

Voor energiebesparing in de industrie staan een aantal wegen open. Sommige daarvan liggen geheel binnen het bereik van de industriële bedrijven zelf, andere daarentegen minder. Voor laatstgenoemde zouden hetzij nieuwe bestuurlijke maatregelen, hetzij interne aanpassingen aan nieuwe taken in de bedrijfsvoering

nodig zijn. Wijziging in overleg met verbruikers over de aan producten of brandstoffen gestelde kwaliteitsnormen kan soms aanzienlijke energiebesparingen opleveren, maar dit aspect komt in dit hoofdstuk slechts zijdelings ter sprake. Een uitvoerige evaluatie van de hierin aanwezige mogelijkheden zou een afzonderlijke studie met een sociaal-economische inbreng vergen. Voorbeelden van mogelijke energiebesparingen die geheel binnen het bereik van de industrie liggen, zijn:

- het terugbrengen van verliezen in en rondom de processen door een verscherpt toezicht op het energieverbruik, eventueel gesteund door geautomatiseerde procesregeling;
- een intensiever gebruik van warmte door meer warmtewisseling;
- een efficiënter gebruik van warmte bij verbrandingsprocessen, hoger ovenrendement;
- het toepassen van vervangende processen die minder energie-intensief zijn;
- in sommige gevallen het overgaan van elektriciteit op aardgas, steenkool of olie als warmtebron;
- het vormen van grotere productiecomplexen, waarbij in het algemeen de opreductie van de bedrijfskosten gerichte investeringen lonender worden en waardoor de verschillende processen efficiënter op elkaar kunnen worden afgestemd. Voor andere voorbeelden wordt verwezen naar de literatuuropgaven [1].

Voorbeelden van energiebesparingen die slechts gedeeltelijk binnen het bereik van de bedrijven liggen, maar wel in dit hoofdstuk aan de orde komen, zijn:

- afvalwarmte beschikbaar maken voor verwarming van woningen en gebouwen;
- het op grote schaal combineren van de productie van elektriciteit en warmte.

Gezien de grote verscheidenheid van industrieën en van de methoden waarmee een procesgang wordt gecontroleerd, behoeft het geen betoog dat in het kader van dit hoofdstuk slechts een greep kan worden gedaan. De aandacht wordt dan ook vooral gevestigd op de besparingsmogelijkheden in die sectoren van de industrie die tot de zeer grote energieverbruikers behoren. In Tabel 1 worden cijfers gegeven van het energieverbruik in de verschillende industriële sectoren.

Tabel 2 laat zien hoeveel het primair energieverbruik is bij de in dit hoofdstuk gekozen voorbeelden van industriële processen.

De keuze van enkele onderdelen in Tabel 2 behoeft enige toelichting. De bereiding van eetbare oliën en vetten, margarine, zeep en wasmiddelen is gekozen als voorbeeld uit de voedings- en genotmiddelensector. Deze sector is als geheel een aanzienlijke energieverbruiker. Dit totale verbruik wordt echter geheel opgebouwd uit zeer vele, op zichzelf onbetekenende

onderdelen afkomstig uit een grote verscheidenheid van processen en producten. Dit voorbeeld is dus tot op zekere hoogte karakteristiek voor de situatie in de overige, niet behandelde industriële processen, die tezamen toch 42% van het totale industriële energieverbruik in 1972 vertegenwoordigen.

Fermentatieprocessen zijn gekozen teneinde na te gaan of hier mogelijkheden liggen om bestaande chemische processen te vervangen door minder energie-intensieve processen op basis van enzymen.

Tabel 1. Primair energieverbruik in verschillende industriële sectoren in 1972¹⁾ [2]

	10 ¹⁵ J	%	% van het nationaal verbruik ²⁾ (2.281 X 10 ¹⁵ J)
Chemische industrie ²⁾	272	34	12
Olieraffinage ²⁾	177	22	8
Metaalindustrie	162	20	7
Voedings- en genotmiddelenindustrie	69	9	3
Bouwmaterialen	50	6	2
Papierindustrie	30	4	1
Textielindustrie	14	2	1
Overige industrie	21	3	1
Totaal	795	100	35

¹⁾ Met inbegrip van door openbare nutsbedrijven geproduceerde elektriciteit.

²⁾ Met uitzondering van niet ten behoeve van energieopwekking gebruikte olie.

Tabel 2. Primair energieverbruik gedurende 1972 in de gekozen industriële processen¹⁾ [2]

	10 ¹⁵ J	% van het industrieel verbruik (795 X 10 ¹⁵ J)
Olieraffinage ²⁾	177	22
Ammoniaksynthese ²⁾ ³⁾	116	15
IJzer- en staalbereiding ²⁾	112	14
Verpakkingsindustrie ca.	37	5
Aluminiumbereiding ca.	15	2
Bereiding van		
— oliën, vetten,		
— margarine ca.	2	—
— zeep, wasmiddelen ca.	1	—
Fermentatieprocessen	verwaarloosbaar	—
Totaal	460	58

¹⁾ Met inbegrip van door openbare nutsbedrijven geproduceerde elektriciteit.

²⁾ De met behulp van de aangegeven hoeveelheid energie vervaardigde producten werden voor een belangrijk deel geëxporteerd.

³⁾ Verbruik van aardgas als grondstof en als energiedrager (voor het proces zelf zowel als voor de verdere omzetting van ammoniak) tezamen genomen.

II. Olieraffinage

II.1. De door Nederlandse raffinaderijen verbruikte energie

De totale hoeveelheid in Nederlandse raffinaderijen verwerkte ruwe olie in 1972 was ongeveer 70 X 10⁶ ton

[2]. Uitgedrukt in energie is dit gelijk aan ongeveer 2.932 X 10¹⁵ J.

Van dit totaal werd slechts ongeveer 26% gebruikt voor binnenlandse energietoepassingen, zoals valt af te lezen uit Tabel 3.

Tabel 3. Toepassingen van door raffinaderijen in Nederland geproduceerde olieproducten (1972) [2]

	10 ¹⁵ J	%
Olieproducten die in Nederland als energiebron worden gebruikt	774	26
Raffinageproducten, niet voor energieverbruik	347	12
Eigen brandstofverbruik van de raffinaderij	177	6
Saldo aan geraffineerde hoeveelheid voor export ¹⁾	1.634	56
Totaal geproduceerd (gelijk aan ongeveer 70 X 10⁶ ton)	2.932	100

¹⁾ Met inbegrip van bunkers voor grensoverschrijdende scheepvaart.

Voorbeelden van niet voor energieverbruik bestemde raffinageproducten zijn smeermiddelen, grondstoffen voor de chemische industrie en bitumen. Een deel van deze producten wordt geëxporteerd. Daadwerkelijk verlies en verbruik aan brandstof voor de raffinage kwamen in 1972 op 6,0% van de aanvoer aan ruwe olie, of 7,8% van het nationale primaire energieverbruik (2.281 X 10¹⁵ J).

II.2. Mogelijke verschuivingen in het energieverbruikspatroon

Een kwart van alle verwerkingskosten van raffinaderijen (kapitaalsuitgaven niet meegerekend) wordt gevormd door het interne energieverbruik. Wegens dit hoge percentage hebben raffinaderijen hier altijd zeer veel aandacht aan geschonken. Het is daarom nauwelijks verbazingwekkend als men verneemt dat de nog altijd mogelijke verbeteringen in de controle op de verwerking ternauwernood enige energiebesparing zouden opleveren. Een aanzienlijke verlaging van het energieverbruik zal daarom veel straffer maatregelen vergen. Het bijbouwen van nieuwe installaties of de vervanging van oude ter verbetering van de warmteterugwinning in een proces kan extra besparingen opleveren. In bestaande eenheden zijn de mogelijkheden voor dergelijke verbeteringen evenwel beperkt. Verbeterde warmteterugwinning kan op groter schaal worden toegepast in nog te bouwen eenheden, omdat een nieuw ontwerp kan worden aangepast aan een optimum van kapitaal- en verwerkingskosten.

Een van de bestudeerde aspecten is het effect dat een sterke verhoging van de brandstofprijzen (tot en met een factor 4) relatief t.o.v. de kosten van het materieel, heeft op de bedrijfsvoering zowel in bestaande als in nog te bouwen eenheden.

Er zouden gevolgen zijn op korte termijn (tot 1985) waarbij de wijziging van bestaande eenheden overheerst, en op middellange termijn (tot het jaar 2000) waarbij het merendeel der eenheden nieuw zal zijn. Een aantal technische mogelijkheden is in overweging genomen en de daardoor op te leveren

besparingen in bestaande en toekomstige eenheden zijn bestudeerd. Deze zijn:

- betere controle op de bediening met behulp van computers;
- betere herwinning van afvalwarmte uit procesgangen;
- hoger fornuisrendement;
- verhoogd rendement door het toepassen van meer schotels in de separatieprocessen;
- het gebruik van het warmtepompprincipe bij separatieprocessen;
- het gecombineerd gebruik van warmte en kracht;
- het integreren met ruimteverwarming.

Tot dusverre is er van uitgegaan dat het totale produktenpakket en de thans geldende specificaties ongewijzigd blijven. Op te merken valt dat ongeveer 50% van de in de processen verbruikte energie (85-90% van het totale energieverbruik in de raffinage) opgaat aan de primaire scheiding van rechtstreeks verkregen ruwe produkten (produkten verkregen uit het eerste destillatieproces, zie Figuur 1). Nog eens 35% wordt verbruikt bij het omzetten van rechtstreeks verkregen ruwe produkten teneinde te komen tot het gewenste ruwe produktpatroon. De resterende 15% wordt gebruikt voor de eindbehandeling en afwerking van het eindprodukt. Ongeveer 1/8 van alle bij raffinagewerkzaamheden verbruikte energie wordt verbruikt op een wijze die herwinning onmogelijk maakt (bijv. wrijving, chemische bindingen, enz.). Uit deze cijfers blijkt dat een verandering in het vereiste produktpatroon of in de kwaliteit van het produkt een aanmerkelijke invloed zou hebben op het energieverbruik van raffinaderijen.

Men dient ook te beseffen dat bijkomende, door het milieu gestelde eisen het brandstofverbruik bij de

raffinage zullen verhogen. De twee voornaamste punten zijn hier de hogere eisen bij het ontzwaren van verschillende produkten en de bijkomende bewerking van benzine die nodig is indien een verminderd loodgehalte wordt toegepast.

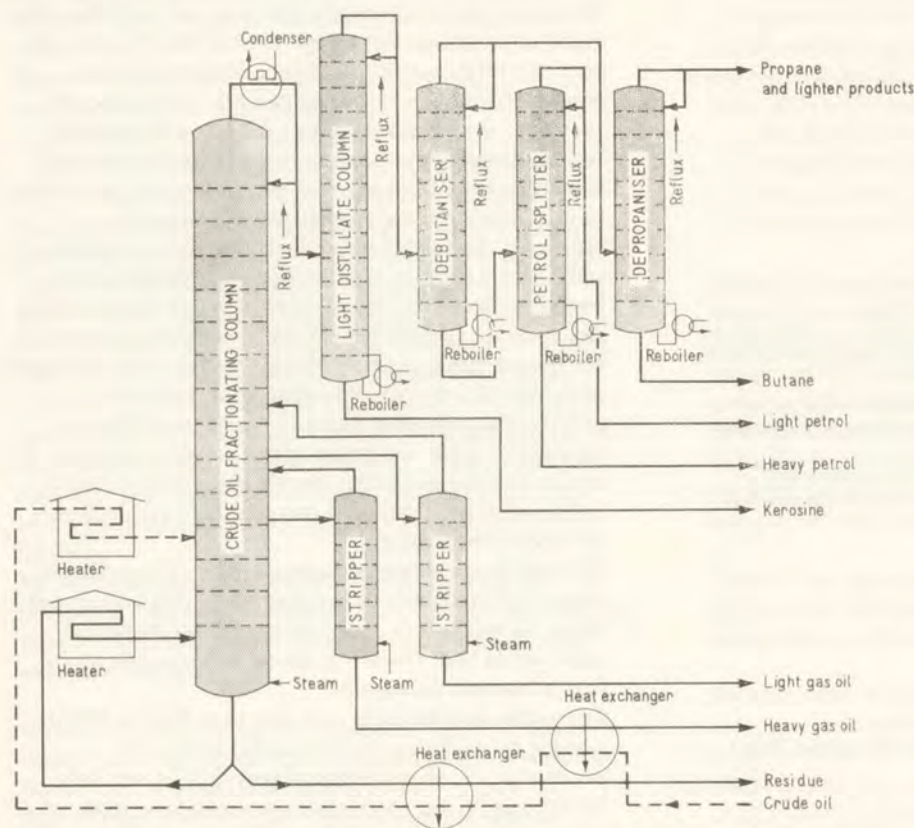
II.3. Mogelijke energiebesparingen

Verbeterd toezicht op de werking van de installatie

Ongeveer 25% van de uitgaven voor het raffineren wordt besteed aan het verbruik van brandstof en warmte. Dientengevolge wordt voortdurend getracht alle overbodig verbruik van brandstof waar mogelijk te verminderen. Tegenwoordig kan zonder meer worden aangenomen dat maar zeer weinig brandstofverbruik is toe te schrijven aan slechts gedeeltelijk belaste eenheden in de raffinaderij of aan een systematisch slechte bedrijfsvoering van de installatie. Het toenemende gebruik van computercontrole op de bedrijfsvoering van de raffinaderij zou tegen 1985 een bijkomende besparing van ongeveer 5% op het verbruik van ruwe olie in raffinaderijen kunnen opleveren.

Verbeterde warmteterugwinning tijdens de procesgang

Voor de verschillende raffinageprocessen is het nodig dat de warmte tijdens de procesgang op onderling verschillende temperaturen naar een aantal onderdelen wordt toegevoerd. De energie wordt gewoonlijk toegevoerd op punten waar de hoogste temperatuur is vereist. Na gebruik aldaar worden deze warmtestromen gedeeltelijk teruggewonnen door warmtewisseling ten behoeve van plaatsen met een lager temperatuurniveau. Hoe meer warmteherwinning hoe



Figuur 1. Algemeen schema van de destillatie van ruwe olie [3]

minder brandstofverbruik. Daarom is er een optimale verhouding tussen de investeringen voor warmtewisselaars en brandstofkosten. Het zal duidelijk zijn dat een verhoging van de brandstoffenprijzen de optimale waarde in de verhouding zal doen verschuiven naar een hogere investering in warmtewisselaars. Een gedetailleerd onderzoek¹⁾ van deze keuzemogelijkheid heeft uitgewezen dat zelfs bij een brandstofprijzverhoging met een factor 4 ten opzichte van de prijzen van de installaties slechts 7% van de brandstofenergie economisch kan worden bespaard. Het werkzame oppervlak van de warmtewisselaars zou dan 60% groter zijn dan tegenwoordig gebruikelijk is. Zoiets is uiteraard alleen maar uitvoerbaar in toekomstige eenheden. De beperkte mogelijkheden voor de lonende vergroting van het oppervlak van de warmtewisselaars in bestaande installaties zouden slechts een besparing opleveren van 5%. Op basis van het totale energieverbruik in de raffinage, met inbegrip van katalytische processen, elektriciteitsopwekking, enz. kunnen deze potentiële energiebesparingen van resp. 7% en 5% slechts gedeeltelijk worden verwezenlijkt. De reële cijfers zijn resp. 5% en 3,5% voor het energieverbruik bij de raffinage van ruwe aardolie.

Verbetering van het fornuisrendement

Een verhoogde warmtewisseling tussen afgewerkt gas uit en verse lucht naar een fornuis (oven) levert ook brandstofbesparing op. De voornaamste hindernis bij een zodanige voorverwarming van lucht is de corrosie door zwavelzuur, die plaatsvindt op elk punt waar de temperatuur van afgewerkte gassen daalt beneden de 160°C. Deze temperatuur is vrijwel onafhankelijk van het zwavelgehalte van de brandstof, zodat het gedeeltelijk ontzwavelen van de brandstof nauwelijks enig praktisch voordeel oplevert. Het gebruik van voldoende corrosiebestendig materiaal is niet economisch, zelfs niet bij de veronderstelde viervoudige verhoging van de brandstoffenprijzen [4].

Aangezien de limiet van 160°C op geen enkel punt mag worden bereikt, wordt de gemiddelde temperatuur gewoonlijk ver boven dit niveau gehouden. Dit biedt de gelegenheid tot het gebruik van stoomketels, die kunnen worden ontworpen voor een hoger rendement (ca. 92%) en voor een werking die dichter bij het optimum ligt dan die van de proces-ovens, dank zij de vaak grotere continuïteit van de operationele omstandigheden bij stoom. In tegenstelling hiermee hebben vele van de thans in gebruik zijnde proces-ovens geen luchtvoorverwarmers en hun rendement ligt rond de 77%. De installatie van luchtvoorverwarmers zou het rendement van de bestaande ovens verhogen tot ca. 82% en nieuwe ovens kunnen economisch verantwoord worden ontworpen voor een rendement van 87%. Dit betekent dat een totale besparing op het brandstofverbruik van raffinaderijen kan worden verwacht van om en nabij 5% voor bestaande en 10% voor nog te bouwen proces-ovens.

Verbeterd rendement van de destillatie

Het overgrote deel van de in een raffinaderij verbruikte energie wordt toegepast voor het scheiden in koolwaterstoffracties door destillatie. De technologie van de destillatie leert ons dat bij een gegeven scheiding

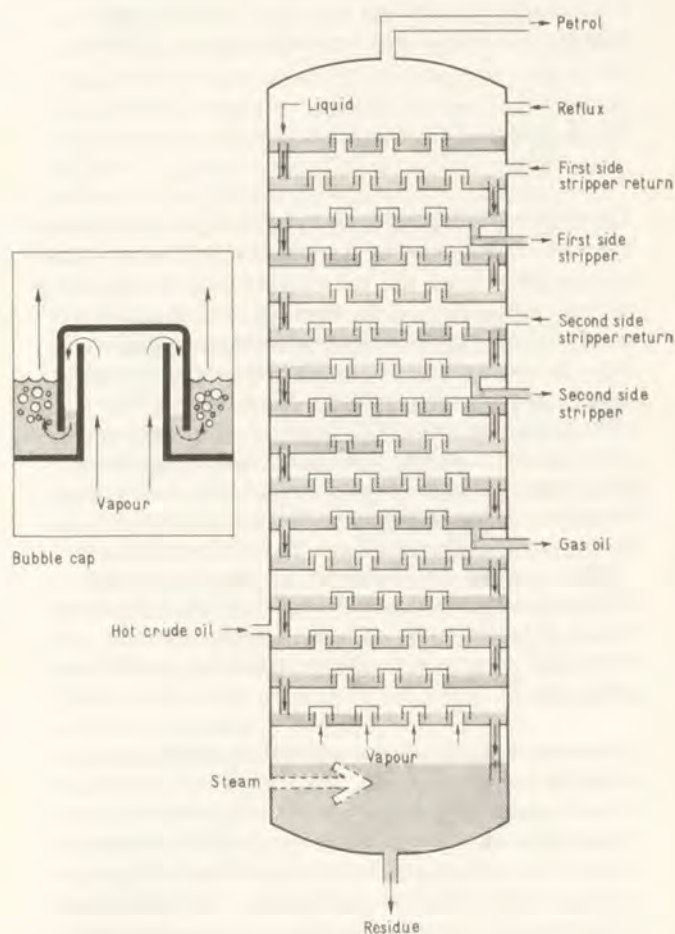
de refluxverhouding¹⁾ een functie is van het aantal schotels. Er is een optimum in de verhouding tussen de investeringskosten voor destillatieschotels en de brandstofkosten voor warmtetoever naar het onderste deel van de kolom en voor het koelen in het bovenste deel (zie Figuur 2).

Maar de warmtetoever naar de kolom wordt niet alleen gevormd door hetgeen nodig is voor de scheiding, maar ook door de warmte benodigd voor de gedeeltelijke verdamping en verhitting van de aanvoer naar de kolom. Dat vormt het grootste deel van de totale warmte die nodig is voor het destillatieproces. Geraamd wordt dat ongeveer 2% van het totale energieverbruik zou kunnen worden bespaard als de voornaamste destillatiekolommen waren uitgerust met tweemaal het aantal destillatieschotels. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijke besparing alleen kan worden bereikt met een nieuw, aan een ander optimum aangepast ontwerp en dat ze dus alleen in een nieuwe installatie kan worden gerealiseerd.

Warmtepompen – mogelijke besparingen

De overdracht van warmte van een laag temperatuurniveau naar een hoger temperatuurniveau met behulp van mechanische arbeid – warmtepompen – wordt

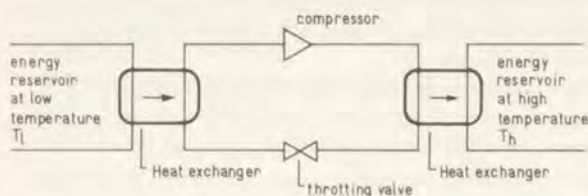
¹⁾ Reflux is de terugvloeiende stroom die in een destillatiekolom naar beneden wordt gevoerd voor het uitwassen van de zwaardere moleculen in de opstijgende dampen. De refluxvloei stof is een deel van het condensaat, dat wordt gevormd door het koelen van de dampen die uit de top van de kolom stromen (zie Figuur 1).



Figuur 2. Fractioneer kolom met schotels en klokken [3]

¹⁾ Onderzoek verricht binnen Shell.

vaak aanbevolen als een moderne techniek voor het verwezenlijken van energiebesparing (zie Figuur 3).



Figuur 3. Eenvoudigste vorm van de warmtepomp.

Een misleidend aspect is evenwel dat de toevoer van elektrische energie vaak wordt geacht de totale energietoevoer naar het systeem te zijn, waarbij geen rekening wordt gehouden met het feit dat voor de opwekking van elektrische energie gewoonlijk driemaal zoveel energie nodig is. Aannemende dat het rendement van de compressor ongeveer 70% is en dat een extra energietoevoer wordt vereist voor de warmtestroom (resultaat van een temperatuurverschil in de warmtewisselaar), dan mag van het systeem van warmtepompen een totaal rendement van ongeveer 50% worden verwacht. Het resultaat is dat slechts een zesde van het totale primaire energieverbruik Q_v werkelijk voor warmtetransport wordt gebruikt.

Volgens de wetten van de thermodynamica is de minimum energie E benodigd voor het transport van een bepaalde hoeveelheid warmte Q_t van een lage temperatuur T_1 naar een hoge temperatuur T_h gelijk aan

$$E = Q_t \left\{ \frac{T_h}{T_1} - 1 \right\}$$

Teneinde enig voordeel te ontleen aan een warmtepomp dient de totale hoeveelheid verbruikte primaire energie Q_v (die gelijk is aan $6E$) ten minste kleiner te zijn dan de overgebrachte warmte, Q_t . Pompen kan dus alleen maar aantrekkelijk zijn als het temperatuurverschil $T_h - T_1$ minder is dan $T_1/6$. Dit betekent bijvoorbeeld dat het met een temperatuur van minimaal 27°C (300 K) niet aantrekkelijk is warmte te pompen over meer dan 50°C als een alternatief voor rechtstreekse verwarming. In gevallen waar zulke kleine temperatuurverschillen vereist zijn in een verwerkingsinstallatie, kan bovendien gewoonlijk een bruikbare stroom van afvalwarmte worden gevonden. En aangezien de te installeren extra apparatuur hogere investeringskosten vereist, is het duidelijk dat van warmtepompen in raffinaderijen geen wezenlijk voordeel kan worden verwacht.

Gecombineerd gebruik van warmte en elektriciteit in raffinaderijen

Dit concept kan leiden tot aanzienlijke energiebesparingen in de toekomst. Nauwe samenwerking tussen degenen die verantwoordelijk zijn voor het raffinageproces en voor de elektriciteitsproductie is van wezenlijk belang. Het principe berust op het benutten van de stroom afvalwarmte, veroorzaakt door het verschil tussen de optredende verbrandingstemperaturen en de

temperaturen waarop de warmte door de processen wordt opgenomen.

De normale methode houdt in dat lucht wordt samengeperst tot 10 – 12 bar, waarna de lucht door brandstofverbranding wordt verhit tot 950°C en dit hete gas in een gasturbine wordt geëxpandeerd tot atmosferische druk met een uitlaattemperatuur van ongeveer 600°C. Dit uitlaatgas kan dan worden gebruikt als warmtetoevoer naar het raffinageproces. De mechanische kracht van de turbine drijft de compressor aan, terwijl het overschot wordt gebruikt voor elektriciteitsopwekking (zie ook Hoofdstuk 4). Op basis van een turbine-aanvoer-temperatuur van 950°C, die geacht kan worden in de naaste toekomst een reëel bereikbare temperatuur te zijn bij het stoken van destillaatbrandstoffen, blijkt dat een raffinaderij met een verwerkingscapaciteit van 10×10^6 ton/jaar aan ruwe olie, tezelfdertijd ongeveer 200 MW aan elektrisch vermogen zou kunnen opwekken, indien alle brandstof benodigd voor de raffinageprocessen in een turbine zou worden verbrand. Vergeleken met het totaal van de door de raffinaderij en de elektrische centrale afzonderlijk verbruikte energie zou de energiebesparing door middel van het gecombineerde proces 30% bedragen. Aangenomen wordt dat twee derde van deze waarde kan worden verwezenlijkt binnen een redelijke termijn, daarbij rekening houdend met technisch en economisch onaantrekkelijke gevallen. Ook wordt aangenomen dat deze elektriciteitsaanvoer zonder onderbreking kan worden toegevoerd aan een elektriciteitsnet dat omgekeerd ook een uitval van de aanvoer uit de raffinaderij kan opvangen. Indien aan deze laatste aannamen niet kan worden voldaan, zal een aanzienlijke vermindering van de mogelijke besparing het gevolg zijn.

Integratie met ruimteverwarming

De door een raffinaderij verbruikte brandstof wekt warmte op die hetzij rechtstreeks, hetzij via warmtedragers zoals stoom of hete olie wordt geabsorbeerd. Deze warmte die in de processen een rol speelt, wordt uiteindelijk afgeleid naar koelwater of lucht, met uitzondering van een betrekkelijk klein gedeelte dat wordt opgenomen door endotherme reacties. In de voorgaande paragraaf werd aandacht besteed aan het verschil tussen de vlamtemperatuur en de hoogste processtemperatuur. Ditmaal wordt de aandacht gevestigd op de temperaturniveaus, waarop de warmtestromen worden afgevoerd naar de omgeving. Niet al deze temperaturniveaus liggen dicht bij die van de omgeving en een groot deel van de warmte kan worden herwonnen in de vorm van heet water met een temperatuur van ca. 100–150°C, dat kan worden weggevoerd en verkocht als een raffinageprodukt. Deze nieuwe aanpak zal in totaal stellig leiden tot een brandstofbesparing, die geraamd kan worden op 20% van het totale brandstofverbruik van de raffinaderij.

Het spreekt vanzelf dat het benodigde kapitaal voor het warmtetransportsysteem behoorlijk groot kan zijn en de evaluatie daarvan dient dan ook zeer zorgvuldig te geschieden. De verwezenlijking van een aanmerkelijk deel van de mogelijke besparingen mag men niet op korte termijn verwachten.

De invloed van milieubeschermingsvoorschriften

In Hoofdstuk 7 is verondersteld dat in 1985 een voorschrift van kracht zal zijn geworden dat SO_2 -

emissies niet hoger mogen zijn dan 10% van de hoeveelheid die zou zijn geloofd indien geen bijkomende maatregelen zouden zijn getroffen. Dit betekent dat praktisch alle zwavelemissies afkomstig van zware stookolie dienen te worden geëlimineerd. Dit kan geschieden door rechtstreekse ontzwaveling, waarvoor een hoeveelheid energie nodig is equivalent aan ongeveer 10% van de ontzwavelde brandstof of, door het minder energieverbruikende proces van de ontzwaveling van rookgas (0,7% of meer van de in de ovens verbruikte brandstof). Zoals in Hoofdstuk 7 zal worden aangetoond, zou in 1985 voor de ontzwaveling van alle stookolie voor industrieel gebruik (waaronder het eigen gebruik van de raffinaderij niet is begrepen) en voor de elektriciteitsopwekking voor het openbare net nog eens $100 \times 10^{15} \text{ J}$ nodig zijn. Voegt men daar nog bij 10% van het brandstofverbruik van de raffinaderij in dat jaar ($215 \times 10^{15} \text{ J}$, zie Hoofdstuk 2, Tabel 11) dan blijkt in totaal ongeveer $120 \times 10^{15} \text{ J}$ nodig te zijn. Dit is ongeveer 55% van het brandstofverbruik van de raffinaderijen in 1985. Met het bijkomende brandstofverbruik voor loodarme benzine en voor het strippen van afvalwater, waarvoor 0,3% van de ruwe oliedoorzet nodig is, stijgt dit percentage tot ongeveer 60% en dit geldt enkel voor de in Nederland verbruikte brandstof. Indien aangenomen wordt dat 50% van de in de elektrische centrales gestookte brandstof kan worden behandeld via de ontzwaveling van afgewerkte gassen en het restant van de stookolie via rechtstreekse ontzwaveling voor de reeds genoemde doeleinden kan worden gebruikt, dan zou het cijfer dalen van 60% tot 50%.

Dientengevolge zouden de onderscheiden maatregelen ter bescherming van het milieu het brandstofverbruik van raffinaderijen in 1985 kunnen doen toenemen met een hoeveelheid tussen 10% en 60%. Bovendien is deze onderste grens slechts van theoretische aard en kan in de praktijk niet worden bereikt (zie Hoofdstuk 7). Het ontzwaren van stookolie voor export zou het bijkomende brandstofverbruik van raffinaderijen doen stijgen met een overeenkomstige hoeveelheid.

11.4. Verwachte verschuivingen in het energieverbruik

In paragraaf 11.3. werden verschillende mogelijke energiebesparingen in raffinaderijen beoordeeld. Een relatieve verhoging van de brandstofprijzen met een factor 4 veroorzaakt bijna automatisch de verwachte besparingen wegens de dan optredende prikkel tot een economische exploitatie van de installatie en tot nieuwe ontwerpen. De punten die in de voorgaande paragraaf werden besproken en het waarom van de besparingen, waren gebaseerd op de huidige technologie en op de ontwikkelingen, waarvan de invloeden reëel binnen een korte termijn kunnen worden voorspeld. De invloed van de besparingen, uitgedrukt in een percentage van het brandstofverbruik van raffinaderijen, worden voor bestaande en toekomstige eenheden samengevat in Tabel 4.

Waarschijnlijk zal de capaciteit van de Nederlandse raffinaderijen omstreeks 1985 zijn verhoogd met ongeveer 17% (Hoofdstuk 2, Tabel 11). Indien de vervanging

Tabel 4. Resultaat van mogelijke besparingen uitgedrukt in percentages van het brandstofverbruik in raffinaderijen

	Bestaande eenheden %	Toekomstige eenheden %
Verbeterd toezicht op de werking van de installatie	5	5
Verbeterde warmteterugwinning door vergrote warmtewisseling	3,5	5
Hoger fornuisrendement	5	10
Geringere behoefte aan destillatiewarmte dankzij een verhoogd aantal schotels	—	2
Toepassing van warmtepompen	—	—
Totaal	13,5 ¹⁾	22

¹⁾ Deze besparingen vereisen een kapitaalinvestering in Nederlandse raffinaderijen van ongeveer f 300 miljoen.

van oude eenheden daarbij wordt inbegrepen, kan enigszins optimistisch worden aangenomen, dat ongeveer een derde van alle eenheden in dat jaar nieuw zijn. Verwacht wordt dat in 2000 alle eenheden nieuw zullen zijn. Als we uitgaan van deze veronderstellingen en denken in termen van hedendaagse technologie, kwaliteit van het produkt en milieu-eisen, dan kunnen we ramen dat de technische verbeteringen besparingen op het brandstofverbruik van raffinaderijen kunnen opleveren van $2/3 \times 13,5 + 1/3 \times 22 = 16\%$ in 1985; en 22% in 2000. Het eerste cijfer komt overeen met 0,8% van het primaire energieverbruik in Nederland in 1985 (Hoofdstuk 2, Tabel 20). Als we deze cijfers in het juiste perspectief willen zien, dient evenwel rekening te worden gehouden met de volgende factoren. Deze maken de gegeven getallen in hoge mate onzeker, aangezien de invloeden van mogelijke correcties gelijk aan of zelfs groter zijn dan de berekende besparingen. Allereerst behoort het concept van het gecombineerd gebruik van warmte en kracht en daarna de integratie met ruimteverwarming te worden genoemd.

Een raffinaderij en een elektrische centrale die elk ongeveer dezelfde hoeveelheid brandstof verbruiken, zouden volgens het concept van het gecombineerd gebruik van warmte en elektriciteit ongeveer 20% van hun gezamenlijk verbruik aan primaire energie besparen indien ze werden geïntegreerd. Dit hoge cijfer kan natuurlijk niet worden toegeschreven aan de raffineringswerkzaamheid alleen. Het moet worden gezien in het licht van het nationaal energieverbruik en dan betekent het een besparing op primaire energie van 20% van het gezamenlijk brandstofverbruik van de raffineringswerkzaamheden en van de elektriciteitsopwekking, indien beide bedrijven volledig zouden zijn geïntegreerd. In 1985 zou deze besparing 2,1% van het nationaal energieverbruik uitmaken.

Integratie met ruimteverwarming is een andere factor, die niet het energieverbruik van raffinaderijen (en van centrales) als zodanig zou verminderen, maar die zou dienen tot vermindering van het nationaal energieverbruik. Ongeveer 20% van het verbruik der raffinaderijen zou beschikbaar kunnen komen als afvalwarmte van lage temperatuur ten behoeve van woonruimten. Op landelijke basis zou dit een besparing betekenen van 1,0% van het verbruik van primaire energie in 1985.

Het gebruik van kernenergie of steenkolen zou een drastische vermindering kunnen betekenen van het verbruik van olie als brandstof in raffinaderijen. Het zou geen vermindering zijn van het energieverbruik van raffinaderijen als zodanig, maar het zou een hoeveelheid vloeibare brandstof vrijmaken ten koste van kernenergie of steenkolen.

Het weer op peil brengen van de kwaliteit en opnieuw in omloop brengen van gebruikte smeermiddelen vormt eveneens een gebied voor mogelijke besparingen, dat overigens niet rechtstreeks in verband staat met het efficiënt gebruik van energie in raffinaderijen. In 1972 werden in Nederland 211.000 ton aan smeeroliën en -vetten verkocht [5]. Geraamd wordt dat 100.000 ton van dit totaal in garages en andere bedrijven werden afgevoerd als afvalolie, waarvan een deel dan weer werd verkocht als stookolie, een deel geregeneerd en een deel weggegooid. Aangezien smeerolie een sterk geraffineerd produkt is, zou meer regeneratie en opnieuw gebruiken van grote waarde zijn. Ofschoon het regeneratieproces zowel kostbaar als ingewikkeld is, maken de jongste prijsontwikkelingen en de toenemende zorg om de kwaliteit van het milieu een herbezinning op de mogelijkheid van regeneratie van essentieel belang.

Afgezien van invloeden veroorzaakt door verschuivingen in het produktiepatroon, waarover weinig kan worden gezegd, is door het uitvaardigen van milieuvoorschriften een stellige verhoging van het energieverbruik door raffinaderijen te verwachten. De oorzaak daarvan zal vooral gelegen zijn in de eis ten aanzien van de ontzwaveling van residuale stookolie, maar een deel van deze last zal worden veroorzaakt door bijkomende verwerkingsprocessen die nodig zijn voor benzine met lage loodbehoefte en het efficiënter zuiveren van uit raffinaderijen afkomstig afvalwater. Op basis van de gegevens en veronderstellingen in Hoofdstuk 7 is het mogelijk te berekenen dat in 1985 een verhoging van het brandstofverbruik van een raffinaderij kan worden verwacht van 60%, indien alle stookolie wordt ontzwaveld. Dit komt overeen met een verhoging van het nationaal verbruik in dat jaar met bijna 3%.

III. Ammoniaksynthese

III.1. Inleiding

Bij de bestudering van het effect van hogere energieprijzen op de ontwikkeling van de chemische industrie, is het van belang vast te stellen, waar het energieverbruik plaatsvindt en in hoeverre daarop kan worden bezuinigd. Als typisch voorbeeld van een energie-intensief chemisch proces dat op grote schaal wordt toegepast wordt hier de ammoniakbereiding uit methaan gekozen. Bij deze bereiding wordt de grondstof methaan op twee manieren toegepast: als grondstof en als energiedrager. Bij de analyse van het probleem zal eerst worden nagegaan hoe groot het verbruik aan methaan als grondstof is en hoe groot de theoretisch minimale energieconsumptie in een praktisch proces is. In tweede instantie wordt nagegaan wat het praktisch gerealiseerde energieverbruik is en wat de oorzaken zijn van het verschil tussen de

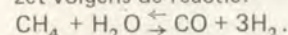
beide cijfers. Uitgaande van deze gegevens kan dan worden nagegaan waar nog besparingen mogelijk zijn. Uitgangspunt voor de analyse is een moderne ammoniakfabriek met een capaciteit van 1000 ton ammoniak per dag en uitgerust met centrifugaalcompressoren en stoomturbines.

III.2. De bereiding van ammoniak uit methaan en het bijbehorend theoretisch energieverbruik

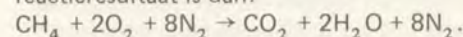
De bereiding van ammoniak uit methaan verloopt in een aantal afzonderlijke reactiestappen:

Reformersectie

In de reformersectie wordt methaan met stoom omgezet volgens de reactie:



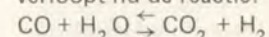
Nadat deze reactie in de primaire reformerstep voor een belangrijk deel is verlopen wordt aan het reactiegas zoveel lucht toegevoegd, dat uiteindelijk een N_2 - H_2 -mengsel van de goede samenstelling zal resulteren. Het reactieresultaat is dan:



Door deze verbrandingsreactie stijgt de temperatuur tot ca. 1000°C, waarbij het methaangehalte daalt tot 0,2%. Er resulteert nu een gasmengsel hoofdzakelijk bestaande uit CO , CO_2 , H_2 , H_2O en N_2 .

Conversie

In de conversiesectie wordt het gasmengsel afgekoeld tot ca. 350°C. In contact met de juiste katalysatoren verloopt nu de reactie:



in de richting van de rechter term in de vergelijking.

CO_2 -verwijdering

Door absorptie in een geschikt oplosmiddel wordt het CO_2 uit het reactiemengsel verwijderd. De laatste resten CO en CO_2 worden onder verbruik van wat H_2 door methanisering omgezet in CH_4 en H_2O .

Synthese

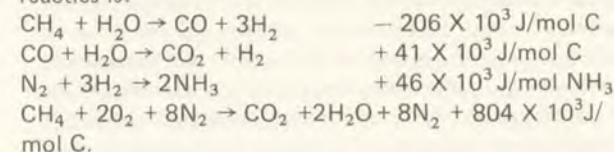
Het mengsel van N_2 en H_2 wordt nu gecompriëerd en verhit tot ca. 250 bar en 450°C en omgezet in NH_3 .

De reactie is: $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$.

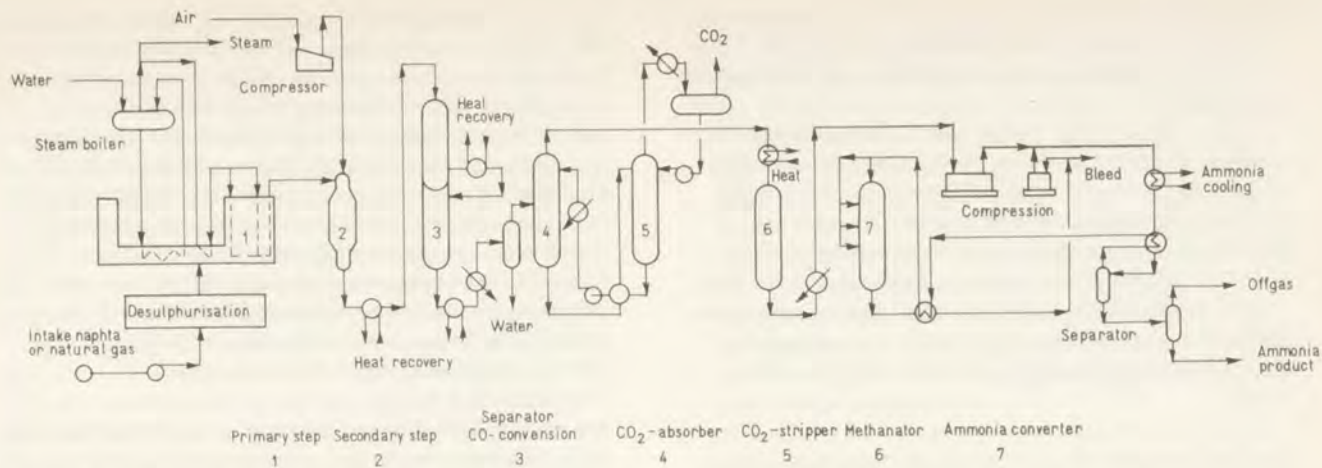
Daar in het gasmengsel resten CH_4 en argon aanwezig zijn moet, teneinde de opbouw van verontreinigingen te beperken, een deel van het synthesesgas (circa 5-8%) samen met deze gassen worden gespuid.

Het warmte-effect van de ammoniaksynthese uit methaan

Het warmte-effect van de vier genoemde synthese-reacties is:



De totale uit de synthese vrijkomende hoeveelheid warmte uitgaande van methaan, stoom en lucht kan hieruit worden berekend op $+ 34 \times 10^3 \text{ J/mol NH}_3$. Voor de vorming van de theoretisch benodigde hoeveelheid stoom is $-28 \times 10^3 \text{ J/mol NH}_3$ nodig, zodat na



Figuur 4. Schema van een grote ammoniakfabriek [6]

correctie voor de warmtebehoefte voor de stoomgeneratie een reactiewarmte-overschot van $+6 \times 10^3 \text{ J/mol NH}_3$ aanwezig is.

III.3. Ammonia-synthese – het feitelijke proces

Het in het voorgaande berekende theoretische verbruik kan alleen worden gerealiseerd indien met de stoichiometrische ¹⁾ hoeveelheid stoom kan worden volstaan, geen temperatuur- en drukverhogingen nodig zijn en alle reactiewarmte effectief kan worden benut. In de praktijk is dit niet mogelijk omdat bij de omvorming en omzettingstappen $\text{H}_2\text{O}/\text{C}$ -verhoudingen van 3,5 à 4 nodig zijn teneinde de evenwichten voldoende ver te laten verschuiven en de afzetting van koolstof te vermijden.

Figuur 4 toont de verschillende stadia van het proces in een grote ammoniakfabriek.

De benodigde drukken worden bepaald door de voor de ammonia-synthese noodzakelijke druk van 250 à 300 bar en de omvormerdruk van 30 bar. Voor een 1000 ton/dag ammoniakfabriek is daarom het volgende compressorvermogen nodig (Tabel 5):

Tabel 5. Benodigd compressorvermogen voor een 1000 ton/dag ammoniakfabriek

synthese-gascompressor	18 MW
luchtcompressor	7 MW
koelmachine	4 MW
overige	2 MW
totaal vermogen	31 MW

Het in Tabel 5 opgegeven totaal vermogen komt overeen met $744 \text{ kWh}_e/\text{ton NH}_3$. In de praktijk wordt in de warmte- en energiebehoefte van de fabriek voorzien door afgaswarmteketels waarin o.m. het reformergas wordt afgekoeld tot de voor de conversie benodigde temperatuur en de synthesewarmte wordt afgevoerd. De geproduceerde stoom van 100-120 bar wordt in

¹⁾ De stoichiometrische hoeveelheid van een reagens is die hoeveelheid welke precies voldoende is voor een volledige reactie met een bepaalde hoeveelheid van een ander reagens.

turbines geëxpandeerd tot 30 bar (de reformerdruk) en benut voor de CH_4 - en CO -omzettingen. Een deel wordt geëxpandeerd tot stoom van lagere druk ten behoeve van het koolzuurabsorptiesysteem, ketelvoedingswaterontgassing, etc. De minimum totale energiebehoefte wordt gegeven in Tabel 6:

Tabel 6. Energiebehoefte (minstens) per ton NH_3 in de praktijk

	10^3 J/mol NH_3	10^9 J/ton NH_3
reactiewarmte	-34	-1,9
conversiestoom	77	4,5 ¹⁾
compressorvermogen	46	2,7 ²⁾
overige verbruiken	14	0,8
totaal energiebehoefte	103	6,1
grondstof	390	22,9
totaal verbruik	493	29

¹⁾ deze post kan, afhankelijk van de omstandigheden variëren tussen $4,5$ en $5,9 \times 10^9 \text{ J/ton NH}_3$.

²⁾ elektrische energie.

Het berekende praktische minimumverbruik is dus $29 \times 10^9 \text{ J/ton NH}_3$. Een goed ontworpen NH_3 -synthesefabriek heeft bij gebruik van methaan als grondstof een energieverbruik van ca. $35 \times 10^9 \text{ J/ton NH}_3$. Het rendement is dus ca. 83%. Dit hoge rendement is mogelijk door een goed doordachte energiehuishouding van de installatie, waarbij door de toepassing van stoomturbines een integratie van het energieverbruik voor compressie en stoomverbruik voor de reformers kan worden verkregen.

III.4. Besparingsmogelijkheden voor energie

Bij een praktisch energieverbruik van $35 \times 10^9 \text{ J/ton NH}_3$, zou het theoretisch mogelijk moeten zijn nog ca. 15% te besparen. Een verdere analyse van dit verschil zal aantonen, dat deze besparingen in de praktijk minimaal zijn. Belangrijke verliesposten zijn:

- Voor methaan is het verschil tussen de bovenste en onderste verbrandingswaarde ca. 10%. Als het gas als brandstof wordt gebruikt, is het niet mogelijk dit verschil als energie te winnen. Hierdoor ontstaat een verliespost van ca. $1,3 \times 10^9 \text{ J/ton NH}_3$.
- Bij de NH_3 -synthese komt ca. $2,6 \times 10^9 \text{ J/ton}$

NH₃ vrij als reactiewarmte. De praktische bovengrens van de terugwinning is echter slechts ca. $2,1 \times 10^9$ J/ton omdat anders het katalysatorvolume te sterk zou moeten toenemen.

c) Bij het gebruik van stoom voor de aandrijving van turbines is het niet mogelijk alle turbines als tegendruk-turbines uit te voeren, daar de behoefte aan lagedruk-stoom van de fabriek dit niet toelaat. Dit geeft een niet-terugwinbaar energieverlies in de condensoren van ca. $2,1 \times 10^9$ J/ton. In totaal is dus ca. $1,3 + (2,6 - 2,1) + 2,1 = 3,9 \times 10^9$ J/ton NH₃ niet-terugwinbaar energieverlies. Praktisch is daarom de ruimte voor energiebesparing bij de NH₃-bereiding ca. $2,1 \times 10^9$ J/ton NH₃, of 6%.

Een verhoging van de energieprijzen zal dus wel een extra stimulans geven voor energiebesparing maar het effect daarvan zal gering zijn. De reden daarvoor is, dat ook nu al sterke impulsen voor besparing op energiekosten aanwezig zijn, zoals blijkt uit de volgende globale kostenberekening, ontleend aan een publikatie van Foster Wheeler [7], een bekende contractor op het gebied van de NH₃-synthese (Tabel 7).

Tabel 7. Globale kostenraming in fl. per ton NH₃. Capaciteit 1000 ton NH₃/dag

gas (grondstof + energie)	55,-
katalysatoren	4,-
koelwater	4,-
ketelvoedingswater	0,30
diversen	0,60
onderhoud en bediening	10,-
overhead	8,25
afschrijving + rente	45,50
totale kosten (af fabriek)	127,65

Volgens deze analyse vertegenwoordigt het energieverbruik 43% van de totale produktiekosten. Dit is dan ook altijd al een belangrijk punt van overweging geweest bij het ontwerpen van ammoniaksynthese-eenheden. Het energieverbruik per ton ammoniak is dan ook in het verleden sterk afgenomen, waarbij in het bijzonder de introductie van roterende compressoren met stoomturbine-aandrijving rond 1965 een belangrijke rol heeft gespeeld. Aan de andere kant heeft juist de mogelijkheid tot rationalisatie van het energieverbruik door middel van deze grote compressoren de bouw van de moderne zeer grote ammoniakfabrieken duidelijk gestimuleerd.

Het gebruik van aardgas als grondstof in plaats van nafta of stookolie geeft een verlaging van het energieverbruik en de benodigde investeringen, zoals uit Tabel 8 blijkt:

Tabel 8. Het effect van het gebruik van verschillende grondstoffen op investeringen en energieverbruik voor een NH₃-fabriek (capaciteit: 1000 ton/dag)

Grondstof	Investeringen (1000 ton NH ₃ /dag)	Energieverbruik per ton NH ₃ ($\times 10^9$ J)
aardgas	fl 63 $\times 10^6$	33,5 - 35,6
nafta	fl 70 $\times 10^6$	37,8 - 39,6
stookolie	fl 75 $\times 10^6$	41,8

Uit beiderlei oogpunt gezien verdient aardgas dus duidelijk de voorkeur.

Het gebruik van gasturbines als aandrijfaggregaat voor compressoren kan tot een verdere energiebesparing bij de NH₃-bereiding voeren. Het directe rendement van een gasturbine is relatief laag, ca. 20 à 25%. Door echter het afgas van de turbine te benutten als voorverwarmde lucht voor de reformerbranders wordt deze afvalwarmte goed gebruikt. In een aantal gevallen zou deze benutting van een gasturbine het energieverbruik van de NH₃-synthese verlagen tot 33×10^9 J/ton NH₃ [8]. Dit vertegenwoordigt dus nog een verdere besparing van ca. 5% op het totale grondstof- en energieverbruik, hetgeen overeenkomt met ca. 0,25% van het nationaal energieverbruik in 1972. (Zie Tabellen 1 en 2).

Een daling van het energieverbruik is ook nog mogelijk door integratie van de NH₃-fabriek in een groter complex. Hierdoor kan lage temperatuurwarmte elders worden benut, zodat het gebruik van condensatieturbines kan worden vermeden. Gezien de grote hoeveelheden afvalwarmte zal deze mogelijkheid alleen op grote schaal aantrekkelijk kunnen zijn.

In Nederland is de situatie zo dat alle hiervoor genoemde mogelijkheden — introductie van grote roterende compressoren, toepassing van aardgas als grondstof, het gebruik van gasturbines als aandrijfaggregaat voor compressoren en benutting van lage temperatuurwarmte — reeds worden toegepast of worden voorbereid. Een mogelijkheid, die op het terrein van onderzoek en ontwikkeling ligt, verdient hier echter nog de aandacht. Indien het gelukt, katalysatoren te ontwikkelen (die bij lagere temperatuur (bijv. 300°C in plaats van 450°C) actief zijn, zou met lagere drukken volstaan kunnen worden. In het geval van het aangegeven voorbeeld zou de synthese-gascompressor (18 MW) van Tabel 5 overbodig worden. Dit levert een besparing aan primaire energie van ca. 13% van het totale grondstof- en energieverbruik op (ca. 0,7% van het nationaal primair energieverbruik in 1972 volgens de Tabellen 1 en 2).

IV. IJzer- en staalindustrie

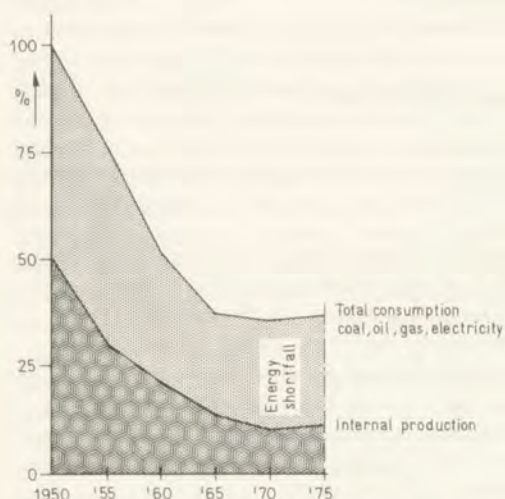
IV.1. Inleiding

De produktie van staal vindt in Nederland voor het overgrote deel (95%) plaats in het complex van Hoogovens BV te IJmuiden. Hierdoor is het bijna onvermijdelijk dat bij de beschouwingen over energiebesparing slechts de gegevens van één bedrijf worden gehanteerd teneinde te kunnen indiceren waar de mogelijkheden tot energiebesparing voor de gezamenlijke staalindustrie liggen. Aangezien deze tak van industrie veel meer Europees, en zelfs mondiaal georiënteerd is dan nationaal, zal bij de overwegingen omtrent energiebesparing met een verscheidenheid aan problemen rekening moeten worden gehouden.

IV.2. Het huidige proces en de energiebehoefte

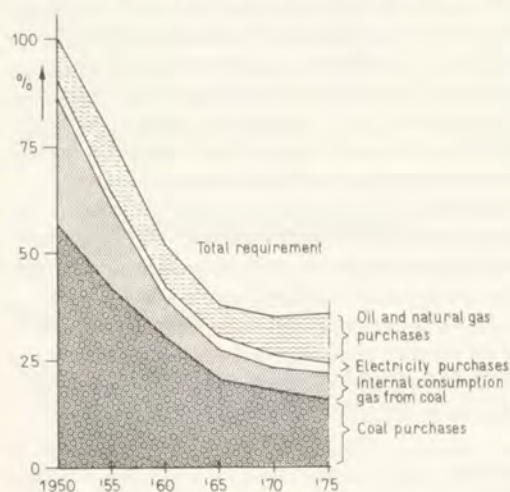
In het geïntegreerde staalcomplex te IJmuiden, waar hoogovens, staalfabrieken en walsenrijen de belangrijkste eenheden in de produktieketen vormen, wordt als belangrijkste halffabriek staalplaat geproduceerd. Als

basis hiervoor dienen de ertsen die in hoogovens met behulp van cokes tot ruwijzer worden gereduceerd. Van het ruwijzer, alsmede een hoeveelheid schroot (ca. 25% van de inzet, waarvan ca. 1/5 vreemd schroot) wordt in oxystaalfabrieken staal in blokform vervaardigd. Dit staal wordt gewoonlijk verder uitgewalst tot plakken, knuppels, plaat, etc. In verhouding tot andere takken van industrie en nijverheid is het staalbedrijf bijzonder energie-intensief te noemen. Dit resulteert uit het feit dat productie en primaire verwerking van ijzer en staal bij hoge temperaturen plaatsvindt. Tengevolge van technische ontwikkelingen is de structuur van de energiehuishouding in de geïntegreerde ijzer- en staalbedrijven in de loop van de jaren aanzienlijk gewijzigd. Omstreeks 1950 was het mogelijk om met de gasproductie uit steenkool, benodigd voor het hoogovenproces, ca. 50% van de totale eigen energiebehoefte te dekken; de laatste jaren is dit nog slechts 30% (zie Figuur 5).



Figuur 5. Ontwikkeling van de energiehuishouding. (Hoeveelheid energie per ton product in 1950 = 100%).

Daarbij was in 1950 het aandeel van steenkool in de te kopen hoeveelheid energie (steenkool, olie en gas) 85%; dit is nu tot 50% gedaald (zie Figuur 6).



Figuur 6. Dekking van de energievoorziening. (Hoeveelheid energie per ton product in 1950 = 100%).

Als gevolg hiervan is het aandeel van aardgas en olie in de energiehuishouding van het ijzer- en staalbedrijf belangrijk toegenomen. De belangrijkste ontwikkelingen die tot deze wijziging hebben geleid willen wij hieronder noemen:

- daling van het cokesverbruik in de hoogoven over een periode van ca. 25 jaar van ca. 900 tot ca. 450 kg per ton ruwijzer, met vrijwel tegelijkertijd een sterke vermindering van de calorische waarde van het bij het hoogovenproces vrijkomende topgas;
- injectie van olie in de hoogoven ter vervanging van de momenteel nog steeds duurder wordende cokes;
- verschuiving van het Siemens-Martinstaalproces naar het oxystaalproces;
- verbetering van het procesrendement van de diverse productiefasen;
- toepassing van grotere productie-eenheden;
- verschuiving in de prijsverhoudingen van energiesoorten.

IV.3. Mogelijkheden tot energiebesparingen bij de huidige installaties

De energiebalans zal er bij een produktieniveau van $7,5 \times 10^6$ ton staal per jaar globaal als volgt uitzien (Tabel 9):

Tabel 9. Energiebalans bij een produktieniveau van $7,5 \times 10^6$ ton staal per jaar (in 10^9 J/ton plak)¹⁾

Verbruik cokes/steenkool	12,6
Verbruik gassen en olie	15,3
Verbruik elektriciteit	3,6 ²⁾
	31,5
Eigen produktie van gassen	9,4
Energietekort	22,1

¹⁾ In de blokwalis verwerkt en vervolgens goedgekeurd materiaal (ca. 90% van het ruwijzer).

²⁾ Primaire energie.

Onlangs zijn bij Hoogovens mogelijkheden tot optimalisering van het energieverbruik geëvalueerd. Daaruit is gebleken, dat bij het gestelde staalniveau ca. $1,9 \times 10^9$ J/ton plak zou kunnen worden bespaard of 12% van het verbruik aan gas en olie. De hiertoe vereiste maatregelen worden verderop in deze studie nader besproken. Hoewel verwacht wordt dat deze projecten technisch uitvoerbaar zullen zijn, kunnen bij de effectuering aanloopmoeilijkheden worden verwacht. Daarom wordt van bedrijfswege bepaald niet op de uitvoering van deze projecten aangedrongen. Bovendien kunnen de investeringsramingen (ca. fl. 180 miljoen, prijspeil 1972) te laag blijken.

Een overzicht van deze projecten wordt gegeven in Tabel 10, met daarbij tevens de terugverdientijd indien uitgegaan wordt van een prijs van fl. 2,39 per 10^9 J aan primaire brandstof.

De gemiddelde terugverdientijd bedraagt iets meer dan 8 jaar, hetgeen naar investeringsnormen gemeten veel te lang is; de cash-flow van de industrie zal dus in principe eerder worden aangewend voor de vele projecten, die een betere rentabiliteit hebben.

Tabel 10. Energiebesparingsprojecten voor het geïntegreerde ijzer- en staalbedrijf in IJmuiden, bij een produktieniveau van $7,5 \times 10^6$ ton staal per jaar

Project	Energiebesparing in 10^{15} J/jaar	Bedrag in 10^6 gulden/jaar bij fl. 2,39/ 10^9 J	Investering in 10^6 gulden (prijsniveau 1972)	Geraamde terugverdientijd in jaren ¹⁾
Verbetering warmtebenutting blokwalserij 3 en warmbandwalserij 2 (voornamelijk rookgaswarmte)	3,13	7,5	35	5
Benutting rookgaswarmte oxystaalfabriek 2	2,09	5	15	6
Droge blussing gecombineerd met stoomproductie bij de cokesfabrieken	3,13	7,5	100	13
Drukbenutting hoogoven-topgas (expansieturbines)	2,52	6	30	7
Totaal	10,87	26	180	Gemiddeld 8

¹⁾ Hierbij zijn de verwerkingskosten verdisconteerd.

IV.4. Flexibiliteit

De in Figuren 5 en 6 aangegeven energiebalans ontstond tegen de achtergrond van de wijzigingen in de onderlinge prijsverhouding der energiedragers. De industrie moet nu naast steenkool grote hoeveelheden aardgas, olie en elektriciteit aankopen. Het is, zij het in beperkte mate, mogelijk deze aankopen te beïnvloeden door wijzigingen in de interne energiehuishouding van het bedrijf.

De hoogovens zijn hiervoor het bepalende instrument. De laatste jaren worden de mogelijkheden om in de hoogovens cokes door olie te vervangen steeds groter geacht. Deze potentiële flexibiliteit biedt ondanks haar beperking, ook de mogelijkheid om 'schaars' (duur) wordende olie weer door cokes te vervangen. De mate waarin substitutie van olie door cokes zal plaatsvinden hangt in de eerste plaats af van de ontwikkeling in de prijsverhouding.

In het vooralsnog hypothetische geval dat zo min mogelijk olie en aardgas wordt ingekocht, zal de energiehuishouding zich aanzienlijk wijzigen. Er zouden een aantal veranderingen in de installaties dienen te worden aangebracht om de nieuwe structuur te verwezenlijken:

- het voeden van conventionele hoogovens met uitsluitend cokes en met elektrisch aangedreven windmachines;
- inzet van ertsens uitsluitend in gepelletiseerde vorm;
- cokesproductie via het nog in ontwikkeling zijnde vormcokesproces, waarbij meer soorten kolen kunnen worden ingezet en bovendien een duidelijke verbetering van de werkomstandigheden kan ontstaan;
- staalfabrikage via het oxystaalproces met benutting van de nog aanwezige chemische energie in de rookgassen;
- continu gieten van het vloeibare staal tot plakken (besparing opwarmen staalblokken);
- energieverliezen (vooral rookgaswarmte) zoveel mogelijk beperken.

De energiebalans van een dergelijk hypothetisch bedrijf zou er als volgt kunnen gaan uitzien (Tabel 11):

Het verbruik aan steenkool neemt bij deze constellatie met 30% toe in vergelijking met de huidige werkwijze. Maar als wordt afgezien van steenkool, dan is het energietekort gehalveerd, nl. van $9,5$ tot $4,7 \times 10^9$ J/ton plak. Een concept als het bovenstaande zou in praktijk kunnen worden gebracht in een nieuw op te zetten ijzer- en staalbedrijf. Bij bestaande bedrijven vergt doorvoering van dit concept zeer hoge investeringen, zodat

Tabel 11. Energiebalans van een ijzer- en staalbedrijf in het geval van minimum-aankoop van olie en gas (in 10^9 J/ton plak)

Verbruik cokes/steenkool	16,2
gassen en olie	13,0
elektriciteit	4,3 ¹⁾
	33,5
eigen produktie gassen	12,6
	20,9
Energietekort	20,9

¹⁾ Primaire energie.

van een enigszins aanvaardbare rentabiliteit vooralsnog geen sprake is. Verder dient in dit verband nog op het volgende te worden gewezen. De flexibiliteit in de energiehuishouding, die bij het hoogovenproces potentieel aanwezig is, kan met name bij een kustbedrijf optimaal tot gelding komen, omdat daar steenkool en olie goedkoop kunnen worden aangekocht. Zou steenkool de hoofdrol in de energiehuishouding gaan spelen, dan is het absoluut noodzakelijk de aanvoercondities zo gunstig mogelijk te doen zijn, aangezien het staalbedrijf aan de kust vooral is gebaseerd op zijn flexibiliteit.

IV.5. Nieuwe ijzer- en staalbereidingsprocessen

Tussen nu en 1985 zijn van nieuwe processen weinig of geen energiebesparingen te verwachten. Afgezien van het feit, dat als gevolg van de huidige hoge efficiency bij het hoogoven/oxystaalproces de drang tot ontwikkeling van nieuwe staalbereidingsprocessen klein is, is van energiebesparingen bij de momenteel in ontwikkeling zijnde processen niet of nauwelijks sprake. Hoewel voor de bereiding van sommige speciale staalprodukten andere, minder energie vereisende processen kunnen worden toegepast, is toepassing daarvan in de massastaalproductie economisch niet haalbaar. De ontwikkeling van deze processen geschiedt niet wegens de energiebesparingen, maar wegens andere, vooral kwalitatieve voordelen. Er doen zich evenwel twee ontwikkelingen voor die in de verdere toekomst wel voor massastaalproductie van belang zouden kunnen worden, namelijk directe reductie en de toepassing van kernenergie.

Directe reductie

Bij het directe reductieproces vindt in feite alleen een verschuiving plaats in de toegepaste energievorm en wel van steenkool naar aardgas of een ander reductiegas. De in totaal benodigde hoeveelheid energie blijft

vrijwel gelijk. Via de directe reductieprocesroute wordt erts gereduceerd door middel van aardgas of een ander reductiegas, zonder dat het reductieproduct in de vloeibare fase overgaat. Om het in dit reductieproduct nog aanwezige ganggesteente te verwijderen en om de juiste staalsamenstelling te verkrijgen, vindt vervolgens in een elektro-oven smelten, raffineren en legeren plaats. De — bij de conventionele route van hoogovens en staalfabrieken — benodigde hoeveelheid steenkool (ca. $16,7 \times 10^9 \text{ J/ton}$ staal) wordt bij een staalbedrijf op basis van directe reductie vervangen door ongeveer dezelfde hoeveelheid energie in gasvorm. Daarnaast is er bij de directe reductieroute nog een extra behoefte aan elektriciteit voor de elektro-ovens van ruim 500 kWh (of $5,4 \times 10^9 \text{ J}$ primaire energie) per ton staal. Deze situatie, alsmede de schaarste aan aardgas maakt het onwaarschijnlijk dat directe reductie in West-Europa op grote schaal van de grond komt.

Kernenergie

Er staan voor de ijzer- en staalindustrie in principe twee wegen open voor de eventuele toepassing van kernenergie. Bij het *geïntegreerde concept* denkt men nu aan een kernreactor gekoppeld aan een ijzer- en staalbedrijf op basis van directe reductie, waarbij de kernenergie zowel wordt toegepast voor de conversie van koolwaterstoffen tot reductiegassen als voor het verhitten daarvan tot ca. 1000°C . Hoewel besparingen op fossiele energie worden verwacht van ca. 30%, verschillen de centrale en het staalbedrijf zodanig van karakter (produktiewijze, vereiste betrouwbaarheid), dat een koppeling vooralsnog uitgesloten moet worden geacht. Ook is de minimale grootte van een rendabele kernreactor te groot voor het bedrijven van een middelgrote reductie-oven: de eenheden zijn qua optimale grootte dus moeilijk aan elkaar aan te passen.

Bij het *niet-geïntegreerde concept* wordt dan ook van deze koppeling afgezien. De warmte uit de kerncentrale wordt dan alleen benut voor produktie van de reductiegassen, die aan een staalbedrijf op basis van directe reductie kunnen worden toegevoerd. De energiebesparing wordt op slechts 15% van de totaal voor reductie van erts benodigde energie geschat.

Bij beide ontwikkelingen zijn thans nog zoveel vraagtekens te zetten, dat een gefundeerd oordeel over de rentabiliteit nauwelijks kan worden gevormd. Industriële toepassing is wel in studie, doch lijkt vóór 1990 onwaarschijnlijk. Dit maakt dat pas op lange termijn een dergelijke ontwikkeling voordelen zal kunnen brengen.

V. Verpakkingsindustrie¹⁾

V.1. Inleiding

Enkele gegevens over het verbruik van verpakkingsmateriaal in Nederland zijn verzameld in Tabel 12.

¹⁾ De in deze paragraaf genoemde cijfers zijn voor het merendeel ontleend aan de documentatie van de Economische Voorlichtingsdienst te Den Haag, het Instituut voor Verpakking TNO te Delft en de Documentatiedienst van Unilever te Rotterdam. Volgens de ervaringen van de beide laatstgenoemde instellingen zijn er weinig betrouwbare statistische gegevens over de consumptie in Nederland.

Het lijkt niet onredelijk voor het jaar 1973 te schatten, dat er ca. $1,5 \times 10^6$ ton aan verpakkingsmateriaal zal worden verbruikt in Nederland, ruwweg verdeeld over:

— blik	240 X 10 ³ ton (16%)
— glas	375 X 10 ³ ton (25%)
— papier	300 X 10 ³ ton (20%)
— golfkarton	315 X 10 ³ ton (21%)
— karton	150 X 10 ³ ton (10%)
— plastic	120 X 10 ³ ton (8%)

Over het verbruik van hout als verpakkingsmateriaal zijn geen gegevens verzameld.

Tabel 12. Verbruik van verpakkingsmateriaal in Nederland (in %)

	[9] 1968	[10] 1971	[11]	[12] 1968	[12] 1969	[12] 1970
Blik	20,3	10-13	12	18,8	19,6	17,6
Aluminium	0,9			1,1	1,1	1,1
Glas	12,6	20-25	24	25,1	24,5	24,9
Papier	23,1			19,8	19,2	19,3
Golfkarton	24,6	50-55	54	21,1	20,8	21,2
Karton	10,3			8,8	9,3	9,8
Plastic	8,3	7-10	8	5,4	5,6	6,1
Totaal (10 ³ ton)	1.071	~ 1.000	—	1.248	1.402	1.484

De navolgende bespreking is gebaseerd op twee vragen:

- Wat is de energie-investering per ton verpakkingsmateriaal en hoe is het mogelijk energie te besparen door verschuivingen bij de toepassing?

V.2. Blik

Het blikverbruik in de plaatverwerkende industrie en de blikverwerkende nevenbedrijven van de zuivelindustrie bedroeg in 1970 238×10^3 ton. Dit cijfer correspondeert redelijk met de voor 1973 gegeven schatting van 240×10^3 ton.

Uit informatie, verstrekt door Hoogovens, blijkt dat voor de produktie als zodanig van 1 ton blik in totaal ca. $28,4 \times 10^9 \text{ J}$ is vereist. Hieraan moet ca. $0,7 \times 10^9 \text{ J/ton}$ worden toegevoegd voor de fabricage van conservenblikken, etc. [13]. De totale energie-investering voor blik als verpakkingsmateriaal kan zo worden geschat op ca. $29,1 \times 10^9 \text{ J/ton}$.

Het cumulatief energieverbruik bij de produktie van aluminiumblik tot en met verpakkingsmateriaal bedraagt ca. $252 \times 10^9 \text{ J/ton}^1$). In Nederland wordt aluminium echter heel weinig gebruikt voor verpakking in de vorm van blikjes.

V.3. Glas

Aangezien in Nederland geen produktiecijfers voor verpakkingsglas worden gepubliceerd, is het moeilijk hierover gegevens te verzamelen. In België [14] bedroeg in 1968 het totale glasverbruik 345×10^3 ton met een totale bruto produktiewaarde van fl. 693×10^6 , ofwel ongeveer fl. 2000/ton. Van de totale produktie was ongeveer 185×10^3 ton holglas. Volgens [15] bedragen de energiekosten voor de glasindustrie ca. 14,4% van de bruto produktiewaarde.

¹⁾ Gegevens ITC Energy Working Group

Indicaties voor het energieverbruik kunnen worden ontleend aan gegevens gepubliceerd door de Verenigde Naties in 1967 (Tabel 13).

Tabel 13. Energieverbruik per ton glas in verschillende landen [16]

Land	Jaar	Warmte (10 ⁹ J/ton)	Elektriciteit (MWh/ton)
Frankrijk	1950	18,4	0,28
	1961	15,5	0,31
Hongarije	1962	18,7	?
	1963	16,6	?
Rusland	1962	18,7	?
	1963	18,0	?

Uit deze cijfers blijkt dat het energieverbruik per ton glas neiging heeft te dalen. Een redelijke schatting voor de huidige investering aan primaire energie in glas zou kunnen zijn 16,3 X 10⁹J/ton. Hierin is niet begrepen * het winnen en transporteren van de benodigde grondstoffen. Makino en Berry [17] vinden hiervoor – onder omstandigheden welke gelden in de V.S. – 2,6 X 10⁹J/ton. Het getal 16,3 X 10⁹J/ton geeft uiteraard slechts een indicatie: volgens inlichtingen van dr. W. Verweij (Philips Ontwikkelingscentrum Glas) kan men, op basis van veel literatuur, aanhouden:

	Flessenglas (10 ⁹ J/ton)	Vlakglas + rest (10 ⁹ J/ton)
Smelten, tot aan vormen	6,7	12,2
Hulpapparatuur (mengen, vormen, enz.)	3,0	3,3
	10,7	15,5

Indien men ervan uitgaat dat de Nederlandse glasindustrie voor ca. 75% flessenglas en voor 25% vlakglas enz. vervaardigt, resulteert een gemiddeld primair energieverbruik voor het glasfabrikageproces als zodanig van ca. 12 X 10⁹J/ton glas. Hierbij is rekening gehouden * met de herverwerking van interne glas-afval.

V.4. Papier en karton

De totale produktie aan papier en karton in Nederland in 1970 bedroeg 1.582 X 10³ ton [18, 19]. Hiervan was ca. 54% of 850 X 10³ ton verpakkingspapier en -karton. Deze hoeveelheid is van dezelfde orde van grootte als de hierboven gegeven schatting voor 1973. De totale produktiekosten kwamen op f 684 X 10⁶, waarvan f 62 X 10⁶ aan energie. De loonkosten (inclusief sociale lasten) bedroegen f 285 X 10⁶. Dit geeft een totale bruto produktiewaarde van f 969 X 10⁶. Het aandeel van de directe energie-investering bedroeg dus 6,4%¹⁾.

In 1972 verbruikte de Nederlandse papierindustrie 30 X 10¹⁵J aan primaire energie (zie Tabel 1). Bij een produktie van 1,6 X 10⁶ ton kan de directe energie-investering worden geraamd op ca. 18,8 X 10⁹J/ton.

¹⁾ Volgens [11] bedragen de energiekosten voor de papierindustrie in Duitsland ca. 8,1% van de bruto produktiewaarde.

Er moet tevens aan worden herinnerd dat de grondstof hout op zichzelf potentiële energie vertegenwoordigt, welke door de omzetting in verpakkingsmateriaal verloren gaat. Deze energie komt eventueel weer ter beschikking indien het uit de verpakkingen ontstane afval wordt verbrand ten behoeve van elektriciteitsopwekking. Indien deze potentiële energie wordt opgenomen in het cijfer voor het energieverbruik, stijgt dit cijfer van 18,8 X 10⁹J/ton tot een gemiddelde van 50 X 10⁹J/ton verpakkingsmateriaal¹⁾. Er wordt op gewezen dat het getal 18,8 X 10⁹J/ton slechts een indicatieve waarde heeft. Juist bij de papier- en kartonfabrikage zijn er zeer grote verschillen in energieverbruik. Dit hangt samen met het gekozen uitgangsmateriaal (hout, cellulose of oud papier), het gehanteerde fabrikageproces, het geproduceerde materiaal (de soort papier of karton) en de toepassing daarvan (bijv. het type doos). Zo blijkt de fabrikage van papier, uitgaande van 100% oud papier, in een inmiddels stilgelegde papierfabriek van Philips N.V. 12,8 X 10⁹J/ton aan primaire energie te hebben gekost, en de fabrikage van golfkarton op dezelfde basis slechts 2,4 X 10⁹J/ton [20]. Anderzijds vinden Makino en Berry [17] voor de fabrikage van een aantal doostypen – onder omstandigheden welke gelden in de Verenigde Staten – energie-investeringen van 39,1 tot 53,1 X 10⁹J/ton. Hierin is dan wel tevens begrepen 7,5 X 10⁹J/ton voor de produktie van pulp, te beginnen met het kappen van de bomen.

V.5. Plastic

De opbouw van het energieverbruik per ton plastic zakken (polyethyleen) vanaf de destillatie van ruwe aardolie tot en met de extrusie van de zakken is gegeven in Tabel 14.

Tabel 14. Energieverbruik per ton plastic zakken (polyethyleen) [21]

	10 ⁹ J/ton
Destillatie van nafta uit ruwe aardolie	1,23
Produktie van ethyleen uit nafta	15,80
Polymerisatie van ethyleen tot polyethyleen	10,55
Extrusie van zakken uit polyethyleen	3,42
Totaal	31,0

Evenals het geval was met hout, geldt ook hier dat de grondstof – olie – een vorm is van potentiële energie. Op deze basis is het totale energieverbruik 96 X 10⁹J/ton²⁾ waarvan 31 X 10⁹J/ton drukkend op de verwerking van ruwe olie tot zak.

¹⁾ Gegevens ITC Energy Working Group.

²⁾ Gegevens ITC Energy Working Group. Hierbij is rekening gehouden met de energie nodig voor winning en transport van de ruwe olie. Overigens zijn uitkomsten als deze sterk afhankelijk van het gehanteerde fabrikageproces en van de wijze van toerekening van energie aan verschillende mogelijke tussen- en eindprodukten. Sluitende internationale afspraken voor dergelijke energieberekeningen zijn nog niet ontwikkeld.

Tabel 15. Totaal energieverbruik in Nederland bij de productie van verpakkingsmateriaal

Verpakkingsmateriaal	Geschatte produktie 1973 (10 ³ ton)	Energieverbruik per ton (10 ⁹ J)	Totaal energieverbruik (10 ¹⁵ J)	%
Blik	240	29,1	7,0	18,0
Glas	375	16,3	6,1	15,5
Papier	765	18,8 (conversie)	14,4	37,0
Golfkarton				
Karton				
Plastic	120	31,0 (conversie) 65 (grondstof)	3,7 7,8	9,5 20,0
		Totaal	39,0	100

¹⁾ De potentiële energie van hout als grondstof is buiten beschouwing gelaten.

V.6. Totaal energieverbruik voor verpakkingsmateriaal

In Tabel 15 is een samenvatting gegeven van het totaalverbruik aan energie voor de productie van verpakkingsmaterialen.

Wanneer men het gebruik van energiedragers als grondstof buiten beschouwing laat, zijn blik en plastic dus materialen waaraan relatief hoge energiekosten *per ton* zijn verbonden. Neemt men de grondstof wel als potentiële energiedrager in aanmerking dan is voor glas en in mindere mate voor blik een lage energie-investering *per ton* nodig. Maar aangezien het doel van deze studie, zoals dit is omschreven in Hoofdstuk 1, bestaat uit het bezien van de mogelijkheden tot het verlichten van de druk op olie en gas als een eerste prioriteit, kan de grondstof hout als potentiële energiedrager buiten beschouwing blijven. Zo verkrijgt men de volgende rangschikking naar toenemend energieverbruik per ton: glas — papier en karton — blik — plastic.

Toch is hiermee nog geen antwoord gegeven op de vraag welke verschuivingen in het gebruikspatroon energiebesparend zouden zijn. Het verpakken van 1 liter melk vereist bijvoorbeeld 25 gram polyethyleen, 30 gram karton of 600 gram glas.¹⁾

Uitsluitend vanuit energetisch standpunt zou men het glas dus tenminste tien maal moeten hergebruiken, nog afgezien van de bij dit hergebruik te verrichten handelingen of het daarbij optredend energieverbruik en de milieuverontreiniging. Voortgezette studie zal gegevens aan het licht moeten brengen ten aanzien van de verhoudingen tussen in de praktijk voor een zelfde doel gebruikte hoeveelheden verpakkingsmateriaal, de mechanische en fysisch-chemische eigenschappen der materialen en de aspecten van het hergebruik voor hetzelfde doel of andere doelen (bijv. elektriciteitsopwekking uit afval). Maatschappelijke verlangens kunnen overigens pas worden geformuleerd indien ook andere aspecten, zoals milieubeïnvloeding van de productie, gebruik en waarde van de grondstof hout, en de verwerking van het afval, in de vergelijking worden betrokken.

¹⁾ Gegevens DSM (Centraal Laboratorium).

VI. Aluminiumbereiding

VI.1. Energieverbruik bij het huidige proces

De vervaardiging van primair aluminium vindt in drie fasen plaats, nl.:

1. extractie van bauxiet;
2. raffinage van bauxiet tot aluinaarde;
3. reductie van aluinaarde tot primair aluminium.

In Tabel 16 is aangegeven wat globaal de energiebehoefte per fase is, met daarnaast het verbruik per ton primair aluminium: rond 232×10^9 J. Vooral de reductiefase, een elektrolytisch proces, vergt een aanzienlijke hoeveelheid energie.¹⁾

Een energiebalans van dit proces is opgenomen in Tabel 17. De grote warmteverliezen, welke ongeveer de helft van het energieverbruik bedragen, worden vooral veroorzaakt door de voor dit elektrolyseproces noodzakelijke grote interpolaire afstand tussen de elektroden (5 – 6 cm.).

Er is naar verhouding bijzonder weinig energie nodig voor de verwerking van het primaire aluminium tot het koudgewalste produkt, hoewel het feitelijke energieverbruik uiteraard varieert naar het soort eindprodukt. In Tabel 18 wordt als voorbeeld gegeven het verbruik voor koudgewalste geknpte plaat van ca. 1 mm dikte; dit vereist aan energie ca. 12×10^9 J/ton.

VI.2. Mogelijkheden tot energiebesparing

Het energieverbruik bij de elektrolyse van aluminium — de procesfase, welke verreweg de meeste energie vraagt — is de laatste twintig jaar door procesverbeteringen gedaald van rond 88×10^9 J/ton tot iets meer dan 55×10^9 J/ton (elektrische energie). Bij het huidige elektrolyseproces lijkt men echter de mogelijkheden tot energiebesparing vrijwel volledig te hebben benut. Het onderzoek richt zich bijvoorbeeld nu op een anode die niet door het proces wordt verbruikt. Milieumaatregelen kunnen het energieverbruik in geringe mate (mogelijk met 1 à 2%) ongunstig beïnvloeden. Bij de verwerking van primair aluminium tot eindprodukt zijn geen wezenlijke energiebesparingen mogelijk.

¹⁾ Overigens valt op te merken dat voor bepaalde produkttoepassingen het energieverbruik per eenheid Al-eindprodukt toch van dezelfde orde kan zijn als dat van staal.

Tabel 16. Energieverbruik voor de vervaardiging van primair aluminium

Bauxietwinning ($Al_2O_3 \cdot H_2O$ en $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$)		drogen (brandstof) diversen (elektriciteit)	1,04 X 10 ⁹ J/ton bauxiet 0,029 X 10 ⁹ J/ton bauxiet
Aluinaardefabrikage (Bayerproces) (omzetting in Al_2O_3 via $NaAlO_2$)		brandstof elektriciteit	13,3 X 10 ⁹ J/ton aluinaarde 0,9 X 10 ⁹ J/ton aluinaarde
Aluminiumsmelter (Hall-Héroult-proces) Aluinaarde oplossen in gesmolten kryoliet (Na_3AlF_6), gevolgd door elektrolyse.		elektriciteit elektroden - per ton elektroden	54,9 X 10 ⁹ J/ton Al 0,5 ton/ton Al 56,5 X 10 ⁹ J petroleumcokes; 1,94 X 10 ⁹ J elektriciteit
Totaal verbruik per ton primair aluminium			
	brandstof 10 ⁹ J	elektr. 10 ⁹ J	brandstof 10 ⁹ J
4,5 ton bauxiet à	1,04 en	0,03	4,68
1,95 ton aluinaarde à	13,3 en	0,9	25,9
smelter 54,9 X 10 ⁹ J			54,9
elektroden, 0,5 ton à	56,5 en	1,94	28,25
			Totaal
			58,8
Totaal primair energieverbruik per ton primair aluminium: 58,8 + 3 X 57,8 = ca. 232 X 10 ⁹ J			

Tabel 17. Globale energiebalans van de elektrolytische reductie van aluinaarde tot primair aluminium (Hall-Héroult-proces)

Geleverde energie	10 ⁹ J/ton Al	Energieverbruik	10 ⁹ J/ton Al
- elektrische energie (stroomsterkte x celspanning)	54,0	reactiewarmte Al_2O_3 -ontleding opwarmen anoden, Al_2O_3 enz.	32,4
- reactiewarmte ($C + O_2 \rightarrow CO_2$)	13,0	warmteverliezen (straling, enz.)	3,3
- Al-reoxydatie	1,8		33,1
	68,8		68,8

Tabel 18. Het energieverbruik bij de verwerking van primair aluminium tot koudgewalste, geknipte plaat (dikte ca. 1 mm)

	brandstof 10 ⁹ J/ton	elektriciteit 10 ⁹ J/ton
warmwals	2,9	0,11
koudwals		0,23
gloeiovens knipbaan	7,6	0,11
Totaal	10,5	0,45
Totaal primair energieverbruik: 10,5 + 3 x 0,45 = ca. 12 X 10 ⁹ J/ton		

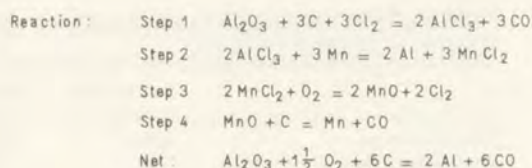
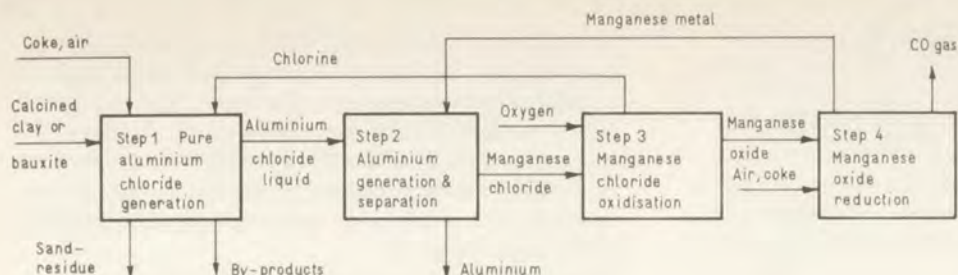
VI.3. Nieuwe processen

Reeds vanaf de allereerste jaren van haar bestaan heeft de aluminiumindustrie gezocht naar een efficiënte wijze van vervaardiging van aluminium via een ander procédé dan het elektrolytische. Tot nu toe zijn deze pogingen op niets uitgelopen, met uitzondering van enkele toepassingen in de Sowjet-Unie, die zich in een bijzondere positie bevindt ten aanzien van de grondstoffen.

Het Toth-proces (Fig. 7) waarover de laatste tijd enige berichten zijn verschenen, is een voorbeeld van een

eerder chemisch dan elektrolytisch proces: uit aluminiumchloride wordt met behulp van mangaan aluminium verkregen. Naast een belangrijke energiebesparing zou dit proces ook een sterke verschuiving van elektrisch naar meer direct (steenkol) energieverbruik teweegbrengen. Aangezien het proces zich nog in de laboratoriumfase bevindt, kan de industriële toepassing op grote schaal pas op middellange termijn mogelijk worden.

Ook bij de elektrolytische bereiding van aluminium wordt gezocht naar processen die goedkoper zijn dan het huidige Hall-Héroult-elektrolyseproces. Het belangrijkste in ontwikkeling zijnde alternatief is momenteel het Alcoa-proces. In dit proces wordt het aluminium verkregen door elektrolyse van $AlCl_3$, waarvoor slechts 70% van de energie, vereist voor het huidige proces, is benodigd. Tevens wordt gewerkt met inerte elektroden, zodat het verbruik aan elektroden drastisch wordt verminderd. Alcoa hoopt in 1975 een pilotplant gereed te hebben met een capaciteit van 15.000 ton Al per jaar. De voordelen van dit proces liggen niet alleen op het gebied van energiebesparingen maar hebben ook betrekking op het milieu (geen HF-emissie), personeelsbehoefte en procesbeheersing, zodat een industriële toepassing niet uitgesloten moet worden geacht. Indien een meer energie-efficiënte aluminiumfabriek van dit



Figuur 7. Het Toth-proces [20].

type met een capaciteit van 100.000 ton/jaar tegen 1985 in productie zou kunnen worden gebracht, dan zou dat een energiebesparing kunnen opleveren van $0,3 \times 232 \times 10^9 \times 10^5 = 7 \times 10^{15}$ J. (0,15% van het nationale verbruik aan primaire energie in 1985).

VI.4. Recycling (Herwerking)

De invloed van de recycling op het energieverbruik bij de productie van aluminium is bijzonder groot. Terwijl bauxiet een verbruik per ton primair aluminium nodig heeft van $57,8 \times 10^9$ J elektriciteit en $58,8 \times 10^9$ J directe brandstof, heeft aluminiumschroot slechts ca. $0,3 \times 10^9$ J elektriciteit en $8,3 \times 10^9$ J directe brandstof nodig.

Verwacht wordt, dat de groei in het aluminiumverbruik – tot nu toe 9% per jaar – spoedig zal afvlakken, vooral in de geïndustrialiseerde landen. Dit zou kunnen leiden tot een stijging van het schrootaandeel in de productie – momenteel ca. 20% –, temeer daar door de tijdsvertraging als gevolg van de gebruiksduur schroot pas een aantal jaren na de productie ter beschikking komt. Als dit het geval is, zal het energieverbruik evenredig dalen. Ter illustratie zijn in Tabel 19 enige cijfers over de recycling van aluminium gegeven.

Tabel 19. Recycling van aluminium

	Schrootverbruik en aandeel in de productie in 1970 ¹⁾	
	ton	aandeel in %
W-Duitsland	260.000	29
Engeland	200.000	33
Japan	320.000	26
U.S.A.	870.000	20
Nederland	27.000	20

¹⁾ Inclusief in- en uitvoerstromen.

Indien voor 1985 wordt verondersteld dat het aandeel van schroot in de productie 40% zou bedragen en dat het verbruik dan $2\frac{1}{2} \times 130.000$ ton per jaar (1970-verbruik) zou zijn, zou circa $(0,4 - 0,2) \times 325.000 \times 220 \times 10^9 = 14,3 \times 10^{15}$ J aan primaire energie kunnen worden bespaard. Dit vertegenwoordigt ca. 0,3% van het nationale primaire energieverbruik in 1985.

VII. Energieverbruik in de voedings- en genotmiddelenindustrie

VII.1. Inleiding

De Nederlandse voedings- en genotmiddelenindustrie verbruikte in 1972 69×10^{15} J aan primaire energie, ofwel 3% van het totale nationale energieverbruik. Hoewel het dus de moeite waard is na te gaan of hier besparingen mogelijk zijn, zal men wel moeten bedenken, dat deze industrie bestaat uit een veelheid van processen, die ieder voor zich slechts een klein deel van het totale energieverbruik voor hun rekening nemen. In het bestek van deze paragraaf zullen wij ons daarom beperken tot enige meer belangrijke processen. Gedurende de analyse is het duidelijk geworden, dat de gepubliceerde literatuur ternauwernood relevante, gedetailleerde gegevens bevat over het energieverbruik van productieprocessen in de voedings- en genotmiddelenindustrie.

Er worden drie belangrijke gebieden in beschouwing genomen:

- de verwerking van eetbare oliën en vetten;
- de productie van margarine;
- de productie van zeep en wasmiddelen.

VII.2. Energieverbruik bij de productie van eetbare oliën, vetten en margarine

Bij de productie van eetbare oliën en vetten kunnen drie belangrijke fasen worden onderscheiden:

- oliëwinning; pletten, extractie, schillen, enz.
- oliëaffinage: bleken, neutraliseren, stomen, enz.
- oliëmodificatie; hydrogeneren, fractioneren, omesteren, enz.

Hiervan zijn pletten, extractie, fractioneren, neutraliseren en stomen de processen met het hoogste energieverbruik. Een gedeelte van de behandelde olie wordt verder verwerkt tot margarine via het votator-proces¹⁾, dat eveneens veel energie vergt. Het gemiddelde energie-

¹⁾ Het votator-proces is een continu-proces (ook toegepast voor de fabricage van roomijs) waarbij de olie-wateremulsie wordt omgezet in margarine door karnen, koelen en kneden in een zogenaamde votatorbuis.

verbruik per ton input voor de diverse fasen in het proces is gegeven in Tabel 20.

Tabel 20. Gemiddeld energieverbruik per ton input voor de diverse fasen tijdens de productie van eetbare oliën, vetten en margarine

	Elektriciteit (10 ⁶ J)	Stoom (kg)
Oliewinning	205	260
Olieraffinage	47	580
Oliemodificatie	378	1.750
Votator-proces	162	80

In Nederland wordt jaarlijks ca. 400.000 ton aan olie, vetten en margarine geproduceerd. Hiervan is ca. 80% zuiver olie en vet. Een geraamde onderverdeling naar de verschillende producten is gegeven in Tabel 21.

Tabel 21. Olie-, vet- en margarineproductie in Nederland

	Productie 10 ³ ton	Olie- en vet- inhoud 10 ³ ton
Margarine (detail)	226	181
Margarine en vetten (en gros)	127	100
Plantaardige 'shortenings', braadvet, etc.	16	13
Tafelolie, etc.	6	6
Diversen	25	25
Totaal	400	325

De totale hoeveelheid energie benodigd voor de productie van eetbare oliën en vetten voor gebruik als zodanig of voor verwerking tot margarine is gegeven in Tabel 22. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat slechts 30% van de oliën in Nederland wordt geëxtraheerd, dat sommige oliën tweemaal in de procesgang worden geraffineerd en dat ongeveer 50% wordt gemodificeerd.

Tabel 22. Totaal energieverbruik bij de productie van oliën en vetten in Nederland (325 X 10³ ton)

	Elektriciteit (10 ¹² J)	Stoom (10 ³ ton)
Olieëxtractie (30% ~ 97,5 X 10 ³ t)	20,2	25,4
Olieraffinage (130% ~ 422,5 X 10 ³ t)	19,8	245,1
Oliemodificatie (50% ~ 163 X 10 ³ t)	61,6	285,5
Totaal	101,6	556,0

Tabel 23 geeft een opsomming van de totale hoeveelheid energie benodigd voor de productie van margarine, van olieëxtractie tot en met verpakking van het eindproduct.

Tabel 23. Totaal energieverbruik bij de productie van margarine in Nederland (370 X 10³ ton)

	Elektriciteit (10 ¹² J)	Stoom (10 ³ ton)
Olieëxtractie	91,4	500
Olieraffinage		
Oliemodificatie		
Votator-proces	60,1	30
Verpakking	6,8	—
Totaal	158,3	530

In Tabel 24 is ten slotte het totale energieverbruik gegeven zowel voor de olie- en vetproductie als voor de margarineproductie. Uit deze tabel blijkt, dat jaarlijks in Nederland door deze tak van industrie aan primaire energie (1,663 + 3 X 0,1693) = ca. 2,17 X 10¹⁵ J wordt verbruikt ofwel ca. 3% van het totale verbruik in de voedings- en genotmiddelenindustrie in 1972 (zie Tabel 1).

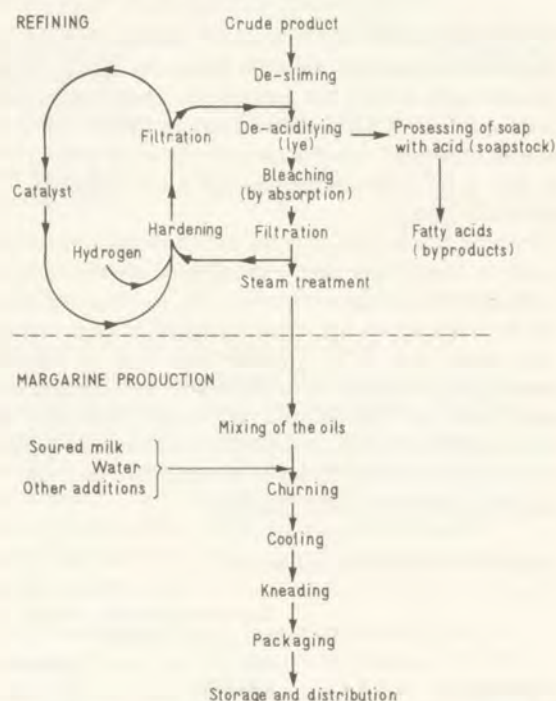
De uiteindelijke energiekosten van margarine bedragen ongeveer 17% van de produktiekosten.

Tabel 24. Totaal energieverbruik bij de productie van oliën, vetten en margarine in Nederland

	Elektriciteit (10 ¹² J)	Stoom (10 ³ ton)
Olieverwerking	101,6	556
Productie margarine (votator)	60,1	30
Verpakking	7,6	—
Totaal	169,3	586¹⁾

¹⁾ Energie-inhoud 10³ ton stoom: 2,27 X 10¹² J. Rendement: 80%.
Voor 586 X 10³ ton stoom is dus nodig $\frac{100}{80} \times 586 \times 2,27 = 1.663 \times 10^{12}$ J aan primaire energie.

In Figuur 8 worden de verschillende fasen van het proces beknopt weergegeven.



Figuur 8. De productie van eetbare oliën en vetten en van margarine [23]

Door deze energieanalyse van de productie van één der belangrijkste primaire voedingsmiddelen wordt bevestigd wat hierboven reeds is gezegd: de voedings- en genotmiddelenindustrie is opgebouwd uit een veelheid van processen, die ieder voor zich slechts een klein deel van het totale energieverbruik in deze sector voor hun rekening nemen. Uit de analyse blijkt bovendien, dat het — althans voor dit bestudeerde proces — niet werkelijk mogelijk is de terreinen aan te geven waar energiebesparing mogelijk is. Dit wordt voornamelijk

veroorzaakt door de veelheid van behandelingen en van kleine energie-investeringen, die nodig zijn om een ruwe grondstof geschikt te maken voor consumptie. Aangezien de diverse fasen van het proces reeds vergaand geoptimaliseerd zijn, zullen verdere besparingen via een intelligent prijsmechanisme toch marginaal blijven.

VII.3. Energieverbruik bij de produktie van zeep en wasmiddelen

In de zeep- en wasmiddelenindustrie in Nederland kunnen vier hoofdproduktieprocessen worden onderscheiden:

- produktie van toilet- en huishoudzeep en van zachte zeep;
- sulfonatie;
- produktie van waspoeders;
- produktie van vloeibare wasmiddelen.

De produktiecijfers en de totaal geïnvesteerde energie zijn gegeven in Tabel 25. Uit deze tabel blijkt, dat de Nederlandse zeep- en wasmiddelenindustrie jaarlijks voor de produktie $(0,79 + 3 \times 0,053) = \text{ca. } 0,95 \times 10^{15} \text{ J}$ aan primaire energie verbruikt, ofwel 1,4% van het totale energieverbruik in 1972 t.b.v. de voedings- en genotmiddelenindustrie. Opmerkelijk is, dat de waspoederproduktie ongeveer 77% van de geïnvesteerde energie voor zijn rekening neemt, hetgeen kan worden toegeschreven aan de toepassing van een sproeidroogproces. Tegenwoordig worden de grondstoffen weliswaar in droge vorm aan het proces toegevoegd, maar de gewenste structuur van het waspoeder maakt het noodzakelijk dat het eerst opnieuw in water wordt opgenomen, waarna sproeidrogen plaatsvindt. Om die reden wordt dan ook naarstig gezocht naar een geschikt droogmengproces, hetgeen een aanzienlijke energiebesparing kan opleveren. Als dit zoeken resultaat oplevert zal de consument moeten leren qua volume minder waspoeder te gebruiken, aangezien het compacter zal zijn.

De betrekkelijk hoge investering aan energie voor de produktie van toilet- en huishoudzeep en zachte zeep wordt veroorzaakt door het feit, dat het verpakken van toilet- en huishoudzeep ongeveer $432 \times 10^6 \text{ J}$ per ton vereist. Hierin is het tabletteren van de zeep begrepen. Weglaten van dit tabletteren en vervangen door het oude 'raam-droogproces' zou betekenen, dat de kwaliteit van

de zeep t.a.v. het vetgehalte achteruit zou gaan. Bovendien zouden in dat geval hogere investeringen aan arbeid en opslagruimte nodig zijn. Met uitzondering van de waspoederproduktie is het moeilijk aan te geven waar besparingen in bepaalde sectoren van de zeepindustrie mogelijk zijn. Ook hier moet worden verwacht dat via een prijsmechanisme slechts marginale besparingen mogelijk zijn.

VIII. Fermentatieprocessen en hun bijdrage aan de energiebesparing

VIII.1. Inleiding

Verschuivingen in het industriële vlak, veroorzaakt door het relatief schaarser en duurder worden van de energie, kunnen de volgende consequenties hebben voor de toepassing van fermentatieprocessen:

- vervanging van chemische produktie door fermentatie, maar ook omgekeerd;
- opwekking van energie uit anders verloren afval door fermentatie.

De energiebehoefte van een fermentatie-installatie maakt ongeveer 5% van de totale kosten uit. In Nederland vergt deze industrie slechts een gering deel van het nationaal energieverbruik. Aangezien energiebesparing nationaal gezien dus weinig te betekenen heeft, zal op dat onderwerp hier niet verder worden ingegaan. Slechts de twee bovengenoemde mogelijkheden zullen worden behandeld. Bovendien wordt aandacht geschonken aan het feit dat grondstoffen voor chemische processen dikwijls tevens potentiële energiedragers zijn.

VIII.2. Produktie via het proces van de laagste energiekosten

Een verschuiving van chemische naar fermentatieve produktie — of omgekeerd — op grond van een stijgende energieprijzen vindt slechts plaats onder bepaalde omstandigheden, waarvan er hier drie worden besproken.

Technologische situatie

De produktie moet uiteraard op beide wijzen mogelijk zijn en de kosten moeten niet al te ver uit elkaar liggen.

Tabel 25. Jaarlijkse produktie en totaal energieverbruik voor de Nederlandse zeep- en wasmiddelenindustrie (1972)

	Produktie (10^3 ton)	Elektriciteit (10^{12} J)	Stoom ¹⁾ (10^3 ton)	Brandstof ²⁾ (10^3 ton)	Totaal Stoom + brandstof (10^{12} J)
Toiletzeep	25	14,0	37,5	—	106,5
Huishoudzeep					
Zachte zeep					
Sulfonatie	12	3,2	0,9	—	2,6
Waspoeder	130	26,3	39,0	13,0	654,2
Vloeibaar wasmiddel	75	4,3	9,4	—	26,7
Totaal verpakking	—	5,4	—	—	—
Totaal	242	53,2	86,8	13,0	790

¹⁾ Voor 10^3 ton stoom = ca. $2,84 \times 10^{12}$ J nodig (rendement 80%).

²⁾ 10^3 ton brandstof = $41,8 \times 10^{12}$ J.

Produkten met zeer complexe samenstelling als de levende bakkergist en enzymen, maar ook bier en wijn, kunnen alleen fermentatief worden bereid.

Antibiotica komen al in een grensgebied. Velen worden semisynthetisch gemaakt, sommige, zoals chloor-amphenicol, geheel synthetisch. Voor andere producten is chemische synthese nog onbekend. Een dergelijke situatie treffen we aan bij vitaminen: B₁₂ biologisch, B₂ beiderlei wijze, C gecombineerde wijze.

Bij steroïden verlopen hydroxyleringsstappen fermentatief vaak met een zeer hoog rendement zodat ze ondanks de lage concentratie een betrekkelijk onaantastbaar gebied zijn van de fermentatie-industrie. Zo ook de scheiding van sommige racematen.¹⁾

Bij minder complexe verbindingen zoals aminozuren, organische zuren, alcoholen en oplosmiddelen is de concurrentie vaak ten nadele van de fermentatieve bereiding. Er is echter nauwelijks sprake van een chemisch alternatief voor citroenzuurbereiding, terwijl de kwaliteitsnormen voor ethylalcohol en azijnzuur, die voor consumptie zijn bestemd, de fermentatieve bereiding tot de enig aanvaardbare maken.

Een apart geval is het toenemende gebruik van enzymen op dragers. Min of meer gezuiverde enzymen blijken, indien gebonden aan speciale vaste dragers, hun werking bij hun lage temperatuuroptimum lang te behouden. Door deze nieuwe techniek bespaart men het steeds weer opnieuw kweken van micro-organismen en de noodzakelijke onderhoudsenergie van de levende cel. Een gangbare toepassing is het gebruik van geïmmobiliseerde penicilline-amidase om de zijketen van benzylpenicilline te verwijderen, waarbij 6-aminopenicillaanzuur overblijft als grondstof voor de bereiding van semisynthetische penicillines. Enzymatische hydrolyse van zetmeel, gevolgd door isomerisatie van de glucose met geïmmobiliseerde isomerase kan een toekomstige bron van invertsuiker en suikerstroop worden.

Energiekosten

Verschuiving van bereidingswijze kan optreden indien de energiekosten per eenheid eindproduct bij de eerst goedkoopste bereidingswijze hoger worden dan die van de alternatieve methode.

Een voorbeeld: chemische produktiekosten zijn nu fl. 10 per kg waarvan fl. 5 per kg voor energie. De overeenkomstige cijfers voor fermentatieve produktie zijn resp. fl. 15 en fl. 3. Fermentatieve produktie wordt concurrerend zodra de energiekosten 3,5 X zo hoog worden bij overigens gelijk blijvende produktiekosten.

Procesverbetering

Verschuiving van bereidingswijze kan optreden indien de energiekosten per eenheid eindproduct voor de alternatieve route laag worden als gevolg van procesverbetering.

Een voorbeeld: chemische produktiekosten zijn nu fl. 10 per kg waarvan fl. 3 aan energie. De overeenkomstige cijfers voor fermentatieve produktie zijn resp. fl. 24 en fl. 4. Door procesverbetering worden de fermentatieve kosten fl. 12 en fl. 2 per kg. Als bovendien de energie relatief 3 X zo duur wordt, komen de produktiekosten van beide processen op gelijk niveau.

¹⁾ Racematen bestaan uit twee gelijke delen van de d en l vormen van dezelfde optisch actieve substantie.

Voorbeelden

a. Alcohol

Tabel 26. Energie in 10⁹ J per ton 100% C₂H₅OH

energiesoort	fermentatief	synthetisch ¹⁾
elektriciteit	0,35	0,7
stoom	70,2	26,3
gas	—	6,8
koelwater	0,7	0,7
totaal	71,25	34,5
energiekosten ²⁾	fl. 170,—	fl. 82,50

¹⁾ Directe hydratering volgens Shell-proces.

²⁾ 10⁹J = fl. 2,39.

De marktprijs van ethanol is nu meer dan fl. 1000,—/ton. Er valt geen verschuiving te verwachten naar fermentatieve bereiding op grond van stijgende energieprijzen.

b. Aceton en butanol

Tabel 27. Energie in 10⁹J per ton, synthetisch¹⁾

energiesoort	aceton	butanol
elektriciteit	0,7	0,35
stoom	14,8	7,9
gas	13,7	6,8
koelwater	0,35	0,35
totaal	29,55	15,4
energiekosten ²⁾	fl. 70,50	fl. 37,—

¹⁾ Volgens het Hibernia-proces.

²⁾ 10⁹J = fl. 2,39.

Marktprijs aceton ca. fl. 800,—/ton.

Marktprijs butanol ca. fl. 1300,—/ton.

Beide producten werden gewoonlijk fermentatief gemaakt op basis van melasse met een totaal rendement uitgaande van suiker van ca. 30%. De verhouding butanol-aceton varieerde hierin, maar kon worden gesteld op ca. 70% butanol en 30% aceton. Het rendement op 100 kg suiker uit melasse is dus 21 kg butanol en 9 kg aceton. Dit geeft volgens genoemde prijzen een marktwaarde van fl. 27,30 + fl. 7,20 = fl. 34,50. Alleen al voor de melasse (52% suiker, fl. 0,22/kg) kost de fermentatieve bereiding fl. 42,—. Vergelijkende kostprijsberekeningen voor energie ontbreken, maar op grond van het voorgaande lijkt een verschuiving terug naar fermentatie illusoir.

c. Lysine

Tabel 28. Energie in 10⁹J per ton lysine

energiesoort	fermentatief	synthetisch (plan)
elektriciteit	7,6	12,2
stoom	43,9	46,8
gas	4,3	2,9
koelwater	5,0	2,9
perslucht	36,0	—
totaal	96,8	64,8
energiekosten ¹⁾	fl. 231,—	fl. 155,—

¹⁾ 10⁹J = fl. 2,39.

De kostprijs van beide processen ligt tussen de fl. 3000,— en fl. 4000,— per ton voor grote eenheden. Bij een sterk stijgende energieprijs is een verschuiving naar synthetische bereiding te verwachten.

d. Riboflavine¹⁾

De kostprijs in 1971 van de chemische produktie kan worden geschat op fl. 30 per kg, als volgt verdeeld:

grondstoffen	fl. 19/kg
produktiekosten	fl. 11/kg

totaal fl. 30/kg

De kostprijs van de fermentatieve bereiding kan bij hoog produktieniveau op fl. 50,-/kg worden geschat. De vermoedelijke energiekosten per kg riboflavine zullen bij chemische bereiding ca. 40% van fl. 11 = fl. 4,50/kg zijn. Bij fermentatieve bereiding zal dit 15% van fl. 50 = fl. 7,50/kg bedragen. Er zal dus geen verschuiving naar fermentatieve bereiding op energie-argument plaatsvinden.

VIII.3. Energie winnen uit verloren afval

De anaërobie fermentatie van vaste afvalstoffen ter winning van energie (gas) wordt niet als reëel alternatief beschouwd voor compostering of verbranding. De anaërobie fermentatie wordt bij de zuivering van afvalwater wel incidenteel toegepast, maar men staat vooralsnog sceptisch tegenover deze wijze van verwerking. Alleen de meer geconcentreerde afvalstromen zouden in aanmerking kunnen komen, maar hierbij denkt men allereerst aan concentrering en verwerking tot veevoer. Naast de economie zijn milieubelasting door stank, onvolledige reiniging en soms ongunstige samenstelling van het gas mede aanleiding tot genoemde scepsis. De B.O.D.²⁾ van de Nederlandse afvalwaterstroom is te schatten op ca. $1,2 \times 10^6$ ton zuurstof per jaar. Dit getal zal wel geleidelijk teruglopen tot ca. $0,75 \times 10^6$ als gevolg van toepassing van alternatieve zuiveringsmethoden voor de meer geconcentreerde stromen.

Als per dag een 30 l methaan bevattend gas te winnen zou zijn uit water met een B.O.D. van 100 gr. zuurstof dan zou in Nederland op papier uit deze meer geconcentreerde stromen tot ca. $\frac{1,2 - 0,75}{100} \times 10^{12} \times 0,030 = 135 \times 10^6$ m³ methaangas per jaar kunnen worden gewonnen, of ca. 0,15% van het Nederlandse energieverbruik in 1985. In feite is moeilijk te voorspellen of de fermentatieve methaanproduktie uit afvalwater meer dan plaatselijke betekenis zal krijgen. Een zeer sterke stijging van de energieprijzen kan de situatie totaal veranderen.

VIII.4. De grondstoffenfactor

Het vraagstuk kan ook worden benaderd vanuit de grondstoffensituatie. Welke weerslag zal een relatief duurder en schaarser worden van grondstoffen hebben op fermentatieprocessen? In het afgelopen decennium is veel onderzoek verricht naar het toepassen van kool-

waterstoffen als goedkope grondstof voor fermentatie, vooral voor de bereiding van 'single cell protein' (SCP), maar ook van bijvoorbeeld citroenzuur. Op basis van koolwaterstoffen verkregen grondstoffen als methanol en azijnzuur worden in toenemende mate gebruikt voor de produktie van glutaminezuur. Maar toenemende relatieve schaarste van koolwaterstoffen voegt aan de situatie een element van wedijver toe: energiebron of grondstof?

Bij de fermentatie wordt het grondstoffenrendement door praktische factoren begrensd. Micro-organismen moeten groeien en worden onderhouden; voor beide is veel energie nodig, waarmee een aanmerkelijk deel van de gegeven C-voeding tot CO₂ en warmte wordt gedegradeerd. Als het grondstoffenverbruik in termen van energie wordt uitgedrukt, dan kan de volgende vergelijking tussen een paar synthetische en fermentatieve bereidingen worden gegeven (Tabel 29).

Tabel 29. Energie en grondstoffen (in 10⁹J), benodigd per ton produkt

produkt	fermentatief		synthetisch	
	energie	grondstoffen	energie	grondstoffen
alcohol	71,25	30,2	34,5	49,3
lysine	96,8	79,2	64,8	75,2

In deze voorbeelden is voor de fermentatieve bereiding de benodigde energie aanzienlijk hoger dan die voor de chemische processen. Maar generaliseren is altijd hachelijk.

IX. Samenvatting en conclusies

IX.1. Olieraffinage

Als we aannemen dat de capaciteit der Nederlandse raffinaderijen tegen 1985 zal zijn uitgebreid met ca. 17%, dan zal, met inbegrip van de vervanging van oude eenheden, ongeveer een derde van alle eenheden in 1985 nieuw kunnen zijn. In het jaar 2000 zullen waarschijnlijk alle eenheden nieuw zijn. Als we deze veronderstellingen en het handhaven van de huidige technologie, kwaliteitsnormen en milieu-eisen als basis nemen, dan kan men ramen dat de technische verbeteringen besparingen op het brandstofverbruik van raffinaderijen kunnen opleveren van 16% in 1985 en 22% in 2000. De eerstgenoemde besparing komt overeen met 0,8% van het verbruik van primaire energie in 1985 in Nederland. De besparingen zijn voornamelijk het resultaat van verbeterde controle op de verwerking in de fabriek, verbeterde warmte-terugwinning met toegevoegde warmtewisselaars en hogere fornuis-efficiency. Bovendien zou de toepassing van het concept van gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit en de integratie met ruimteverwarming in 1985 een verdere besparing van 3,1% op het nationaal verbruik aan primaire energie kunnen opleveren.

Milieubeschermingsvoorschriften ter zake van de ontzwaveling van residuale stookolie en van benzine met lager loodgehalte kunnen evenwel het brandstofverbruik van raffinaderijen verhogen met een percentage dat kan oplopen tot 60% — een verhoging van ongeveer 3% van het nationale primaire energieverbruik in 1985.

¹⁾ Riboflavine (vitamine B₂) is een dieetbestanddeel en vindt ook therapeutische toepassing.

²⁾ B.O.D. (Biological Oxygen Demand) is de hoeveelheid zuurstof die nodig is voor het afbreken van de organische stof in een hoeveelheid water met behulp van aërobie micro-organismen.

IX.2. Ammoniaksynthese

Een verhoging van de energieprijzen zal wel een extra stimulans geven aan energiebesparing maar het effect daarvan zal gering zijn, aangezien ook nu reeds sterke impulsen voor besparing op energiekosten aanwezig zijn. Besparende maatregelen zoals introductie van grote roterende compressoren en toepassing van aardgas als grondstof zijn enige jaren geleden reeds ingevoerd. Het gebruik van gasturbines als aandrijfaggregaat voor de compressoren is in voorbereiding en kan leiden tot een besparing van ca. 0,25% op het nationaal primair energieverbruik in 1985.

Indien het zou gelukken katalysatoren te ontwikkelen die bij een lagere temperatuur (300°C) voldoende actief zouden zijn, zou nog eens een besparing van ca. 0,7% op het nationaal energieverbruik mogelijk worden.

IX.3. IJzer- en staalindustrie

Bij de bestaande installaties in de ijzer- en staalindustrie zijn slechts in beperkte mate mogelijkheden tot energiebesparingen aanwezig en daarvoor zouden dan nog aanzienlijke investeringen nodig zijn. Deze besparingen zouden bij een jaarproductieniveau van $7,5 \times 10^6$ ton staal 0,25% van het nationaal primair energieverbruik in 1985 uitmaken.

Een duidelijke besparing op aardolie en aardgas zou worden verkregen in een nieuw te bouwen ijzer- en staalbedrijf door wijziging van de min of meer traditionele opzet. Een dergelijk bedrijf zou naast de steenkool aan energie nog slechts een geringe hoeveelheid elektriciteit behoeven aan te kopen. De verschuiving naar steenkool zou een besparing op het olie- en gasverbruik van ca. 0,3% van het nationaal energieverbruik in 1985 betekenen bij een produktie (extra t.o.v. het 1972-niveau) van $2,5 \times 10^6$ ton staal. Wanneer het vervangende steenkoolverbruik mede in rekening wordt gebracht blijft een kwart van deze 0,3%-besparing over.

Ten aanzien van nieuwe ijzer- en staalbereidingsprocessen worden de komende 10 tot 15 jaar geen omwentelingen voorzien. Van de in ontwikkeling zijnde processen is eerder een verschuiving in energievorm dan een energiebesparing te verwachten. Daarbij dient erop te worden gewezen dat de zgn. 'life cycle' bij nieuwe vindingen die zijn bedoeld als vervanging van bestaande processen, dikwijls lang is, vooral bij de ijzer- en staalindustrie: 20 jaar voor ontwikkeling van de uitvinding tot de eerste industriële installatie en daarna gewoonlijk nog eens 20 jaar voor geleidelijke vervanging van de bestaande processen.

IX.4. Verpakkingsindustrie

Door de verpakkingsindustrie werd in 1973 39×10^{15} J aan energie verbruikt, indien ook de grondstof (aardolie) voor plastics daarbij wordt inbegrepen. Dit energieverbruik kan als volgt over de diverse verpakkingsmaterialen worden verdeeld: glas 15,5%, papier en karton 37%, blik 18% en plastic 29,5%. De per ton in deze materialen geïnvesteerde energie was onderscheidenlijk 16,3, 18,8, 29,1 en $96,0 \times 10^9$ J.

Toch heeft het probleem nog een ander aspect, namelijk de invloed van verschuivingen in het gebruik van

verpakkingsmateriaal op het energieverbruik. Voortgezette studie is nodig om te bepalen hoeveel van elk materiaal is vereist voor een bepaald doel en om de mechanische en fysisch-chemische eigenschappen en de aspecten van hergebruik aan het licht te brengen. Zonder dergelijke gegevens is het nauwelijks mogelijk vast te stellen of er maatregelen moeten worden genomen voor een verbeterd energieverbruik over de hele linie. Pro's en contra's vooral ten aanzien van benodigd gewicht, transport en milieubelasting zijn met de thans beschikbare gegevens moeilijk te overzien.

IX.5. Aluminiumbereiding

Bij de huidige toegepaste bereidingswijze van aluminium via de elektrolytische reductie van aluinaarde zijn in de praktijk geen aanzienlijke energiebesparingen meer te verwachten. Men dient zijn hoop te vestigen op in ontwikkeling zijnde nieuwe processen, zowel varianten op het elektrolytische proces, als chemische processen. Of deze processen binnen afzienbare tijd industriële toepassing zullen vinden, is zowel technisch als economisch nog niet te bepalen. Potentiële besparingen kunnen in de orde van grootte van 70×10^9 J/ton aan primaire energie liggen, maar dat zou in het geval van een fabriek met een produktie van 100.000 ton slechts ca. 0,15% van het nationaal primair energieverbruik in 1985 vertegenwoordigen. Een toenemende mate van recycling (herverwerking) van aluminium zou het energieverbruik per ton aluminium doen dalen. Indien het schrootaandeel in de toelevering van de Al-produktie in 1985 zou zijn verdubbeld ten opzichte van nu, zou dat een besparing van ca. 0,3% op het nationaal energieverbruik betekenen.

IX.6. Voedings- en genotmiddelen

Uit de studie welke tot nu toe is verricht blijkt dat het voor deze tak van industrie zeer moeilijk is aan te geven welke maatregelen met betrekking tot energiebesparing moeten worden genomen en wel om de volgende redenen:

- de totaal door deze groep verbruikte energie is de som van een groot aantal kleine posten zoals: produktie van margarine, oliën en vetten: 3%, zeep- en wasmiddelenindustrie: 1½%;
- de in de voedings- en genotmiddelenindustrie toegepaste processen bestaan over het algemeen uit een groot aantal afzonderlijke stappen, die ieder voor zich een kleine hoeveelheid energie consumeren. Het zal moeilijk zijn exact na te gaan hoe de energie over de diverse stappen is verdeeld.

Omdat de totale produktiekosten voor een niet onbelangrijk deel energiekosten zijn (17% in het geval van margarine), mag worden aangenomen dat vooral de grote producenten voortdurend nagaan of de bestaande processen energie-efficiënter kunnen verlopen en of substitutie van bestaande processen door minder energie vragende processen mogelijk is. Maatregelen welke zowel de producent als de consument meer energiebewust maken, zullen stellig extra besparingen opleveren. Een van deze maatregelen zou een intelligent prijsmechanisme kunnen zijn, ofschoon de sociaal-economische consequenties van een dergelijke maatregel moeilijk voorspelbaar

zijn en onderwerp voor een aparte studie zouden moeten zijn.

Uit de bestudeerde voorbeelden mag evenwel worden afgeleid dat een besparing van 5 à 10% op het totale energieverbruik in deze sector mogelijk is. Dat komt overeen met 0,15 à 0,3% van het nationaal primair energieverbruik.

IX.7. Fermentatieprocessen

Als energie relatief duurder en schaarser wordt zou dit de volgende consequenties kunnen hebben voor de toepassing van fermentatieprocessen:

- Verschuiving van chemische naar fermentatieve productie en omgekeerd;
- Fermentatieve opwekking van energie uit anders teloorgaand afval.

Een verschuiving van de ene manier naar de andere kan optreden als de energiekosten per eenheid eindproduct bij de *nu* goedkoopste bereidingswijze hoger worden dan die van de alternatieve produktiewijze, vooropgesteld dat produktie op beiderlei wijze mogelijk is. Verschuiving naar synthetische lysineproductie zou op grond hiervan te verwachten zijn.

Bovendien zou verschuiving op kunnen treden indien de energiekosten per eenheid eindproduct dalen beneden de kosten van de alternatieve produktiewijze als gevolg van procesverbetering. Dit kan zich zeker voordoen in het geval van enzymen op dragers.

Een duidelijke verschuiving naar de fermentatieve bereiding is niet te zien. Fermentatie lijkt gereserveerd voor specialistische toepassing, voor bereiding van complexe produkten (zoals eiwitten uit aardolie) en voor speciale stappen in een synthese. Bij niet-complexe verbindingen is de concurrentie-positie reeds lang verdwenen. Opwekking van energie uit organisch afval door middel van fermentatie-processen zal in Nederland nauwelijks meer op kunnen leveren dan ca. 0,1% van het nationaal primair energieverbruik in 1985. Meer dan een zuiver plaatselijke betekenis kan aan deze fermentatieve methaanproductie feitelijk niet worden toegekend.

IX.8 Conclusies

De uit de studies van de werkgroep resulterende conclusies zijn samengevat in Tabel 30.

Tabel 30. Mogelijkheden voor besparingen op industrieel energieverbruik

Maatregel	Vóór	Tegen	Besparing 1985 (in % van het nationaal verbruik)	Besparing 2000
1. Olieraffinage				
– Verbeterde controle van de bedrijfsvoering, verbeterde warmte-winning, hoger fornuis-rendement, vermindering van de benodigde destil-latiewarmte	– Kan binnen de raffinade-rij worden gerealiseerd	– Hoge kapitaalsinves-tering (fl. 300 X 10 ⁶)	0,8%	Mogelijk 1-1½%
– Een studie maken over de wijze waarop de elektriciteitsopwekking technisch en organisato-risch het beste geïnte-greerd kan worden in raffinaderij en/of andere industriecomplexen	– Besparing op het geza-menlijk energieverbruik van de elektriciteits-opwekking en andere industrieprocessen – Minder afvalwarmte naar de omgeving	– Er kan geen residuale brandstof gebruikt worden – Betrouwbare gas-turbines voor hoge temperatuur moeten binnen enkele jaren beschikbaar komen – Alleen volledig uit-voerbaar voor nieuwe installaties – Wederkerige afhanke-lijkheid van elektrici-teitsopwekking en de raffinaderijoperatie	≤1%	2%
– Het gebruik van afval-warmte van raffinade-rijen en/of andere indus-trieën in woonge-bieden of broeikassen met behulp van warm water Daaraan voorafgaande zal de economie van het warmtetransport moeten worden bestudeerd	– Besparing op het geza-menlijk energieverbruik van woningverwarming en industrie – Minder afvalwarmte naar de omgeving – Verhoogde veiligheid bij woningverwarming	– Zware transportlei-dingen tussen indus-trie- en woongebieden – Slechts economisch haalbaar over niet te lange afstanden	≤0,5%	1%
– Uitgebreidere herver-werking van afgewerkte oliën (smeerolie e.d.) zou door een subsidie gestimuleerd moeten worden	– Minder milieubelasting – Kleine besparing ruwe olieverbruik	– Kostbaar verzamel- en herverwerkingsysteem	—	—

Maatregel	Vóór	Tegen	Besparing 1985 (in % van het nationaal verbruik)	Besparing 2000
— Toepassing van kernbrandstof of steenkool als raffinaderijbrandstof	— Zou het verbruik van olieprodukten als raffinaderijbrandstof drastisch beperken	— Kan gecompliceerde problemen inzake milieubescherming en veiligheid met zich brengen	—	nul of negatief
2. Ammoniaksynthese				
— Gebruik van gasturbines als aandrijfaggregaat voor compressoren	— Is thans in voorbereiding		0,2%	0,2%
— Ontwikkeling van katalysatoren die actief zijn bij lagere temperatuur (ca. 300°C)	— Bespaart op elektriciteit — Vermindert kapitaalsinvesteringen	— Mogelijkheid moet worden aangetoond door onderzoek	≤0,7%	0,7%
3. IJzer- en staalfabrikage				
— Verbetering warmtebenutting bestaande bedrijven	— Energiebesparing met als neveneffect enige verbetering t.a.v. het milieu	— Hoge investeringen; bij huidige energieprijzen onvoldoende rentabiliteit. (Wel worden nu reeds maatregelen genomen om deze investeringen t.z.t. mogelijk te maken)	0,2% (productieniveau 7,5 X 10 ⁶ ton staal)	kan 0,3% zijn, afhankelijk van productieniveau
— Vermindering olieinjectie in de hoogoven	— Verschuiving van olie (4,3 X 10 ⁹ J/ton staal) naar steenkool	— Bij huidige kolen- en olieprijsen is olieinjectie aantrekkelijk	—	—
— Vormcokesproces toepassen	— Inzetmogelijkheid van vele typen kolen t.o.v. de beperkte mogelijkheden nu — Milieuverbetering	— Nog in ontwikkelingsstadium	—	—
— Zo volledig mogelijk geïntegreerde energiehuishouding	— Inzet van steenkool met nog enige elektriciteit, geen olie- en gasaankoop	— Komt alleen in aanmerking voor nieuwe vestigingen	0,3% (productieniveau 2,5 X 10 ⁶ ton staal erbij)	0,6% (productieniveau 5 X 10 ⁶ ton staal erbij)
4. Verpakkingindustrie				
— Studie van mogelijkheden van efficiënter gebruik en substitutie van verpakkingsmaterialen	— Pro's en contra's thans moeilijk te overzien. Vele factoren van technische en sociaal-economische aard spelen een rol		Besparingen kunnen aanzienlijk zijn (in de orde van 0,1% of enkele tienden van procenten)	
5. Aluminiumbereiding				
— Toepassing nieuwe energiebesparende processen	— Aanzienlijke besparingen op elektriciteit mogelijk	— Bevindt zich nog in laboratoriumstadium	≤0,1%	Kan meer worden, afhankelijk van productieniveau en resultaten procesontwikkeling
— Bevordering hergebruik van aluminium	— Gunstig voor zowel energie- en grondstoffenpositie als het milieu	— Vereist grote inspanning en waarschijnlijk hoge kosten	≤0,3%	Kan oplopen tot ca. 0,5%
6. Voedings- en genotmiddelen				
— Bevordering energie- en materiaalbewustheid bij producent en consument, bijv. door weloverwogen hantering prijsmechanisme	— Moeilijk te overzien, ligt sterk in het sociaal-economische vlak Verdere studie nodig		≤0,2%	0,3%, mogelijk meer
7. Fermentatie-industrie				
— Zoeken naar substitutiemogelijkheden tussen synthetisch-chemische en fermentatieprocessen	— Technische doorbraken zijn mogelijk (bijv. enzymen op dragers)	— Aard der produkten geeft weinig reden tot optimisme	Besparingen zullen gering blijven	

Maatregel	Vóór	Tegen	Besparing 1985 (in % van het nationaal verbruik)	Besparing 2000
— Winnen van gas uit organisch afval via fermentatie	— Bijdrage aan energievoorziening uit anders verloren afval	— Slechts plaatselijke betekenis	0-0,1%	Onzeker
8. Overige industrie				
— Bevordering energie- en materiaalbewustheid bij producent en consument, bijv. door weloverwogen hantering prijsmechanisme	— Moeilijk te overzien, ligt sterk in het sociaal-economisch vlak Verdere studie nodig		≤1,5%?	Kan misschien verder oplopen
Totaal maximale mogelijkheden			6%	

X. Samenstelling van de werkgroep

De werkgroep die Hoofdstuk 3 tot stand heeft gebracht, was als volgt samengesteld:

dr. J. de Flines	Gist-Brocades
ir. A.L. van Kleef (secretaris)	Shell Internationale Petroleum Mij
ir. C. Lely	Shell Internationale Petroleum Mij
dr. ir. B.G. Linsen	Unilever Research Laboratorium
dr. ir. L.J. Revallier	Centraal Laboratorium DSM
ir. G.W. van Stein Callenfels	Hoogovens IJmuiden
dr. ir. K.R. Westerterp	Philips Duphar
ir. J.A. Over	Stichting Toekomstbeeld der Techniek

Voorts werd een bijdrage gevraagd en verkregen van:

dr. ir. J.W.M. Steeman	Centraal Laboratorium DSM
ir. S. van der Weele	Gist Brocades
ir. J. van Weeren	Hoogovens IJmuiden

XI. Literatuur

- [1] Zie Polytechnisch Tijdschrift, ed. Procestechniek, 1966 p. 113, 161; 1967 p. 119, 554, 595; 1970 p. 848; 1972 p. 367.
- [2] Centraal Bureau voor de Statistiek. Publikatie: De Nederlandse energiehuishouding, No. 4, 1972.
- [3] The petroleum handbook. Shell International Petroleum Co. Ltd., London, 1966.
- [4] Persoonlijke mededeling (Shell).
- [5] Centraal Bureau voor de Statistiek, mededeling van de afdeling Energiestatistieken.
- [6] O.J. Quartulli, D. Wagener, Technologie der Ammoniaksynthese in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Erdöl und Kohle, 26 (1973), No. 4, 192 - 8.
- [7] International symposium on the economics of ammonia production and distribution. London, 14/15 September 1970. The Fertiliser Society.
- [8] S.D. Caplow, S.A. Bresler, Economics of gas turbine drives. Chemical Engineering, 74 (1967), No. 7, 103 - 10.
- [9] F.P. Jacques, Comparaisons internationales des industries de l'emballage. Emballages, 39 (1969), No. 269, 178 - 97.
- [10] P.J. Bakker, T. Frieling, Milieu-aspecten van kunststoffen. Plastica, 25 (1972), No. 12, 572 - 9.
- [11] W.P. Fornerod, Het ontwikkelen van kwantitatieve beoordelingsmaatstaven van de milieubelasting van verpakking. Instituut voor Verpakking TNO, Rapport No. 14/73 (1973).
- [12] Macropak, 10e Salon de l'emballage aux Pays-Bas. Emballages, 42 (1972), No. 293, 158 - 85.
- [13] Centraal Bureau voor de Statistiek. Produktiestatistiek voor de plaatverwerkende industrie (1970).
- [14] Glass products in Belgium. Marketing in Europe, December 1969. No. 85.
- [15] Energieproblemen der chemischen Industrie. Chem. Ind. 19 (1967), No. 4, 180 - 3.
- [16] The use of gas in the glass industry. United Nations, Paris, 1967.
- [17] H. Makino and R.S. Berry, Consumer Goods - A thermodynamic analysis of packaging, transport and storage. Illinois Institute for Environmental Quality, juli 1973.
- [18] Centraal Bureau voor de Statistiek. Produktiestatistiek voor de papier- en kartonindustrie (1970).
- [19] Centraal Bureau voor de Statistiek. Produktiestatistiek voor de papierwaren-, golfkarton- en kartonnage-industrie (1970).
- [20] Inlichting: ir. D. Valstar, Philips Golfkartonfabriek, Eindhoven.
- [21] G. Schuur, Het voor en tegen van de polyetheen-huisvuilzak. Verpakking, 24 (1972), No. 7, 424 - 30.
- [22] J. Fidler, Aluminium at half the price — if Toth's idea will scale up. The Engineer, 237 (1973), No. 6125/6, 38 - 40.
- [23] J.H. van Stuijvenberg (red.), Honderd jaar margarine. Nijhoff, 's-Gravenhage, 1969.

Hoofdstuk 4. Besparingen in de elektriciteitsopwekking

door de werkgroep **Opwekking Elektriciteit**

I. Inleiding

Zoals in Hoofdstuk 2 werd aangegeven, valt het nationaal energieverbruik uiteen in twee hoofdcategorieën: het verbruik in de industrie en in de energiebedrijven enerzijds en het verbruik door eindverbruikers (verwarming, verlichting en aandrijving) anderzijds. In Hoofdstuk 3 werd het industrieel verbruik bestudeerd. In dit hoofdstuk zal de elektriciteitsopwekking aan een nadere beschouwing worden onderworpen. Samen met de industrie gebruikt deze activiteit immers het leeuwedeel van de primaire energie die niet voor rechtstreeks eindverbruik is bestemd. Bovendien neemt het procentuele aandeel, wat de elektriciteitsopwekking betreft, nog voortdurend toe (zie Hoofdstuk 2).

Elektriciteitsopwekking is een vorm van energieverbruik met een geheel eigen karakter. Er moeten grote investeringen worden gedaan, die over perioden van tientallen jaren worden afgeschreven. Besparingsmogelijkheden moeten daarom steeds worden gezien als onderdeel van een uitgebreid en ingewikkeld systeem. Zij kunnen slechts geleidelijk worden gerealiseerd en hun effect hangt mede af van vele andere factoren, zoals: het patroon van de afname van elektriciteit en, eventueel, de afvalwarmte; de mogelijkheden bij de keuze van de vestigingsplaats van centrales; de mogelijkheden voor toepassing van de verschillende brandstoffen; de onderlinge afstemming van verschillende typen opwekkingseenheden en het tempo waarin het elektriciteitsverbruik zal blijven groeien. Om deze redenen is in dit hoofdstuk een enigszins andere benadering gekozen van het probleem van de energiebesparing. Een evaluatie, waarbij wordt gestreefd naar een kwantificering van de invloed die bepaalde besparingsmogelijkheden kunnen hebben op het nationaal energieverbruik in 1985, zou wel zeer arbitraire cijfers hebben opgeleverd. Daarom wordt de elektriciteitsopwekking hier gezien als een systeem waarvan het rendement geleidelijk verder kan worden opgevoerd (wat trouwens reeds voortdurend plaatsvindt) door toepassing van verschillende maatregelen, enkele waarvan hieronder worden besproken. Daarbij is gepoogd de diverse mogelijkheden te bezien in hun onderlinge samenhang, die mede wordt bepaald door hun specifieke beperkingen.

Achtereenvolgens worden in dit hoofdstuk de methoden van elektriciteitsopwekking behandeld die thans in Nederland nog zelden of nooit worden toegepast, hoe het rendement van de opwekking op basis van fossiele brandstoffen kan worden verhoogd, welke mogelijkheden kernsplijting biedt, wat de perspectieven zijn van brandstofcellen en welke mogelijkheden er bestaan voor het gecombineerde gebruik van elektriciteit en warmte. Het hoofdstuk wordt besloten met een lijst van samenvattende conclusies die uit de beschouwingen kunnen worden afgeleid.

De aandacht wordt erop gevestigd, dat met de boven-

genoemde onderwerpen het terrein van de elektriciteitsopwekking geenszins volledig is behandeld, wat in dit beperkte kader trouwens ook niet mogelijk was. Evenmin mag men uit de meer kwalitatieve benadering afleiden dat de bereikbare besparingen gering zouden zijn. In 1985 zal naar verwachting rond 30% van het binnenlands primair energieverbruik nodig zijn voor elektriciteitsopwekking, met een omzettingsrendement van ca. 37% (Hoofdstuk 2, Tabel 9). Zou men met diverse maatregelen kunnen bereiken dat dit rendement ca. 41% bedroeg, dan zou dit reeds 3% op het nationale verbruik besparen. Zulks geheel afgezien van de mogelijkheden van het gebruik van steenkool (die minder schaars is dan olie of aardgas) of zelfs van niet-fossiele primaire energie, van afvalwarmte, of van een doelmatiger benutting van elektrische energie (zie hiervoor Hoofdstuk 5).

II. De elektriciteitsvoorziening in de toekomst

door **prof. ir. J. J. C. van Lier**

II.1. Inleiding

Van de vele vormen waarin energie ter beschikking van de verbruiker kan komen, is elektrische energie een zeer praktische vorm, daar:

- elektrische energie op eenvoudige wijze kan worden vervoerd, zodat de produktie ervan op weinige plaatsen in het land kan worden geconcentreerd;
- de distributie aan en de verrekening met de verbruiker weinig complicaties met zich meebrengen;
- elektrische energie door de verbruiker op zeer eenvoudige wijze naar elk gewenst verbruikspunt kan worden geleid;
- elektrische energie vrij gemakkelijk, met weinig risico en met een hoog rendement, in elke andere gewenste energiesoort kan worden omgezet;
- het verbruik ervan ter plaatse geen milieubelasting met zich meebrengt;
- voor bepaalde toepassingen (bijv. telecommunicatie) geen andere energiesoort kan worden gebruikt.

Minder praktische kanten van de elektrische energie zijn o.a.:

- elektrische energie komt niet in een bruikbare vorm in de natuur voor en moet daarom uit wel in de natuur aanwezige primaire energiedragers worden verkregen;
- elektrische energie is moeilijk op grote schaal op te slaan, zodat het tijdstip van de produktie moet samenvallen¹⁾ met dat van het verbruik.

¹⁾ Indien een geschikte accumulator kan worden ontwikkeld, zal vermoedelijk een groot deel van het wegverkeer omschakelen op elektrische aandrijving. Dit zou dan leiden tot een sterke toename van het elektriciteitsverbruik.

In het algemeen kan evenwel worden gesteld dat de praktische voordelen overwegen. Mede door de steeds verder voortschrijdende mechanisering in huishouding en bedrijf, kan daarom worden verwacht dat de vraag naar elektrische energie — ook procentueel — voorlopig zal blijven toenemen. In de Hoofdstukken 1 en 2 van deze publikatie werd er reeds op gewezen, dat de wereldvoorraad van de tot nu toe op grote schaal gebruikte primaire energiedragers beperkt is. Daarom zal de elektriciteitsproducent moeten blijven streven naar zo gering mogelijke verliezen bij het omzetten van primaire energiedragers in elektriciteit en zal de elektriciteitsverbruiker moeten gaan streven naar een zo efficiënt mogelijk gebruik van de hem ter beschikking gestelde elektrische energie.

11.2. Welke primaire energie?

De primaire energie die voor elektriciteitsproductie in aanmerking komt, is in twee groepen te verdelen:

a. De energie die door de zon of door het krachterspel tussen aarde en maan aan de aarde wordt toegevoerd en hier direct kan worden gebruikt. De belangrijkste energiesoorten uit deze groep zijn:

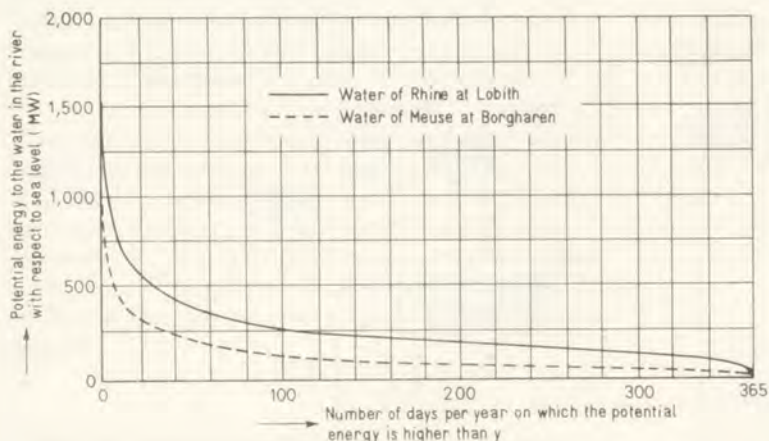
- de potentiële energie van het water in de hydrologische kringloop¹⁾;
- de potentiële en kinetische energie van het zeewater als gevolg van de getijden;
- de kinetische energie van de wind;
- zonnestraling.

b. De energie die door zonnestraling — via organismen — in de loop van tientallen miljoenen jaren in de aardbodem is opgeslagen, alsmede de energie die bij het ontstaan van de aarde in de aardkorst werd gevormd.

De belangrijkste energiesoorten van deze groep zijn:

- de chemische energie²⁾ van fossiele brandstoffen;
- de kernenergie^{2) 3)};
- de geothermische energie⁴⁾.

De energie van de eerste groep is te allen tijde en in onbeperkte hoeveelheden beschikbaar, zulks in tegenstelling tot de energie uit de tweede groep, waar wordt geput uit een voorraad die van nature beperkt is.⁵⁾



Figuur 1. Cumulatieve frequentieverdeling van de in de rivieren Maas en Rijn aanwezige potentiële energie.

Dat tot nu toe voornamelijk energie uit de beperkte voorraden van de tweede groep wordt gebruikt, komt omdat de fossiele brandstoffen steenkool, aardolie en aardgas een zeer grote concentratie van energie in een gering volume bezitten en tot voor kort betrekkelijk gemakkelijk en goedkoop waren te winnen. Ofschoon dit reeds in andere rapporten uitvoerig is gedaan [1, 2], zal onderstaand nogmaals in het kort worden ingegaan op de mogelijke bruikbaarheid van primaire energie uit de eerste groep voor de elektriciteitsopwekking in Nederland.

Potentiële energie uit de hydrologische kringloop

In Nederland wordt het mogelijke gebruik van de potentiële energie van het water beperkt door het — zeer geringe — verval van onze rivieren. De met dit geringe verval op te wekken elektrische energie zou slechts een uiterst klein deel van de totale behoefte kunnen dekken (zie Figuur 1). Bovendien vormen waterkrachtcentrales grote obstakels voor de zo belangrijke binnenvaart op de grote rivieren. Op een mogelijke bijdrage van waterkrachtcentrales aan de elektriciteitsopwekking in Nederland hoeft dus niet te worden gerekend.

Getijde-energie

Voor een getijdecentrale van redelijk vermogen is een groot estuarium en een groot getijdeverschil nodig [3]. Er wordt wel gedacht aan de mogelijkheid de Oosterschelde zodanig af te sluiten dat een getijdecentrale in

¹⁾ De hydrologische kringloop van het water bestaat uit verdamping op zee, neerslag op het land en de vorming van rivieren die uiteindelijk in de zee uitmonden.

²⁾ Strikt genomen, zijn chemische energie en kernenergie eigenlijk geen soorten van energie, maar een naam voor een energiestroom die bij een chemische reactie of een kernreactie vrijkomt. Of de energie in deze stroom aanwezig is in de vorm van arbeid, warmte of elektrische energie, hangt af van de reagerende stoffen en de aard van het proces.

³⁾ Kernenergie is de energie die vrijkomt bij de splijting, c.q. bij de samensmelting (fusie) van atoomkernen uit (al dan niet voorbewerkte) mineralen.

⁴⁾ Geothermische energie wordt ontleend aan de natuurlijke warmte van de aardkorst.

⁵⁾ Deze natuurlijke beperktheid geldt niet zozeer voor de geothermische energie in het algemeen, maar doet zich vaak wel plaatselijk voor.

de dam kan worden opgenomen met een vermogen van 50 MW [4]. Een getijdencentrale heeft het nadeel dat hij niet continu elektrische energie kan leveren¹⁾, zodat een gelijk vermogen moet zijn opgesteld in een normale centrale.

Windenergie

Vooral direct na de Tweede Wereldoorlog zijn in het buitenland diverse proefinstallaties gebouwd [5-7]. Aangezien lucht een geringe dichtheid bezit en de theoretische maximale waarde van het rendement

$$\eta = \frac{P}{\frac{1}{2} (\rho A c) c^2}$$

(waarin A = door de rotor beschreven oppervlakte in m²; ρ = dichtheid van de lucht in kg/m³; c = windsnelheid in m/s; en P = vermogen van de windstroom in W) ca. 60% bedraagt [8] hebben deze installaties zeer grote afmetingen in verhouding tot het opgewekte vermogen [9]²⁾. Dit betekent dat voor het verkrijgen van een redelijke hoeveelheid elektrische energie een zeer groot aantal windkrachtcentrales moet worden opgesteld³⁾. Zolang geen goede en eenvoudige opslag van elektrische energie is ontwikkeld, zouden de grote schommelingen in de productie moeten worden opgevangen door centrales van een andere soort.

¹⁾ Bij dood tij (4 X per etmaal) is helemaal geen energie beschikbaar, en gedurende enige tijd daarvoor en daarna is de beschikbare energie gering.

²⁾ Wanneer het werkelijke rendement 70% van het theoretisch haalbare bedraagt (en dat is zeer hoog), is het op te wekken vermogen te bepalen met $P = 1,97 \times 10^{-4} D^2 c^3$, waarin D = rotordiameter in m en c = windsnelheid in m/s.

De molen De Traanroeier op Tessel, speciaal voor elektriciteitsopwekking herbouwd, levert met wieken van 22,5 m een vermogen van 30 kW. Bij storm zowel als bij zwakke wind kan geen elektriciteit worden opgewekt. In de Verenigde Staten is in de jaren veertig een windmolen gebouwd voor een vermogen van 1000 kW. Deze is in een storm vernield en niet meer herbouwd [6].

³⁾ Voor een vermogen als dat van één moderne met gas gestookte elektriciteitscentrale (600 MW) zijn reeds 20.000 windmolens als De Traanroeier nodig. Voor het behoud van een gunstige luchtstroom moeten deze op een redelijke afstand van elkaar staan. Hoewel daar geen exacte gegevens over bekend zijn, kan veilig worden aangenomen dat voor dit molentype die afstand minstens 100 m moet bedragen. Er is dan reeds een oppervlakte van 200 km² mee gemoeid. Opgemerkt moet echter worden dat De Traanroeier geen voorbeeld is van een moderne, technisch optimale windmolenconstructie.

Windkrachtcentrales kunnen voor Nederland plaatselijk belangrijk zijn. Bij een bestudering van hun mogelijkheden dient zeker de windmolen met verticale as in de beschouwing te worden betrokken, aangezien dat type een betrekkelijk hoog rendement kan halen en waarschijnlijk goedkoper zal zijn dan de orthodoxe types. Het nadeel van dit type is echter dat het niet zelfstartend is. Windmolens zullen geen grote rol gaan spelen bij de elektriciteitsopwekking op grote schaal.

Zonne-energie¹⁾

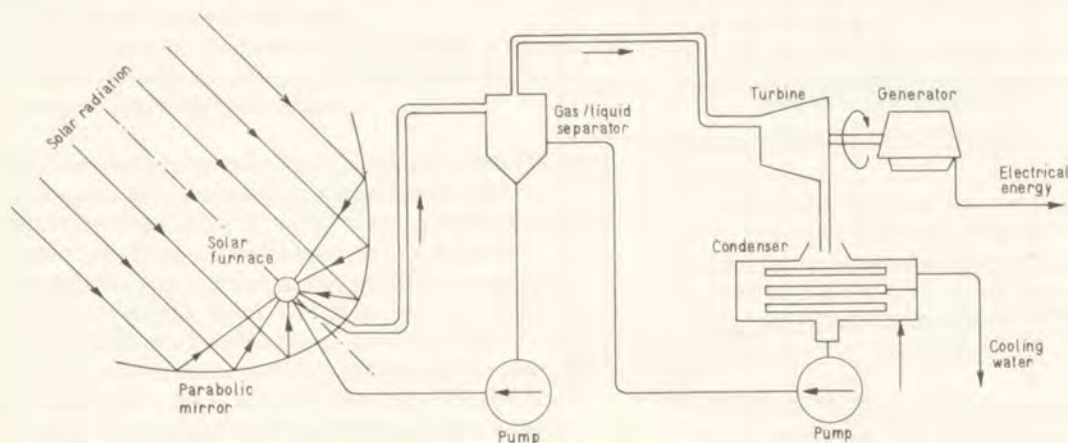
De stralingsenergie van de zon kan in beginsel op twee wijzen in elektrische energie worden omgezet, nl.:

- indirect, door de stralingsenergie om te zetten in warmte en met deze warmte elektrische energie op te wekken;
- direct, door de stralingsenergie met behulp van foto-elektrische cellen in elektrische energie om te zetten.

De indirecte omzetting. De stralingsenergie van de zon wordt opgevangen met collectors en als warmte toegevoerd aan een medium²⁾. Het door de collector stromende medium zal door deze warmtetoevoer verdampen. Dit gas laat men expanderen in een turbine (die daardoor gaat draaien), waarna men het medium laat condenseren en met een pomp in de begintoestand terugbrengt. Het medium heeft nu een kringloop beschreven en hierbij is een deel van de warmte in arbeid omgezet [10]. Zoals later in dit hoofdstuk zal blijken, is het rendement van dit kringproces sterk afhankelijk van de temperatuur waarbij het medium verdampt. Bij een vlakke collector dient het circulerende medium tevens als koelmiddel voor de collector. Daardoor is de verdampingstemperatuur niet hoog (80 à 120°C) en het rendement van het kringproces laag (5 à 20%) [10-12]. Daarom overweegt men thans, voor grote zonne-energiecentrales de zonnestraling te concentreren met gebruikmaking van een parabolische spiegel (zie Figuur 2) of Fresnel-lenzen. In beide gevallen kan het verdampen bij een aanzienlijk hogere temperatuur plaatsvinden, waardoor het rendement van het kringproces aanmerkelijk wordt verbeterd.

¹⁾ Zie ook de Hoofdstukken 1 (par. III.3) en 5 (par. IV).

²⁾ Bij reeds bestaande kleine installaties wordt bijv. gebruik gemaakt van monochloorbenzeen [11].



Figuur 2. Elektriciteit uit zonne-energie via een parabolische spiegel.

Een veel hogere werktemperatuur — en dus een hoger rendement en geringer ruimtebeslag — kan worden bereikt door toepassing van deklagen met een hoge mate van absorptie van zonnestraling en een geringe afgifte in het infraroodgedeelte van het spectrum. De warmte wordt — bij een temperatuur van 500°C — opgeslagen in gesmolten zouten, zodat het gehele etmaal energie kan worden afgegeven [13].

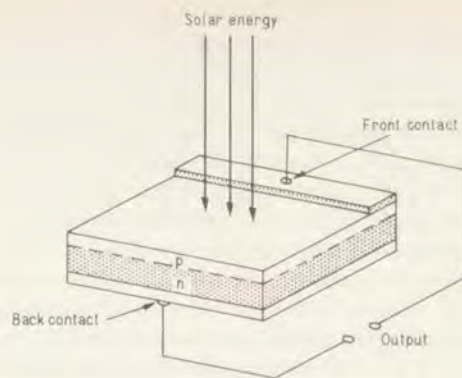
Het totale rendement van een zonne-energiecentrale wordt bepaald door het produkt van het rendement van de collector¹⁾ en het rendement van het kringproces. Reeds in werking zijnde kleine installaties met vlakke collectors hebben een collectorrendement van ca. 40% [10-11]. Praktijkcijfers over rendementen van parabolische collectors met inbegrip van een warmte-oven zijn in de literatuur nog niet vermeld. Daar vlakke collectors ook in staat zijn diffuus zonlicht te verwerken, kunnen zonnecentrales met vlakke collectors, ondanks hun geringe rendement, toch wel aantrekkelijk zijn voor gebieden met lange perioden zonder zonneschijn, zoals Nederland.

Bij een stralingsdichtheid van 500 W/m² (in Nederland alleen gedurende midzomer bereikbaar met de zon in het hoogste punt), een collectorrendement van 40% en een rendement van het kringproces van 20%, dus een totaal rendement van de centrale van 8%, is een collectoroppervlak nodig van 25 m²/kW. Voor een kleine centrale van 200 MW zou dus een collectoroppervlak van 5 km² nodig zijn. Het zou te ver voeren hier op de nog op te lossen technische, economische en planologische problemen in te gaan. Optimistische onderzoekers spreken de verwachting uit dat zonne-energiecentrales van redelijk groot vermogen reeds in 1985 economisch haalbaar zullen zijn [14].

De methode van de directe omzetting, waarbij geen stromende media en intermediaire energie-omzettingen nodig zijn, lijkt vooral in aanmerking te kunnen komen voor toepassing in Nederland.

De directe omzetting. Bij de directe omzetting [15-17] wordt een deel van het op de fotocel vallende licht door het oppervlak teruggekaatst. Door speciale deklagen kan dat verlies worden teruggebracht tot ca. 6% [16]. Het niet-teruggekaatste licht wordt geabsorbeerd door de in de cel aanwezige halfgeleiders. Volgens de natuurwetten die het proces in de halfgeleiders beheersen, kan slechts een deel van het geabsorbeerde licht in elektrische energie worden omgezet. Deze hoeveelheid hangt af van de samenstelling van het licht en van het halfgeleidermateriaal. Verder treden er in de cel nog verliezen op omdat het niet-omgezette licht en een deel van de verkregen elektrische energie in warmte worden omgezet. Het hoogste rendement wordt verkregen met een cadmium-telluriumcel (ca. 23% bij 0°C). De foto-elektrische cel die commercieel de beste vooruitzichten biedt, is de siliciumcel (zie Figuur 3). Het theoretisch haalbare rendement bedraagt ca. 20%. Bij praktische toepassingen is 12% bereikt [15]. Bij verdere verfijning zal een iets hoger rendement mogelijk worden.

¹⁾ Het collectorrendement is de verhouding van de door het kringproces opgenomen warmte tot de opgevangen zonne-energie.



Figuur 3. De silicium-zonnecel.

Aangezien het rendement van een cel sterk afneemt bij hogere temperatuur, is goede koeling een eerste vereiste.

Systemen met foto-elektrische cellen zijn momenteel nog uitermate duur en de levensduur is beperkt. Met de nieuwe technieken die thans worden ontwikkeld, kunnen deze nadelen naar verwachting sterk worden vermindert¹⁾.

Welke van beide methoden — de directe of de indirecte omzetting — uiteindelijk voor gebruik op grote schaal het meest geschikt is, valt nog niet te voorspellen. Aan beider ontwikkeling wordt intensief gewerkt.

Wil men in de elektriciteitsbehoefte van een groter geheel uitsluitend voorzien met een zonne-energiecentrale, dan zal ook het probleem van de opslag van grote hoeveelheden elektrische energie moeten worden opgelost. De opslag- en afgifteverliezen zullen daarbij tot het uiterste moeten worden beperkt, aangezien juist die bepalend zijn voor de grootte van het vereiste collector- of cellenoppervlak. Tegenover de genoemde problemen staan evenwel de grote voordelen dat er geen gebruik hoeft te worden gemaakt van onze eindige voorraad fossiele energiedragers en dat er vrijwel geen luchtverontreiniging bij optreedt. Ook Nederland zal zonne-energie kunnen gebruiken, al zal zeker tot 1985 en misschien tot 2000 in Nederland nog niet mogen worden gerekend op toepassing op grote schaal.

Geothermische energie

Door radioactieve processen in het inwendige van de aarde wordt warmte opgewekt, die door de aardkorst heen naar buiten wordt afgevoerd. Naarmate men dieper in de aardkorst doordringt, wordt de temperatuur hoger (gemiddeld 3°C per 100 m). In beginsel zijn er twee manieren om deze thermische energie aan de aardkorst te onttrekken, nl. de 'natte' en de 'droge' techniek.

De 'natte' geothermie. In vulkanische gebieden komen vrij dicht onder de oppervlakte reeds hoge temperaturen

¹⁾ De Solar Power Corporation, Braintree, Mass., brengt een zonnecelmoduul in de handel van 5 cellen met een energielevering van 1.0 W. De kosten bij 1000 stuks bedragen thans \$ 30 per stuk. De afmetingen zijn 344 X 73 X 7 mm³. Voor een kleine centrale van 200 MW zou — bij gebruik van deze commerciële cellen — een moduuloppervlak van 5 km² nodig zijn [18].

voor. Komt in zo'n gebied het grondwater in aanraking met dit warme gesteente, dan wordt het verhit of wordt er zelfs stoom gevormd. Slaagt men erin dat hete water of die stoom door boringen aan de oppervlakte te brengen, dan kan de warmte daaruit worden gebruikt [19]. De temperatuur is meestal niet erg hoog (n.l. minder dan 200°C), zodat deze warmte niet economisch over grote afstanden kan worden vervoerd. Daar vulkanische gebieden meestal dunbevolkt zijn, kan de thermische energie het beste aan de bron worden omgezet in elektrische energie alvorens te worden vervoerd naar de verbruikers. Door de betrekkelijk lage temperatuur is het rendement van de omzetting gering (ca. 20%). Dit soort geothermische centrales is gebouwd in Italië, Nieuw-Zeeland en de Verenigde Staten. Gebleken is dat de levensduur van een boring beperkt is (bij Larderello in Italië 20 à 25 jaar [19]) en dat de produktie tijdens de levensduur langzaam afneemt. Deze bron is dus aan beperkingen onderhevig.

De 'droge' geothermie. Wanneer in niet-vulkanische gebieden maar diep genoeg wordt geboord, dan kunnen in het diepe, vaste gesteente ook temperaturen van 200°C en hoger worden bereikt. Door hydraulische verbrekking of door een explosie dicht bij de bodem van het boorgat wordt de omringende rots gebroken, zodat een zeer groot verwarmend oppervlak wordt verkregen. Pompt men nu water door een pijp in de kern van het boorgat, dan kan deze warmte aan het gesteente worden onttrokken. De eerste proeven hebben reeds plaatsgevonden [20]. Ook hier heeft een boring een beperkte levensduur, is het rendement van het kringproces laag en is er veel energie nodig voor het verpompen van het water. Het is dan ook de vraag wat de waarde van deze methode voor Nederland is. De 'natte' geothermie kan hier zeker niet worden toegepast.

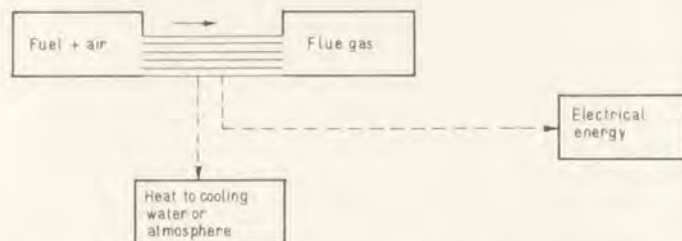
Uit het voorgaande blijkt dat in Nederland de mogelijkheid voor gebruik van energie van de eerste groep beperkt is en dat alleen de zonnestralingenergie in zulke grote hoeveelheden kan worden gewonnen, dat toepassing op grote schaal te overwegen is. Daar het echter zeker wel tot het einde van deze eeuw zal duren voordat op grote schaal zonnecentrales kunnen worden gebouwd, zal Nederland tot die tijd nog geheel zijn aangewezen op de primaire energie van de tweede groep energiedragers, n.l. de chemische verbrandingsenergie van steenkool, aardolie en aardgas en de kernsplijtingsenergie. Aangezien de voorraden van deze brandstoffen beperkt zijn, zal het dringend nodig worden de verliezen bij het gebruik van deze energie te beperken. Dit betekent een geheel andere doelstelling bij het ontwerpen van een nieuwe elektriciteitscentrale. Tot nu toe werd er gestreefd naar een zo laag mogelijke kWh-prijs, hetgeen inhield dat de extra kapitaalslasten die nodig zijn voor het verhogen van het rendement geringer moesten zijn dan de besparing aan kosten ten gevolge van een lager verbruik van primaire energiedragers. Het zo klein mogelijk maken van de conversieverliezen¹⁾ zal onherroepelijk leiden tot een hogere kWh-prijs.

¹⁾ Conversieverlies is de aanduiding van de energieverliezen die optreden bij het omzetten van primaire energie in elektrische energie.

Om een indruk te krijgen van de mogelijkheden ter verdere beperking van de conversieverliezen worden onderstaand in het kort de natuurwetten behandeld, die zulke verliezen bepalen.

II.3. Minimaal verlies bij energie-omzetting [20]

Energieomzettingen zijn gebonden aan bepaalde natuurwetten: de eerste en de tweede hoofdwet van de thermodynamica. Deze wetten geven aan welke omzettingen mogelijk zijn en welke niet. Bij het gebruik van fossiele brandstoffen ter verkrijging van elektrische energie laat men de brandstof reageren met zuurstof uit de lucht. De warmte die hierbij vrijkomt en niet wordt omgezet in elektrische energie, wordt afgevoerd naar het koelwater en de omringende lucht. We hebben hier te maken met een proces waarbij de fossiele brandstof en de lucht tezamen overgaan in een nieuwe evenwichtstoestand (het rookgas) onder gebruikmaking van slechts een enkel warmereservoir (zie Figuur 4). Van zo'n proces zeggen genoemde natuurwetten dat de verkrijgbare hoeveelheid elektrische energie maximaal is als het proces omkeerbaar is.¹⁾



Figuur 4. Principe van de opwekking van elektrische energie uit fossiele brandstof.

Wat gebeurt er nu eigenlijk bij de chemische reactie tussen brandstof en zuurstof? Bij zo'n reactie staat het brandstofmolecuul elektronen af, die worden opgenomen door het zuurstofmolecuul. Het brandstofmolecuul wordt daardoor positief geladen en het zuurstofmolecuul negatief. Hierdoor ontstaat een elektrische kracht tussen de moleculen, die zorgt voor een hechte binding. Het overspringen van elektronen betekent vervoer van elektrische lading, m.a.w. het beschikbaar komen van elektrische energie [20, deel III]. Slaagt men er in het proces waarbij de brandstof elektronen afstaat en de zuurstof elektronen opneemt, in twee van elkaar gescheiden systemen te doen plaatsvinden en wordt tussen beide systemen een stroomdraad aangebracht, dan kan de elektronenstroom door deze draad gaan en de vrijkomende elektrische energie afstaan. Om de chemische reactie te voltooien, moet bovendien tussen beide systemen een geleider worden aangebracht die geen elektronen maar wel ionen

¹⁾ Een omkeerbaar proces is een proces dat zodanig verloopt, dat na afloop alle systemen die er aan hebben deelgenomen in hun begintoestand kunnen worden teruggebracht. Is dat met slechts één systeem niet het geval, dan spreekt men van een niet-omkeerbaar proces. Alle technische processen zijn — bijv. door wrijving of door een temperatuurverschil — niet-omkeerbare processen. Is de wrijving praktisch nihil of het temperatuurverschil bijna nul, dan benadert een dergelijk niet-omkeerbaar proces het karakter van een omkeerbaar proces.

doorlaat, zodat de gevormde brandstof- en zuurstof-ionen zich met elkaar kunnen verbinden. Geschiedt dit gehele proces zonder verlies, dan is er sprake van een omkeerbaar verbrandingsproces. Toestellen waarin deze soort verbranding kan worden verwezenlijkt, heten brandstofcellen.

Aangezien dit de enige toestellen zijn waarmee een omkeerbaar verbrandingsproces kan worden benaderd, ligt het voor de hand ze te gebruiken bij het streven naar een optimaal brandstofverbruik bij de elektriciteits-opwekking. De brandstofcel zal in deel III van dit hoofdstuk aan een nadere beschouwing worden onderworpen.

Het overspringen van elektronen van een brandstofmolecuul naar een zuurstofmolecuul resulteert bij het normale verbrandingsproces in warmte, die door het rookgas wordt opgenomen. Dit is dus in sterke mate een niet-omkeerbaar proces.

Wil men het verlies bij het verbranden van fossiele brandstoffen tot een minimum beperken, dan zal het verbrandingsproces zodanig moeten worden opgezet dat het zoveel mogelijk het karakter van een omkeerbaar proces benadert. Nu is uit de tweede hoofdwet van de thermodynamica af te leiden dat uit een warmtestroom alleen dan elektrische energie kan worden verkregen als een deel van deze warmte wordt afgevoerd naar een warmtereservoir met lagere temperatuur. De maximaal verkrijgbare hoeveelheid elektrische energie E die uit een warmtestroom Q kan worden verkregen, kan dan in de volgende formule worden weergegeven:

$$E = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q$$

waarin:

- E = per tijdseenheid verkrijgbare maximum hoeveelheid elektrische energie (in kW);
- T = temperatuur (in Kelvin) van de warmtestroom;
- T_0 = temperatuur (in Kelvin) van het warmtereservoir waarnaar de niet in elektrische energie omgezette warmte moet worden afgevoerd;
- Q = hoeveelheid warmte (in kJ/s).

Uit de tweede hoofdwet en uit deze vergelijking zijn enige zeer belangrijke conclusies te trekken:

- a. de warmtestroom waaruit de elektrische energie moet worden verkregen, moet een zo hoog mogelijke temperatuur hebben;
- b. het temperatuurverschil bij het elektriciteits-opwekkingsproces moet zo gering mogelijk zijn;
- c. de restwarmte die aan de omgeving moet worden

afgegaan, moet een temperatuur hebben die praktisch gelijk is aan de omgevingstemperatuur.¹⁾

Hoewel dit niet geheel juist is, kan men bij het beoordelen van het proces in een centrale de maximaal verkrijgbare hoeveelheid elektrische energie vergelijken met de verbrandingswaarde van de brandstof. Dit is weergegeven in de formule

$$\eta_{th} = \frac{E}{mH}$$

waarin:

- η_{th} = het thermisch rendement van het elektriciteits-opwekkingsproces;
- E = maximaal verkrijgbare hoeveelheid elektrische energie (in kWh);
- m = hoeveelheid brandstof (in kg);
- H = verbrandingswaarde (in kWh) van 1 kg brandstof.

II.4. Productie van elektrische energie met behulp van fossiele brandstoffen

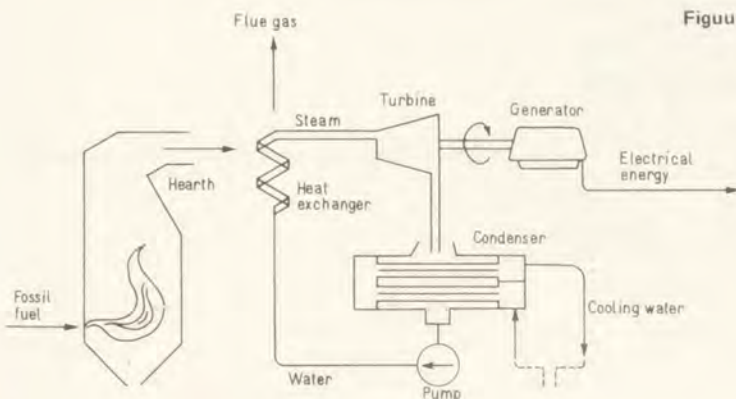
Het waterkringproces

De gebruikelijke methode voor de omzetting van warmte in elektrische energie is die waarbij water een kringproces doorloopt. Bij dit waterkringproces neemt het water in de stoomketel warmte van de rookgassen op, waarbij het verdampt en wordt oververhit. De verkregen stoom expandeert in een turbine en geeft hierbij arbeid af, die wordt gebruikt voor het aandrijven van een generator.

De geëxpandeerde stoom condenseert in een z.g. condensor en geeft hierbij de warmte die niet in arbeid kan worden omgezet, af aan het koelwater. Het uit de condensor komende afgekoelde water wordt nu in de ketelvoedingpomp weer op de oorspronkelijke begin-druk gebracht, verwarmd en teruggevoerd naar de ketel (zie Figuur 5).²⁾

¹⁾ Uit deze restwarmte kan dan geen elektrische energie meer worden gewonnen. Het bedenken van processen om uit deze warmte nog meer arbeid te winnen is zinloos.

²⁾ Het uit de condensor komende afgekoelde water wordt, alvorens het naar de ketel wordt teruggevoerd, eerst verwarmd. Dit voorverwarmen geschiedt met stoom die van de turbine wordt afgetapt. Door deze voorverwarming en door de drukverhoging in de ketelvoedingpomp wordt de temperatuur waarbij het water in de ketel de warmte opneemt, verhoogd. Zoals eerder opgemerkt, vergroot dit het omzettingsrendement. Tot verdere verhoging van het rendement wordt in grote installaties de stoom — na gedeeltelijke expansie in de turbine — naar de stoomketel teruggevoerd, daar opnieuw verhit en daarna naar de turbine teruggebracht [21].



Figuur 5. Het waterkringproces

Voor een goed rendement moet het waterkringproces de warmte bij een zo hoog mogelijke gemiddelde temperatuur opnemen. Dit betekent een combinatie van hoge temperatuur en hoge druk. Mede gedwongen door de naar verhouding hoge brandstofprijzen ging men in de jaren '50 er toe over centrales met steeds hogere drukken en temperaturen te bouwen, soms zelfs tot 350 bar en 650°C. De daarvoor ontwikkelde materialen en constructies gaven nogal wat problemen van bedrijfszekerheid en deze geavanceerde installaties bleken duurder dan verwacht. Toen de brandstofprijzen relatief lager werden, werd men daarom voorzichtiger, zodat thans drukken van 180 à 260 bar en temperaturen van 540 à 560°C gebruikelijk zijn. Hierbij wordt een rendement van ca. 42% bereikt.¹⁾ Zou men, ter besparing op primaire brandstoffen, terugkeren naar hogere drukken en temperaturen, dan zou het totale rendement een geringe stijging vertonen. Indien de kernenergiecentrale een steeds groter aandeel krijgt in de elektriciteitsopwekking, dan zullen de met fossiele brandstoffen gestookte centrales vooral bij de middenbelasting en piekbelasting moeten inspringen. De daarbij optredende snelle belastingwisselingen zouden bij zeer hoge druk en temperatuur echter niet gemakkelijk zijn op te vangen.

Het probleem hoge druk en hoge temperatuur bij de warmtetoever aan een waterkringproces is te vermijden door bij de omzetting van warmte in arbeid naast het waterkringproces nog een proces in te schakelen dat in staat is bij zeer hoge temperatuur en relatief lage druk warmte op te nemen. Na een deel van de opgenomen warmte in arbeid of elektrische energie te hebben omgezet, kan de resterende warmte bij aanzienlijk lagere temperatuur aan het waterkringproces worden toegevoerd. Zulk een gecombineerd proces is o.a. mogelijk door gebruik te maken van een M.H.D.-generator.

De magneto-hydrodynamische (M.H.D.-) generator

Vindt de verbranding van fossiele brandstof plaats bij zeer hoge temperatuur, dan kan een deel van de elektronen van de rookgasmoleculen zich van deze moleculen losmaken en vrij door het gas gaan bewegen. Het gas wordt geleidend en men spreekt dan van een

¹⁾ Berekend [22, diagram op blz. 153] bij een ketelrendement van 91% en voor een installatie met aftapvoorverwarming en herverhitting.

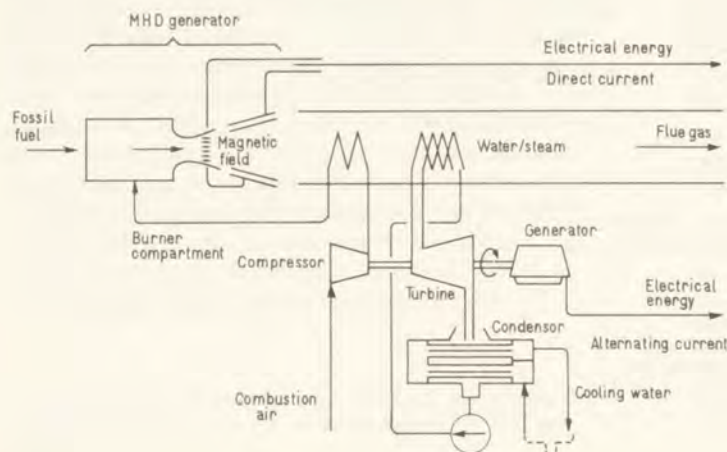
plasma. Door dit gas na het verlaten van de verbrandingskamer te laten expanderen tot een lagere druk, krijgt het plasma een hoge snelheid. Leidt men dit snelstromende plasma door een magnetisch veld, dan wordt er op de vrije elektronen een kracht uitgeoefend in één richting. De daardoor ontstane gerichte elektronenstroom kan dan een spanningsverschil geven tussen twee in het plasmakanaal ingebouwde elektroden. Worden deze elektroden door een uitwendige stroomdraad met elkaar verbonden, dan kan de elektronenstroom in deze stroomdraad elektrische energie afgeven. De elektronenstroom in het plasma veroorzaakt in dit plasma een kracht die tegengesteld is aan de stromingsrichting van het plasma. Deze kracht remt het plasma af en het uiteindelijke resultaat is dus dat in de M.H.D.-generator kinetische energie (beweging van het plasma) is omgezet in elektrische energie.

Na het verlaten van de M.H.D.-generator dient het nog hete plasma een deel van zijn warmte af te geven ter voorverwarming van de verbrandingslucht (anders is de voor plasma-vorming nodige hoge temperatuur niet te bereiken). De resterende warmte kan daarna worden overgedragen aan een waterkringproces bij redelijk hoge temperatuur en lage druk (Figuur 6) [1, 15, 23, 24].

Bij dit gecombineerde proces van M.H.D.-generator en waterkringproces wordt ongeveer de helft van de elektrische energie opgewekt in de M.H.D.-generator en wel als gelijkstroom. In Rusland is een proefcentrale van totaal 81 MW met een rendement van 30% in bedrijf. Met grote installaties verwacht men rendementen van 47 à 50% en bij verdere technische ontwikkeling zelfs rendementen van 50 à 60% [23-25]. Vanuit een oogpunt van besparing van primaire brandstoffen is dit dus een veelbelovend proces. Aangezien de M.H.D.-generator een zeer hoge kapitaalinvestering vergt, zal men dit voorschakelsysteem bij voorkeur koppelen aan een productie-eenheid die in basisbelasting voorziet [9].

Enkele van de technische problemen die nog moeten worden opgelost zijn:

- de entstof, die moet worden ingespoten ter verhoging van de geleidbaarheid van het plasma ter verkrijging waarvan anders extreme temperaturen nodig zouden zijn, moet direct na de M.H.D.-generator weer uit het plasma worden verwijderd om moeilijkheden in de luchtverhitter en de stoomketel te voorkomen;



Figuur 6. Combinatie van een M.H.D.-generator en een waterkringproces.

- mocht steenkool als brandstof worden gebruikt (en dit is zeer wel denkbaar, omdat steenkool het grootste deel van de voorraad fossiele brandstoffen vormt), dan zijn speciale maatregelen nodig voor een goede verbranding met gewone lucht en het voorkomen van moeilijkheden met de as;
- ter verkrijging van een hoge snelheid moet de expansie van het plasma een goed rendement hebben;
- de stralingsverliezen moeten gering zijn;
- de M.H.D.-generator moet zijn voorzien van elektroden en wanden die bestand zijn tegen zeer hoge temperaturen en die zeer slijtvast zijn.

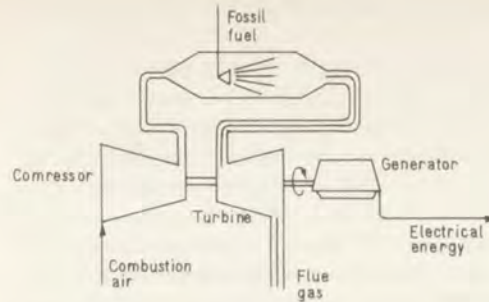
Al deze problemen betekenen dat er zeker nog een tiental jaren van intensief en kostbaar speurwerk nodig zal zijn voordat een goed werkende M.H.D.-generator op de markt kan worden gebracht [26]. Door de zeer hoge kosten hebben vele instituten het onderzoek getemporeerd, gedeeltelijk in de verwachting dat een even grote besparing kan worden verkregen met de combinatie gasturbine-waterkringproces, waarop hieronder nader wordt ingegaan.

Er valt dan ook niet aan te nemen dat vóór 1985 de M.H.D.-generator in Nederland zijn intrede zal doen. Een eventuele invloed van de M.H.D.-generator op het brandstofverbruik in Nederland zal daarom ook in de periode 1985-2000 slechts gering kunnen zijn.

De gasturbine

In de jaren dertig begon men te werken aan een nieuw proces dat niet het grote nadeel van het waterkringproces heeft (d.i. de ongunstige combinatie van hoge temperatuur en hoge druk), nl. het gasturbineproces. Bij dit proces wordt lucht in een compressor tot een minder hoge druk (bijv. 10 bar) gecomprimeerd dan bij het waterkringloopsysteem gebruikelijk is. Met deze samengeperste lucht wordt in een drukverbrandingskamer gas of lichte olie verstoekt, waarna het hete rookgas in een turbine expandeert tot atmosferische druk en wordt afgevoerd in de atmosfeer (Figuur 7). Het grootste deel van de expansie-arbeid is nodig voor de aandrijving van de compressor (die op dezelfde as is gemonteerd als de turbine) en het resterende deel wordt gebruikt voor aandrijving van de generator.

Omdat de verbrandingsgassen de turbine met een nog hoge temperatuur verlaten, voldoet de gasturbine wel



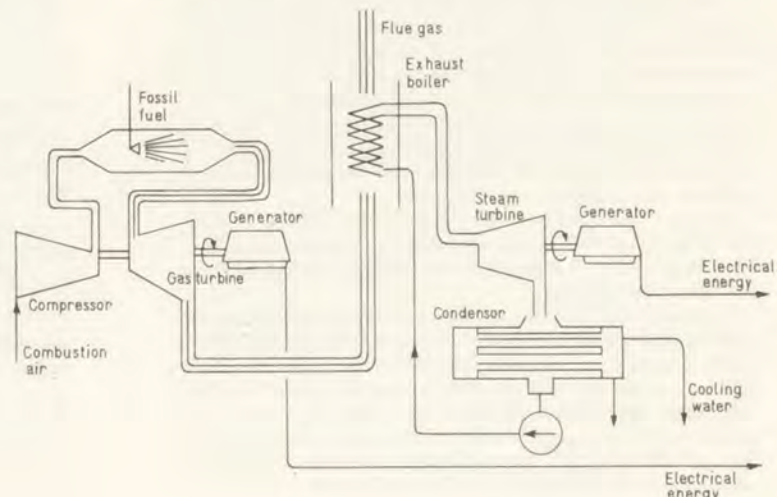
Figuur 7. Het gasturbineproces.

aan de eis van het opnemen van warmte bij hoge temperatuur, maar niet aan de eis dat de temperatuur van de niet in arbeid omgezette warmte zo dicht mogelijk bij de atmosferische temperatuur moet liggen. Wil het omkeerbare proces zo dicht mogelijk worden benaderd, dan dienen de compressor en de turbine een zo hoog mogelijk rendement te hebben, want de compressie-arbeid circuleert en bedraagt een veelvoud van de netto verkrijgbare arbeid. Iedere verbetering in het rendement van de compressor en van de turbine, hoe gering ook, is van groot belang. Verder moet, ter beperking van de omzettingsverliezen, worden gestreefd naar een zo hoog mogelijke temperatuur aan de inlaat van de turbine (er worden reeds temperaturen van 850-950°C toegepast). Voor de complete installatie is dan een rendement van 29% haalbaar [27-30]. Door toepassing van speciale materialen en door het koelen van de schoepen kan nu reeds een temperatuur van 1000°C en in de toekomst van 1300-1400°C worden bereikt [31, 32]. Dan zal met de gasturbine een totaal rendement kunnen worden bereikt van ca. 42%, dus gelijk aan dat van een moderne centrale met een enkel waterkringproces.

Aan het vermogen van de gasturbine zijn constructieve grenzen gesteld.¹⁾ Het maximale vermogen van de huidige standaardturbine bedraagt 90 MW [28, 33-35], maar in de toekomst zullen misschien vermogens van

¹⁾ De hoeveelheid lucht die door de compressor en de hoeveelheid rookgas die door de turbine kan gaan, worden bepaald door het toelaatbare Machgetal van de axiale stroomsnelheid (momenteel < 1, dus subsonisch) en de door de centrifugaalkracht nog toegelaten buitendiameter van de schoepenkransen [33].

Figuur 8. Gecombineerde gas-stoomturbine installatie.



300-400 MW kunnen worden bereikt.¹⁾

Gecombineerde gas-stoomturbine-installatie

Het grote nadeel van de gasturbine — nl. de hoge temperatuur van het gas aan de uitlaat van de turbine — kan worden beperkt door de verbrandingsgassen na de expansie in de gasturbine af te koelen en wel door de desbetreffende warmte toe te voeren aan een waterkringproces (zie Figuur 8). Zodoende kan bij een voor de huidige gasturbine normale temperatuur van 850 à 950°C een totaal rendement worden bereikt van ca. 42% [36]. Er is zelfs opdracht gegeven voor de bouw van een 130 MW-installatie die bij een temperatuur van 945°C aan de inlaat van de gasturbine een rendement zal hebben van 44%.²⁾

Vergeleken met een enkel waterkringproces (met hoge druk en hoge temperatuur) kan een gecombineerde gas-stoomturbine installatie de volgende voordelen bieden:

- een gas-stoomturbine installatie kan zeer snel in en buiten bedrijf worden gesteld;
- bij gebruik van meerdere gasturbines met één stoomturbine, zoals bij grote vermogens nodig is, kan het rendement over een groot belastinggebied (75-100%) zijn hoge waarde behouden.

Deze installatie is dus zeer geschikt voor het leveren van de midden- en piekbelasting en kan daardoor energiebesparend werken, vooral als bovendien de temperatuur aan de inlaat van de turbine nog drastisch kan worden verhoogd.³⁾ Uiteraard kan een gecombineerde gas-stoomturbine installatie pas optimaal worden benut wanneer zuivere brandstoffen ter beschikking staan.

Een variant op deze installatie is die waarbij het uitlaatgas (waarin zich nog zuurstof bevindt) als verbrandingslucht voor de stoomketel wordt gebruikt.⁴⁾

11.5. Productie van kernenergie

Aangezien voor de verwezenlijking van kernfusie (zie Hoofdstuk 1) nog zeer veel research en ontwikkeling nodig is, is de daarvoor nodige tijd moeilijk te schatten. Meestal stelt men die op 20 à 30 jaar [40-42]. Dit zou betekenen dat men de eerste centrales met

¹⁾ Deze grotere vermogens zullen kunnen worden bereikt door toepassing van transsonische snelheden (Machgetal tussen 0,8 en 1,2) in de eerste schoepenkrans van de compressor en in de eerste en laatste schoepenkrans van de turbine en door nog hogere temperaturen aan de inlaat van de turbine.

²⁾ Dit hoge rendement wordt bereikt door een hoog rendement van compressor en gasturbine, een dubbel waterkringproces, een zeer klein temperatuurverschil in de uitlaatgassenketel en een zeer lage schoorsteen temperatuur.

³⁾ Berekeningen tonen aan dat bij een inlaattemperatuur van 1200°C, resp. 1500°C, een rendement kan worden bereikt van 46%, resp. 51%. Dit laatste benadert dat van een centrale met een M.H.D.-generator.

⁴⁾ De gasturbine fungeert dan voor de stoomketel als een soort veredelde aanjager. De mogelijke brandstofbesparing is niet groot wanneer het rendement van het waterkringproces hoog is. Een bijkomend voordeel van deze in West-Duitsland reeds toegepaste combinatie [38, 39] is dat de totale investeringskosten worden verlaagd en dat deze combinatie in de winter een extra reserve biedt (het vermogen van de gasturbine stijgt nl. wanneer de buitentemperatuur daalt).

kernfusie op z'n vroegst rond de eeuwwisseling kan verwachten. In deze beschouwing zullen wij ons beperken tot het gebruik van de kernenergie die vrijkomt bij een kernsplijtingsproces.

Kernsplijting

Het kernsplijtingsproces dat zich in de reactor van de kerncentrale afspeelt, is net als de normale verbranding van fossiele brandstoffen in sterke mate een niet-omkeerbaar proces. De vrijkomende splijtingsenergie wordt als warmte door het koelmiddel van de reactor opgenomen en door dit koelmiddel toegevoerd aan een waterkringproces dat deze warmte moet omzetten in arbeid en tenslotte in elektrische energie. Voor de kernenergie geschikte, splijtbare kernen zijn

uranium ${}_{92}^{235}$ en plutonium ${}_{94}^{239}$, waarvan alleen het uranium in redelijke hoeveelheid in de natuur voorkomt [43, 44].

Het U ${}_{92}^{238}$, dat 99,3% van het natuurlijke uranium uitmaakt, is een nauwelijks splijtbare isotoop, maar heeft de prettige eigenschap, dat het neutronen kan vangen. Dit leidt dan tot een proces waarbij uiteindelijk uit het niet-splijtbare U ${}_{92}^{238}$ een splijtbare kern, het plutonium Pu ${}_{94}^{239}$ wordt gevormd.

Een identieke eigenschap bezit ook het in de natuur voorkomende thorium (Th ${}_{90}^{232}$). Bij vangst van een neutron (bijv. vrijgekomen bij het splijten van een uraniumkern) kan nl. het Th ${}_{90}^{232}$ overgaan in de splijtbare isotoop U ${}_{92}^{233}$.

Men spreekt in beide gevallen van conversie en de verhouding van het aantal nieuw gevormde splijtbare kernen tot het aantal verbruikte splijtbare kernen bij het proces in een reactor wordt omschreven als de conversieverhouding. Is deze conversieverhouding groter dan één, dan worden er meer splijtbare kernen gevormd dan er splijtbare kernen zijn verbruikt. Een reactor, waarin zich een dergelijk proces afspeelt, wordt een kweekreactor genoemd. Een conversiereactor is een reactor met een conversieverhouding kleiner dan één.

Zeer belangrijk voor het verbruik van de grondstof natuurlijk uranium (resp. thorium) in een reactor is de grootte van het z.g. nucleair rendement, d.w.z. van de verhouding van het aantal kernen dat daadwerkelijk in de reactor kan worden verspleten tot het aantal kernen, dat met het natuurlijk uranium (resp. thorium) in de reactor is gebracht. Dat dit nucleair rendement zeer sterk afhankelijk is van de conversieverhouding spreekt voor zich [45]. Opgemerkt dient te worden dat zodra de conversieverhouding groter wordt dan 0,9 het nucleair rendement zeer sterk toeneemt [45]. Een andere factor waarmee rekening moet worden gehouden, is het thermische rendement, d.w.z. de verhouding van de verkregen hoeveelheid elektrische energie tot de geproduceerde hoeveelheid splijtingswarmte. Zowel het nucleair rendement van de reactor als het thermisch rendement van de centrale spelen een beslissende rol bij het nuttig gebruik van de grondstof uranium

of thorium¹⁾ [46]. Verbetering van het nucleair rendement heeft evenwel de meeste invloed op de verhoging van het nuttig gebruik. Dit nucleaire rendement is bij een kweekreactor zeer vele malen groter dan bij een conversiereactor. Voor een zo goed mogelijk gebruik van onze voorraad kernenergie is de ontwikkeling van een veilige kweekreactor dan ook dringend gewenst.

De watergekoelde reactor

Het momenteel meest gebruikte reactortype voor het splijtingsproces is de watergekoelde reactor. Dit type is te verdelen in de druk-water reactor (PWR = pressurized water reactor) en de kokend water reactor (BWR = boiling water reactor). De temperatuur waarbij het water de splijtingswarmte in de reactor opneemt, is bepalend voor de hoeveelheid warmte die daarna met een waterkringproces in elektrische energie kan worden omgezet. Deze temperatuur zal daarom zo hoog mogelijk moeten zijn; zij wordt echter beperkt door de druk in de reactor en door de maximaal toelaatbare temperatuur voor het materiaal van de huls van de splijtstofelementen [45]. Dit betekent dat momenteel in centrales met watergekoelde reactoren slechts 32% van de vrijkomende splijtingsenergie in elektrische energie kan worden omgezet, terwijl de resterende 68% als warmte aan de omgeving moet worden afgestaan (zoals wij eerder zagen, liggen deze waarden bij een moderne, met fossiele brandstof gestookte centrale op 42%, resp. 58%). Het relatief geringe rendement van een centrale met een watergekoelde reactor is dus een rechtstreeks gevolg van de voorzichtigheid ten aanzien van de druk en de temperatuur in het reactorvat.

De gasgekoelde reactor

De eerste kerncentrales werden uitgevoerd met gasgekoelde reactoren. Als gas werd koolzuurgas (CO₂) genomen. De maximale temperatuur van het gas is met het oog op het materiaal van de huls van de splijtstofelementen beperkt tot 450°C.²⁾ Het rendement van deze eerste kerncentrales is dan ook laag (ca. 31,5%) [47]. Bij de nieuwe gasgekoelde reactoren (AGR = advanced gas-cooled reactor) werd een ander hulsmateriaal toegepast³⁾, zodat de toelaatbare temperatuur kon worden verhoogd tot 670°C. Daarmee is het potentiële rendement verbeterd tot ca. 40%. Een verdere verhoging van de gastemperatuur is niet mogelijk, daar dan het koolzuurgas ongewenste verbindingen aangaat. De hoge temperatuur gasgekoelde reactor (HTGR = high temperature gas-cooled reactor) werkt daarom met helium als koelmiddel. Bij deze uitvoering kan een kerncentrale een rendement bereiken dat van een conventionele centrale evenaart. Gasgekoelde reactoren zijn nog in ontwikkeling. De splijtstof bestaat uit kleine deeltjes, die voorzien zijn van een speciale deklaag en zodanig zijn ingebed dat met dit systeem zeer hoge temperaturen toe-

laatbaar zijn. Ook hier wordt de uit de reactor afgevoerde warmte toegevoerd aan een waterkringproces. Een 40MW-centrale van dit type is met zeer gunstig resultaat van 1967 af in bedrijf. Een 330 MW HTGR-centrale is onlangs in bedrijf genomen en voor 1978 zijn twee 770 MW en vier 1160 MW-eenheden voorzien. Deze zullen echter nog met betrekkelijk conventionele druk en temperatuur werken en een rendement bereiken van 39% [48, 49]. Het waterkringproces kan, evenals bij de centrales die met fossiele brandstoffen worden gestookt, worden voorafgegaan door een gasturbine. Deze kan in dit geval rechtstreeks door het helium worden aangedreven. De door de turbine stromende hoeveelheid helium kan worden geregeld (met handhaving van de temperatuur), waardoor het rendement van een dergelijke centrale¹⁾ over een vrij groot belastinggebied vrijwel constant blijft [50, 51].

11.6. Gecombineerde productie van elektriciteit en warmte

Bij vele industriële processen is naast elektriciteit ook warmte nodig. Eerder werd reeds aangetoond, dat een deel van de warmte die wordt geproduceerd voor de opwekking van elektriciteit moet worden afgevoerd naar de omgeving. Is de temperatuur van deze warmte hoger dan de omgevingstemperatuur, dan zou ze een waardevol goed kunnen zijn voor een warmteverbruiker [52, 54]. Dit leidt tot een besparing aan energie, omdat de warmteverbruiker die warmte dan niet meer zelf hoeft te produceren.²⁾ Daar warmte moeilijk over grote afstanden kan worden vervoerd, is het wel nodig dat de installatie voor het gecombineerde proces zo dicht mogelijk is gelegen bij de warmteverbruiker, die meestal tevens de elektriciteitsverbruiker is. Is de geproduceerde elektrische energie niet voldoende voor zijn behoeften, dan kan het tekort het beste worden aangevuld uit het openbare net. De elektriciteit kan immers met een veel hoger rendement worden opgewekt, in de grote eenheden zoals opgesteld bij de openbare elektriciteitsbedrijven dan in een kleine, door de verbruiker zelf opgestelde eenheid, die in de regel door zijn beperkte vermogen een aanzienlijk lager rendement zal hebben. Bij eigen opwekking van de resterende hoeveelheid elektrische energie kan het zelfs gebeuren, dat in geval van een zeer laag rendement van de eigen opwekkingsinstallatie de totale hoeveelheid benodigde brandstof, ondanks de gecombineerde warmte-elektrische productie, toch nog groter wordt dan bij enkel warmteproductie voor eigen behoeften en inkoop van alle elektriciteit uit het openbare net. Dit zal in de toekomst zeker niet toelaatbaar zijn. Men kan dus zonder meer stellen dat gecombineerde opwekking in de toekomst alleen dan verantwoord zal zijn, wanneer

¹⁾ Bij conventionele centrales wordt ervan uitgegaan dat alle toegevoerde (fossiele) brandstof zal verbranden. Het zeer kleine percentage 'onverbrand' wordt in het thermisch rendement van de stoomketel meegeteld. Het werken met enkel het thermisch rendement van de conventionele centrale is bij het beoordelen van het nuttig gebruik van de brandstof dan ook correct.

²⁾ Het materiaal van de huls is een magnesiumlegering. Naar aanleiding daarvan wordt dit type reactor aangeduid met de naam 'Magnox'-reactor.

³⁾ Een staallegering met 20% chroom en 25% nikkel.

¹⁾ Warmte wordt gewoonlijk geproduceerd door het verbranden van fossiele brandstoffen. Het rendement van dit proces wordt bepaald door het ketelrendement en de warmteoverdracht aan het warmtetransportmedium. Bij industrieketels belooft dit rendement 87 - 94% en bij grote centrale verwarmingsketels 72 - 85% (berekend op basis van de z.g. stookwaarde van de brandstof).

²⁾ Bij een gastemperatuur van 760°C kan met een gasturbine met gesloten kringloop een rendement van 38 à 42% worden bereikt. Bij een gastemperatuur van 900°C wordt dat 44 à 47% en bij een temperatuur van 1000°C zelfs 47 à 51%.

het totale brandstofverbruik bij de gecombineerde opwekking kleiner is dan de hoeveelheid brandstof nodig voor het produceren van de benodigde warmte in een speciale ketel en voor de elektriciteitsopwekking in een openbare centrale.¹⁾

De voorwaarden voor gecombineerde produktie van elektriciteit en warmte kunnen als volgt in formulevorm worden uitgedrukt:

$$\frac{E}{\eta_{\text{openbaar}}} + \frac{Q}{\eta_{\text{ketel}}} > (m \times H_B)$$

waarin:

- E = opgewekte elektrische energie per uur bij een gecombineerd bedrijf;
 η_{openbaar} = rendement van centrale + hoogspanningsnet;
 Q = benodigde warmte per uur;
 η_{ketel} = rendement van de ketel waarin deze warmte kan worden geproduceerd;
 m = benodigde hoeveelheid brandstof per uur bij gecombineerde opwekking;
 H_B = verbrandingswaarde van de brandstof voor de gecombineerde opwekking.

Aangezien

$$\eta_{\text{gecombineerd}} = \frac{E + Q}{m \times H_B}$$

kunnen de voorwaarden ook worden geschreven als:

$$\eta_{\text{gecombineerd}} > \frac{E + Q}{\frac{E}{\eta_{\text{openbaar}}} + \frac{Q}{\eta_{\text{ketel}}}}$$

Uit deze vergelijking volgt dat bij het huidige relatief hoge rendement (η_{openbaar}) van een moderne eenheid in een centrale en bij het tegenwoordige, zeer hoge rendement (η_{ketel}) van de grote stoomketel voor de industrie, het minder eenvoudig wordt om een energiebesparing te bereiken bij gecombineerde opwekking. Een hoge $\eta_{\text{gecombineerd}}$ zal alleen dan worden bereikt, wanneer bij de gecombineerde opwekking wordt gewerkt met een hoge temperatuur van de warmte die in arbeid moet worden omgezet en met geringe verliezen bij de desbetreffende omzetting en warmteoverdracht. Dit betekent in het algemeen grote industriecentrales met deskundig personeel.

Terwille van energiebesparing in de toekomst zal dan ook moeten worden nagegaan, of warmteverbruikende

¹⁾ Momenteel wordt bij eigen elektriciteitsopwekking nog uitsluitend gekeken naar zo laag mogelijke kosten. Is de prijs die door het elektrische energiebedrijf wordt gevraagd hoog en wordt door de betrokken industrie bij eigen opwekking genoeg genomen met een zeer kleine reserve aan vermogen of geheel geen reserve (gevolg: lage investeringskosten) dan is het inderdaad mogelijk dat de kosten van de zelf opgewekte elektriciteit lager worden dan bij inkoop, ondanks het hogere brandstofverbruik. Dikwijls gebeurt het ook dat deze bedrijven — om warmte van hun gasturbines te benutten — er de voorkeur aan geven extra warmteverbruikende apparaten op te stellen in plaats van naar het rendement van de overige warmteverbruikende apparaten te kijken. Kan dit uit economisch oogpunt nog te verantwoorden zijn, uit het oogpunt van energiebesparing zal dit zeker niet het geval zijn [55].

industriën kunnen worden gegroepeerd om één grote industriecentrale. Ook zal bij stadsuitbreidingen moeten worden overwogen, of de voor de woningen benodigde warmte kan worden geleverd door grote stadsverwarmingcentrales [56].

III. De brandstofcel

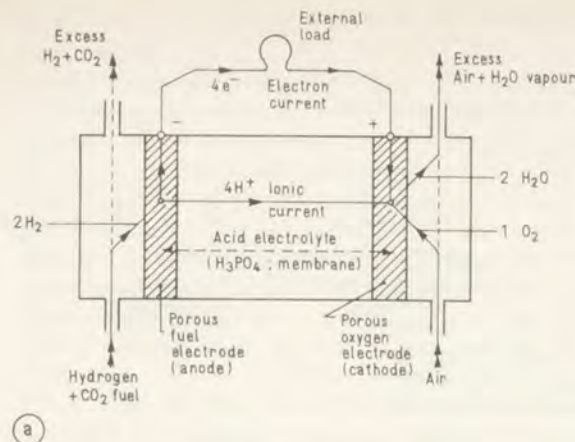
door dr. G. H. J. Broers

III.1. Inleiding

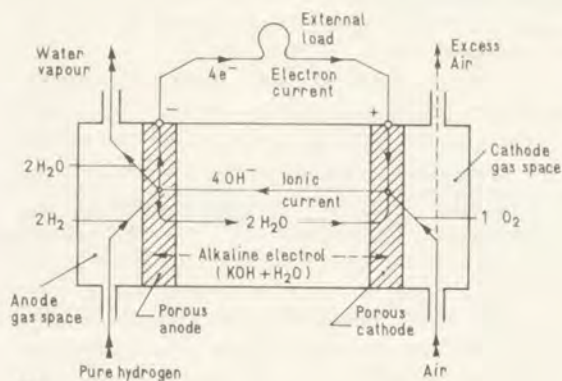
Een brandstofcel is een galvanische (elektrochemische) energiebron die in wezen niet verschilt van de batterijen die men in het dagelijkse leven gebruikt, zoals de primaire 'droge' cel en de secundaire cellen van het lood-zuur of nikkel-cadmium type. Terwijl de primaire en secundaire cellen de stoffen verbruiken waaruit zij zijn vervaardigd, en secundaire cellen elektrisch moeten worden omgevormd om opnieuw te worden geladen, produceert de brandstofcel rechtstreeks elektrische energie uit de galvanische oxydatie van een hiervoor geschikte en voortdurend toegevoerde brandstof met de zuurstof uit de lucht.

In het algemeen houdt oxydatie de overdracht in van elektronen uit brandstofmoleculen aan zuurstofmoleculen. De tegenovergesteld geladen deeltjes (ionen) die aldus worden gevormd, worden gebonden door sterke elektrische krachten; hun elektrisch neutrale combinaties zijn gewoon de moleculen van het verbrandingsprodukt. Bij rechtstreekse verbranding worden de elektronen overgedragen tijdens botsingen tussen de zuurstof- en brandstofmoleculen en komt de bindingsenergie vooral vrij als kinetische energie van de produktmoleculen, d.w.z. als warmte. In brandstofcellen geschiedt de elektronenoverdracht op gecontroleerde wijze via een uitwendig (verbruikend) circuit. De combinatie van de ionen geschiedt inwendig. De uitwendige elektronenstroom produceert nuttige elektrische energie, rechtstreeks in het belastingcircuit. Het proces verloopt als volgt:

Brandstof- en zuurstofmoleculen worden afzonderlijk in contact gebracht met twee ruimtelijk gescheiden elektronische geleiders — de katalytische elektroden van de cel. De ondoorlaatbare afscheiding tussen de elektroden is een materiaal dat elektronen tegenhoudt maar ionen geleidt, de elektrolyet. Wanneer de elektroden via het uitwendige circuit worden verbonden, stromen de elektronen die uit de brandstofmoleculen vrijkomen via de brandstofelektrode en het uitwendige circuit naar de zuurstofelektrode, waar zij door de zuurstofmoleculen worden opgevangen en negatieve ionen vormen. Tegelijkertijd stromen hetzij de positieve brandstof-ionen, hetzij de negatieve zuurstof-ionen door de elektrolyet naar de zuurstofelektrode dan wel de brandstofelektrode. In het eerste geval (brandstof-ionen) vormen zij een nieuwe combinatie met de zuurstof-ionen, waardoor zij het verbrandingsprodukt aan de zuurstofelektrode vormen. In het tweede geval wordt het verbrandingsprodukt gevormd aan de brandstofelektrode (dan zijn zuurstof-ionen door de elektrolyet gestroomd). De schema's in de Figuren 9a en b geven een beeld van het proces in zure cellen (H^+ brandstof-ionen door de elektrolyet) en alkalische cellen (OH^- ionen gevormd uit zuurstof-ionen en watermoleculen).



(a)



(b)

Figuur 9. Schematische weergave van zure en alkalische brandstofcellen.

- Werking van een lage temperatuur-cel met een zure elektrolyet. Waterstof brandstof + CO₂ verkregen uit fossiele koolwaterstoffen met behulp van een stoom-omvormingsproces bij 700–800°C.
- Lage temperatuur-cel met een alkalische elektrolyet. De brandstof moet vrij zijn van koolstofbevattende bestanddelen zoals koolwaterstoffen, CO en CO₂. Dit betekent dat alleen zuivere waterstof of een mengsel van waterstof en stikstof kan worden gebruikt.

Aan de poreuze elektroden worden voortdurend brandstof en lucht toegevoerd en de oxydatieproducten (H₂O en/of CO₂) worden voortdurend uit de elektrolyet of van een van zijn raakvlakken met de elektroden verwijderd. Zowel de elektroden als de elektrolyet moeten tijdens de gehele levensduur van de cel onbeïnvloed blijven, wat in de praktijk een zeer zware eis is. De drijvende kracht van het proces is het verschil in

chemische vrije energie ('affiniteit') tussen brandstof en zuurstof enerzijds en de reactieproducten anderzijds. Populair gezegd: chemische energie wordt rechtstreeks omgezet in elektrische energie.

Galvanische omzetting is een veel elegantere proces dan de rechtstreekse verbranding van brandstoffen, waarbij de hitte wordt geproduceerd door een grove chemische kortsluiting. De hoge mate van omkeerbaarheid van het proces betekent dat het fundamenteel een hoog rendement heeft (zie par. 11.3).

In Tabel 1 worden de drie soorten van brandstofcellen opgesomd. Hun belangrijkste kenmerken worden wat uitvoeriger besproken in Bijlage 1.

Brandstofcellen worden voornamelijk toegepast in het vervoer, in grote krachtcentrales en kleine stationaire installaties. Juist het hoge rendement inherent aan de brandstofcel maakt haar tot zulk een aantrekkelijk middel voor energiebesparing. Tabel 2 geeft enkele gegevens omtrent de rendementen van brandstofcellen; Tabel 3 omvat een vergelijkend overzicht van brandstofcellen en andere processen voor de omzetting van energie.

De eerste onderzoeken begonnen rond 1840 – lang voordat Faraday zelfs ook maar de wetten van elektromagnetische inductie had ontdekt – maar, ondanks spectaculaire vooruitgang in de laatste twintig jaar en successen bij de toepassing bij ruimtevloten, is de brandstofcel vrijwel niet tot de huidige markt doorgedrongen. Dit valt toe te schrijven aan de moeilijke problemen bij het onderzoek en de ontwikkeling van brandstofcellen. Brandstofcellen zijn niet uitsluitend aangewezen op aan uitputting onderhevige fossiele brandstoffen. Zuivere waterstof is in feite de aantrekkelijkste brandstof en dat kan worden geproduceerd uit water met behulp van verschillende energiebronnen, zoals zonne-energie, kernfusie, windkracht, enz. Voor huishoudelijk gebruik, met een gemiddeld lage energiebehoefte, zou zelfs de plaatselijke windkracht kunnen bijdragen tot energie-opwekking in huis, met gebruikmaking van brandstofcellen en waterstof in opslagbatterijen. Om de haalbaarheid van dergelijke alleen met gas werkende huishoudingen in het dicht bevolkte Nederland na te gaan, zijn evenwel realistische ramingen nodig van de kosten alsmede studies over de waarschijnlijk verstrekkende invloed op de bestaande systemen voor distributie van elektrische energie.

Tabel 1. Soorten van brandstofcellen

Cel	Elektrolyet	Ionen- vervoer	Typische elektroden
1. lage temperatuur 25–120°C	alkalisch: waterig KOH zuur: waterig H ₂ SO ₄ ; H ₃ PO ₄ geconcentreerd membraan: R-SO ₃ H	OH ⁻ H ⁺ H ⁺ H ⁺	Ni, Ni ₂ B, Ag, kool + katalysator Pt, Pt op kool, Au Pt, (gebonden met Teflon)
2. matige temperatuur 250°C (Apollocel)	gesmolten KOH 80% H ₂ O 20%	OH ⁻	Ni (aan de H ₂ kant) NiO – Li ₂ O (aan de O ₂ kant)
3. hoge temperatuur 600–800°C 900–1100°C	gesmolten carbonaat (halfvaste pasta) vast oxyde ZrO ₂ + 15% CaO	CO ₃ ²⁻ O ²⁻	Ni, Co (brandstofkant) Ag, NiO, CuO (luchtkant) Pt, halfgeleiders (SnO ₂)

Opmerking:

vervoer van H⁺ ionen houdt vorming in van reactieproducten aan de luchtkant,
vervoer van negatieve ionen houdt vorming in van reactieproducten aan de brandstofkant.

Tabel 2. Theoretische en praktische rendementen van galvanische verbrandingsprocessen bij isothermische werking

Theoretisch rendement = $\frac{\text{maximale elektrische energie uit galvanische oxydatie}}{\text{thermische energie (lage verbrandingswarmte)¹) bij rechtstreekse verbranding}}$

Praktisch rendement = $\frac{\text{nuttige elektrische energieproductie van de brandstofcelbatterij}}{\text{lage verbrandingswarmte van brandstof-toevoer}}$

brandstof	theoretisch rendement in % bij				brandstof	praktisch rendement in % van	
	25°C	100°C	600°C	1000°C		cellen met een lage temperatuur	cellen met een hoge temperatuur
H ₂	83 ²⁾	92	80	72		25–150°C	600–1100°C
CO	91	89	73	60	steenkool	35–45	45–60
C(grafiet)			100		aardgas	40–50	45–65
CH ₄			100		minerale olie	40–50	45–65
C _n H _{2n+2}			iets meer dan 100				

¹⁾ Lage verbrandingswarmten zijn gebaseerd op verbranding van de waterstofatomen in de brandstof tot waterdamp; hoge verbrandingswarmten betreffen de vorming van vloeibaar water.

²⁾ 83% gebaseerd op hoge verbrandingswarmte, wat meer met de werkelijkheid overeenkomt bij 25°C (94% bij lage verbrandingswarmte).

Tabel 3. Kenmerken voor de werking van verschillende energiebronnen

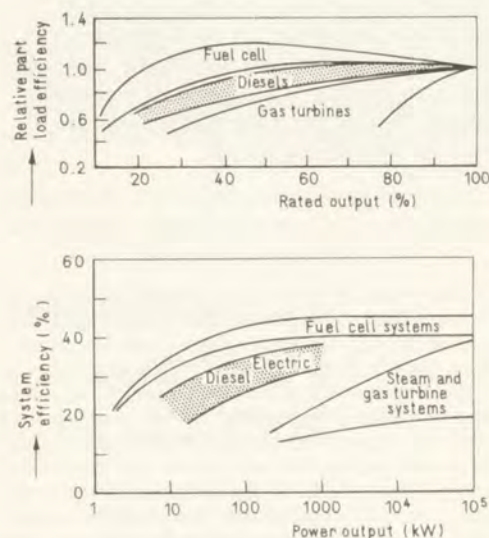
	Brandstof-celsystemen met lage temp.	Brandstofcel-systemen met hoge temp.	Thermo-elektrisch	Thermo-ionisch	M.H.D. (piekbelasting)	Gasturbine	Gewone stoomcyclus
Temperatuurbereik in °C	25–150	600–1100	150–550	1200–1800	1800–2500	750–1000	450–600
Beperkt door Carnot	neen	neen	ja	ja	ja	ja	ja
Maximum praktisch rendement in %	40–50 ¹⁾	65	15?	20	55	25	35–40
Rendement afhankelijk van grootte	neen ²⁾	neen ²⁾	neen	ja	ja	ja	ja
Bewegende delen onmisbaar	neen	neen	neen	neen	ja	ja	ja
Mogelijkheid van aanpassing aan aardgas en olie	bewerking van brandstof noodzakelijk ³⁾	zeer goed ³⁾	goed	slecht	goed	goed	goed
Mogelijkheid van aanpassing aan steenkool	bewerking noodzakelijk ⁴⁾	bewerking noodzakelijk ⁴⁾	goed	slecht	twijfelachtig	niet direct	goed

¹⁾ 70–75% bij zuivere waterstof als primaire brandstof.

²⁾ Indien productie meer dan ongeveer 3–5 kW_e.

³⁾ Ontzwaveling, stoomvorming, evenwichtsverschuiving watergas, verwijdering van sporen CO bij cellen met een lage temperatuur. Ontzwaveling bij hoog S-gehalte voor hoge temperatuurcellen, zie tekst en Tabel 5.

⁴⁾ Gasvormige toestand altijd noodzakelijk. Zie tekst.



Figuur 10. Rendement van verschillende systemen als functie van de belasting.

De meer technische bijzonderheden over brandstofcellen zijn te vinden in Bijlage 1, waarvan enkele conclusies onderstaand worden weergegeven. Afzonderlijke brandstofcellen leveren een laag uitgangsvoltage (0,4–1 V), zodat celbatterijen moeten worden gebouwd, wil men een bruikbaar voltage bereiken (20 V of hoger). De specifieke energieproductie heeft haar maximum bij een uitgangsvoltage van 0,4–0,5 V. Aangezien het totale rendement samenhangt met het uitgangsvoltage, moet er altijd een compromis worden gevonden tussen de gewenste energieproductie en het gewenste rendement. Dit blijkt uit Fig. 10, waar ook het afwijkende gedrag van dieselmotoren en gasturbines is aangegeven.

De brandstofcel met lage temperatuur

Alleen waterstof (en het zeer kostbare hydrazine N₂H₄) reageren voldoende om een bevredigende stroomdichtheid bij een lage temperatuur (25–120°C) te bereiken. Voordat fossiele brandstoffen kunnen worden gebruikt, moeten zij daarom worden omgezet in waterstofrijke gasvormige brandstoffen. Daarvoor is de in-

stallatie vereist van een energieverbruikende chemische installatie die in de procesgang aan de brandstofcel voorafgaat. Bewerkte brandstoffen die CO_2 (of CO) bevatten, kunnen niet worden gebruikt in de alkalische cel met een lage temperatuur, zodat tegenover de lage kosten van de elektroden in dit type cel de kosten van uiterst zuivere waterstof staan. Zure cellen met een lage temperatuur, die CO_2 bevattende brandstoffen kunnen verwerken, hebben zuurbestendige materialen voor de elektroden nodig. In de praktijk hebben alleen platina-legeringen de vereiste bestendigheid. Voor de waterstof-lucht cel van het Gemini-type, met een lage temperatuur, is 0,41 kg platina per kW nodig als katalysator, wat voor commercieel gebruik niet doenlijk is. Verlies van rendement wegens de slechte prestatie van de luchtelektrode is iets wat alle soorten van cellen met een lage temperatuur gemeen hebben.

De brandstofcel met een hoge temperatuur

Cellen met een hoge temperatuur hebben daarentegen minder problemen met de reacties, kunnen werken met minder kostbare materialen voor de elektroden en kunnen (bij werk-temperaturen boven $650\text{-}700^\circ\text{C}$) elke fossiele brandstof gebruiken, mits die is gemengd met een voldoende hoeveelheid stoom en CO_2 (verkregen door de terugvoer in de kringloop van een passend gedeelte van de afgewerkte gassen). Deze 'geïntegreerde systemen' leveren een gunstige warmtebalans, daar zij bij cellen met gesmolten carbonaat voor 90% van de brandstof gebruik kunnen maken, met een totaal rendement van rond 60%. En in tegenstelling tot cellen met een lage temperatuur kunnen brandstofcellen met een hoge temperatuur nog werken op brandstoffen met een bescheiden zwavelgehalte ($< 1\%$).

Veiligheid

Hierover is weinig bekend, maar het gevaar van explosies – vooral bij systemen met een lage temperatuur – kan niet worden uitgesloten. Het gebruik van vloeibare elektrolieten tezamen met uiterst actieve poreuze elektroden die op korte onderlinge afstand zijn geplaatst en zijn geladen met geadsorbeerde waterstof en zuurstof, is beslist de onveiligste aanpak, omdat de elektroliet geen mechanische weerstand biedt tegen een doorbraak van gas van de ene kant naar de andere. Het werken met halfvaste elektrolieten – zoals gebruikt in de meest geavanceerde Pratt & Whitney-fosforzuurcel – is veel veiliger wegens de grote mechanische stijfheid. Het is misschien verbazingwekkend dat het explosiegevaar van cellen met een hoge temperatuur zeer klein is. Hoewel de schrijver in de loop van een twintigtal jaren tijdens vele tests vele lekkende cellen heeft onderzocht, is hij nooit het geval tegengekomen, dat een cel explodeerde. Dit valt toe te schrijven aan het feit dat zelfs het geringste lek in de halfvaste elektroliet leidt tot het onmiddellijk vlamvatten van de brandstof en niet tot ontploffing. De plaatselijke oververhitting kan verdere beschadiging van de elektroliet veroorzaken, maar de elektriciteitsproductie van de cel daalt onmiddellijk wegens de overvloedige vorming van reactieproducten bij het lek. Dit signaal is voldoende om de gastoevoer af te sluiten.

In het algemeen gesproken moeten de afzonderlijke cellen van een batterijsysteem alle een even grote mate van betrouwbaarheid hebben, wil men het falen van het systeem wegens enkele ondeugdelijke cellen uit-

sluiten. Voor energie-opwekking op grote schaal is de beste aanpak waarschijnlijk de bouw van batterij-modules van 10-25 kW per stuk, zodat een module met een slecht werkende cel kan worden vervangen zonder dat dit de sluiting van de gehele installatie meebrengt.

III.2. Toepassingen van de brandstofcel

Voortstuwing van voertuigen

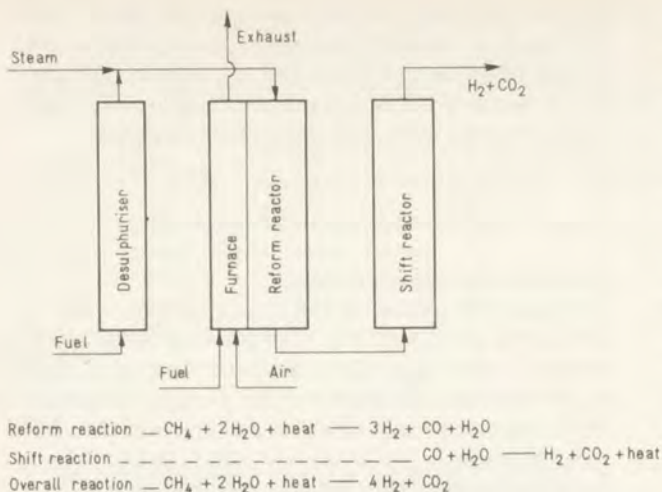
Een mogelijke toepassing van brandstofcellen is het gebruik bij zware tractie of voortstuwing (locomotieven, schepen), waar hoge belastingsgraden normaal en gewicht en omvang van minder belang zijn. Hun gebruiksmogelijkheden voor auto's zijn uitvoerig geanalyseerd [57 - 59] maar de brandstofcel op zichzelf schijnt geen reëel vervangingsmiddel voor benzine- of dieselmotoren in personenauto's te zijn. Dit hangt rechtstreeks samen met het feit dat een auto een dikwijls laag en ook gevarieerd vermogen moet leveren, wat elk type cel behalve de waterstof-lucht-cel met een lage temperatuur uitsluit. De energiedichtheid van brandstofcellen ($10\text{-}40 \text{ W}_e/\text{kg}$) is gering vergeleken met die van interne verbrandingsmotoren ($800 \text{ W}_{th}/\text{kg}$), en zelfs wanneer men uitgaat van het meest gunstige rendement, zou de brandstofcel bij gelijke prestatie 5-6 maal zo zwaar zijn. Er is naar een compromis gezocht met hybride systemen, waarbij een brandstofcelbatterij, gewoonlijk van 6 kW_e bij 84 V wordt gekoppeld met een lood-zuurbatterij van 100 Ah en 84 V welke voorziet in de piekbehoeften aan energie (22 kW_e in het stadsverkeer). Een adequate brandstofcelbatterij alleen zou ongeveer 770 kg wegen; het hybride systeem weegt ca. 500 kg. De brandstofbehoefte voor een actieradius van 400 km zou 140 liter waterstof bij een druk van 300 bar bedragen. Het drukvat heeft een geschat gewicht van 200 kg. Bij enkel rijden op autosnelwegen zou de hoeveelheid waterstof kunnen worden verminderd tot 60 liter, waarvoor een drukvat van ca. 80 kg nodig is. Wanneer men bedenkt dat waterstof duur is vergeleken met benzine en als men de voor de productie en montage van de nodige materialen vereiste energie vergelijkt met de energie die nodig is om gewone motoren, versnellingsbakken, enz. te produceren, dan blijkt dat de vooruitzichten voor de elektrische hybride auto waarschijnlijk niet gunstig zijn.

Brandstofcellen voor gebruik in elektrische centrales [60]

De brandstofcel die werkt met gesmolten carbonaat is vermoedelijk een van de meest in aanmerking komende soorten voor gebruik in elektrische centrales. De brandstofcellen zouden kunnen worden gebruikt voor gespreide opwekking, zodat de noodzaak voor elektriciteits-transmissie ¹⁾ wordt verminderd. Een complete installatie, met een vermogen van misschien 20 MW, zou bestaan uit de feitelijke geïntegreerde brandstofcelbatterij ²⁾ en een omvormer (om de geproduceerde gelijkstroom om te zetten in wisselstroom).

¹⁾ De brandstof zou aardgas of een andere geschikte brandstof zijn.

²⁾ Waarbij in een omvormer commerciële brandstoffen zoals aardolieproducten of aardgas worden omgevormd tot een gas met een hoog waterstofgehalte en CO_2 . Zie Figuur 11.



Figuur 11. Stoomomvormingsproces.

Niets wijst erop, dat de nog bestaande obstakels voor centrale elektriciteitsopwekking spoedig zullen worden opgelost. Bij het gesmolten carbonaatsysteem betreffen de problemen de prestatie van de cel, de mechanische beperkingen waaraan de elektrolyt is onderworpen en de fabrikagetechnieken, alsmede de technologie van de materialen van de cel-onderdelen. Bovendien is voortgezet onderzoek vereist om de kosten van de brandstofcel, de koolwaterstofomvormer en de spanningsomvormer te drukken en hun levensduur te verlengen.

Brandstofcellen voor gebruik in kleine installaties [60]
 Indien een afzonderlijke cel kan worden vervaardigd met

aanvaardbare technische en economische eigenschappen, zal het mogelijk zijn installaties voor elk gewenst voltage en vermogen te ontwikkelen. Onder de auspiciën van 35 aardgasmaatschappijen, die het zonder winstoogmerk werkende Team to Advance Research for Gas Energy Transformation (TARGET) vormen, wordt bij Pratt & Whitney een uitgebreid onderzoek- en ontwikkelingsprogramma uitgevoerd. Een onderdeel van dit programma is de installatie in gewone huizen van een aantal met aardgas werkende 12,5 kW experimentele brandstofcellen (zie Bijlage 1). Bij verdere ontwikkeling zou een dergelijke eenheid een omvang kunnen hebben van 0,3 m³, tijdens een werkingsduur van 10.000 uur niet meer dan 10% van het prestatievermogen verliezen, en eenmaal per jaar minimaal routine-onderhoud vergen. Naar verluidt is de feitelijke prestatie ongeveer halverwege dit doel. Aangezien de gegevens over de stand van ontwikkeling onder industriële eigendomsrechten vallen, kunnen de onderzoeksbehoeften niet duidelijk worden vastgesteld. Er blijkt evenwel duidelijk dat fundamenteel en toegepast onderzoek nodig zijn ten aanzien van de platina bevattende elektrode-materialen en hun prestatie, elektrolytmaterialen en katalysatoren, alsmede omtrent ontwerp en constructie welke is gericht op cellen die in de handel kunnen worden gebracht. Er zijn zuiniger werkende omvormers nodig om de gelijkstroom om te zetten in wisselstroom. Een meer fundamentele aanpak zou natuurlijk zijn over te gaan op het gebruik van gelijkstroom.

III.3. Nog te onderzoeken problemen

Tabel 4. Nog op te lossen belangrijke problemen op het gebied van het brandstofcelonderzoek

Type cel	Probleem	Soort van onderzoek
lage temperatuur zuur	goedkope, zuurbestendige katalysator voor de zuurstof-elektrode, met minder polarisatie dan de huidige platina benuttende elektroden	fundamenteel (elektrokatalyse)
lage temperatuur alkalisch	hetzelfde, maar alkalibestendig; vervanging van de huidige NiO - Li ₂ O en de met katalysator geïmpregneerde poreuze koolelektroden; ook belangrijk voor metaal/lucht opslagcellen en de elektrolyse van water; doeltreffende en goedkope afscheiding van waterstof uit H ₂ /CO ₂ + CO-mengsels	fundamenteel fundamenteel en toegepast
zowel zuur als alkalisch	operationele veiligheid bij mogelijk huishoudelijk gebruik (waterstof-'economie'; H ₂ uit windkracht)	toegepast
hoge temperatuur gesmolten carbonaat ¹⁾	afscheiding van CO ₂ uit afgewerkte gassen van de anode bij batterijtemperatuur; vermindering van de sinteringsverschijnselen van poreuze brandstofelektroden; corrosiebestendige materialen voor de bouw van batterijen; de bouw van de batterijen als zodanig	fundamenteel en toegepast fundamenteel fundamenteel en toegepast
hoge temperatuur vast oxyde	ionengeleider van vast oxyde (O ²⁻ -ionen) met een specifieke weerstand beneden 10Ωcm bij ~ 700°C	fundamenteel

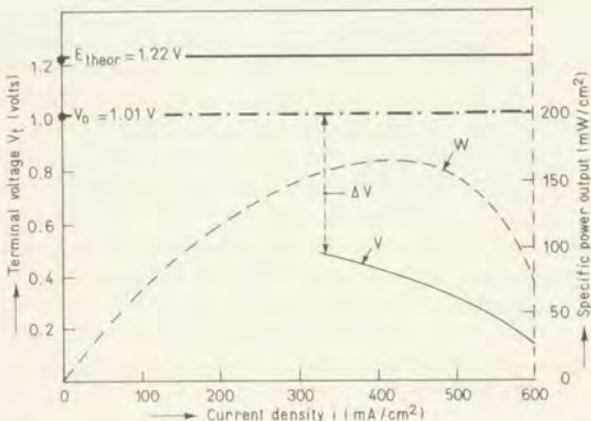
Opmerking:

Er kan geen duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen de twee soorten van onderzoek, maar fundamenteel onderzoek kan worden verricht in betrekkelijk kleine groepen, waarbij de financiering geen overheersende rol speelt.

¹⁾ Het enige serieuze onderzoek naar cellen met gesmolten carbonaat wordt verricht aan het Institute of Gas Technology, Chicago, USA, een sub-contractor van Pratt & Whitney. De jaarlijkse kosten belopen ca. \$ 0,5 - 0,75 miljoen.

Bijlage 1 Enkele technische gegevens over brandstofcellen

In werking zijnde afzonderlijke brandstofcellen hebben uitgangsvoltages V_t van 0,4 tot 1 V, afhankelijk van de stroomdichtheid i die van de elektroden wordt afgenomen (i wordt over het algemeen uitgedrukt in mA/cm² elektrodeoppervlak). Het lage voltage V_t van de afzonderlijke cel noodzaakt tot de bouw van in serie verbonden celkolommen om nuttige batterijvoltages te verkrijgen (20 V of hoger). Onder de invloed van met name de ruimtevaartprogramma's is de technologie van de batterijbouw zo ver voortgeschreden, dat dit niet langer het knelpunt is bij de ontwikkeling van technisch bruikbare batterijen met een lage temperatuur.



Figuur 12. Kenmerkend gedrag van een waterstof-luchtcel met een lage temperatuur (25°C). Elektroliet: verdund H₂SO₄, 5 normaal.
Elektroden: in teflon ingekit platina, in elke elektrode 35 mg Pt/cm². Deze soort van elektrode werd gebruikt bij de Gemini-ruimtevluchten. Bij de maximale energieproductie is de investering aan Pt 0,41 kg/kW_e [61, blz. 293].

Figuur 12 toont het kenmerkende gedrag van een waterstof-luchtcel met lage temperatuur wat betreft het uitgangsvoltage V_t en de specifieke energieproductie $W = i \cdot V_t$ als functies van i (de batterijprestatie vertoont hetzelfde verloop). De volgende aspecten verdienen de aandacht.

- Het voltage V_0 bij open circuit is 17% beneden de verwachte (theoretische) waarde.

- Er treedt sterke polarisatie op (daling van voltage ΔV), vooral bij lage i -waarden. Beide verschijnselen hangen rechtstreeks samen met de lage reactiviteit van zuurstof aan de Pt-kathode van de cel, ondanks de zeer hoge katalysatorlading van de elektrode, nl. 35 mg Pt per cm² elektrode-oppervlak.
- De specifieke energieproductie W is maximaal bij een waarde van V_t , van ongeveer 0,5 - 0,4 V. Aangezien het totale rendement van het galvanische oxydatieproces evenredig is met V_t/V_0 , moet er altijd een compromis worden gevonden tussen de gewenste energieproductie en het gewenste rendement. In de regel wordt bij de opgegeven vermogensafgifte van batterijen uitgegaan van voltages van 0,5 tot 0,6 V van de afzonderlijke cellen (d.w.z. dicht bij het maximum vermogen), het totale rendement schommelt dan tussen 40 en 50%. Een lagere vraag naar energie leidt derhalve tot een hoger rendement dan het ontwerp-rendement. Dit bijzondere aspect van brandstofcellen blijkt uit Fig. 10, waarin tevens het andersoortige gedrag van dieselmotoren en gasturbines is aangegeven.
- Figuur 12 heeft betrekking op elektroden van het bij de Gemini-ruimtevluchten gebruikte soort. Voor het maximale vermogen van ca. 170 mW/cm² is een hoeveelheid Pt nodig van 70 mg/cm² (twee elektroden per cel), d.w.z. 0,41 kg Pt/kW, wat voor commercieel gebruik niet aanvaardbaar is.

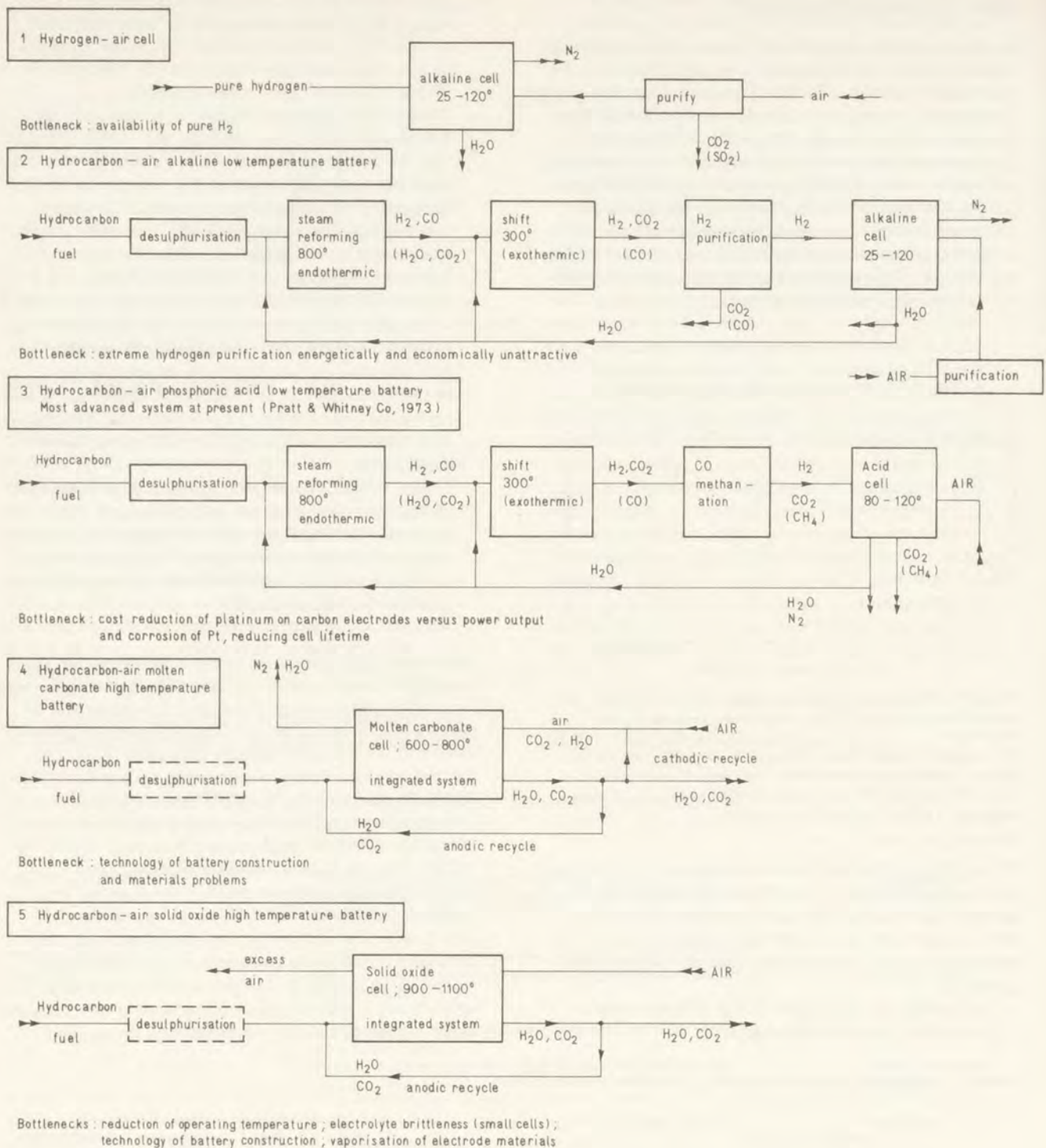
Zoals reeds opgemerkt zijn de polarisatieverliezen voornamelijk te wijten aan de onvoldoende (elektro)-chemische reactiviteit van zuurstof. De situatie is nog slechter bij gebruik van de een of andere fossiele brandstof. Alleen waterstof (en het zeer kostbare hydrazine N₂H₄) zijn reactief genoeg om een bevredigende stroomdichtheid bij lage temperaturen (25 - 120°C) op te leveren. De veel geringere reactiviteit van andere brandstoffen (in afdalende volgorde): H₂ >> zuivere zuurstof > lucht > CO >> CH₄ (en hogere koolwaterstoffen) > steenkool, is in overeenstemming met het feit dat zuurstof en fossiele brandstoffen vrij in de natuur aanwezig zijn, terwijl waterstof dat niet is. De reactiviteit is het kernprobleem bij het onderzoek op het gebied van brandstofcellen en hoewel in de afgelopen twee decennia grote vooruitgang is geboekt bij de ontwikkeling van geschikte elektro-katalysatoren en van behoorlijk ontworpen

Tabel 5. Verenigbaarheid van brandstoffen, elektroden en elektrolieten

		Lage temperatuur		Hoge temperatuur		
		KOH	Zuur ¹⁾	Carbonaat	Vast oxyde	
brandstof	zuivere H ₂ , N ₂ H ₄ gekraakt NH ₃	exotisch	+	+	(+)	(+)
	onzuivere H ₂ CH ₃ OH C-H-O-gassen ¹⁾	gewenst	—	+	+	+
elektroden	elektroden van onedele metalen Ni, Ni ₂ B, NiO, CuO kool + oxydische (in de geoxydeerde vorm) katalysator	gewenst	+	+	+	±?
	elektroden van edele metalen Pt, Pt-Ru, Au, Pd-Ag folie (H-selectief) Pt op kool	kostbaar	+	+	(+)	+

¹⁾ C-H-O-gassen verkregen uit de vergassing van steenkool of de omvorming van brandstoffen op koolwaterstofbasis.
Let op de onverenigbaarheid van de gewenste brandstoffen en de gewenste elektroden voor cellen met een lage temperatuur!

Tabel 6. Brandstofcelsystemen en 'bewerking' van brandstoffen



poreuze elektroden met een groot inwendig oppervlak, zijn de overige problemen tot dusverre onopgelost gebleven. De belangstellende lezer zou een aantal handboeken [61 - 65] over dit onderwerp kunnen raadplegen ter aanvulling op dit beknopte overzicht van de bestaande soorten van brandstofcellen (Tabel 1), problemen met de verenigbaarheid (Tabel 5) en de complete brandstofcelsystemen met de vereiste voorbehandeling van brandstoffen (Tabel 6).

Cellen met een lage temperatuur

Rechtstreekse galvanische oxydatie van koolwaterstoffen (en steenkool) in cellen met een lage temperatuur is

vrijwel onmogelijk. Ondanks zeer uitgebreide pogingen in de V.S. [66] blijken in fosforzuurcellen bij ca. 180°C slechts lage energieopbrengsten (20 mW/cm²) mogelijk, bij teleurstellend lage celvoltages (< 0,4 V) en zeer hoge kosten voor de platina katalysator (> \$ 10⁴/kW). Zelfvergiftiging leidt tot onregelmatige werking en een beperkte levensduur van de cel (< 600 uur). Voor cellen met een lage temperatuur is voorbehandeling van de brandstof, waardoor waterstofrijke brandstoffen worden verkregen, dus een dringende vereiste. De hiervoor nodige handelingen zijn aangegeven in Tabel 6. Alkalische cellen met een lage temperatuur kunnen niet werken met voorbehandelde brandstoffen die CO₂ (of

CO) bevatten wegens de carbonaatvorming in de elektroliet. Tegenover het voordeel dat alkalische cellen bieden — het gebruik van goedkope elektroden — staat het nadeel dat uiterst zuivere waterstof dient te worden gebruikt. De laatste fase (verwijdering van CO₂ + CO door absorptie in geschikte vloeistoffen, of de diffusie van waterstof door palladium-zilver membranen), leidt tot een ernstige vermindering van het rendement en tot hoge kapitaalkosten.

Zure cellen met een lage temperatuur, die de prettige eigenschap hebben, dat zij met CO₂-bevattende brandstoffen kunnen werken, hebben zuurbestendige elektrode-materialen nodig. In de praktijk verenigt alleen platina (of legeringen daarvan met soortgelijke kostbare metalen) een voldoende elektrokatalytische activiteit met corrosiebestendigheid.

Een nadeel dat alle typen cellen met een lage temperatuur gemeen hebben, is de relatief slechte prestatie van de luchtelektrode, zelfs wanneer zeer hoge Pt-beladingen worden gebruikt. De sterke daling van het voltage bij een lage stroomdichtheid en het (dan te lage) voltage van het open circuit zoals te zien in Figuur 12, zijn uitsluitend te wijten aan de luchtelektrode. Deze ongunstige resultaten blijven zich voordoen tot een werkt temperatuur van 160°C en leiden tot ongewenste rendementsverliezen. De verbetering van de prestatie van de zuurstof-luchtelektrode, waarbij platina wordt vervangen door minder kostbare en schaarse katalysator-materialen, is nog steeds een omvangrijke taak voor verder onderzoek.

Brandstofbehandeling voor batterijen met een lage temperatuur, zoals te zien is in Tabel 6, houdt in de bouw van een volledige chemische installatie die in de procesgang aan de batterij voorafgaat. Dit leidt uiteraard niet alleen tot een grotere ingewikkeldheid van het systeem en stijging van de kapitaalkosten, maar ook tot vrij ernstige rendementsverliezen. De hoofdoorzaak van deze verliezen ligt in het sterk endotherme (warmte vereisende) stoomomvormingsproces van de ontzwavelde brandstof bij 700-800°C. Hoewel zowel het daarop volgende evenwichtsverschuivingsproces en de feitelijke galvanische oxydatie in de batterij exotherme (warmte producerende) reacties zijn, vinden zij plaats bij veel lagere temperaturen, wat betekent dat hun laag-niveau warmte niet kan worden gebruikt om het omvormingsproces op gang te houden. Het gevolg van deze fundamenteel ongunstige warmtebalans is dat ongeveer 25% van de brandstof *rechtstreeks* met lucht moet worden verbrand om de hoog-niveau warmte te produceren die de stoomvormer nodig heeft. Als de batterij zelf werkt met een rendement van 60% wat de *galvanisch* omgezette brandstof betreft, dan belooft het totale rendement, als gevolg van deze warmtebalans, $75\% \times 60\% = 45\%$.

Cellen met een hoge temperatuur

Uit het bovenstaande is duidelijk geworden waarom het onderzoek van cellen met een hoge temperatuur zo nuttig is. De reactiviteitsproblemen zijn veel minder, er kunnen minder kostbare elektrodematerialen worden gebruikt, en bij werktemperaturen boven 650-700°C kunnen brandstoffen op koolwaterstofbasis rechtstreeks aan de brandstofcellen worden toegevoerd wanneer zij gemengd zijn met een voldoende hoeveelheid stoom en CO₂. Deze beide gasen zijn in overvloed voorhanden

uit de afgewerkte (uitlaat)-produkten van de anode, zoals is aangegeven in de systemen 4 en 5 in Tabel 6. Het wezenlijke kenmerk van de anodische terugvoerkringloop is de combinatie van het endotherme omvormingsproces en de exotherme galvanische verbranding van de produkten H₂ en CO binnen de brandstof (anode)-ruimten van de batterij. Dit soort geïntegreerde systemen heeft geen ongunstige warmtebalans, zodat in bijvoorbeeld gesmolten carbonaatcellen een nuttig brandstofgebruik van 90% mogelijk is [67] met een totaal rendement van rond 60% (Tabel 2).

Een bijkomend voordeel van cellen met een hoge temperatuur is dat zij kunnen werken op brandstoffen die een bescheiden hoeveelheid zwavel bevatten (minder dan 1 gewichtsprocent), zodat voorbehandeling ter ontzwaveling vaak overbodig zal zijn. Cellen met een lage temperatuur behoeven een grondige ontzwaveling van de brandstof om te voorkomen dat de anoden (brandstofelektroden) vergiftigd raken en dus niet meer werken. In dit verband zijn de beweringen over een het milieu niet verontreinigende werking van de brandstofcellen misleidend: ontzwaveling is voor cellen met een lage temperatuur een operationele noodzaak en geen verdienste. Anderzijds geldt voor zowel cellen met een lage als voor die met een hoge temperatuur dat in de batterijen geen vorming van verontreinigende stoffen van het NO_x-type plaatsvindt, wat een wezenlijk voordeel is. (De verhitting ten behoeve van de stoomvormer brengt wat vorming van NO_x met zich, aangezien deze warmte door rechtstreekse verbranding wordt verkregen.)

In Tabel 6 worden in het kort de min of meer voor de hand liggende nadelen van cellen met een hoge temperatuur opgesomd. In de cel met een vast oxyde elektroliet is een zeer hoge operationele temperatuur nodig, omdat bij temperaturen beneden de 900°C de specifieke weerstand van alle geschikte elektrolieten te groot wordt. Bovendien beperkt de brosheid van de noodzakelijkerwijze dunne elektrolietplaten of -buizen de omvang van de afzonderlijke cellen tot een oppervlak van enkele vierkante centimeters, wat noodzaakt tot het gebruik van een uitermate groot aantal cellen (meer dan 1000 per kW). Schrijver is van mening dat cellen met vaste elektrolieten, gebaseerd op bestaande systemen met een vast oxyde, zoals de zirconium-calcium elektroliet, geen toekomstmogelijkheden bieden. Er zal een belangrijke doorbraak in de richting van oxyde-ionengeleiders die bij lagere temperaturen kunnen werken, moeten worden verwezenlijkt alvorens batterij-systemen van dit type mogelijk worden. Fundamenteel onderzoek naar elektrolieten van vaste oxyden is derhalve dringend geboden.

Cellen met gesmolten carbonaat, die tussen 1950 en 1969 in Nederland uitvoerig werden onderzocht door TNO (en die, op basis van de Nederlandse resultaten, nog steeds in de V.S. worden bestudeerd door een subcontractor van Pratt & Whitney), bieden veel minder fundamentele moeilijkheden. De elektrolieten worden vervaardigd uit een mengsel van inert vast poeder (aluminaten van lithium, natrium, kalium) en een aangepaste hoeveelheid van gesmolten alkali-carbonaten, zodat het hieruit gevormde materiaal een pasta-achtige, halfvaste substantie is [68]. Gecombineerd met nikkelen

anoden en zilveren of lithium-nikkelen zuurstofkathoden, kunnen specifieke vermogensproducties tot 250 mW/cm^2 bij $0,6 \text{ V}$ worden verkregen bij ca. 700°C . Kleine laboratoriumcellen zijn reeds meer dan vier jaar onafgebroken in werking geweest. Afzonderlijke cellen met een oppervlak van 500 cm^2 , d.w.z. $100\text{-}125 \text{ W}$ per cel, werden in de VS gebouwd en beproefd door het Institute of Gas Technology in Chicago. Een nog onopgelost fundamenteel probleem van de met gesmolten carbonaat werkende cellen is de noodzaak van de terugvoer van de CO_2 bevattende afgewerkte gassen uit de anode-ruimten naar de binnenstromende lucht (zie de terugvoerkringloop van de anode-produkten in systeem 4 van Tabel 6). Indien een geschikt proces kan worden gevonden voor de afscheiding van H_2O en CO_2 bij de werktemperatuur van de cellen, zou of het specifiek vermogen of de procentuele benutting van de brandstof kunnen worden opgevoerd tot boven de aangegeven waarden. Het gesmolten carbonaatsysteem zou een tweede generatie brandstofcelbatterij kunnen vormen, indien door intensief technologisch onderzoek de tamelijk moeilijke materiaalproblemen zouden kunnen worden opgelost, die door het werken met gesmolten zout-systemen bij hoge temperatuur ontstaan. Maar deze problemen zouden kunnen worden aangepakt tegen een uiterst gering deel van de kosten die voor de ontwikkeling van bijv. kweekreactoren nodig zijn. Huynink [69] heeft onlangs een overzicht gepubliceerd van de werkzaamheden van TNO inzake de ontwikkeling van batterijen met gesmolten carbonaat.

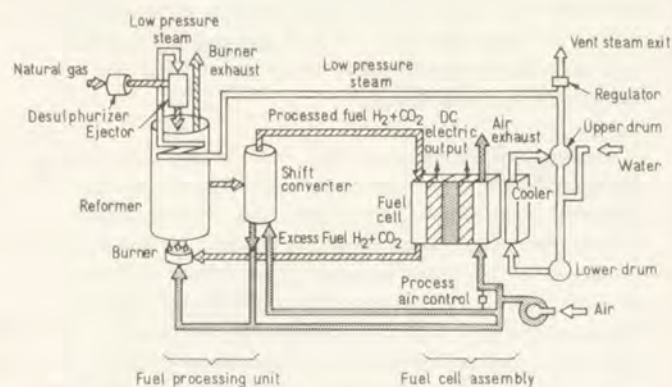
Gebbruik van steenkool

De onbewerkte grondstof kan in geen enkel type brandstofcel worden gebruikt. Na vergassing met stoom (een endotherm proces) is het in beginsel mogelijk, de hierbij geproduceerde gassen te gebruiken. Voor cellen met een lagere temperatuur vervangt het vergassingsproces het omvormingsproces met stoom in Tabel 6 (de systemen 2 en 3), maar het ontzwavelingsproces komt dan toch na de vergassing. De overige fasen zijn in wezen dezelfde als aangegeven in de tabel. Cellen met een hoge temperatuur bieden het voordeel dat de vergassing met het batterijsysteem kan worden geïntegreerd, daar de voornaamste reactie bij hoge temperatuur is: C (steen-kool) + CO_2 (uit de afgewerkte gassen van de anode) $\rightarrow 2 \text{ CO}$ (galvanische brandstof). Er is derhalve geen stoom nodig om de voor systemen met een lage temperatuur onmisbare waterstof te produceren. Niettemin is het geïntegreerde systeem voor gebruik van steenkool ingewikkelder dan dat voor koolwaterstoffen, omdat de koolvergassingsruimte gescheiden moet worden gehouden van de gasruimten van de batterij, wil men verstopping en de vorming van slakken in de batterij voorkomen. Zwavelrijke kwaliteiten steenkool moeten halverwege het proces worden ontzwaveld (bij een hoge temperatuur) terwijl as en de vorming van slakken in de vergassingsruimte het systeem ingewikkelder maken.

De fosforzuur brandstofcelbatterij van Pratt & Whitney Co. Hoewel al veel reclame is gemaakt voor dit batterijsysteem (dat voor de praktijk beslist het meest geavanceerde is) [70], beschikken we over heel weinig nuttige wetenschappelijke of technische gegevens. Enkele andere grote Amerikaanse ondernemingen die reeds tamelijk lang bij het onderzoek van brandstofcellen betrokken zijn geweest, zijn in feite wat huiverig om

een nieuw onderzoek- en ontwikkelingsprogramma op te zetten wegens de geheimzinnigheid rond de werkelijke vooruitgang die Pratt & Whitney zouden hebben geboekt. Maar het lijkt wel vast te staan dat een uiteindelijke mislukking van deze werkzaamheden het einde van alle langdurige, grootscheepse inspanning zou inhouden.

De basiskenmerken zijn te vinden in Tabel 6, systeem 3. Figuur 13 geeft een uitvoeriger schema voor een batterij van $12,5 \text{ kW}_e$ (ontwerp-) productie van gelijkstroom bij $0,6 \text{ V}$ per cel en bij een batterijvoltage van 120 V .



Figuur 13. Procesgang (vereenvoudigd) van de experimentele PC-11 Power-cel, voor het TARGET-project ontwikkeld door Pratt & Whitney Co. De brandstofcelbatterij is een $12,5 \text{ kW}_e$ (ontwerpwaarde) fosforzuursysteem met platina-op-kool elektroden voor brandstof en zuurstof. De gelijkstroom wordt in wisselstroom omgezet door een omvormer op basis van vaste stof. De batterij werkt bij 120°C . Het totale rendement aan de wisselstroomuitgangen wordt geraamd op 35-39% van de lage verbrandingswaarde van het methaangas [66, blz. 83].

De anode bestaat uit kool beladen met Pt als katalysator, dat H_2 aantrekt en CO_2 afstoot. De elektrolyt is geconcentreerd H_3PO_4 in een inerte vaste matrix. De kathode bestaat eveneens uit kool beladen met Pt als katalysator, dat hier zuurstof uit de atmosfeer aantrekt en H_2O afgeeft (zie Figuur 9a).

In *afzonderlijke cellen* belooft de stroomdichtheid $180\text{-}185 \text{ mA/cm}^2$ bij $0,6 \text{ V}$, d.w.z. 110 mW/cm^2 ; de temperatuur is 120°C ; het oppervlak van elke elektrode is 570 cm^2 ; de celstroom is $10,4 \text{ A}$; het celvermogen is $62,5 \text{ W}$. Het materiaal van de matrix is niet bekend (mogelijk fosfaten van zware metalen en/of teflon in de een of andere poreuze vorm). De verhouding van de Pt-belading van anode/kathode is ongeveer 1 : 5. De omvorming van de brandstof (H_2) per doorstroming belooft 70-75%. De structuur van de elektrode en de fabrikagetechnieken zijn onbekend; de elektroden zijn zeer dun ($< 1 \text{ mm}$), bruto afmetingen $25 \times 25 \text{ cm}$. De batterij is opgebouwd uit 4 celkolommen van elk 50 in serie verbonden cellen; de kolommen kunnen vermoedelijk worden verwisseld en in serie verbonden om 120 V te verkrijgen (ontwerp). De gasstroom gaat parallel door alle cellen (d.w.z. elke cel werkt in aanleg onder dezelfde belastingsomstandigheden).

De waterbalans wordt gehandhaafd door regulering van de luchtstroom, wat een kenmerkend voordeel is van cellen met een zure elektrolyt waarin H_2O wordt gevormd aan de kathode. Vermoedelijk hebben alle 50 cellen van een kolom een gezamenlijke kathode-(lucht)-ruimte, wat een aanzienlijke besparing op materialen voor de gasverdeling zou opleveren en de ingewikkeldheid van het systeem zou verminderen.

Het complete systeem. In de voorafgaande alinea's werd de installatie voor brandstofbewerking reeds besproken. De methaniseringsfase (zie Tabel 6) ontbreekt in Figuur 13, maar lijkt onmisbaar te zijn als men wil voorkomen dat de Pt-anoden door CO worden vergiftigd. Verwarming van de omvormer door de overmaat brandstof die weer uit de batterij wordt gevoerd (in plaats van door een overeenkomstig gedeelte van de toegevoerde koolwaterstof) vormt een elegante oplossing voor het fundamentele probleem dat een 100% gebruik van H₂ uit het H₂ + CO₂ mengsel in de batterij niet mogelijk is. Bovendien worden giftige nevenproducten, zoals formaldehyde uit de anodische uitlaat, op deze wijze rechtstreeks verbrand. Het systeem wordt nog verder vereenvoudigd door het weglaten van de terugvoerkringloop van de stoom uit de kathode uitlaat (overtollige lucht + stoom) naar de koolwaterstof-omvormer en de verschuivingsomvormer. Dit betekent echter wel het gebruik van zuiver water als een derde reagens, naast koolwaterstof en lucht. Voor grotere systemen lijkt condensatie van het water uit de lucht-uitlaat voor terugvoer in de kringloop onmisbaar. De verwarming van de omvormer vereist 25-30% van de toegevoerde H₂. Voor luchtaanjagers, ventilatoren, enz. voor de terugvoerkringloop zou ongeveer 10% van de totale geproduceerde gelijkstroom nodig zijn, maar de genoemde ontwerpproductie (120 V, 12,5 kW_e) betreft niet de hoeveelheid bruto gelijkstroom, maar de nuttige hoeveelheid. In de praktijk is het gelijkstroom-rendement derhalve 43-40%, gebaseerd op de lage verbrandingswaarde van CH₄ als primaire brandstof (52-49% bij 70% van de ontwerp-vermogensafgifte).

Bovendien omvat het systeem een (vaste stof-) gelijkstroom/wisselstroom-omvormer, die 125 V normale wisselstroom of 125/216 V draaistroom levert. Het uiteindelijke rendement aan de wisselstroomuitgangen wordt geraamd op 36-39%.

Kosten en het probleem van de platina elektrode. Omtrent dit punt heerst aanzienlijke verwarring. Terwijl het ene rapport [66] (1972) als platina hoeveelheden per ontwerp-kW 100 tot 40 gram noemt, wat overeenkomt met fl. 1.500-600 per kW alleen al voor Pt, noemen nieuwere bronnen [70, 71] prijzen voor de gehele installatie die variëren tussen \$ 140 en \$ 185, d.w.z. fl. 380-500 per kW. In het laatste geval betreft dit levering na 1977 door Pratt & Whitney van 26 MW sub-centrales waarbij de materialen als afgeschreven worden beschouwd. Hoewel hier sprake kan zijn van flink wat ongerechtvaardigd optimisme en van tijdige reclame, is het wel een feit dat bij de werkzaamheden bij Pratt & Whitney thans ongeveer 1200 technici zijn betrokken; met inbegrip van een onderzoekslaboratorium met 30-50 wetenschapsmensen en assistenten. Het vorige TARGET-programma (dat werd gesteund door gasbedrijven) [57], waarin in de periode 1967-1972 \$ 50 X 10⁶ werd geïnvesteerd, is thans uitgebreid door de deelneming van 60 elektriciteitsbedrijven, die elk \$ 0,5 X 10⁶ per jaar bijdragen, d.w.z. \$ 90 X 10⁶ voor het planningstijdvak 1973-1976. Andere Amerikaanse ondernemingen die zich vroeger bezighielden met onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten op het gebied van brandstofcellen, staan er sceptisch tegenover, maar vrezen de boot te missen. Men beweert dat Pratt & Whitney, de enige grote onderzoeker, het wat gemakkelijker zou krijgen, als een serieuze mededinger zoals de

General Electric Co (Gemini-brandstofcellen) haar arbeid op dit terrein zou hervatten. De Engelse Central Electricity Generating Board weigerde onlangs gelden bij te dragen aan het Pratt & Whitney-project, voornamelijk wegens de 'onaantrekkelijke voorwaarden' die het Amerikaanse bedrijf bood [72].

Vanuit een wetenschappelijk standpunt zijn er twee mogelijkheden:

- 1) de grote doorbraak in het vervangen van Pt door een goedkope elektrokatalysator voor energielevering bij de reductie van zuurstof is gemaakt, maar wordt strikt geheim gehouden;
- 2) de Pt-belading per cm² is verminderd tot minder dan 1 mg voor zowel de H₂ als de O₂ elektroden.

Het onder 1) gestelde is hoogst onwaarschijnlijk. Vindingen van zulk een belang kunnen niet geheim worden gehouden, gezien het grote aantal erbij betrokken onderzoekers.

Wat 2) betreft is de kernvraag of de zeer kleine Pt-belading de benodigde 110 mW/cm² kan leveren en zo ja, over een minimum periode van verscheidene jaren. Schrijver dezes is tamelijk sceptisch in dit opzicht, gedeeltelijk op grond van zijn eigen praktijkervaring. Indien men de zaak optimistisch beziet, zou 1 mg Pt/cm² overeenkomen met 9 g Pt/kW_e. Wanneer we de wereldreserves aan Pt stellen op 12.000 ton en uitgaan van een gebruik van 10% daarvan voor brandstofcelbatterijen, zou een totaal vermogen van 130 X 10³ MW_e kunnen worden geïnstalleerd. Gesteld tegenover de wereldvraag is dat geen indrukwekkend cijfer, maar toch is het bijvoorbeeld meer dan de mogelijke nuttige energie van getijdewolven [2] die over de gehele wereld slechts 13 X 10³ MW_e zouden kunnen produceren.

IV. Gecombineerde productie van elektriciteit en warmte

door ir. H. Hondius en ir. K. Wassenaar

Inleiding

In het onderstaande zal worden nagegaan welke besparingsmogelijkheden er zijn bij de combinatie van productie en verbruik van elektriciteit en warmte. Een viertal specifieke toepassingen zijn daarbij globaal onder de loupe genomen, waarbij uitsluitend is gekeken naar de mogelijke energiebesparing. Economische factoren zijn buiten beschouwing gelaten, evenals de invloed van prijsontwikkelingen in de verschillende sectoren. Deze zijn immers vrijwel onmogelijk te evalueren, behalve in het verband van een concreet project. Na een overzicht van de in Nederland in gebruik zijnde warmte/krachtinstallaties wordt achtereenvolgens aandacht besteed aan besparingsmogelijkheden door het gebruik van kracht/warmtesystemen voor een industriële installatie, een stedelijke agglomeratie, installaties in de utiliteitsbouw (zgn. Total Energy installatie) en de glastuinbouw. Voor de grondslagen van de hier besproken systemen zie men de paragrafen II.3 en II.6.

IV.1. Kracht/warmtesystemen

Reeds in de jaren twintig werd onderkend, dat gecombineerde produktie en verbruik van warmte en elektriciteit in industrieën en woonwijken tot aanzienlijke warmtebesparingen kan leiden.

Daar waar de kosten van energie een zeer belangrijke uitgavenpost vormden, vond gecombineerde produktie van warmte en elektriciteit reeds toepassing (bijvoorbeeld in raffinaderijen en in de suiker-, strokarton-, aardappelmeel- en papierindustrie). Deze systemen waren dus reeds daar ingevoerd, waar een bepaalde hoeveelheid lage druk of middendruk stoom voor het industriële proces en waar de opwekking van een zekere hoeveelheid elektriciteit nodig waren.

De zo geproduceerde elektriciteit kan, inclusief het ketelrendement, worden opgewekt met een rendement van 86%, *mits* evenwel warmte en elektriciteit steeds in de juiste hoeveelheden gelijktijdig kunnen worden opgewekt en afgenomen.

Deze warmte/krachtinstallaties met hun warmte-economische voordelen zijn in trek gekomen in de kolenstooktijd, toen men steenkool met een beter rendement kon verstoken in relatief grote installaties, bediend door geschoold personeel, dan in kleine installaties.

Het ter beschikking komen in de jaren vijftig van stookolie en in de jaren zestig van aardgas, beide tegen lage prijs verkrijgbaar en gemakkelijk met goed rendement te verstoken, alsmede de sterke voortgaande stijging van de arbeidskosten hebben een principiële verschuiving teweeggebracht.¹⁾

Steeds meer industriële warmte/krachtinstallaties, vooral kleinere met een vermogen tot 1.500 kW, werden vervangen door geautomatiseerde lage druk stoomketels ter voorziening in de warmtebehoefte, terwijl de elektriciteit uit het openbare net werd betrokken. Bij deze gang van zaken waren de personeels- en onderhoudskosten geringer dan de kosten van het grotere brandstofverbruik.

Alhoewel het ter beschikking komen van aardgas voor particuliere kleinverbruikers tegen een aantrekkelijke prijs een verdere uitbreiding van warmte/krachtssystemen voor de verwarming van stedelijke agglomeraties economisch minder aantrekkelijk heeft gemaakt, worden in Utrecht en Rotterdam nog steeds stadswijken en gebouwencomplexen door de elektriciteitsbedrijven van warmte voorzien. Deze warmte wordt voor een belangrijk deel in de plaatselijke elektrische centrales verkregen uit tegendruk- of aftapturbines, gecombineerd dus met de elektriciteitsproduktie.

Gelijktijdig met de komst van het aardgas diende zich als variant van de warmte/krachtkoppeling de kracht/warmtekoppelingsinstallatie aan, waarbij met behulp van een motor- of gasturbinegenerator elektriciteit wordt opgewekt en de afvalwarmte uit het koelwater en uitlaatgassen voor verwarmingsdoeleinden wordt gebruikt. Bij de warmte/krachtkoppeling is de hoeveelheid te produceren warmte in wezen bepalend voor het elektrisch vermogen (behoudens bij de aftapcondensatie-turbine).

¹⁾ De energiekosten zijn in verhouding tot de kosten van een manuur in de periode 1951-1970 met een factor 4 gedaald.

Bij de kracht/warmtekoppeling kunnen verschillende mogelijkheden worden onderscheiden:

- de kracht- en warmtebehoefte van een proces zijn geheel in evenwicht; dit is gewoonlijk alleen het geval in de industrie;
- de behoefte aan warmte is de dominerende factor. De machines die de elektriciteit opwekken zijn zo gekozen, dat bij een bepaalde omschreven warmtebehoefte, met een bijbehorende belastingsfactor, de brandstof optimaal wordt benut. Dit optimale gebruik noodzaakt tot levering van overtollige elektriciteit aan het openbare net, ofwel tot aankoop van elektriciteit in geval van een tekort. Deze oplossing is hier gekozen voor de voorziening in een stad en in de glastuinbouw;
- de elektriciteitsbehoefte is de beslissende factor voor het te installeren vermogen tot elektriciteitsproduktie. Het doel is de bij de elektriciteitsopwekking vrijkomende warmte zo goed mogelijk te gebruiken. Deze laatste vorm wordt het *total energy system* genoemd. Deze kracht/warmte en total energy systemen hebben veel meer bekendheid verworven dan de warmte/krachtinstallaties ooit hebben gedaan.

In de jaren 1966-1972 is het gezamenlijk vermogen van de warmte/krachtinstallaties nagenoeg niet toegenomen, maar het aantal installaties nam af. Het aantal installaties ten behoeve van de stedelijke voorziening is thans gering en van beperkt vermogen. De op commerciële gronden aangeschafte kracht/warmte installaties zijn hoofdzakelijk in chemische bedrijven opgesteld. Zou er geen aardgasaanbod tegen relatief gunstige prijzen zijn geweest, dan zouden deze chemische industrieën zeer waarschijnlijk warmte/krachtinstallaties met oliegestookte stoomketels en tegendruk stoomturbines hebben genomen.¹⁾

Vast staat dat op grond van het energieprijsniveau, dat tot medio 1972 in Nederland gold, er niet gesproken kan worden van een uitbreiding van het gecombineerd opwekken van elektriciteit en warmte of van een verder doordringen van de zgn. 'Total Energy' gedachte. Indien de diverse industriële aftapmachines samen met 1.261 MW en de 'Total Energy' installaties met 294 MW worden meegerekend, nemen de gecombineerde installaties een bescheiden deel van de totale elektriciteitsproduktie voor hun rekening: de openbare centrales hadden begin 1972 een opgesteld vermogen van 9.700 MW.

Dit korte historische overzicht doet de vraag rijzen of door een ruimere toepassing van speciaal de kracht/warmtekoppeling grote warmtebesparingen zijn te verwachten, zoals sommige publikaties stellen. En zo ja, welke verdere ontwikkelingen zou men dan kunnen verwachten?

In het onderstaande wordt een poging²⁾ gedaan een inzicht te geven in de besparingen die te bereiken zouden zijn, indien in bepaalde sectoren zou worden besloten over te gaan tot gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte. De analyse wordt beperkt tot een uiteenzetting van de resultaten van de in [73] vermelde onderzoeken.

¹⁾ In de periode waarin de aardgasprizen zeer gunstig waren, was de prijs voor geregelde levering van aardgas vrijwel gelijk aan die voor zware stookolie.

²⁾ De uitvoerige berekeningen kunnen worden ontleend aan [73].

De kernvraag bij alle berekeningen over warmtebesparing is de tijdsduur waarover er een goed evenwicht tussen de vraag naar elektriciteit en die naar warmte bestaat. Dit evenwicht is doorslaggevend, wil de gewenste energiebesparing worden bereikt. Aan dit aspect moet dan ook de grootste aandacht worden besteed, wil men teleurstellingen vermijden.

IV.1.1. Gecombineerde productie van elektriciteit en warmte in de industrie

Twee gevallen worden vergeleken, nl. (a) het gecombineerd opwekken van elektriciteit en warmte binnen het bedrijf en (b) het kopen van elektriciteit uit het openbare net en het zelf produceren van stoom. In de berekeningen is uitgegaan van een behoefte aan elektrisch vermogen van 15 MW en een behoefte aan 43,5 ton stoom per uur met een druk van 24 bar en een temperatuur van 250°C. Dit impliceert een verhouding tussen elektriciteit en warmte van 1 : 1,97.

In het geval (a) wordt elektriciteit opgewekt met een gasturbinegeneratorset; de afgewerkte gassen worden geleid in een afvalwarmteketel, die zonder bijstoken de verlangde stoomproductie levert. Het gekozen voorbeeld betreft een uit economisch oogpunt optimale installatie. Wanneer de afgewerkte gassen uit de ketel komen hebben ze een temperatuur van ca. 160°C bij een voedingwatertemperatuur van 65°C.

In het geval (b) wordt de elektriciteit uit het openbare net betrokken en de stoom opgewekt in een gastestookte stoomketel.

In 1972 was in Nederland bij de elektriciteitsopwekking door de openbare centrales het gemiddeld rendement ca. 35,8%. De verliezen bij vervoer van de elektriciteit tussen centrale en industrie zijn op 6% gesteld.

a) Kracht/warmtekoppeling

Het vollast-rendement van de gasturbine-generatorset bedraagt 24,6%. Warmteverbruik voor elektriciteit en stoom per uur:

$$\frac{15 \times 3.600}{0,246} \times 10^6 = 219,5 \times 10^9 \text{ J/h}$$

b) Eigen opwekking van stoom, inkopen van elektriciteit

Het vollast-ketelrendement bij een voedingswatertemperatuur van 105°C is gesteld op 90%. Warmteverbruik voor de stoomproductie:

$$\frac{43.500 \text{ (kg stoom/h)} \times 2,44 \times 10^6 \text{ (J/kg stoom)}}{0,9} = 117,9 \times 10^9 \text{ J/h}$$

Warmteverbruik voor de elektriciteitsopwekking en transport met een rendement van respectievelijk 35,8% en 94%:

$$\frac{15 \times 3.600}{0,358 \times 0,94} \times 10^6 = 160,5 \times 10^9 \text{ J/h}$$

Totaal $278,4 \times 10^9 \text{ J/h}$

Indien er wordt uitgegaan van het landelijk gemiddeld rendement voor de elektriciteitsopwekking kan er via geval (a) dus 21,2% aan brandstof worden bespaard ten opzichte van geval (b).

Wanneer de gecombineerde installatie bijvoorbeeld 7.000 uur per jaar draait, dan bedraagt de besparing per jaar $7.000 \times (278,4 - 219,5) \times 10^9 = 412,3 \times 10^{12} \text{ J}$, overeenkomend met ca. $11,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ aardgas per jaar.

Dat de besparing niet groter uitvalt, komt omdat de benodigde warmte over het algemeen toch al wel met een goed rendement wordt opgewekt.

IV.1.2. Stedelijke voorziening

Onderzocht is welke besparingen te bereiken zijn wanneer een woonagglomeratie bestaande uit 100.000 centraal verwarmde standaardwoningen (geen industrie) uit een kracht/warmte centrale van elektriciteit en warmte wordt voorzien. De elektriciteit wordt opgewekt met gasturbine-generatorsets. De warmte wordt via afvalwarmteketels verkregen; in het meest koude jaargetijde wordt de warmtelevering aangevuld met behulp van gastestookte ketels. Een stadsverwarmingsnetwerk vervoert de warmte naar de woningen.

Dit systeem zou in de plaats komen van de opwekking van elektriciteit in een buiten de stad gelegen conventionele gastestookte centrale en de verwarming van de woningen met individuele centrale verwarming en een warmwatergeyser op basis van aardgas.

Er zijn steeds situaties met elkaar vergeleken, waarin dezelfde hoeveelheid elektriciteit en dezelfde hoeveelheid warmte aan de woningen wordt geleverd.

Indien, i.v.m. de te dekken warmtebehoefte, er met de gasturbines meer elektrische energie wordt opgewekt dan waaraan de woningen behoefte hebben, wordt de overtollige elektriciteit afgegeven aan het koppelnet van de openbare elektriciteitsbedrijven; bij een tekort wordt de elektriciteit uit het koppelnet betrokken. Voorts is aangenomen dat het kracht/warmtecomplex — analoog aan de situatie in Utrecht en Rotterdam — door het openbare nutsbedrijf wordt beheerd.

Er is steeds van uitgegaan dat er elektrisch wordt gekookt. Hoewel het koken op gas energie bespaart, maakt deze veronderstelling een duidelijke vergelijking tussen de drie gevallen mogelijk.

Geval 1 De woningen zijn van het thans gebouwde type, d.w.z. met een geringe mate van isolatie. Totaal gasverbruik voor centrale verwarming en warmwaterverbruik $4.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Totaal elektriciteitsgebruik 4.500 kWh/jaar .

Geval 2 De woningen zijn goed geïsoleerd. Warmteverbruik equivalent aan een gasverbruik van $2.600 \text{ m}^3/\text{jaar}$, elektriciteitsverbruik als in geval 1.

Geval 3 De huizen zijn goed geïsoleerd, als in geval 2, maar ten gevolge van de toegenomen welvaart is het elektriciteitsverbruik met 30% gestegen tot 6.000 kWh/jaar .

In de praktijk is het mogelijk de gasturbine-afgas-ketelcombinaties op een aantal verschillende plaatsen op te stellen. Hier zullen de besparingen op de transportverliezen van warmte en van elektriciteit evenwel moeten worden afgewogen tegen mogelijk

hogere personeelskosten. In de onderstaande bespreking is uitgegaan van slechts één centraal complex.

Algemene uitgangspunten voor de drie gevallen

1. De kracht/warmte-installatie levert in principe alle warmte die nodig is bij een buitentemperatuur boven 0°C. Onder 0°C worden gasgestookte ketelinstallaties bijgeschakeld, die in de verdere stijging van de warmtevraag tot een buitentemperatuur van -15°C kunnen voorzien.

2. Bij de gewoonlijk optredende temperatuurverdeling over een jaar in Nederland zal dan de kracht/warmtecentrale 90% van de totale warmtebehoefte kunnen dekken. Voorts wordt hier ter vereenvoudiging aangenomen dat de warmtelevering en de daarmee gekoppelde elektriciteitsproductie 3.000 uur per jaar in vollast geschiedt. 10% van de totale warmtebehoefte op jaarbasis wordt gedekt vanuit een — in dit geval gasgestookte — ketelinstallatie, het hulpstation. Dit betekent dus dat het in de praktijk heel goed mogelijk is dat de hulpinstallatie ook in het voor- en naseizoen af en toe met de in deellast draaiende hoofdinstallatie warmte moet leveren. Gasturbines moeten liefst nagenoeg in vollast draaien in verband met het sterk dalende thermische rendement bij deellast. De gecombineerde centrale zal dus een aantal gasturbine-generatorsets/afgasketels moeten omvatten, die al naar behoefte in- of uitgeschakeld worden. De hulpketels kunnen dan worden gebruikt om een tekort te dekken, waarvoor anders een gasturbine in deellast zou moeten worden bijgeschakeld.

3. De optimale oplossing qua brandstofgebruik zou zijn in de kracht/warmtecentrale het gasturbinevermogen zo hoog te kiezen dat de warmtebehoefte bij 0°C precies door de afgasketels wordt gedekt dus zonder de hulpketels in te schakelen. Deze situatie is verondersteld in de berekeningen.

4. Het stadsverwarmingswater wordt in de gecombineerde centrale of in de hulpstations verwarmd van 70 tot 110°C.

5. De leidingverliezen in het transportnet van de stadsverwarming worden gesteld op 10%.

6. Aangenomen wordt dat de elektriciteit in de conventionele centrale wordt opgewekt in eenheden ter grootte van 200 à 600 MW met enkelvoudige heroververhitting met een netto rendement van 40% (moderne installatie).

7. Het rendement van het elektriciteitstransport wordt, wanneer de elektrische energie wordt betrokken van de conventionele centrale, gesteld op 94%, en wanneer elektriciteit wordt opgewekt in de kracht/warmtecentrale op 98%. De uitwisseling van elektriciteit met andere producenten wordt geacht verliesvrij te geschieden.

8. Het gemiddeld thermisch vollastrendement van een centrale verwarmingsketel en een heetwatervoorziening tezamen wordt op 80% gesteld. Dit is de combinatie van de rendementen van de toestellen.¹⁾

¹⁾ Dit is een hoger rendement dan over het algemeen in de praktijk wordt bereikt (zie Hoofdstuk 5). Voor het hier beoogde doel is dit geen bezwaar, aangezien aanname van een lager rendement de mogelijke besparingen slechts zou vergroten.

Resultaat

Uit de berekeningen [73], hier in Tabel 7 samengevat, blijkt dat de besparingen aanzienlijk zijn.

Tabel 7. Besparingen bij toepassing van gecombineerde kracht/warmte opwekking ten opzichte van de conventionele oplossing

	besparing aan aardgas in m ³ per jaar voor 100.000 woningen	per woning
Geval 1	204,6 X 10 ⁶ (26,4%)	2.046
Geval 2	133,7 X 10 ⁶ (25,8%)	1.337
Geval 3	133,7 X 10 ⁶ (23,7%)	1.337

De veronderstelde besparing als gevolg van betere isolatie (vergelijk geval 1 en geval 2) is 4.000 - 2.600 = 1.400 m³ gas per jaar (zie Hoofdstuk 5). De besparing in geval 2 bedraagt 1.337 m³/jaar per huis door de gecombineerde opwekking van kracht en warmte. Hieruit blijkt dat zelfs bij toepassing van goede isolatie, de gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit nog een verdere besparing oplevert van ongeveer dezelfde grootte.

Het is dus wel duidelijk, dat stadsverwarming of wijkverwarming in samenspel met een kracht/warmtecentrale waarvan de elektrische productie deel uitmaakt van het nationaal systeem, aanzienlijke besparingen op brandstof kan leveren, ook bij beter geïsoleerde woningen. Voorwaarde is evenwel, dat men het voldoende grootschalig doet en een optimale procesvoering met warmtebuffers e.d. schept. Alleen dan zal men alle mogelijkheden van de kracht/warmtekoppeling ten volle kunnen benutten.

Discussie

Zoals in de inleiding gezegd, heeft deze studie tot doel een kwantitatief inzicht te geven in de mogelijke energiebesparingen. Het cijfer van 100.000 woningen was willekeurig gekozen. Voor stads wijken van 10.000 à 20.000 woningen kan men met andere gasturbines van kleiner vermogen vergelijkbare besparingen verkrijgen. Dit voorbeeld is gebaseerd op de kracht/warmtekoppeling waarbij gasturbines worden gebruikt. De warmte/krachtkoppeling met stoomketels en aftap-condensatiemachines, die vergelijkbare besparingen kan opleveren, is hier buiten beschouwing gelaten. Een andere mogelijkheid is, het gebruik van gecombineerde kracht/warmtesystemen en van warmtepompen aan elkaar te koppelen [74]. In dat geval is een gunstiger afstemming mogelijk van de verbruikspatronen van elektriciteit en warmte op de bedrijfseigenschappen van de apparatuur voor de elektriciteitsopwekking.

De economische merites van een opzet zoals hier behandeld worden hier niet gezien. De hoge prijzen voor fossiele brandstoffen zullen het evenwel beslist een stap dichterbij de verwezenlijking brengen. Om een gecombineerde kracht/warmte-opwekking te realiseren, zijn plannen op lange termijn bij

de ontwikkeling van nieuwe stadsdelen noodzakelijk. Om tot een zo rendabel mogelijke opzet te komen, zijn een grote aansluitdichtheid van de woningen aan het warmwaternet en liefst korte transportafstanden vereist. Dit betekent in feite dat in zulke stadsdelen de warmwaterverwarming planologisch voorgeschreven zou moeten worden. In de eerste fase van een nieuwe stadswijk kan een stadsverwarmingsnet worden aangelegd, gevoed uit gestookte ketels. Wanneer het systeem een bepaalde grootte heeft bereikt, gaat men over op kracht/warmte-opwekking en gebruikt men de bestaande ketels als hulp-eenheden. Deze methode is in Duitsland en Zweden in kleinere steden heel gebruikelijk.

In Nederland heeft aardgas een uitzonderlijk groot aandeel in de energievoorziening; de lage kosten van aardgasdistributie en -transport maken dat er hier een heel aparte situatie bestaat. Wanneer men energiebesparing ernstig wil nemen, dan dient men ook in Nederland de gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte voor nieuwe steden zorgvuldig te overwegen.

IV.1.3. Glastuinbouw

Als derde voorbeeld is de glastuinbouw gekozen. In grote trekken is nagegaan welke besparingen te bereiken zouden zijn ingeval een bepaald glastuinbouwgebied vanuit een gecombineerde centrale van elektriciteit en warmte zou kunnen worden voorzien. De berekening en uitgangspunten zijn ook hier nagenoeg analoog aan die gegeven voor de stedelijke voorziening. Aangenomen is weer dat de elektriciteit wordt geproduceerd met gasturbine-generatorsets, terwijl de warmte afkomstig is uit de bijbehorende afgasketels. Indien nodig wordt nog aanvullende warmte geleverd met gasgestookte pieklast- c.q. hulpketels. Door een zorgvuldige keus van de capaciteiten kan de installatie zo worden ontworpen dat de gasturbines die in bedrijf zijn steeds in vollast draaien. Dit impliceert een parallel-aansluiting op het openbare elektriciteitsnet. Een leidingsysteem zorgt voor het transport van de warmte naar de woningen en kassen. De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van gas-elektriciteitsverbruiksmetingen in een als representatief te achten glastuinbouwgebied, zij het dat deze verbruikscijfers tevens een aantal andere verbruikers omvatten. Ook deze andere verbruikers worden in dit rekenvoorbeeld geacht op de centrale voorziening van elektriciteit en warmte te zijn aangesloten.

In het beschouwde gebied bedroeg het jaarverbruik aan gas ca. $450 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($15,8 \times 10^{15} \text{ J}$) en het elektriciteitsverbruik ca. 1.400 GWh ($15,1 \times 10^{15} \text{ J}$ primaire energie). Het is niet bekend in hoeverre op gas werd gekookt; in de verdere berekening is aangenomen dat dit niet het geval is en dat al het gas voor verwarming werd benut. De totale glastuinbouwsector in Nederland verbruikt volgens zeer recente ramingen (1974) per jaar ca. $2,7 \times 10^9 \text{ m}^3$ aardgas¹⁾ ($95 \times 10^{15} \text{ J}$),

zodat het beschouwde gebied

$$\frac{15,8}{95} = 1/6 \text{ deel van het totaal gebruikt.}$$

Hierbij is verondersteld dat de kasverwarming plaatsvindt door middel van warm water, de zgn. buisverwarming, hoewel momenteel ca. 25% van de kassen op andere wijze wordt verwarmd, meestal met behulp van directe luchtverhitters.

Resultaten

— Berekeningen [73] laten zien dat de besparing voor het beschouwde gebied $7 \text{ à } 8 \times 10^{15} \text{ J}$ per jaar zou kunnen bedragen, dat is dus ca.

$$\frac{7,5}{15,8 + 15,1} \times 100\% = 24\%.$$

- De besparing bij gecombineerde opwekking voor het totale glastuinbouwareaal in geheel Nederland zou theoretisch het zesvoudige kunnen bedragen, dus ca. $40 \text{ à } 50 \times 10^{15} \text{ J}$ per jaar (ca. 1,1% van het nationaal energie-verbruik in 1985).
- Voor het verwirkelijken van deze besparing zou het gehele glastuinbouwareaal moeten worden aangesloten op gecombineerde centrales met in totaal 36–42 eenheden van 74,5 MW — tezamen een elektrisch vermogen van ca. 3000 MW.
- Opstelling van deze gecombineerde eenheden zou een toename van het gasverbruik in de glastuinbouwgebieden van ca. $1,4 \times 10^9 \text{ m}^3$ per jaar vragen.

Discussie

Wanneer de grote elektrische vermogens die met deze kracht/warmtekoppeling zijn gemoeid, nl. ca. 3.000 MW, worden vergeleken met de tot dusverre opgetreden maximale jaarbelasting voor geheel Nederland van ca. 7.700 MW en een totaal opgesteld elektrisch vermogen in 1973 van ca. 11.000 MW, dan lijkt het zeer waarschijnlijk dat een dergelijke toepassing, vooral bij de huidige concentratie van de glastuinbouw op enkele betrekkelijk dicht bij elkaar gelegen kleine gebiedsdelen in het westen, de gehele landelijke elektriciteitsvoorziening aanmerkelijk zal beïnvloeden.

Daar de grootste vraag naar warmte voor tuinbouwactiviteiten meestal optreedt tussen 8 uur 's avonds en 8 uur 's ochtends met een piek even voor zonsopgang, is de kans groot dat de periode van de grootste warmtevraag — en daarmee gekoppeld de grootste elektriciteitsproductie van de gecombineerde centrales — samenvalt met de periode van het minimum landelijk verbruik van elektriciteit. Dit zou betekenen dat gedurende die periode vele eenheden van de openbare elektriciteitscentrales moeten worden stilgezet of in deellast moeten draaien, terwijl ze slechts enkele uren later (bijv. bij zoninstraling in de kassen, waardoor eventueel de gecombineerde centrales uit bedrijf zouden kunnen worden genomen) de gehele elektrische belas-

¹⁾ Vergelijk Hoofdstuk 2, Tabel 15, waar voor 1975 een aardgasverbruik in deze sector van $73 \times 10^{15} \text{ J}$ wordt geraamd. Blijkbaar is de omschakeling naar aardgas sneller verlopen dan in Hoofdstuk 2 werd verondersteld. Bovendien ligt het totale energieverbruik in deze sector vermoedelijk hoger dan verwacht, hoewel in het cijfer van $95 \times 10^{15} \text{ J}$ ook een aantal andere verbruikers is begrepen.

ting weer voor hun rekening zouden moeten nemen. Dit op- en afregelen, alsmede het bedrijf bij zeer lage belasting, van normale elektriciteitscentrales brengt grote warmteverliezen met zich mee.

Naast de deellastverliezen zullen verder nog verliezen optreden bij het transporteren van de elektrische energie vanuit het geconcentreerde opwekgebied over nagenoeg geheel Nederland, wat betekent dat een aanmerkelijk deel van de theoretische energiebesparing aan brandstoffen in de glastuinbouw op andere plaatsen weer verloren zal moeten gaan.

Een van de eerste voorwaarden voor de realisering van een dergelijk project is overigens dat de situatie waarop het ontwerp zal zijn gebaseerd tenminste gedurende de afschrijvingstermijn blijft bestaan. In het verleden hebben zich steeds wisselingen in de samenstelling van de verbouwde produkten voorgedaan, soms zelfs zeer radicale zoals bijv. het overschakelen van groenten op bloemen (waarbij de warmte- en lichtbehoeften, zowel kwantitatief als wat betreft belastingspatronen zich geheel kunnen wijzigen). Mocht zo'n verschijnsel zich — als gevolg van een gewijzigde marktsituatie — voordoen bij gebruik van het gecombineerde systeem, dan kan de kracht/warmtebalans geheel worden verstoord, zodat eventueel zelfs een energieverspilling i.p.v. een besparing kan ontstaan. Het is derhalve noodzakelijk eerst een meerjarig productieschema vast te stellen, waarvan niet noemenswaard zou mogen worden afgeweken.

Gelet evenwel op de ontwikkeling van de tuinbouw binnen de EEG en op de concurrentie van landen buiten de EEG op de Europese markt, lijkt het vrijwel uitgesloten dat de tuinders zich, zowel wat het verwarmde glasoppervlak als wat het teelpatroon betreft, voor een aantal jaren zouden kunnen binden. Verder zal het feit dat nagenoeg alle tuinders zojuist nieuwe aardgas-stookinstallaties hebben aangeschaft een praktische verwezenlijking in de weg staan.

Een laatste facet dat hier nog genoemd zou kunnen worden, is dat van de toediening van koolzuur (CO_2) aan de gewassen, iets dat bijna algemeen in de tuinbouwbedrijven wordt toegepast door gebruikmaking van een deel van de verbrandingsgasen van de verwarmingsketel. Het vindt meestal plaats in het tijdsverloop van één uur voor zonsopgang tot in de middaguren. Bij een gecombineerde centrale wordt dat onmogelijk. De kwekers zullen dus op andere wijze in deze CO_2 -bemesting moeten voorzien, bijv. door aankoop van zuiver CO_2 of door de installatie van speciale verbrandingsketels waarbij weer extra energie moet worden gebruikt.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat, al lijkt op papier een aanzienlijke energiebesparing mogelijk, deze besparing in de praktijk waarschijnlijk aanmerkelijk kleiner zal zijn als gevolg van extra verliezen bij de elektriciteitsopwekking elders en van het niet samenvallen van belastingspatronen voor warmte en elektriciteit. Hoewel men over organisatorische, financiële en uitvoerings-technische aspecten niet optimistisch mag zijn, kan een nadere studie voor een bepaald gebied zeker waarde hebben.

IV.1.4. Installaties in de utiliteitsbouw

Tot nu toe is het aantal 'Total Energy' installaties in deze sector zeer bescheiden. In het onderstaande wordt onderzocht in hoeverre een sterke toename van deze installaties zal leiden tot een belangrijke brandstofbesparing.

Opnieuw wordt de conventionele oplossing (zelf warmte produceren en elektriciteit uit het openbare net betrekken) vergeleken met de gecombineerde opwekking, ditmaal met gasmotoraggregaten. De vergelijking is met opzet globaal gehouden en betreft alleen de rendementen.

In het soort gebouwen waar kleine TE-installaties worden opgesteld (bijv. ziekenhuizen, kantoorgebouwen e.d.), wordt de warmte meestal met cilindrische stoomketels opgewekt. Het gemiddelde thermisch rendement bedraagt ca. 85% (het vollastrendement kan 92% bedragen).

Het rendement van de Nederlandse openbare elektriciteitscentrales bedroeg in 1972 gemiddeld 35,8%. Rekenend met 6% transportverlies was het netto rendement op de plaats van het verbruik 33,7%. Bij verhouding tussen de per jaar afgenomen hoeveelheden elektrische energie en warmte van 1 : 5 is het thermisch rendement van de conventionele oplossing:

$$\frac{1}{0,337} + \frac{5}{0,85} = \frac{6}{\eta_{\text{totaal}}}; \quad \eta_{\text{totaal}} = 68\%$$

Bedraagt de verhouding 1 : 3 dan is het resultaat:

$$\frac{1}{0,337} + \frac{3}{0,85} = \frac{4}{\eta_{\text{totaal}}}; \quad \eta_{\text{totaal}} = 62\%$$

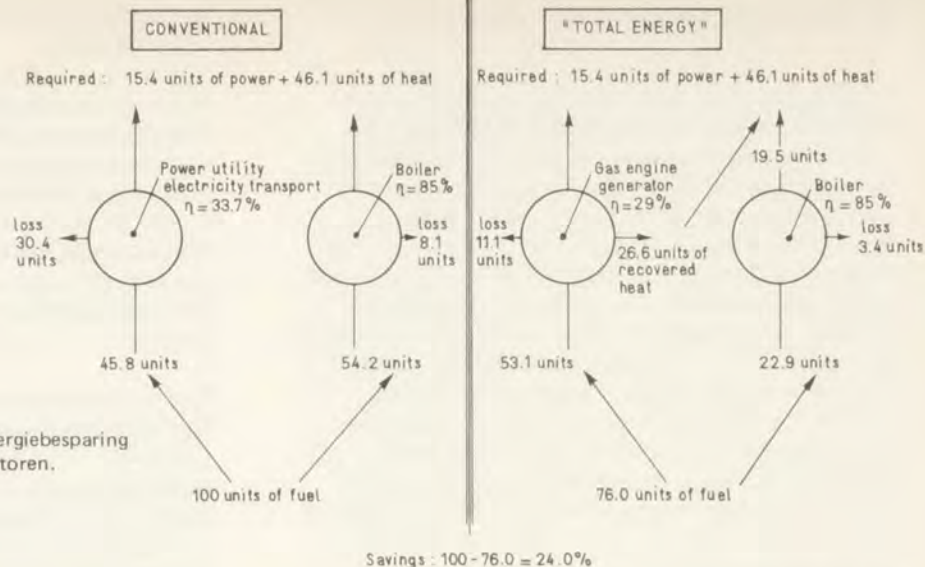
Voor de onderstaande berekeningen is uitgegaan van een vaak voor het hier beschouwde doel gebruikte gasmotor met de volgende rendementen:

vollast	30%
75% last	29%
65% last	28%

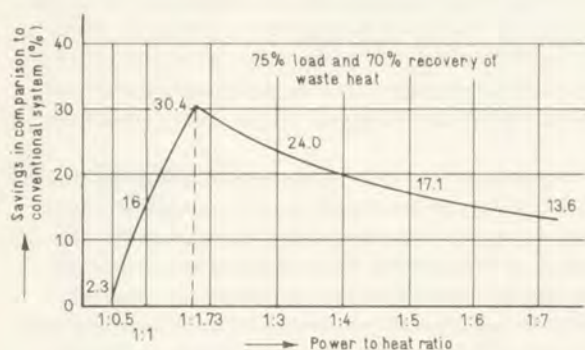
Aangezien dit duidelijk minder is dan het rendement bij de openbare elektriciteitsvoorziening, moeten de besparingen dus komen uit een zo goed mogelijke benutting van afgas- en koelwaterwarmte. Uit de onderstaande berekening voor een aantal elektriciteit/warmteverhoudingen blijkt, welke brandstofbesparingen te verwachten zijn [73]. Figuur 14 geeft het schema voor een vergelijkende berekening van de conventionele oplossing en de gecombineerde opzet, waarbij voor een gebouw in het conventionele geval 100 eenheden brandstof nodig zijn, die resulteren in 15,4 eenheden elektrische energie en 46,1 eenheden warmte (verhouding 1 : 3) oftewel 61,5 eenheden voor nuttig gebruik.

De TE-variant heeft om deze 61,5 eenheden in dezelfde verhouding te produceren 76,0 eenheden nodig. Daarbij wordt aangenomen dat de TE-variant elektrisch voor 75% wordt belast, dat van de daarbij ontstane warmte 70% reëel terugwinbaar is en dat deze voor 100% effectief wordt gebruikt. De besparing bedraagt 24%.

In Figuur 15 is grafisch de te verwachten besparing aangegeven die met de TE-variant t.o.v. de conven-



Figuur 14. Voorbeeld berekening van energiebesparing met het Total Energy systeem met gasmotoren.



Figuur 15. Energiebesparing bij diverse verhoudingen tussen elektriciteit en warmte bij gecombineerde opwekking met gasmotoren.

tionele oplossing te bereiken is bij diverse verhoudingen tussen elektriciteit en warmte. De elektriciteitsbehoefte is daarbij steeds constant gedacht.

Resultaat

Bij het beschouwen van de grafiek valt op dat de maximale besparing van de TE-variant t.o.v. de conventionele voorziening wordt bereikt bij de verhouding tussen elektriciteit en warmte waarbij nog net niet behoefte te worden bijgestookt. Als de verhouding zich wijzigt in de richting van meer elektriciteit, dan kan de aanvullende warmte niet worden benut. De besparing neemt zeer snel af. Als de verhouding zich wijzigt in de richting van meer warmte, dan moet er worden bijgestookt. Dit geschiedt met hetzelfde rendement als bij de conventionele oplossing, zodat de besparing langzaam afneemt.

Discussie, kritieke variabelen

De bereikbare brandstofbesparing met TE-installaties is afhankelijk van drie factoren:

1. de effectiviteit van het gecombineerd verbruik, niet alleen op calculatiebasis maar over de tijd gezien;
 2. de verhouding van de gewenste nuttige gebruiksenergie in de vorm van elektriciteit en warmte;
 3. het in deellast stroom opwekken.
- Dergelijke variabelen gelden in principe ook voor de installaties met gasturbines, al is de derde factor daar het belangrijkste.

Ad. 1. Gelet op de kleinschaligheid van de operatie bij utiliteitsgebouwen en op het feit dat de bedrijfstijd in de praktijk ~ 2000 uur is, zal het niet gemakkelijk zijn over het gehele jaar een goed evenwicht tussen elektriciteitsproductie en warmtebehoefte te bewaren. Wat dit betreft is gecombineerde opwekking eerder geschikt voor de voorziening van de industrie, stadswijken en de glastuinbouw.

Ad. 2. Hoe dichter de verhouding tussen elektriciteit en warmte het optimale gebied, liggend tussen $1:0,9 - 1:1,7$ benadert, des te meer wordt er bespaard. In die utiliteitsgebouwen die een grote behoefte hebben aan elektrische energie (bijv. compressie-coeling) en een kleinere warmtebehoefte hebben (goede isolatie) zal de besparing het gemakkelijkst te realiseren zijn. De praktijk wijst echter uit dat in veel utiliteitsbouw de verhouding $1:4$ à 5 is.

Ad. 3. De veiligheid (zekerheid) van de stroomvoorziening van gebouwen met eigen krachtopwekking brengt vaak met zich mede dat de gebruiker meer gasmotoren in deellast laat draaien dan uit een oogpunt van zuinig brandstofgebruik gewenst is. Om dit te ondervangen, zou een permanente parallel-verbinding met het openbare elektriciteitsnet noodzakelijk zijn, maar dat is zeer kostbaar. Hoe dan ook, het openbare nutsbedrijf zal de stand-by functie slechts tegen een behoorlijke kostenvergoeding op zich kunnen nemen en gelet op de slechte bedrijfstijd van de aanvullende elektriciteitslevering zullen deze kosten waarschijnlijk aanzienlijk zijn. Uit een oogpunt van veilige bedrijfsvoering zal het openbare nutsbedrijf dit alleen willen toestaan voor installaties die geheel volgens de door haar gestelde eisen zijn beveiligd. Dit zal in het algemeen pas bij vermogens van ten minste $1,5$ MW kunnen worden overwogen.

Conclusie

Resumerend kan men stellen dat gedecentraliseerde elektriciteitsopwekking door ruime toepassing van deze TE-installaties in de utiliteitsbouw, of voor kleine stadswijken, in absolute zin geen brandstofbesparingen van betekenis zal opleveren. Deze installaties kunnen echter wel om economische redenen interessant zijn, maar dit valt buiten het bestek van deze studie.

V. Samenvatting en conclusies

1. Waterkracht zal geen wezenlijke bijdrage kunnen leveren aan de elektriciteitsproductie in Nederland vanwege het geringe verval van het water in Nederland. Ook getijdecentrales zullen door het voor een getijdecentrale geringe verschil tussen eb en vloed aan de Nederlandse kust slechts in zeer geringe mate kunnen bijdragen in de elektriciteitsproductie. Het gebruik van windkracht in kleine en middelgrote installaties is mogelijk. Het onderzoek op het gebied van windkrachtgeneratoren dient te worden gestimuleerd. Het gebruik van zonne-energie voor de algemene elektriciteitsproductie in Nederland is niet zo aantrekkelijk daar een zonne-energiecentrale van een redelijk groot vermogen een zéér groot grondoppervlak verlangt en het aantal zonloze dagen in Nederland naar verhouding groot is. Toch dient het onderzoek op dit gebied te worden gestimuleerd.

2. Aan de ontwikkeling van een niet al te dure accumulator met een hoog rendement en een groot accumulatievermogen bij beperkte afmetingen en een laag gewicht dient de grootste aandacht te worden gegeven, daar een dergelijke accumulator niet alleen het gebruik van elektrische energie voor het aandrijven van voertuigen mogelijk maakt, maar ook de problemen ten gevolge van de discontinue energie-toevoer bij de getijdecentrale, de windkrachtcentrale en de zonne-energiecentrale sterk vermindert.

3. Nederland zal tot het jaar 2000 voor zijn energievoorziening in hoofdzaak zijn aangewezen op fossiele brandstoffen en splijtbare kernen. Deze energie zal zuinig moeten worden gebruikt. Dit betekent dat bij het ontwerp van een nieuwe centrale de nadruk zal moeten worden gelegd op een zo nuttig mogelijk gebruik van de beschikbare primaire energie. In dit verband zij erop gewezen dat:

a) van een verdere verhoging van de druk en de temperatuur bij het waterkringproces in de conventionele centrale geen grote besparing in het brandstofverbruik is te verwachten;

b) door het gebruik van een M.H.D.-generator het rendement van een centrale aanzienlijk kan worden opgevoerd. Veel kostbaar ontwikkelingswerk is echter nog nodig voordat de eerste commerciële installatie kan worden gebouwd. Daar eenzelfde rendementsverbetering waarschijnlijk ook kan worden bereikt door het verhogen van de temperatuur bij de gecombineerde gas/stoomturbine-installatie, dient men terdege na te gaan of een verdere ontwikkeling van de M.H.D. nog van belang is;

c) door haar grote flexibiliteit kan de gecombineerde gas/stoomturbine-installatie met een gering extra brandstofverbruik snel in en uit bedrijf worden genomen. Door dit feit en door haar hoog rendement is zij zeer geschikt om door het opvangen van de midden- en de piekbelasting een bijdrage te leveren aan het besparen van brandstof.

4. Om de voorraad fossiele brandstoffen zo volledig mogelijk te benutten, zullen ook de zwavelrijke brandstoffen moeten worden verstoekt. Ter voorkoming van milieuhinder dient verder onderzoek naar binding

van de zwavel tijdens het verbrandingsproces te worden aangemoedigd.

5. Kernenergiecentrales met conversiereactoren zullen eveneens een zeer groot aandeel moeten krijgen in de toekomstige elektriciteitsproductie in Nederland, wil men een verdere stijging van het verbruik van fossiele brandstoffen voorkomen in een sector waar reeds een behoorlijk alternatief bestaat. Voor een zo goed mogelijk gebruik van de voorraad uranium en thorium is de ontwikkeling van de kweekreactor dringend gewenst.

6. Een aanzienlijke besparing in het brandstofverbruik kan worden verkregen door gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit, mits de productie en de consumptie van beide soorten energie op elkaar zijn afgestemd. Dit evenwicht kan in de praktijk worden bereikt door het groeperen van industrieën met een grote vraag naar warmte rond een elektrische centrale, en door de toepassing van stadsverwarming bij stadsuitbreidingen. Van het gebruik van 'total energy' (T.E.)-installaties met gasturbines in utiliteitsgebouwen valt echter slechts een marginale besparing te verwachten.

7. Vergeleken met de bovengenoemde maatregelen lijkt de besparing van brandstoffen op koolwaterstofbasis door de rechtstreekse omzetting van hun chemische energie in elektriciteit, technologisch nog toekomstmuziek. Het praktische rendement van een typisch systeem met lage temperatuur is bij volle belasting niet aanmerkelijk hoger dan bij conventionele opwekking, maar wordt dat wel wanneer het systeem in deellast draait. Werkelijke energiebesparingen kunnen alleen worden verwacht van geïntegreerde brandstofcellen met een hoge temperatuur. De voornaamste toepassingsmogelijkheden voor brandstofcellen zijn de vervanging van dieselmotoren (tussen 20 en 100 kW) en als elektrische hulpcentrales (tussen 1 en 30 MW). De werkzaamheden van Pratt & Whitney zullen doorslaggevend zijn voor de praktische toepasbaarheid van brandstofcellen op korte termijn. De huidige beweringen betreffende de kosten, de ontwerpvermogensafgifte en, in het bijzonder, de lange levensduur, dienen met terughoudendheid te worden bezien. De mate van betrouwbaarheid is nog steeds een open vraag, en evenmin is bekend, welke hoeveelheid platina per eenheid energieproduct nodig is. De hervatting van het onderzoek in Nederland naar bepaalde aspecten van brandstofcellen dient te worden overwogen.

VI. Samenstelling van de werkgroep

De werkgroep die Hoofdstuk 4 heeft opgesteld, bestond uit de volgende leden:

ir. J.H. Bakker	Arnhemse Instellingen van de Elektriciteitsbedrijven
dr. G.H.J. Broers	Rijksuniversiteit Utrecht
ir. L.M. van Haasteren	Ministerie van Landbouw en Visserij, Den Haag
ir. H. Hondius	Nederlandse Gasunie, Groningen

prof. ir. J.J.C. van Lier	Technische Hogeschool, Delft
ir. W. van Soest	Ministerie van Landbouw en Visserij, Den Haag
ir. J.A. Stender	Instituut voor Tuinbouw- techniek, Wageningen
ir. Th. J. Tienstra	Ministerie van Landbouw en Visserij, Den Haag
ir. K. Wassenaar	Arnhemse Instellingen van de Elektriciteitsbedrijven
ir. J.A. Over (Secretaris)	Stichting Toekomstbeeld der Techniek

De volgende personen verstrekten nadere gegevens (o.m. [75]) of leverden een aanzienlijke bijdrage aan de besprekingen:

ir. P. Brand	Arnhemse Instellingen van de Elektriciteitsbedrijven
ir. M.A. Engels en ir. P.H.H. Leijendeckers	Raadgevend Technisch Bureau Van Heugten, Nijmegen

VII. Literatuur

- [1] D.G.H. Latzko, Nieuwe methodes voor elektriciteitsopwekking. In: Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening. Publikatie 12, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag, 1972.
- [2] F. Gransch, Als de fossiele brandstoffen op zijn, is er maar één alternatief: kernenergie. Chemisch Weekblad, 66 (1970), No. 44, 27-9.
- [3] Tidal Power – Proceedings of the International Conference on the utilisation of Tidal Power. May 1970, Halifax.
- [4] Rapport betreffende de toepassing van een getijdecentrale in combinatie met de nog uit te voeren Delta-werken in het Oosterscheldebekken. Intern rapport PZEM, 1967.
- [5] Clausnizer, Windkraft. Summary of the papers on this subject of the UN Conference on New Sources of Energy. Rome, 1961. Brennstoff, Wärme, Kraft, 14 (1962), No. 7, 321-6.
- [6] Clausnizer, Die Bedeutung der Windkraft für die Deutsche Energiewirtschaft. Elektrizitätswirtschaft, 64 (1965), No. 7, 180-3.
- [7] Betriebserfahrungen mit einer Windkraftanlage von 100 kW. Studiengesellschaft Windkraft, Stuttgart, Brennstoff, Wärme, Kraft, 16 (1964), No. 7, 333-40.
- [8] P. South, R. Rangi, The performance and economics of the vertical-axis wind turbine developed at the National Research Council, Ottawa, Canada. ASAE Pacific Northwestern Region Meeting, Oct. 1973, Calgary.
- [9] D.G.H. Latzko, Alternatieven voor energieopwekking en -transport, De Ingenieur, 85 (1973), No. 28/29, 604-14.
- [10] H. Tabor, Solar Utilization and Development in Israel. Paper 183-III-7/4. Sixth World Power Conference, Melbourne 1962.
- [11] H. Tabor c.s., Establishing criteria for fluids for small vapor turbines. Paper 931 C. National transportation, power plant and fuels and lubricants meeting, Baltimore, 1964.
- [12] H. Tabor c.s., Small turbine for solar energy power package, Paper IIc-11a. UN Conference on New Sources of Energy, Rome, 1961.
- [13] C.M. Summers, The Conversion of Energy. Scientific American, 224 (1971), No. 9, 95-106.
- [14] Solar energy: the largest Source. Science, 177 (1972), No. 4054, 1088-90.
- [15] Sutton, Direct energy conversion. McGraw Hill Book Company, 1966.
- [16] Direct energy conversion. Angrist, Allyn and Bacon Inc., Boston, 1965.
- [17] Space Power Systems. Edition of NATO (AGARDograph No. 123), 1969.
- [18] B.P. Kelly, J.A. Eckert, E. Berman, Investigation of photovoltaic applications. Paper presented at the Int. Congress The Sun in the Service of Mankind, Paris, 1973.
- [19] N. Gašparovič, Geothermische Energie. Summary of the papers on this subject of the UN Conference on New Sources of Energy, Rome, 1961. Brennstoff, Wärme, Kraft, 14 (1962), No. 7, 313-20.
- [20] J.J.C. van Lier, Energietransformaties. Deel I: De grondslagen van de thermodynamica; Deel II: Thermodynamische en constructieve aspecten van de stoomketel en de stoomturbine; Deel III: Exergetische beschouwingen. Technische Hogeschool Delft, Afd. der Werktuigbouwkunde, 1970-1973.
- [21] J.J.C. van Lier, Thermodynamische processen in de centrale en mogelijkheden tot het verbeteren van deze processen. Argus, 1963.
- [22] K. Knizia, Die Thermodynamik der Dampfkraftprozessen. Springer Verlag, 1966.
- [23] J.B. Dicks, MHD; Central power – a status report. Mechanical Engineering, 94 (1972), No. 5, 14-20.
- [24] H.L.Th. Rietjens, J.H. Blom, J.W.M.A. Houben, Magneto-hydrodynamische conversie naar elektrische energie. Chemisch Weekblad, 66 (1970), No. 44, 46-50.
- [25] W.D. Jackson, M. Petrick, J.E. Klepeis, A critique of MHD power generation. Journal of Engineering for Power, 92, Trans. ASME (1970), Serie A, No. 3, 217-30.
- [26] H.C. Hottel, J.B. Howard, New Energy Technology – some facts and assessments. Chapter 5.3, Magneto-hydrodynamics. MIT Press, 1971.
- [27] G. Dibelius, Gasturbinen, Brennstoff, Wärme, Kraft, 24 (1972), No. 4, 165-9.
- [28] Jacobsen, Gasturbinen – Spitzenkraftwerke mit Strahltriebwerke der N.W.K. Mitteilungen der V.G.B., December 1972, 472-8.
- [29] Ehrenhardt, Gas Turbine Utility Applications. Paper ESOA-7206. General Electric Third European State of the Art Congress, Portugal, 1972.
- [30] Endress, Three gas turbine types for outputs from 20-60 MW. Turbo-Forum, May 1971, 27-34.
- [31] Tätigkeitsbericht der V.G.B. 1972/1973, 74-5.
- [32] H.C. Hottel, J.B. Howard, New Energy Technology – some facts and assessments. Chapter 5.2., Improved gas turbine and mixed heat-engine cycles. MIT Press, 1971.
- [33] Maghon, Die Entwicklung der einwelligen

- Gasturbine, VGB-Kraftwerkstechnik, October 1973, 651-6.
- [34] Linn, Desoroux, Design Review of a 90 MW gas turbine for 50 Hertz Power Generation. Paper ESOA-7207. General Electric Third European State of the Art Congress, Portugal, 1972.
- [35] Gas turbine programme: brochure BST.
- [36] Hergot, VEGA Plants for Power Generation. Paper ESOA-7217. General Electric Third European State of the Art Congress, Portugal, 1972.
- [37] Huhle, Die Kombinierte Gas-Dampfturbinen Anlage zur Erzeugung preiswerter Mittellastenergie. Brown Boveri Mitteilungen, Jan. 1974, 9-16.
- [38] Mäule, Pfost, Rau, Kombinierte Gas-Dampfturboanlagen. Paper c 115/73, Convention on Steam Plant Operation, 1972.
- [39] K. Knizia, Erweiterung des Kraftwerkes Gersteinwerk um 4 X 400 MW. Brennstoff, Wärme, Kraft, 23 (1971), No. 12, 503-12.
- [40] L.Th.M. Ornstein, Thermonucleaire reactoren. Atoomenergie, 11 (1969), No. 10, 247.
- [41] S.H.A. Begemann, Recente ontwikkeling m.b.t. de Amerikaanse energiecrisis. De Ingenieur, 85 (1973), No. 47, 923-33.
- [42] Knoepfel, Die gesteuerte thermo-nukleare Fusion — Eine Bestandesaufnahme nach der ersten Halbteil, Neue Technik, (1972), No. 1, 11-20.
- [43] Riezler, Walcher, Kerntechnik. Teubner Verlag, 1958.
- [44] H.R. Kleyn, Enkele fysische aspecten bij het gebruik van plutonium in thermische reactoren. De Ingenieur, 80 (1968), No. 1, TWO 1-8.
- [45] D.G.H. Latzko, Leidraad bij het College Kernreactoren, Deel I. Technische Hogeschool Delft, 4e editie, 1972.
- [46] P. Brand, Het rendementsbegrip bij de toepassing van kernenergie voor de elektriciteitsproductie. De Ingenieur, 86 (1974), No. 13, 250-2.
- [47] Schubarth, Fortgeschrittener, gasgekühlter Reaktor. V.G.B. Kernkraft seminar, 1970.
- [48] Goodjohn c.s., The HTGR-Status in the US and Future Unique Potential. Neue Technik (1973), No. 7, 285-91.
- [49] Gibbons c.s., Design of 2.300 MW Twin High-Temperature Gas-cooled Reactors for Philadelphia Electric. Proceedings of the American Power Conference 1972, 195-206.
- [50] Keller, Closed Cycle Gas Turbines for all fuels; Coal, Oil, Gas, Nuclear. Brochure Escher Wyss. Keller, Schmidt, Die Heliumgasturbine für Kernkraftanlagen. Escher Wyss Mitteilungen (1967), No. 3, 3-8.
- [51] Shepherd, Locket, Direct cycle applications of high temperature gas cooled reactors. Paper EN-1/40, ENRA — Symposium on the technology of integrated primary circuits for power reactors, Paris, 1968.
- [52] K. Wassenaar, Enkele gedachten omtrent total energy. Elektrotechniek, 50 (1972), No. 12, 241-50.
- [53] H. Hondius, Total Energy in the Netherlands. Gas, 92 (1972), No. 12, 427-33.
- [54] B. van den Hoogen, Recuperatie van warmte uit rookgassen van gasturbines d.m.v. stoomopwekking. De Ingenieur, 84 (1972), No. 8, W13-W21.
- [55] J.J.C. van Lier, Uiteenzetting over de mogelijkheden voor total energy. Elektrotechniek, 49 (1971), No. 21, 963-7.
- [56] Hohl, Fernbeheizte Schweiz? Die totale Energieverwertung und ihre mögliche Rolle in einer Umweltfreundlichen Gesamtenergieversorgung. Brown Boveri Mitteilungen, Juli 1973, 253-64.
- [57] E.J. Cairns, H. Shimotake, Fuel Cell Systems II. (pp. 392-425). B.S. Baker, ed. Advances in Chemistry, Series 90, Am. Chem. Soc., Washington, 1969.
- [58] K.V. Kordesch, Hydrogen-R/lead battery hybrid system vehicle propulsion. J. Electrochem. Soc., 118 (1971), No. 5, 812-7.
- [59] F.A. Schneider, Alternatieve krachtbronnen voor automobielen. Polytechnisch Tijdschrift (Elektrotechniek), 26 (1971), No. 26, 1008-16.
- [60] S.H. Schurr, Energy research needs. PB-207516, National Technical Information Service, Washington, October 1971.
- [61] H.A. Liebhafski, E.J. Cairns, Fuel cells and fuel batteries. Wiley & Sons Inc., New York, 1968.
- [62] K.R. Williams, ed., An introduction to fuel cells. Elsevier Publ. Co., Amsterdam, 1966.
- [63] A.B. Hart, G.J. Womack, Fuel cells, theory and application. Chapman & Hall, London, 1967.
- [64] W. Vielstich, Fuel cells. Wiley-Interscience, London/New York, 1960.
- [65] G. Sandstede, Electrocatalysis, Fuel cells. University of Washington Press, Seattle, 1972.
- [66] J.R. Huff, ed., Seventh Status Report on Fuel cells. Report 2039, US Army R & D center, Fort Belvoir, Va, USA, 1972 (distr. unlimited).
- [67] B.S. Baker, ed., Hydrocarbon fuel cell technology (pp. 225-50, door G.H.J. Broers, M. Schenke). Acad. Press, New York, 1966.
- [68] G.H.J. Broers, H.J.J. van Ballegoy, Journées Intern. Étude Piles à Combustible, Comptes Rendus III, Bruxelles, 1969, 77.
- [69] H.E. Huynink, Cell assemblies for a molten carbonate fuel battery — I. Construction of cell assemblies; Energy Conversion, 12 (1972), No. 4, 131-8; II. Electrolyte paste discs for molten carbonate fuel cells, idem 139-43.
- [70] Fuel cells could produce power at \$ 140/kW plant costs, but R & D goes unfunded by Fed. Govt. Utilities. Energy Digest, 2 (1972), 31-2.
- [71] Persoonlijke informatie uit Nederlandse en Amerikaanse bronnen.
- [72] Financieel Dagblad, 15 september 1973. Chemisch Weekblad, 69 (1973), No. 40, 25.
- [73] H. Hondius, K. Wassenaar, Mogelijkheden van energiebesparing door gecombineerde opwekking van elektriciteit en warmte, Elektrotechniek, 52 (1974), No. 7, 1-38.
- [74] P.J. Collet, Energiebesparing door combinatie van total energy systemen en warmtepompen. Instituut TNO voor Werktuigkundige constructies, rapport No. 82078/2, februari 1974, Delft.
- [75] M.A. Engels, Memorandum betreffende de warmtevoorziening van de tuinderijen in het Westland, gekombineerd met het opwekken van elektrische energie. Raadgevend Technisch Bureau Van Heugten, Nijmegen.

Hoofdstuk 5. Besparingsmogelijkheden bij het energieverbruik in woningen en andere gebouwen

door de werkgroep Verbruik in woningen en gebouwen¹⁾

I. Inleiding

In de beide voorgaande hoofdstukken werd de aandacht gericht op het indirecte energieverbruik (industrie, elektriciteitsopwekking). Dit en het volgende hoofdstuk behandelen de directe toepassing van energiedragers door eindverbruikers.

Het energieverbruik in woningen en andere gebouwen omvat de toepassing van energiedragers voor verwarming, ventilatie, klimaatregeling en andere, vooral huishoudelijke doeleinden. Tabel 1 geeft een beknopte verdeling van dit energieverbruik. Daarbij is de wijze van rubricering van Hoofdstuk 2 aangehouden. Het elektriciteitsverbruik wordt als zodanig aangegeven, maar hierbij moet worden bedacht dat bovendien een circa twee maal zo hoog mutatieverbruik bij de opwekking plaatsvond: 1 kWh-elektrisch komt overeen met ca. 3 kWh of $10,8 \times 10^6$ J aan primaire energie.

Tabel 1. Energieverbruik in woningen en andere gebouwen in 1972 (Hoofdstuk 2, [1])

	10 ¹⁵ J	% van het nationaal energieverbruik ²⁾
Huishoudelijk verbruik		
- Steenkool, olie, gas	474,4	21,0
- Elektriciteit ¹⁾	36,0	1,6
Verbruik in gebouwen		
- Olie, gas	180,0	8,0
- Elektriciteit ¹⁾	ca. 30,0	1,3

¹⁾ Uit het openbare net [1].

²⁾ Excl. het verbruik van olie voor andere dan energiedoelinden.

Uit berekeningen in paragraaf II.1.2. zal blijken dat de niet-elektrische energie die in de huishoudelijke sector wordt verbruikt voor ca. 80% voor rekening van de ruimteverwarming komt. De rest is voor koken en warmwatervoorziening. Het verbruik in gebouwen omvat vooral het verbruik in velerlei utiliteitsgebouwen: kantoren, warenhuizen, winkels, ziekenhuizen, fabriekshallen, scholen, enz. De voorzieningen in deze gebouwen moeten aan vaak zeer uiteenlopende eisen voldoen. Onder de directe energieverbruikssectoren worden behalve de beide in Tabel 1 genoemde categorieën ook gerekend verkeer en vervoer (zie Hoofdstuk 6), de tuinbouw ($82,4 \times 10^{15}$ J in 1972; zie Hoofdstuk 2, Tabel 15), en een restcategorie (minder dan 55×10^{15} J in 1972, zie Hoofdstuk 2, Tabel 20), waaronder vallen de landbouw, bouwwerkzaamheden en militaire doeleinden.

Gezien hun relatieve belang worden in dit hoofdstuk achtereenvolgens gezien de besparingsmogelijkheden bij het huishoudelijk energieverbruik en bij het verbruik in utiliteitsgebouwen. De tuinbouw is reeds aan de orde

¹⁾ Paragraaf II.3. is een bijdrage van dr.ir.E.T. Ferguson.

geweest in het voorgaande hoofdstuk. Landbouw, bouwwerkzaamheden en defensie worden niet behandeld, aangezien de leden van de werkgroep zich op deze terreinen niet voldoende ingevoerd achtten. Ongetwijfeld zullen hier soortgelijke mogelijkheden kunnen worden gevonden als die in de in dit hoofdstuk en in Hoofdstuk 6 behandelde gebieden.

In de sector huishoudelijk verbruik is in de eerste plaats gekeken naar de mogelijkheden voor verbetering van de isolatie van woningen en introductie van betere regelsystemen om te komen tot een efficiëntere ruimteverwarming. Vervolgens is bezien op welke wijze nog verdere besparingen kunnen worden bereikt door verbeteringen aan gasapparatuur en elektrische apparatuur. In de sector utiliteitsgebouwen zijn mogelijke maatregelen tot vermindering van elektriciteitsverbruik en olie- of gasverbruik tezamen bestudeerd, omdat de toepassing van de verschillende energiedragers veelal is geïntegreerd.

Tenslotte wordt een beschouwing gewijd aan de mogelijkheid zonne-energie te gaan gebruiken voor ruimteverwarming en warmwatervoorziening in woningen en gebouwen.

In elk der sectoren worden de bereikbare besparingen berekend aan de hand van een scenario betreffende het tempo waarin de verschillende bezuinigingen kunnen worden ingevoerd en het bouwvolume of de markt waarop zij betrekking hebben. Gepoogd is deze scenario's zo logisch en realistisch mogelijk te doen zijn. De resultaten en conclusies van de verschillende studies worden samengevat aan het eind van dit hoofdstuk. Het effect van de voorgestelde besparingsmogelijkheden op het energieverbruik in 1985 en (zo nodig) in 2000 wordt aangegeven in Tabel 19.

Tenslotte dient te worden opgemerkt dat in dit hoofdstuk steeds is uitgegaan van de vraag hoe de verschillende functies die door toepassing van energie worden vervuld, kunnen worden gehandhaafd met toepassing van minder energie. Diverse aspecten die voor het bereiken van dit doel van belang zijn maar niet in de eerste plaats door de technologie worden bepaald, worden daarbij slechts aangestipt of geheel buiten beschouwing gelaten. Hiertoe behoren o.m. economische criteria, bestuurlijke aspecten, normalisatie, enz.

De mogelijkheid energie te besparen door het achterwege laten van consumptie komt slechts zijdelings aan de orde.

II. Huishoudelijk energieverbruik

II.1. Woningverwarming

II.1.1. Inleiding

De warmteverliezen van een woning worden, in volgorde van belangrijkheid, bepaald door de volgende drie factoren:

- de overdracht van warmte door de wanden;
- de winddichtheid van de woning alsmede de mate van bewust toegepaste ventilatie;
- de stralingsverhoudingen in de woonvertrekken.

Deze drie factoren hangen onderling samen, bijv. in die zin dat bij ongunstige stralingsverhoudingen in een woonvertrek een hogere luchttemperatuur moet worden gehandhaafd. Als gevolg daarvan treden weer hogere doorgangverliezen door de wanden op.

De gevolgen van de stralingsverhoudingen en van de gebrekkige winddichtheid van onze huidige woningen zijn nog onvoldoende onderzocht om een duidelijke uitspraak te kunnen doen over de besparingen die mogelijk zijn door verbeteringen op deze punten. Voor zover thans bekend zijn warmtedoorgang en ventilatie de belangrijkste posten in de warmtebehoefte. De nu volgende beschouwingen zijn daarom vrijwel geheel op deze beide aspecten gericht.

Wat de warmtedoorgangverliezen betreft, moet rekening worden gehouden met een heel belangrijk punt. Wanneer er aan beide zijden van een scheidingswand temperatuurverschillen bestaan, treedt altijd warmtedoorgang op: de isolatie is nooit absoluut. De mate van warmtedoorgang kan worden gekarakteriseerd door een constante, die verband houdt met de fysische eigenschappen van het materiaal van de wand: de doorgangscoefficiënt. Het warmteverlies Q (watt) via een scheidingswand kan worden berekend met de formule:

$$Q = F \cdot \Delta T \cdot k \cdot f$$

waarin: F = oppervlak scheidingswand (m^2)

ΔT = temperatuurverschil tussen beide zijden van de scheidingswand ($^{\circ}C$)

k = warmtedoorgangscoefficiënt ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)

f = toeslagfactor voor de ligging.

Wil men het warmteverlies beperken, dan kan dit door verkleining van ieder der factoren afzonderlijk.

De factor k (veelal k -waarde genoemd) wordt bepaald door warmtegeleidingscoëfficiënten en de dikten van de in de scheidingswand toegepaste materialen. Hoe lager de warmtegeleiding is en hoe dikker de materiaal-lagen, des te lager is de k -waarde. Gebruikelijke k -waarden zijn thans: ca. 6 voor gewone ramen, ca. 1,7 voor een spouwmuur, 1–1,5 voor een dak boven een bewoonbare ruimte en ca. 2 voor een vloer op de begane grond. De buitenoppervlakken van vrijstaande woningen, woningen in een rij en flats verhouden zich globaal als 3 : 2 : 1 bij een gelijk woonoppervlak. De temperatuurverschillen aan beide zijden van de buitenwanden worden enerzijds bepaald door de gewenste binnentemperatuur, anderzijds door de optredende buitentemperaturen. Wat dit laatste betreft valt op te merken dat in Noord- en Oost-Nederland de buitentemperaturen gemiddeld $1^{\circ}C$ lager liggen dan in de Randstad. Bij de tocht- en ventilatieverliezen speelt de beschut-

ting tegen wind een rol. De ligging ten opzichte van de zon heeft een belangrijke invloed op stralingsverliezen. Behalve de zon dragen ook de bewoners zelf en de voor andere doeleinden gebruikte energie (o.a. verlichting, warmwatervoorziening) bij tot de verwarming van een woning.

In het algemeen kan dus worden gedacht aan besparingsmaatregelen gericht op beperking van raamoppervlakken en buitenoppervlakken, juiste plaatsing van ramen, aanpassing van de onderlinge ligging van vertrekken aan de verschillende temperaturen, goede temperatuurregeling, en juiste constructie en materiaalkeuze voor scheidingswanden. Daarnaast is goede keuze van de ligging van belang, alsmede een zorgvuldige uitvoering als het gaat om het winddicht maken van de woning.

II.1.2. Uitgangspunten scenario

Er zijn in 1972 in Nederland 4,0 miljoen woningen, waarvan 1,3 miljoen met centrale verwarming (Hoofdstuk 2, Tabel 13). Bij de nu volgende berekeningen wordt verondersteld dat in de periode 1972–1985 0,4 miljoen, niet van centrale verwarming (c.v.) voorzien, woningen zullen worden gesloopt en 1,35 miljoen van c.v. voorzien woningen nieuw zullen worden gebouwd. Bovendien zullen tot 1985 1,55 miljoen vóór 1972 gebouwde woningen van c.v. worden voorzien. Er zullen dan in 1985 in totaal 4,95 miljoen woningen zijn, waarvan 4,2 miljoen voorzien van c.v.

Het energieverbruik voor woningverwarming was in 1972 gemiddeld gelijk aan of equivalent met $4.000 m^3$ aardgas/woning/jaar (indien c.v. aanwezig) of $2.000 m^3$ aardgas/woning/jaar (indien geen c.v. aanwezig). Per 1 miljoen woningen is dit een verbruik van $140 \times 10^{15} J$ (met c.v.) of $70 \times 10^{15} J$ (zonder c.v.). Zo komt men tot een totaal verbruik voor woningverwarming in 1972 van $1,3 \times 140 + 2,7 \times 70 = 371 \times 10^{15} J$.

Het gemiddeld energieverbruik voor verwarming is per woning in de loop der jaren voortdurend gestegen (o.a. door verhoging van de binnentemperatuur). Verwacht mag worden dat het in de toekomst verder zal stijgen. Bij de verdere beschouwing van dit onderwerp is uitgegaan van de volgende veronderstellingen.

1. Woningen, gebouwd vóór 1972, met (eventueel later geïnstalleerde) c.v., zullen gemiddeld een verbruiksstijging te zien geven van $4.000 m^3$ aardgas (of het equivalent daarvan) in 1972 tot $4.300 m^3$ in 1980, welk niveau vervolgens constant blijft tot 1985.
2. Woningen zonder c.v. laten een stijging zien van $2.000 m^3$ in 1972 tot $2.400 m^3$ in 1980; ook dit verbruik blijft dan constant tot 1985.
3. Woningen die tussen 1972 en 1985 worden gebouwd (alle voorzien van c.v. en slecht geïsoleerd) zullen een verbruikstoename laten zien van $4.500 m^3$ aardgas in 1972 tot $4.750 m^3$ (of een equivalent verbruik aan olie) per woning per jaar in 1985.

Het energieverbruik voor woningverwarming zal dan in 1985 omvatten:

- Voor 1,35 miljoen na 1972 gebouwde woningen met c.v.: $1,35 \times 10^6 \times 4.750 = 6,41 \times 10^9 m^3$ aardgas, overeenkomend met $226 \times 10^{15} J$.
- Voor 2,85 miljoen vóór of in 1972 gebouwde wonin-

gen, tegen 1985 voorzien van c.v.: $2,85 \times 10^6 \times 4.300 = 12,3 \times 10^9 \text{ m}^3$ aardgas, overeenkomend met $431 \times 10^{15} \text{ J}$.

- Voor 0,75 miljoen vóór of in 1972 gebouwde woningen zonder c.v.: $0,75 \times 10^6 \times 2.400 = 1,8 \times 10^9 \text{ m}^3$ aardgas, overeenkomend met $63 \times 10^{15} \text{ J}$.

Voor het totaal aantal van 4,95 miljoen woningen zal het verbruik voor ruimteverwarming in 1985 dus $720 \times 10^{15} \text{ J}$ zijn.

Vergelijkt men het voor 1972 gevonden verbruik voor ruimteverwarming in woningen met het totale niet-elektrische verbruik in woningen ($474,4 \times 10^{15} \text{ J}$, zie Hoofdstuk 2, Tabel 14) dan blijkt er ca. 20% over te blijven voor het koken en de warmwatervoorziening. Tevens blijkt uit een soortgelijke vergelijking van de cijfers voor 1985 dat de in Hoofdstuk 2 gegeven raming voor het energieverbruik in woningen wellicht aan de lage kant is.

11.1.3. Besparingsmogelijkheden door thermische isolatie

Tabel 2 geeft een illustratie van de warmteverliezen die optreden bij de ontwerpnormen (buitentemperatuur -10°C) voor een in Nederland als standaard te beschouwen complex eengezinshuizen in rijenbouw.

Tabel 2. Warmteverliezen per woning bij -10°C buitentemperatuur in standaard Nederlandse eengezinshuizen

	kW	%
30 m ² glas	5,2	35
30 m spleet/kier	2,2	15
50 m ² gevel	2,6	18
50 m ² vloer	2,0	14
70 m ² dak	2,8	18
Totaal	14,8	100

In het stookseizoen van 1968 waren de warmteverliezen bij de laagste buitentemperaturen (-18°C) per woning in Stockholm gemiddeld 5 kW; voor Nederland bedroeg dit cijfer 12 kW bij een buitentemperatuur van -10°C . In Zweden bedragen k-waarden voor daken en gevels ten hoogste $0,7 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ \text{C}$. Omstreeks 1953 zijn in de wijk Östberga in Stockholm 820 etagewoningen gebouwd, waarin het warmteverlies bij ontwerpcondities door zeer goede isolatie (k-waarde van gevels en daken $0,35 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ \text{C}$; drievoudige beglazing) en warmteterugwinning was teruggebracht tot ca. 2,2 kW [2].

Nu is het energieverbruik voor woningverwarming niet zonder meer evenredig met de verliezen bij de laagste buitentemperatuur. Voor het hiervoor genoemde standaard eengezinshuis met een warmteverlies van 14,8 kW bij een buitentemperatuur van -10°C kunnen, over het stookseizoen gerekend, gemiddeld de in Tabel 3 weergegeven verliezen worden aangehouden.

Indien het verwarmingsapparaat een gebruiksrendement heeft van 60%, moet een hoeveelheid van

$$\frac{97,2}{0,6} = 162 \times 10^9 \text{ J energie worden verbruikt, hetgeen}$$

overeenkomt met 4.600 m^3 aardgas.

Met betrekkelijk eenvoudige maatregelen kunnen de warmteverliezen van Tabel 3 worden verminderd met

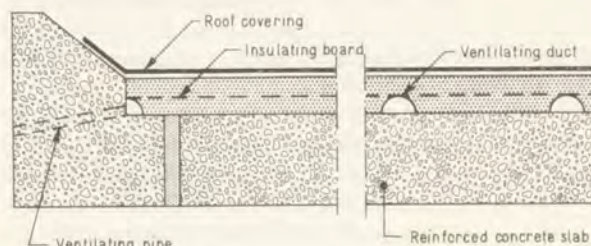
Tabel 3. Warmteverliezen per woning gedurende een stookseizoen in standaard eengezinshuizen

	10^9 J
30 m ² glas	39,6
50 m ² gevel	21,6
50 m ² vloer	21,6
70 m ² dak	18,0
Ventilatie (gemiddeld $200 \text{ m}^3/\text{h}$)	14,4
Totaal	115,2
Warmtewinst door zon, personen, gebruik elektriciteit	18,0
Netto warmteverlies	97,2

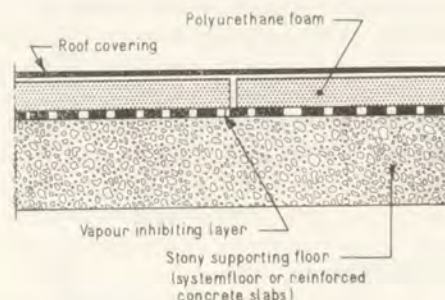
45%, mits deze maatregelen tijdens de bouw worden genomen. De maatregelen zijn: dubbele beglazing voor alle vensters en glazen buitendeuren en het veel beter isoleren van vloeren op de begane grond, gevels en daken. Als voorbeelden van zulke isolatie kunnen worden genoemd:

- de isolatie van daken met 40 mm dik polyurethaanschuim in plaats van de gebruikelijke 70 mm dikke kanaalplaten van cementgebonden organisch materiaal (zie Figuren 1 en 2);
- het vullen van de spouw van spouwmuren met minerale wol of kunststofschuim (zie Figuren 3 en 4);
- het aanbrengen van 40 mm dikke platen van minerale wol of kunststofschuim onder de vloeren op de begane grond, of het toepassen van gewapend cellenbeton voor zulke vloeren.

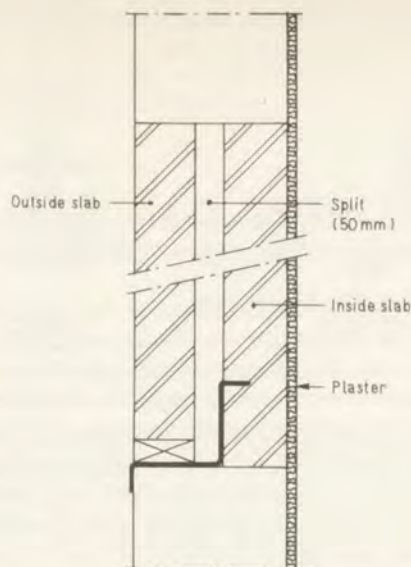
Bij bestaande woningen zijn de mogelijkheden kleiner en zullen de resultaten van geval tot geval verschillen. Enkele praktische maatregelen kunnen zijn: het aanbrengen van goede voorzieningen tegen tocht, gespoten isolatie in spouwmuren, het beschieten van de binnenzijde van gevelpuien en externe isolatie op daken. De te



Figuur 1. Gebruikelijke betonnen dakconstructie met 70 mm kanaalplaten ($k = 1,05 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ \text{C}$) [3].



Figuur 2. Betonnen dakconstructie, geïsoleerd met 40 mm polyurethaanschuim ($k = 0,50 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ \text{C}$) [3].



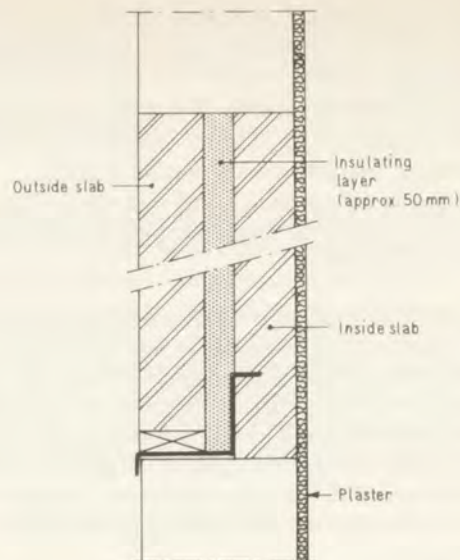
Figuur 3. Gebruikelijke spouwmuur ($k = 1,75 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) [3].

verwachten besparing zal kunnen variëren van 0 tot 50%, met een gemiddelde van ca. 30%, berekend op de totale voorraad bestaande woningen met centrale verwarming. Daar er nog geen algemeen aanvaarde wetenschappelijke methode is voor het berekenen van warmtebehoefte en -verliezen van woningen, wordt in het navolgende weergegeven op welke wijze de genoemde schatting van 30% voor een bestaand, slecht geïsoleerd, eengezinshuis tot stand is gekomen.

	10^9 J
Warmtetoevoer brandstof (4.500 m ³ aardgas):	158
Warmtetoevoer zon, elektriciteit, personen, etc.:	22
Totaal toevoer	180
Warmteverliezen warmtedoorgang:	94
Warmteverliezen ventilatie:	21
Verliezen warmtebron (vooral via rookgasafvoerkanal) bij een gebruiksrendement van 60%:	65
Totaal verliezen	180

Aangenomen wordt dat door isolatie en tochtwering zowel de warmteverliezen door transmissie als door ventilatie 30% lager worden en dat het gebruiksrendement van de warmtebron door lagere gemiddelde belasting (hogere verliezen door onbelast draaien) daalt tot 55%. Dan ontstaat de onderstaande balans:

	10^9 J
Warmteverliezen warmtedoorgang (0,7 X 94):	66
Warmteverliezen ventilatie (0,7 X 21):	15
Verliezen warmtebron (0,45 X 106):	47
Totaal verliezen	128
Warmtetoevoer brandstof:	106
Warmtetoevoer zon, elektriciteit, personen etc.:	22
Totaal toevoer	128



Figuur 4. Geïsoleerde spouwmuur [3]:

- a. tijdens de bouw geïsoleerd: $k = 0,55 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.
 b. na de bouw geïsoleerd: $k = 0,85 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

De brandstofbesparing is nu: $\frac{158 - 106}{158} \times 100 = 33\%$.

De werkelijke cijfers zullen van geval tot geval verschillen, maar een gemiddelde van 30% lijkt een redelijke veronderstelling.

Voor woningen zonder centrale verwarming zijn de bovengenoemde maatregelen evenzeer van toepassing, maar naar de mening van de werkgroep mag er nauwelijks brandstofbesparing van worden verwacht. Een betere isolatie zou een voor de hand liggende mogelijkheid zijn om het comfort in deze woningen te vergroten, bijvoorbeeld doordat het minder nodig wordt de deuren van verwarmde vertrekken gesloten te houden. Gegevens hierover zijn echter niet bekend.

II.1.4. Besparingsmogelijkheden door andere maatregelen

Door betere thermische isolatie wordt tijdens vorst de oppervlaktetemperatuur van de binnenzijde van gevels, daken, vloeren en ramen hoger. Hierdoor kan bij dezelfde mate van comfort worden volstaan met een lagere luchttemperatuur (ca. 2°C lager dan thans gebruikelijk). Dit levert bij nieuw te bouwen woningen een brandstofbesparing van naar schatting 5% op. Door thermostatische regeling per vertrek en automatische verlaging van de temperatuur 's nachts (voorzover niet nu reeds toegepast) kan ook een zekere energiebesparing worden bereikt. Uit voorlopige metingen en berekeningen bij de Technisch-Physische Dienst TNO-TH blijkt dat een voorzichtige schatting van deze besparing op 5% kan worden gesteld. In de loop van 1974 zijn hierover uitgebreidere gegevens ter beschikking gekomen.

Door warmteterugwinning in combinatie met mechanische ventilatie kan theoretisch 75% van de warmteverliezen door ventilatie worden bespaard, maar in verband met de aanwezigheid van niet gecontroleerde ventilatie zal de besparing in de praktijk waarschijnlijk slechts de helft van de ventilatieverliezen belopen. Dit

komt overeen met ca. 5% van het brandstofverbruik van een slecht geïsoleerde woning ofwel ca. 10% van het verbruik in een goed geïsoleerde woning. De afzuigventilator zelf verbruikt ca. 30 W. Dit is over een jaar ca. 260 kWh of ca. $2,8 \times 10^9$ J aan primaire energie. Op een brandstofverbruik van 4.000 m^3 aardgas (140×10^9 J) is dit 2%. Het wordt hier buiten beschouwing gelaten, mede omdat het zeker niet volledig zou moeten worden toegerekend aan het energieverbruik voor verwarming. Overigens kan warmteterugwinning slechts in een klein deel van de nieuw te bouwen woningen, nl. ca. de helft van de etagewoningen, worden toegepast. Bij bestaande woningen is deze maatregel vrijwel niet toepasbaar.

Door toepassing van individuele warmteverbruiksmeting en toerekening van de kosten per woning in het geval van blokverwarming kan naar schatting 10% op het verbruik worden bespaard. Voorts kunnen besparingen worden bereikt door het verhogen van het rendement van verwarmingstoestellen en -apparaten. Dit onderwerp zal in de volgende paragraaf worden behandeld.

Een relatief hogere prijs van brandstoffen kan een zuiniger verbruik in de hand werken. De vraag of — en zo ja hoe — dit prijsmechanisme in de praktijk zal werken, valt buiten het bestek van deze studie.

II.1.5. Mogelijke besparingen in 1985

Met behulp van een aantal veronderstellingen, gebaseerd op de hiervoor genoemde mogelijkheden, kunnen de mogelijke besparingen in 1985 worden berekend.

- Alle 0,95 miljoen woningen gebouwd na 1975 zijn veel beter geïsoleerd dan thans gebruikelijk is (besparing 45%). Hierdoor kan de wenselijke binnentemperatuur met ca. 2°C worden verlaagd (besparing 5%). Al deze woningen zijn voorzien van thermostatische regeling per vertrek (besparing 5%). In 20% van deze woningen (blokverwarming) vindt warmteverbruiksmeting per woning plaats (besparing 10%). In 10% van de woningen vindt bovendien warmteterugwinning uit ventilatielucht plaats (besparing 10%). Dit alles resulteert in een brandstofverbruik in deze woningen in 1985 van: $0,55 \times 0,95 \times 0,95 (0,8 + 0,1 \times 0,90 + 0,1 \times 0,90 \times 0,90) \times 0,95 \times 10^6 \times 4.750 = 2,174 \times 10^9 \text{ m}^3$ aardgas, ofwel $76,5 \times 10^{15} \text{ J}$.
- Van alle 3,25 miljoen woningen die nu reeds zijn gebouwd of vóór 1976 zullen worden gebouwd en die bovendien in 1985 van centrale verwarming zullen zijn voorzien, zal de isolatie en/of de temperatuurregeling per vertrek zodanig zijn verbeterd dat de gemiddelde brandstofbesparing 30% bedraagt. Deze woningen zullen dan in 1985 verbruiken: $0,7 \times 3,25 \times 10^6 \times 4.300 = 9,783 \times 10^9 \text{ m}^3$ aardgas ofwel $344 \times 10^{15} \text{ J}$.
- Van de 0,75 miljoen woningen zonder centrale verwarming in 1985 wordt aangenomen dat getroffen maatregelen tot comfortverhoging en niet tot brandstofbesparing zullen leiden. Het verbruik blijft $63 \times 10^{15} \text{ J}$.

De bereikte besparing in 1985 is dan $720 - (76,5 + 344 + 63) = 236,5 \times 10^{15} \text{ J}$. Het binnenlands primair energieverbruik in Nederland daalt hierdoor van 4.154 tot $3.918 \times 10^{15} \text{ J}$ (zie Hoofdstuk 2, Tabel 20): een be-

sparing van 5,7%. De besparing op het verbruik voor woningverwarming zou ca. 33% bedragen.

II.1.6. Financiële aspecten

De genoemde maatregelen zullen belangrijke financiële offers vragen, die bij de energieprijzen van medio 1973 niet volledig zouden worden gecompenseerd door besparing op energiekosten. Zowel bij nieuwe als bestaande woningen vormt verbetering van thermische isolatie de grootste post. In het onderstaande wordt hierop globaal ingegaan, uitgaande van het prijspeil op 1 januari 1974. Wat de omvang van de financiële offers betreft, wordt er van uitgegaan dat goede isolatie, inclusief toepassing van dubbele beglazing, na 1975 snel gemeengoed zal zijn geworden en dat massaproductie en goede normalisatie van de benodigde hulpmiddelen wordt bereikt (wat een bijzonder belangrijke factor is voor de prijzen). Tabel 4 geeft een raming van de kosten van de voornaamste posten.

Tabel 4. Meerkosten voor goede isolatie van een woning

	f
30 m ² dubbel glas à f 60,-	1.800,-
120 m ² verbeterde isolatie aan gevels, daken en vloeren à f 10,-	1.200,-
Totaal ca.	3.000,-

In een dergelijke goed geïsoleerde woning zal de verwarmingsinstallatie ca. f 800,- minder kosten, waardoor de totale investering daalt tot f 2.200,-.

Uitgaande van een afschrijving in 30 jaar en een rentevoet van 8% komt dit neer op f 250,- voor het eerste jaar (ieder volgend jaar wordt dit bedrag lager). Hiertegenover staat een brandstofbesparing van 50% ($2,375 \text{ m}^3$ aardgas à f 0,11 excl. BTW en vastrecht), overeenkomend met f 260,- per jaar. Bij nieuwbouw betaalt goede isolatie zichzelf dus reeds onder de huidige verhoudingen terug, mits zij op voldoende grote schaal worden toegepast.

Voor bestaande woningen is het veel gecompliceerder een raming te maken van de benodigde investering voor een goede isolatie. Men zou als uitgangspunt kunnen nemen een complex van 100 of meer eengezinshuizen in rijen in de woningwet- of premiebouwsector, traditioneel gebouwd met spouwmuren, pannen daken en betonnen vloeren. Indien uitsluitend de spouwmuren worden voorzien van een vulling van ureumformaldehydeschuim, dan zal dit per woning ongeveer f 400,- kosten. De bereikte brandstofbesparing is dan gemiddeld 22 tot $29 \times 10^9 \text{ J}$ per woning per jaar. Dit komt overeen met 625 – 825 m^3 aardgas à f 0,11; gemiddeld f 80,- per jaar. In dit geval zullen rente en aflossing van het geïnvesteerde bedrag ruimschoots worden gecompenseerd door de brandstofbesparing.

Ook in het geval van bestaande gebouwen zijn er dus goede mogelijkheden, die echter van geval tot geval zullen verschillen. Het zou overweging verdienen indien men energiebesparing in deze omvangrijke deelsector wil stimuleren, dit te doen door subsidies voor woningverbetering.

II.2. Gasverwarmingsapparatuur

II.2.1. Inleiding

Hoewel ook olieverwarmingsapparatuur een rol speelt in het huishoudelijk energieverbruik (met name in de centrale verwarmingsketels), blijkt uit Hoofdstuk 2 (Tabel 13 en 14) dat dit aandeel niet groot is en bovendien in de toekomst zal teruglopen. De besparingsmogelijkheden voor olieverwarmingsapparaten zullen daarom niet worden behandeld: zij zijn beperkt (zij het niet zonder betekenis).

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de besparingen op het energieverbruik die in 1985 kunnen worden verkregen door verbeteringen aan gasgestookte verwarmings- en warmwatertoestellen in de woning en, voorzover van toepassing, ook in andere gebouwen. Om dubbelstellingen te vermijden zullen de berekeningen van de besparingen worden gebaseerd op het energieverbruik in woningen waarin de in paragraaf II.1. voorgestelde maatregelen zijn getroffen.

II.2.2. Rendementen

In de Nederlandse keuringseisen voor gasverbruiktoestellen is een programma opgenomen ter bepaling van het zgn. stookrendement. In het algemeen bedraagt dit directe of indirecte rendement, op basis van de bovenste verbrandingswaarde van de brandstof, $78\% \pm 5\%$. De waarde ervan is bepalend voor de toekenning van het keurmerk (GIVEG-keur). Een verhoging van het stookrendement is niet mogelijk, daar het is gebaseerd op bepaalde veiligheidseisen. Dit stookrendement hangt evenwel niet rechtstreeks samen met het werkelijk optredend rendement, gemeten over een lange periode. Het is echter dit gebruiksrendement dat voor deze studie van belang is. Onder gebruiksrendement wordt verstaan de verhouding tussen de *jaarlijkse* nuttige productie (hoeveelheid warmte, warm verbruikswater, enz.) en de hiertoe benodigde hoeveelheid brandstof.

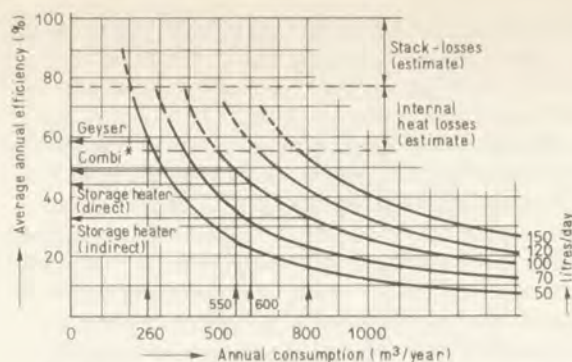
De grote discrepantie tussen stookrendement en gebruiksrendement is een gevolg van de stilstandsverliezen. De meeste apparaten worden slechts een beperkt aantal uren per dag gebruikt; gedurende het grootste gedeelte van de tijd wordt het toestel niet gebruikt en gedurende deze periode wordt een groot deel van de in het toestel verzamelde warmte aan de omgeving afgegaan.

Toestellen met een grote warmte-inhoud (combiketels, centrale verwarmingsketels, gasboilers) hebben een laag gebruiksrendement. Het omgekeerde geldt voor keukengeysers (geringe warmte-inhoud). Uit Figuur 5 blijkt, hoe het jaarlijks gebruik het rendement van enkele soorten warmwatertoestellen beïnvloedt.

Verliezen

In het algemeen kunnen vier hoofdgroepen van verliezen worden onderscheiden, te weten:

- transmissieverlies, dat is het jaarlijks verlies aan warmte via het buitenoppervlak van het toestel;
- schoorsteenverlies, het jaarlijks verlies aan warmte met het rookgas via het verbrandingsafvoerkanaal;
- stilstandsverlies, het jaarlijks verlies aan warmte ten gevolge van de door het apparaat stromende lucht



* Combined heating and storage-unit

apparatus	efficiency (%)	tapping volume (litres/day)	gas consumption (m³/year)
geyser	58	50	260
combi *	48	100	550
storage heater (direct)	45	100	600
storage heater (indirect)	33	100	800

(roughly estimated values)

Figuur 5. Rendement als functie van jaarlijks gasverbruik van soorten warmwatertoestellen bij diverse per dag afgetapte waterhoeveelheden (Gasunie).

van buiten, die eveneens via de schoorsteen wordt afgevoerd;

- leidingverlies, de hoeveelheid warmte die per jaar via de direct tot het systeem behorende leidingen aan de omgeving wordt afgestaan (bij een ketel/voorraadvat-combinatie, waarbij het voorraadvat buiten de ketelmantel is opgesteld, zijn dat de warmteverliezen van de leidingen tussen ketel en voorraadvat). Hieronder worden dus niet de verbruikswarmwater- of de warmwater-leidingverliezen van centrale verwarmingsinstallaties verstaan.

De stilstandsverliezen kunnen worden onderscheiden in:

- inwendige trekverliezen;
- warmte-afgifte aan de omgeving;
- het verbruik van de waakvlam.

Het geven van een nadere kwantificering van deze verliezen is niet eenvoudig. De mechanismen, bedoeld om een bepaald verlies te beperken, compenseren dikwijls meerdere verliesposten geheel of gedeeltelijk. Een verband tussen een te nemen maatregel en de bijbehorende besparing is daarom doorgaans slechts zinnig te leggen als meerdere verliesposten in de beschouwing worden betrokken.

De warmte-afgifte aan de omgeving kan zowel via de bij stilstand door het apparaat stromende lucht als via de buitenmantel van het apparaat plaatsvinden. Het waakvlamverbruik komt gedurende de winterperiode voor een deel ten goede aan de verwarming van huis of gebouw; in hoeverre kan worden gesproken van een verliespost is hier de vraag. Hetzelfde geldt in principe ook voor het schoorsteenverlies; bij zeer korte schoorstenen is duidelijker van een verlies sprake dan bij lange, door woning of gebouw lopende schoorsteenkanaalen die op deze wijze bijdragen tot de totale verwarming. In de zomer kan men meestal van een volledig verlies spreken.

II.2.3. Maatregelen ter verbetering van gebruiksrendementen

De drie belangrijkste middelen die ons ten dienste staan

om de eerder genoemde verliezen geheel of gedeeltelijk te voorkomen, zijn:

- de verbrandingsgasklep;
- een alternatief voor de waakvlam;
- verbeteringen aan de brander en aan het verwarmend oppervlak.

De verbrandingsgasklep

De functie van een beweegbare verbrandingsgasklep is het ongehinderd laten passeren van de rookgassen wanneer het toestel in werking is en het afsluiten van de afvoer gedurende de overige tijd. Indien het toestel een waakvlam heeft, zal een permanente opening in de verbrandingsgasklep aanwezig moeten zijn. De klep dient te worden geplaatst tussen het toestel en de valwindafleider - trekonderbreker. Weliswaar kan plaatsing na de trekonderbreker additionele besparingen opleveren, maar dit is ongewenst met het oog op de noodzakelijke ventilatie van de stookruimte. In verband met plaatsingsmogelijkheden en uit esthetische overwegingen gaan steeds meer fabrikanten van centrale verwarmingsketels er toe over ketels te ontwikkelen met ingebouwde valwindafleider. Plaatsing van een verbrandingsgasklep vóór de valwindafleider wordt dan moeilijk of onmogelijk. Uit oogpunt van energiebesparing is deze ontwikkeling dus ongewenst.

Gezien de grote aantallen, het hoge gasverbruik en het lage gebruiksrendement komen, in volgorde van belangrijkheid, vooral centrale verwarmingsketels, combitoestellen en gasboilers in aanmerking voor toepassing van een verbrandingsgasklep. Voor de centrale verwarmingsketels en combitoestellen is een elektrisch bediende klep, gecommandeerd door kamer- en/of ketelthermostaat, het meest geschikt. Voor de gasboiler zou dit een op gasdruk werkende klep kunnen zijn.

Besparingen zullen sterk afhangen van het verbruikspatroon. Voor centrale verwarmingsketels kan worden gerekend met ca. 10% over de stookperiode (opgebouwd uit stralings- en convectieverlies 3%, waakvlam 2%, intern trekverlies 5%). Voor boilers kan dit ca. 9% zijn, gerekend over het gehele jaar. Bij gasboilers komt een zeer klein gedeelte van de geproduceerde warmte via het verbrandingsgaskanaal ten goede aan woningverwarming.

Voor combitoestellen is een belangrijke factor de verhouding tussen de hoeveelheid warmte die beschikbaar is voor woningverwarming en die welke wordt benut voor verwarming van verbruikswater. Voorts is het toegepaste systeem van belang: een combiketel met tapspiraal levert minder verliezen op dan een ketel met voorraadvat. Een en ander wordt in paragraaf II.2.4. nader geanalyseerd.

Kachels, die vrijwel altijd een ingebouwde valwindafleider hebben, en geysers met hun zeer geringe waterinhoud worden in dit verband buiten beschouwing gelaten.

Een alternatief voor de waakvlam

Vrijwel alle gasapparaten zijn op het ogenblik uitgerust met een waakvlam. Het hierdoor ontstane verlies hangt in de eerste plaats samen met het gedeelte van de tijd dat de waakvlam brandt. Is het toestel op een afvoerkanaal aangesloten dan gaat de waakvlamwarmte

gedurende het gehele jaar nagenoeg verloren, zij het dat bij toestellen met een grote warmte-inhoud (centrale verwarmingsketels, boilers) een deel ten goede komt aan het op temperatuur houden van het water in het toestel. Bij afwezigheid van een afvoerkanaal kan de waakvlamwarmte 's winters een bijdrage betekenen in de benodigde energie voor woningverwarming.

Toepassing van een waakvlam heeft een belangrijk veiligheidsaspect: ingeval van ongecontroleerd uitstromend gas zorgt de vlam voor tijdige ontsteking van het lucht-gasmengsel. Het alternatief kan een elektrische ontsteking (vonkontsteking) zijn, die vrijwel energieloos functioneert. Dit mechanisme kan in ieder nieuw apparaat en zelfs in de meeste bestaande worden ingebouwd. Slechts voor toestellen in een vochtige omgeving (boilers, geysers) zal men speciale voorzieningen moeten treffen, daar de ontsteking onder alle omstandigheden feilloos dient te werken. Daarbij wordt geaccepteerd dat het gasapparaat buiten bedrijf komt bij een storing in de elektriciteitsleverantie. Tabel 5 geeft een indicatie van de mogelijke besparingen.

Tabel 5. Energieverbruik van waakvlammen

	Normverbruik ¹) (m ³ aardgas/jaar)
Gasfornuis	170
Keuken/badgeyser, gasboiler	160
Normale centrale verwarmingsketel	200
Grote gaskachel	200
Kleine gaskachel	160

¹) Bedrijfstijd 100%; op basis van de keuringseisen.

Afhankelijk van het aantal bedrijfsuren, het al dan niet aangesloten zijn op een afvoer, het al dan niet 's zomers in bedrijf zijn, enz. kan het reële warmteverlies worden bepaald. Wanneer het toestel is voorzien van een waakvlam, dient in de verbrandingsgasklep een opening te worden aangebracht, zodat het al dan niet toepassen van de klep geen directe invloed heeft op het waakvlamverbruik.

Verbeteringen aan de brander en aan het verwarmend oppervlak

De belangrijkste verliezen in toestellen met een grote warmte-inhoud worden veroorzaakt door afkoeling gedurende stilstand van het in het toestel aanwezige water. Er moet daarom worden gezocht naar systemen met een zo klein mogelijke water-inhoud en een beperking van de luchtdoorstroming tijdens stilstand. Een mogelijke oplossing biedt de zogenaamde condensatieketel, waarbij de verbrandingsgassen rechtstreeks in contact worden gebracht met het te verwarmen medium, zodat er geen warmte-overdragende wand nodig is. Bij dergelijke ketels zal een gebruiksrendement van 60 à 70% bereikbaar zijn, afhankelijk van rookgascondities en wateraanvoertemperatuur. Dit komt omdat van de condensatiewarmte uit de rookgassen gebruik kan worden gemaakt en omdat in de stilstandperiode de interne ventilatieverliezen tot een minimum kunnen worden teruggebracht, daar er in principe geen verwarmend oppervlak aanwezig is.

Een andere mogelijkheid is de ventilatorketel, die is voorzien van een ventilatorbrander. Door toepassing van een uiterst compact geconstrueerd verwarmend oppervlak met hoge weerstand aan de rookgaszijde en

hoge rookgassnelheden zal hier een grote warmte-overdracht per eenheid van oppervlak kunnen worden gerealiseerd. Daarnaast zal door de hoge interne weerstand van de ketel (de som van de weerstanden van het compacte verwarmend oppervlak en van de dan stilstaande ventilator) het stilstandsverlies beperkt zijn. Het feit dat thans reeds een aantal nagenoeg geruisloze ventilatorketels op de markt zijn, wijst erop dat de geluidsproductie op een aanvaardbaar niveau kan worden gehouden.

Besparingen van ca. 30% zijn mogelijk omdat het gebruiksrendement van de 40 à 50% van de huidige conventionele ketels door toepassing van bovengenoemde principes tot 60 à 70% kan worden opgevoerd. Hierin is het alternatief voor de waakvlam reeds verdisconteerd.

Slotopmerkingen

Naast de toepassing van de behandelde mogelijkheden kunnen energieverliezen nog worden beperkt door verbetering van de isolatie van gastoestellen. Wanneer bij de constructie rekening wordt gehouden met de hierboven gedane suggesties, zal dit in vele gevallen vanzelf tot betere isolatie van de toestellen leiden. Het is moeilijk te schatten welke extra energiebesparingen dat nog ten gevolge heeft, want het betreft hier een secundair effect dat kleiner is dan de effecten van de andere verbeteringen. Daarom wordt de isolatie in deze studie niet apart behandeld.

Een andere besparingsmogelijkheid is het isoleren van in kruipruimten geïnstalleerde leidingen. Dit heeft vooral zin indien deze ruimten hun warmte snel verliezen door luchtdoorspoeling. Anders komt de warmte toch wel voor een deel ten goede aan de verwarming van woning of gebouw.

Voorts kan een betere regeling tot besparingen bijdragen. Men kan daarbij, behalve aan de eerder genoemde temperatuurregeling per vertrek en de verlaging van de temperatuur des nachts, ook denken aan een juiste regeling van de watertemperatuur met behulp van een mengsysteem. Metingen van de afdeling Warmte en Koudetechniek van het Centraal Technisch Instituut TNO hebben uitgewezen dat door een betere regeling besparingen van 5–10% op het brandstofverbruik mogelijk zijn.

II.2.4. Mogelijke besparingen in 1985

Zoals uit het voorgaande blijkt, dienen zinvolle schattingen van in 1985 bereikbare besparingen vergezeld te gaan van gedetailleerd uitgewerkte veronderstellingen. Daarom zal per apparaat een gemiddelde schatting van de mogelijkheden worden gegeven. Bij het schatten van de besparingen is wat de warmwaterapparatuur betreft uitgegaan van de mate van verbreiding zoals vermeld in Tabel 6.

Keukengeyser

Uitgangspunten:

- Geen afvoerkanaal.
- Verbruik 1972: 350 m³/jaar, waarvan waakvlam (10 liter/uur) op 24 uursbasis: 84 m³/jaar.
- In ca. 30% van de huishoudens blijft de geysers thans dag en nacht branden; dit zal in 1985 20% zijn. De anderen doen 's nachts (8 uur) de waakvlam uit.

Tabel 6. Aantallen gasaansluitingen en mate van verbreiding van warmwaterapparatuur in 1972, 1985 en 2000

	1972	1985	2000
Aantal gasaansluitingen (X 10 ⁶)	3,697	4,85	5,0
Mate van verbreiding (in %) ¹⁾			
Keukengeyser	70	50	40
Badgeyser	5	40	50
Gasboiler	4	5	8 (?)
Elektrische boiler	18	15	?
Combiketel	3	10	?
Geen apparaten (in %)	7	0	0

¹⁾ De som van de maten van verbreiding van verschillende toestellen kan tezamen meer dan 100% bedragen, omdat een elektrische boiler, gasboiler of badgeyser in één woning met de keukengeyser gecombineerd aanwezig kunnen zijn.

- Van de geproduceerde waakvlamwarmte komt 50% ten goede aan de opstellingsruimte (nl. 's winters en tijdens koude zomeravonden).

Veronderstellingen:

- In 1985 zullen alle geysers zijn voorzien van een elektrisch ontstekingsmechanisme (huidige levensduur keukengeysers: ca. 10 jaar).
- Het aantal schoorsteengebonden toestellen zal sterk toenemen.

Besparing in 1985 op jaarbasis:

$$(0,2 + 0,8 \times \frac{16}{24}) \times 0,5 \times 0,5^{1)} \times 4,85 \times 10^6 \text{ } ^{2)}$$

$$\times 84 = 75 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ aardgas (} 2,6 \times 10^{15} \text{ J).}$$

Verwacht wordt dat de besparing in 2000 met ca. 20% zal zijn afgenomen t.o.v. 1985, mede door een voortgezette daling van het aantal geysers zonder afvoerkanaal. Dit laatste heeft tot gevolg dat de warmte van de afvoergassen minder ten nutte kan komen aan ruimteverwarming, waarin dan op andere wijze moet worden voorzien.

Badgeyser

Uitgangspunten:

- Huidig gasverbruik 450 m³/jaar, waarvan waakvlam 100 m³/jaar.
- Huidig gebruiksrendement ca. 53%.

Veronderstellingen:

- De badgeyser zal veel meer ook voor het warme water in de keuken worden benut.
- Het gasverbruik zal toenemen tot 700 m³/jaar (mede door de vrij grote leidingverliezen equivalent met ca. 120 m³/jaar).
- Toepassing verbrandingsgasklep heeft weinig zin (kleine waterinhoud).
- Vonkontsteking wordt toegepast. In 1985 zullen vrijwel alle badgeysers hiervan zijn voorzien (huidige levensduur ca. 10 jaar).

Besparing in 1985 op jaarbasis:

$$0,4^{1)} \times 4,85 \times 10^6 \text{ } ^{2)} \times 100 = 194 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ aardgas (} 6,8 \times 10^{15} \text{ J).}$$

Verwacht wordt dat de besparing in 2000 met ca. 25% zal zijn gestegen t.o.v. 1985, vooral door de toegenomen verbreiding.

¹⁾ Mate van verbreiding.

²⁾ Aantal gasaansluitingen.

Gasboiler

Uitgangspunten:

- Huidig verbruik 820 m³/jaar, waarvan waakvlam 150 m³/jaar (op 24 uurbasis).
- Huidig gebruiksrendement 37%.

Veronderstellingen:

- Door toepassing van de verbrandingsgasklep in de schoorsteen wordt het gebruiksrendement opgevoerd tot 45%.
- Er wordt vonkontsteking toegepast.
- Alle gasboilers zijn in 1985 met deze twee verbeteringen uitgerust.

Besparing in 1985 op jaarbasis:

$$0,05^1) \times 4,85 \times 10^6 \text{ } ^2) \left\{ 150 + \left(670 - \frac{37}{45} \times 670 \right) \right\} =$$

65 X 10⁶ m³ aardgas (2,3 X 10¹⁵ J).

Schattingen van besparingen in 2000 zijn onzeker.

Een sterke groei van het boilerbestand is door bezwaren t.a.v. levensduur en rendement thans niet te verwachten.

Een meer geavanceerd ontwerp kan echter een beter toekomstperspectief bieden. Op basis van de mate van verbreiding volgens Tabel 6 en een verdere verbetering van het gebruiksrendement zou de besparing in 2000 nog kunnen verdubbelen t.o.v. 1985.

Combiketel

Uitgangspunten:

- Huidig gasverbruik 6.000 m³/jaar; waarvan 4.750 m³/jaar voor woningverwarming en 1.250 m³/jaar voor verbruikswaterverwarming.
- Alleen de vanaf 1975 geïnstalleerde combiketels worden gezien; dit aantal wordt voor 1985 geschat op 375.000.
- Deze ketels worden gedeeltelijk in reeds gebouwde woningen en gedeeltelijk in nieuwbouwhuizen geplaatst. In deze huizen zijn de in paragraaf II.1. aangegeven maatregelen toegepast, hetgeen leidt tot een daling van het verbruik voor woningverwarming van de genoemde 4.750 tot 3.000 m³/jaar (ca. 37%).
- Het huidig gebruiksrendement is 45% in de winter (7 maanden) en 15% in de zomer.

Veronderstellingen:

- De combiketel zal worden uitgerust met een voorraadvat in plaats van een tapspiraal, ter verbetering van de verbruikswatercapaciteit.
- Door toepassing van een ventilator- en condensatieketelcombinatie zal het gebruiksrendement 's winters op 70% worden gebracht. In de zomer zal dit rendement kunnen worden opgevoerd tot 50%.

Besparing in 1985 op jaarbasis:

$$375.000 \times 3.000 \times \left(1 - \frac{45}{70} \right) = 402 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ aardgas}$$

(14,1 X 10¹⁵ J) voor woningverwarming, en

$$375.000 \times 1.250 \times \left(1 - \frac{15}{50} \right) = 328 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ aardgas}$$

(11,5 X 10¹⁵ J) voor verbruikswaterverwarming.

Totaal: 25,6 X 10¹⁵ J.

¹) Mate van verbreiding.

²) Aantal gasaansluitingen.

Voor het jaar 2000 zijn geen zinvolle besparingscijfers te geven. De mogelijkheid van sterke collectivering van de verwarming (stadsverwarming, enz.) moet zo reëel worden geacht, dat het huidige patroon: eengezinshuis — individueel systeem; meergezinsblokken — collectief systeem wellicht grondig zal zijn gewijzigd.

Gaskachels

Hier zijn geen besparingen van betekenis te verwachten.

Thans bedraagt de mate van verbreiding 65% van het aantal aansluitingen; gezien de sterke verbreiding van centrale verwarmingsinstallaties zal dit getal in 1985 tot ca. 20% zijn gedaald. Het huidige gebruiksrendement van ca. 60% kan, o.a. door aansluiting op een schoorsteen, worden opgevoerd tot ca. 70%.

De gaskachelmarkt is dus een aflopende markt, die zich door massale introductie van modulerende regeling (van 40% van het huidige bestand tot 100% in 1985) en aanpassing van de kachelmantels enigszins zal kunnen handhaven. Introductie van elektrische ontstekingsystemen is gezien de concurrentieverhoudingen en de eindigheid van de markt nauwelijks meer te verwachten.

Kookapparatuur op basis van aardgas

Uitgangspunten:

- Het verbruik van de waakvlam bedraagt 115 m³/jaar (24 uur per dag, 340 dagen per jaar).
- Van de gebruikers doet 50% de waakvlam 's nachts (8 uur) uit.
- Van de waakvlamenergie is 50% nuttig (in de winter) en 50% verlies.

Veronderstellingen:

- De mate van verbreiding zal teruglopen van 90% van het aantal gasaansluitingen in 1972 tot 80% in 1985 (uit overwegingen van properheid en hygiëne).
- In 1985 zal de helft van alle kookapparaten zijn voorzien van vonkontsteking.

Besparing in 1985 op jaarbasis:

$$0,5 \times 0,5 \left(0,5 + \frac{16}{24} \times 0,5 \right) \times 115 \times 4,85 \times 10^6 \text{ } ^1)$$

X 0,8 = 93 X 10⁶ m³ aardgas (3,3 X 10¹⁵ J).

De besparing in 2000 kan het dubbele bedragen van die in 1985 als alle kookapparaten dan van vonkontsteking zijn voorzien. Overigens kan bij deze apparaten worden aangetekend dat het niet gebruiken van de waakvlam over het algemeen slechts gering ongemak met zich brengt, te meer daar de waakvlam hier nauwelijks een veiligheidsfunctie heeft.

Centrale verwarmingsketel

Uitgangspunten:

- Het huidig gebruiksrendement is 55% (in de praktijk kan het variëren van 50 tot 65%).
- Na toepassing van de in paragraaf II.1. voorgestelde maatregelen zal het gasverbruik bedragen: 2.600 m³/jaar (55% van 4.750 m³) voor na 1975 gebouwde woningen (0,95 miljoen stuks) en 3.000 m³/jaar (70% van 4.300 m³) in het geval van woningen gebouwd vóór 1976, die in 1985 van centrale verwarming zijn voorzien (3,25 miljoen stuks).
- Van het totaal van 4,2 miljoen centrale verwarmingsketels in 1985 moet het totaal van 485.000 combi-

¹) Aantal gasaansluitingen.

toestellen (hiervóór reeds behandeld) worden afgetrokken. Van de 375.000 vanaf 1975 geleverde combitoestellen worden er 275.000 in nieuwe huizen geïnstalleerd.

Veronderstellingen:

- Op basis van de thans beschikbare kennis inzake verbetering van warmte-overdracht en beperking van stilstandsverliezen zal een gebruiksrendement van centrale verwarmingsketels van 65% worden gerealiseerd.
- Van alle vanaf 1975 geleverde ketels (1,8 miljoen verminderd met 375.000 combiketels, zie hoofdstuk 2, Tabel 13) zal 50% met een gebruiksrendement van 65% functioneren. Van de overige 50% wordt de helft voorzien van schoorsteenklep (besparing 10%) en vonkontsteking (besparing 5%).
- Van de andere ketels (4,2 miljoen — 1,8 miljoen — 485.000 combiketels) wordt 10% voorzien van een schoorsteenklep. Dit lage percentage wordt mede veroorzaakt door het feit dat slechts een gering aantal ketels is voorzien van een aangebouwde trekonderbreker. Een verdere 10% zal worden voorzien van vonkontsteking en nog eens 10% wordt voorzien van beide.

Besparingen in 1985 op jaarbasis:

Voor ketels van ná 1975: $(0,675 \times 2.600 + 0,75 \times 3.000) \times 10^6 \times (0,5 \times \frac{10}{65} + 0,25 \times 0,15) = 458 \times$

10^6 m^3 aardgas ($16,1 \times 10^{15} \text{ J}$). Voor ketels van vóór 1975: $1,915 \times 10^6 \times 3.000 \times (0,10 \times 0,10 + 0,10 \times 0,05 + 0,10 \times 0,15) = 172 \times 10^6 \text{ m}^3$ aardgas ($6,1 \times 10^{15} \text{ J}$).

Totaal: $22,2 \times 10^{15} \text{ J}$.

De besparingen in 2000 kunnen het dubbele van die in 1985 bedragen, omdat dan alle ketels het hoge gebruiksrendement van 65% kunnen bezitten. De levensduur is thans ca. 25 jaar. Toch valt er nauwelijks een zinvolle prognose hieromtrent te geven, zulks in verband met de mogelijkheid van sterke collectivering van de woningverwarming, zoals ook reeds bij de combitoestellen vermeld.

II.2.5. Kostenaspect

Daar zeker bij de fabricage van nieuwe gasapparatuur de kosten van de aan te brengen verbeteringen over het algemeen spoedig door de verkregen besparingen zullen zijn gecompenseerd, lijkt het opsommen van gedetailleerde financiële consequenties per apparaat weinig zinvol. Volstaan wordt hier met het weergeven van een argument dat in de wereld van de gasapparaten-technici steeds meer aanhangers krijgt.

Daar de meeste 'verbeteringen' op den duur als standaardvoorziening in de diverse apparaten zullen worden ingebouwd, is de prijs niet zo relevant; het is veeleer het energietekort dat de fabrikant zal nopen tot de constructie van apparaten met een optimaal gebruiksrendement. Bovendien ligt het voor de hand dat de keuringseisen zodanig zullen worden aangepast dat de toestellen aan een bepaald minimum gebruiksrendement zullen moeten voldoen. Aangezien dit alles zal gelden voor alle toestellen, zal ten aanzien van de direct op het verbeteren van het gebruiksrendement

betrekking hebbende technische verfijningen geen concurrentiestrijd ontstaan; alle fabrikanten zullen in dezelfde situatie zitten. De gebruiker betaalt uiteraard; op voorwaarde dat hij niet meer betaalt dan nodig, krijgt hij waar voor zijn geld.

II.3. Elektrische huishoudelijke apparatuur

door dr. ir. E.T. Ferguson

II.3.1. Inleiding

Een schatting van besparingsmogelijkheden in deze sector zal moeten worden gebaseerd op gegevens over de verdeling van het verbruik over de diverse apparaten, zowel in 1972 als in 1985. Deze gegevens zijn niet uit de literatuur te verkrijgen. Daarom zijn hiervoor schattingen opgenomen, gebaseerd op eigen ramingen van de gebruiksduur van toestellen en op gegevens ontleend aan [4 — 6]. Tabel 7 geeft de resultaten van deze schattingen.

Het gemiddeld verbruik is de hoeveelheid elektriciteit die het toestel gemiddeld per jaar en over alle bezitters verbruikt. De mate van verbreiding is het aantal toestellen per 100 gezinnen.

Het totaal gemiddeld verbruik is het produkt van het gemiddeld verbruik en de mate van verbreiding.

Veronderstellingen en werkwijzen

De mate van verbreiding voor 1972 is uit metingen door industrie, NIPO, enz. nauwkeurig bekend. De meeste getallen zijn tot op $\pm 5\%$ of vaak zelfs tot op $\pm 2\%$ betrouwbaar en gelden voor 1 januari 1973. Zij zijn gebaseerd op een aantal van $4,155 \times 10^6$ gezinnen. Dit is een hoger getal dan opgegeven in Hoofdstuk 2, Tabel 4, omdat een andere definitie van huishoudingen (V.N.-normen) werd gehanteerd. De mate van verbreiding voor 1985 is gebaseerd op 'ervaren schattingen' van personen die in de industrie marktprognoses maken. Waar meningsverschillen bestonden, werden 'subjectief redelijke' waarden gekozen.

Nadat de beschikbare cijfers waren vergaard en vergeleken, werd op subjectieve gronden een gemiddeld vermogen per toestel geschat. Daar het totale aantal verschillende toestellen dat men in gezinnen kan aantreffen boven de honderd ligt, nog zonder onderscheid te maken naar typen, was een zekere rationalisatie wel vereist. In Tabel 7 zijn radio's, bandrecorders, hi-fi-apparaten, grammofoons, enz. samengevat onder 'geluidsapparatuur'; melkkokers, braadpannen, snelkookpannen, grills, enz. staan samen met elektrisch fornuis en oven onder 'elektrisch koken'. De sluitpost 'overige toestellen' omvat categorieën als tuin-, hobby-, persoonlijke verzorgings- en filmapparatuur.

Het gemiddeld vermogen voor 1985 wordt in beginsel gelijk verondersteld aan dat in 1972, behalve waar bekend is dat:

- technische ontwikkelingen tot hoger of lager verbruik voor dezelfde functie zullen leiden;
 - de markt zal overschakelen op grotere of kleinere modellen;
 - de gebruiksintensiteit zal veranderen.
- Onzekere factoren hierbij zijn de mogelijke toename van

Tabel 7. Verbruik¹⁾ door elektrische apparaten in 1972 en 1985

	Gemiddeld verbruik per toestel per jaar (kWh)		Mate van ver- breiding %		Totaal gemiddeld verbruik per jaar (kWh)	
	1972	1985	1972	1985	1972	1985
Koelkast	450	800	88	110	396	880
Diepvriezer	800	800	17	50	136	400
Afwasmachine	900	900	4	50	36	450
Wasmachine	450	600	85	90	383	540
Droogtrommel	700	600	5	30	35	180
Elektrisch koken	1.300	1.300	6	15	78	195
Warmwater-boiler	1.750	1.750	16	16	280	280
Stofzuiger	60	60	103	110	62	66
Centrale verwarmingspomp	500	500	30	90	150	450
Verlichting	—	—	—	—	700?	1.050?
Televisie	175	175	96	160	168	280
Geluidsapparatuur	—	—	—	—	30	30
Toestellen voor bijverwarming	350?	200?	40?	30?	140?	60?
Overige toestellen	—	—	—	—	90	130
Klimaatregelingsapparatuur	1.300?	1.300?	0	(20?)	0	buiten beschou- wing gelaten
Totaal kWh					2,684	4,991

¹⁾ Onzekere cijfers zijn van een vraagteken voorzien.

het aantal ongebruikte of door tijdgebrek minder gebruikte toestellen en de invloed van de toenemende vrije tijd.

Met de mogelijke invoering van nieuwe soorten toestellen voor nieuwe of bekende functies is geen rekening gehouden.

Controle van de verbruiksschattingen

Volgens opgave van de 'Arnhemse Instellingen van de Elektriciteitsbedrijven' was het gemiddeld elektriciteitsverbruik per huishouding in Nederland in 1972 2.600 kWh [7] (gebaseerd op 3,85 miljoen huishoudingen). Dit stemt redelijk overeen met het in Tabel 7 gegeven cijfer, dat op andere wijze is verkregen. De cijfers kunnen ook worden gecontroleerd aan de hand van de gegevens over de provincie Utrecht, waar het gemiddeld verbruik per huishouding 3.620 kWh/jaar in 1972 was. Vult men in de opstelling van Tabel 7 de in Utrecht geldende maten van verbreidingen van 63% voor warmwaterboilers, 24% voor kooktoestellen en 1% voor geheel elektrische verwarming in (geraamd op ca. 16.000 kWh/jaar), dan ontstaat een verbruik per huishouding van 3.896 kWh/jaar. Dit is in redelijke overeenstemming.

Op basis van Tabel 7 kan worden geraamd dat gezinnen met een elektrisch fornuis en elektrisch verwarmd water ca. 6.500 kWh/jaar zouden verbruiken (tevens rekening houdend met een groter aantal andere apparaten in een dergelijk meer welgesteld gezin). Dit cijfer blijkt echter 8.500 kWh/jaar te zijn [5], hetgeen er op kan wijzen dat het verbruik van een elektrisch fornuis sterk is onderschat of dat in een dergelijk huishouden over het geheel genomen een royaler gebruik van elektrische apparaten wordt gemaakt. Nader onderzoek zou gewenst zijn.

Er dient nog op te worden gewezen dat men meer vertrouwen kan hebben in de onderlinge verhoudingen van de gegeven verbruiksschattingen dan in hun absolute waarden.

Betekenis van de schattingen

De in hoofdstuk 2 (Tabel 10) gegeven prognose van het totale huishoudelijke elektriciteitsverbruik in 1985 is 32,3 TWh. Deelt men dit door de $4,1 \times 10^6$ huishoudingen in 1985, dan ontstaat een gemiddeld

verbruik per huishouding van ca. 7.900 kWh/jaar, wat aanzienlijk hoger is dan het in Tabel 7 gevonden cijfer van 5.000 kWh/jaar. Vermoedelijk is het cijfer van 32,3 TWh, verkregen door extrapolatie van de trend uit het verleden, te hoog¹⁾, mogelijk omdat er niet voldoende rekening mee is gehouden dat de verbreiding van veel toestellen het verzadigingsniveau zal bereiken. Anderzijds loopt de hier gevolgde methode het gevaar dat wel de mogelijke verzadiging van bestaande activiteiten wordt gezien, maar niet het ontstaan van nieuwe activiteiten.

Alvorens de schattingen bruikbaar zouden zijn voor de planning van de elektriciteitsvoorziening is dus nog verdere studie nodig. Het verschil tussen de schatting van Hoofdstuk 2 en die van deze paragraaf ($32,3 - 4,1 \times 10^6 \times 5.000 \times 10^{-9} = 11,8$ TWh) wordt hier gememoreerd omdat het in paragraaf V moet worden verantwoord. Het zou het geschatte Nederlands primair energieverbruik in 1985 met ca. $3 \times 11,8 = 35,4$ TWh (127×10^{15} J) ofwel 3% reduceren.

11.3.2. Mogelijke besparingen in 1985

Inleiding

Voor ieder van de toestellen is, in samenwerking met deskundigen op het terrein van de produktontwikkeling, nagegaan welke wijzigingen aan het toestel dezelfde functie mogelijk maken met een kleiner energieverbruik. Tevens is onderzocht welke aanvullende voorzieningen in het huis nodig zijn. Bij de besparingsschattingen is ervan uitgegaan dat in 1985 alle toestellen van het zuinige type kunnen zijn. De grootste besparingen kunnen dáár worden bereikt waar voor verwarming gebruikte elektriciteit wordt vervangen door aardgas. De besparingen brengen in het algemeen hogere kapitaalkosten (duurdere aanschaf, extra voorzieningen in de woning) met zich mee. Daarom is voor ieder besparingsvoorstel een 'grens-

¹⁾ Inmiddels is door de elektriciteitsbedrijven een nieuwe prognose opgesteld, die leidt tot een jaarlijks verbruik per huishouding van ca. 5.700 kWh in 1985 (in plaats van de genoemde 7.900 kWh), weer op basis van $4,1 \times 10^6$ huishoudingen.

prijs' berekend voor elektrische energie. Deze grensprijs is uiteraard niet meer dan een grove indicatie, gebaseerd op de volgende veronderstellingen, geldend voor 1985:

- jaarlijkse rente en afschrijving op extra kapitaal-kosten (geschat op basis van globale technische gegevens): 20%;
- het gemiddeld energieverbruik per toestel is als aangegeven in Tabel 7;
- de gasprijs is 25% van de elektriciteitsprijs voor gelijke hoeveelheden eindverbruiksenergie (uitgaande van een rendement van 100% voor elektriciteit en van 70% voor gas);
- wanneer meerdere besparingsmethoden tezamen kunnen worden gebruikt, wordt voor elke techniek apart een grensprijs berekend, uitgaande van het ongewijzigde toestel. Bij combinatie van technieken tellen de kosten op, maar de effecten zullen vaak multiplicatief zijn. Daarom zal de gecombineerde grensprijs dikwijls hoger zijn dan het gewogen gemiddelde voor de technieken apart.

Het voordeel (of de kosten) voor de gebruiker bij invoering van het energiebesparende toestel wordt aangegeven door het verschil tussen deze grensprijs en zijn elektriciteitstarief.

Wil de overheid een besparingsmaatregel doorvoeren met een grensprijs boven het geldende elektriciteitstarief, dan worden maatregelen als subsidie, belastingheffing of dwingende voorschriften nodig.

Verwarming van water op basis van elektriciteit of gas
Uitgaande van primaire energie wordt aangenomen dat elektrische verwarming een rendement heeft van 35%¹⁾ en gasverwarming van 70% (apparatuur met hoog gebruiksrendement). Als men bij een verwarmende functie dus van gas in plaats van elektriciteit gebruik maakt, kan 50% op het primair energieverbruik worden bespaard. Op de kosten bespaart men 75%, daar de gasprijs is gesteld op 25% van de elektriciteitsprijs. Er wordt verder van uitgegaan dat vóór 1985 de nu bestaande geysers zijn vervangen en dat nieuwe geysers water van voldoende hoge temperatuur kunnen leveren voor wasmachines. Het installeren van een dergelijke geysers behoeft nauwelijks extra kosten met zich mee te brengen.

Koelkasten

De afmetingen van koelkasten nemen nog steeds toe; 2-deurscombinaties met een verbruik van ca. 900 kWh/jaar vormen reeds een belangrijk deel van de markt. Dit verschijnsel en het meer en meer ingebouwd worden van verwarmingselementen voor automatische ontdooiing zijn oorzaak van het verwachte hogere verbruik in 1985 (Tabel 7).

Er bestaan ook koelkasten waarbij in de koelruimte koude lucht wordt rondgeblazen, welke in een aparte warmtewisselaar wordt gekoeld (het zgn. 'no frost' principe). Deze koelkasten hebben een betere temperatuurbeheersing, echter ten koste van een vrijwel verdubbeld stroomverbruik. In de V.S. en Japan zijn ca. 2/3 van de verkochte koelkasten thans van dit type, in West-Europa komen ze nog nauwelijks voor. Uit een oogpunt van energiebesparing is de invoering ervan ongewenst.

¹⁾ Verondersteld gemiddelde in 1985.

Besparingen zijn vooral te bereiken door dikkere isolatie. De koudeverliezen ontstaan vooral door geleiding; bij normaal gebruik draagt het openen van de deur weinig bij. Het isolatiemateriaal (poly-urethaanschuim) heeft een warmtegeleidingsvermogen dat weinig hoger is dan dat van lucht: hier zijn slechts minimale verbeteringen mogelijk.

Verhoogt men de isolatiedikte (thans ca. 35 mm) met 50%, dan kost dit per koelkast ca. f 25,- extra; het leidt evenwel tevens tot een verkleining van de inhoud met ca. 12% (bij gestandaardiseerde buitenafmetingen). Dit nadeel is moeilijk in geld uit te drukken, maar rekent men de kosten per liter nuttige inhoud, dan zou het een extra investering van f 60,- betekenen. De geleidingsverliezen worden met 1/3 verminderd, de overige verliezen blijven gelijk: besparing ca. 25%.

Grensprijs in 1985: $\frac{20\% \text{ van } f 60,-}{25\% \text{ van } 800 \text{ kWh}} = f 0,06 \text{ per kWh.}$

Andere besparingen zijn mogelijk door verbetering van het rendement van de warmtepomp. Hierover valt zonder nader theoretisch en experimenteel onderzoek weinig te zeggen. Voorts maakt het veel verschil in welke omgevingstemperatuur de koelkast wordt gebruikt en of hij regelmatig wordt 'ontdooit' (het ijs op de koelelementen fungeert als isolator). Nader veldonderzoek moet uitwijzen wat hier kan worden bereikt.

Diepvriezers

Er zijn geen nieuwe principes te verwachten voor 1985. De mate van verbreiding zal toenemen. Het gemiddelde formaat zal zelfs kleiner kunnen worden, naarmate diepvriezers niet alleen op het platteland, maar steeds meer in de stad worden gebruikt, want de kopers in de stad worden meer geleid door overwegingen ten aanzien van de beperkte ruimte. Besparing is ook hier te bereiken met dikkere isolatie: 80 mm i.p.v. 55 mm kost per diepvriezer f 20,- extra.

De energiebesparing is ca. 1/3 van het verbruik. De toename van de wanddikte is geen groot nadeel voor kistmodellen, en het ruimteverlies wordt niet meeberekend.

Grensprijs in 1985: $\frac{20\% \text{ van } f 20,-}{30\% \text{ van } 800 \text{ kWh}} = f 0,02 \text{ per kWh.}$

Aangezien het kosten/baten-optimum ligt bij een nog dikkere isolatie dan 80 mm, lijkt dit een lonende investering voor de consument. Verschillende bij de koelkast gemaakte opmerkingen zijn uiteraard ook op de diepvriezer van toepassing. Bij kastmodellen moet weer de verloren ruimte in rekening worden gebracht.

Afwasmachines

Essentieel nieuwe principes lijken vóór 1985 niet te verwachten. In Tabel 7 is het gemiddeld energieverbruik per toestel over de jaren als constant aangenomen (sommige gezinnen wassen vaker af, maar de afwasmachine komt tevens in meer gezinnen die niet dagelijks erin afwassen). De verbruikstoename ontstaat dan door toenemende mate van verbreiding. Neemt men gas in plaats van elektrische verwarming (aansluiting op een gasgeyser) dan kost dit f 30,- extra voor wijzigingen in de afwasmachine en f 100,- voor extra leidingen. Voor motor en bijverwarming blijft 20% van het vermogen nodig. De besparing is dus 80% van het elektriciteitsverbruik (40% van het primaire energieverbruik).

Grensprijs in 1985: $\frac{20\% \text{ van } f 130,-}{75\% \text{ van } 80\% \text{ van } 900 \text{ kWh}} = f 0,05 \text{ per kWh.}$

Bouwt men een warmtewisselaar en een voorraadvat in, dan kan het instromend water voor de tweede spoelgang worden verwarmd door het afgewerkte eerste sop. Dit maakt de machine zwaarder, volumineuzer en ingewikkelder. De hieraan verbonden extra kosten bedragen f 200,-. De energiebesparing is ca. 50% op het tweede sop, 25% op het totaal.

Grensprijs in 1985: $\frac{20\% \text{ van } f 200,-}{25\% \text{ van } 900 \text{ kWh}} = f 0,18 \text{ per kWh.}$
De thermische isolatie kan een besparing van ca. 10% opleveren; de kosten hiervoor zijn niet bepaald.

Wasmachines

Essentieel nieuwe principes lijken vóór 1985 niet te verwachten. Invoering op grote schaal van de zgn. 'waskast' waarin kleding hangend wordt gewassen, lijkt onwaarschijnlijk. Het is uit oogpunt van energie- en waterverbruik zeer af te raden. De gebruiksfrequentie zal toenemen (meer kledingstukken geschikt voor de gezinswas, vaker wassen), terwijl de gemiddelde gebruikstemperatuur zal afnemen (meer synthetische vezels). De vervanging van oudere apparaten door automatische modellen zal het energieverbruik doen stijgen.

Bij verwarming met gas in plaats van elektriciteit is het wenselijk het warme water uit een gasgeyser te betrekken; wel moet men het wasgoed beschermen tegen te heet water. Dergelijke toestellen zijn in Engeland normaal in de handel verkrijgbaar. Kosten: f 50,- voor de machine; f 100,- voor de extra leidingen. Voor de witte was en het handhaven van een hoge temperatuur is nog elektrisch vermogen nodig; stel de besparing op 70% (35% in primaire energie); in kosten dus $0,75 \times 0,70$.

Grensprijs in 1985: $\frac{20\% \text{ van } f 150,-}{75\% \text{ van } 70\% \text{ van } 600 \text{ kWh}} = f 0,10$
per kWh.

Voor het inbouwen van een warmtewisselaar en een voorraadvat geldt hetzelfde als bij de afwasmachine, maar de besparingen vallen lager uit (15%) omdat de eerste wasgang bij een lagere temperatuur geschiedt.

Grensprijs in 1985: $\frac{20\% \text{ van } f 200,-}{15\% \text{ van } 600 \text{ kWh}} = f 0,45$ per kWh.

Voor het wassen bij lagere temperatuur (bijv. witte was op 60°C in plaats van 95°C) zijn betere wasmiddelen nodig, tenzij men met wat minder 'wit' wasresultaat genoegen neemt. De besparing op energie (elektriciteit of gas) voor zo'n witte was zal dan ca. 35% bedragen.

Thermische isolatie van de kuip kan ca. 10% besparing op het verbruik opleveren; de extra kosten hiervan zijn niet bepaald.

Droogtrommels

Er worden vóór 1985 geen nieuwe principes verwacht. Het energieverbruik per lading zal afnemen (toenemend aandeel synthetische vezels, die minder vocht vasthouden).

Besparing is mogelijk door installatie van een warmtewisselaar tussen binnenkomende en afgewerkte lucht. Meerkosten f 200,-, besparing 67% van het verbruik.

Grensprijs in 1985: $\frac{20\% \text{ van } f 200,-}{67\% \text{ van } 600 \text{ kWh}} = f 0,10$ per kWh.

Gasverwarming levert de gebruikelijke besparingen op, maar vereist hoge investeringen: vaste gasleiding, waakvlam of vonkontsteking, warmtewisselaar, afvoer. Het ligt voor de hand de gas-gas-warmtewisselaar en de eerder genoemde lucht-lucht-warmtewisselaar te combineren. De grensprijs zou zeker hoog liggen.

Koken en warmwatervoorziening op basis van elektriciteit

Zowel het verbruik van primaire energie als de kosten van eindverbruik aan energie zijn bij alle elektrische kookapparatuur altijd hoger dan bij overeenkomstige gasapparatuur. Dit nadeel lijkt niet op te heffen met technische verbeteringen.

Tegen 1985 zullen op bescheiden schaal hoogfrequente ovens zijn ingevoerd voor het verwarmen van voedsel, maar dat is van weinig invloed op het totale energieverbruik.

Elektrische boilers zijn door afkoelingsverliezen ongunstiger in energieverbruik dan geysers. Gasboilers (waarvoor in paragraaf II.2.4. een gebruiksrendement van 37% is aangenomen) verbruiken wellicht iets minder primaire energie dan elektrische boilers, maar zijn niet goedkoper, want voor elektriciteit gelden lagere nachtstroomtarieven. Zoals bekend vindt dit zijn oorzaak in de wenselijkheid van een meer gelijkmatige elektriciteitslevering over een etmaal. Het moet mogelijk zijn hun gebruiksrendement nog te verbeteren.

Collectieve warmwatervoorziening geeft extra warmteverliezen en bovendien, volgens ervaringscijfers, een tot 50% hoger verbruik.

De enige reële besparingsmogelijkheid is deze elektrische toestellen niet te gebruiken, maar te blijven bij koken op gas en bij gasgeysers. Aan elektrische energie wordt dan het in Tabel 7 genoemde verbruik (195 + 280 kWh/jaar) bespaard, aan primaire energie, na aftrek van het vervangende gas, ca. $1,5 \times (195 + 280) \text{ kWh/jaar}$ ($2,6 \times 10^9 \text{ J}$).

Stofzuigers

Een hoog vermogen wordt als verkoopargument gebruikt. Het rendement moet dan laag zijn; anders worden de vloerkleden beschadigd. Het is mogelijk, na onderzoek en ontwikkeling, een stofzuiger met een vermogen van 200 W en optimale zuig eigenschappen te bouwen. Dit hoeft zeker geen meerkosten mee te brengen.

Centrale verwarmingspomp

Daar veelal wordt aangeraden de pomp ook 's zomers te laten lopen, ter voorkoming van aanslibbing in de leidingen, is het jaarverbruik verrassend hoog (zie Tabel 7). Met enige hulpapparatuur zou het mogelijk zijn de pomp 's zomers slechts enkele malen per dag te laten lopen en 's winters op laag vermogen te laten lopen zolang ook weinig stookvermogen nodig is. De kosten voor deze apparatuur zijn niet bepaald; de besparing is wellicht 50% van het verbruik.

Verlichting

Armatuuren voor woonhuizen worden ontworpen op het uiterlijk; efficiënter verlichten is mogelijk door er bij het ontwerp rekening mee te houden. Voorts levert vervanging van gloeilampen door fluorescerende

lampen besparingen op. Het in Tabel 7 geschatte verbruik is erg onzeker; de 50% hogere schatting voor 1985 is arbitrair. Verondersteld wordt dat hierop een derde kan worden bespaard.

Overige categorieën

De grote variëteit van andere apparaten is uit besparingsoogpunt niet zo interessant. Slechts van klimaatregeling kan worden gesteld dat het een zeer groot verbruik zou opleveren indien het op grote schaal wordt ingevoerd, temeer daar het verzadigingspunt hiervan de 400% kan overschrijden (een installatie per kamer!). Gezien het gematigde Nederlandse klimaat lijkt een en ander weinig zinvol.

11.3.3. Discussie

In Tabel 8 zijn de voornaamste besparingen die ook economisch haalbaar zijn, samengevat.

Tabel 8. Belangrijkste besparingen op elektrische apparatuur, per huishouden

	Gemiddeld verbruik in 1985 (kWh)	Besparing in 1985		
		%	Elektriciteit (kWh)	Primaire energie (10 ⁹ J)
Koelkast	880	25	220	2,38
Diepvriezer	400	30	120	1,29
Afwasmachine ¹⁾	450	80	360	1,95 ²⁾
Wasmachine ¹⁾	540	70	378	2,04 ²⁾
Droogtrommel	180	67	120	1,29
Koken, warm water ¹⁾	475	100	475	2,58 ²⁾
Verlichting	1.050 ²⁾	33	350 ²⁾	3,78 ²⁾
Centrale verwarmingspomp	450	50	225	2,43
Stofzuiger	66	50	33	0,36
Totaal			2.281	18,1

¹⁾ Gas in plaats van elektriciteit.

²⁾ 1½ maal het elektriciteitsverbruik.

Bij toepassing van al deze besparingen zou in 1985 het elektriciteitsverbruik in het huishouden nauwelijks hoger zijn dan thans. De besparing aan primaire energie zou $18 \times 10^9 \times 4,1 \times 10^6 = 73,8 \times 10^{15}$ J bedragen (1,8% van het totale primaire energieverbruik in 1985; zie Hoofdstuk 2, Tabel 20).

Omdat de levensduur van vrijwel alle elektrische apparatuur korter is dan 12 jaar, is versneld afdanken van apparatuur niet nodig voor het bereiken van de aangegeven besparingen. Wel moet binnen enkele jaren verbeterde apparatuur in de handel zijn. Uit de verschillende berekende grensprijzen zou men kunnen afleiden dat de overheid, wier medewerking onontbeerlijk lijkt, met stimulering van fabrikanten van apparaten en met voorlichting een belangrijke bijdrage zou kunnen leveren.

De mate waarin deze technische voorstellen worden aanvaard, zal er uiteraard sterk van afhangen in hoeverre onze samenleving een sobere mentaliteit ontwikkelt en het verspillen van energie als onbehoorlijk zal gaan beschouwen.

Besparingen door wijzigingen in het gedragspatroon van de gebruiker

Hoeveel zouden de consumenten kunnen besparen door zuinig te zijn met energie? Wanneer men een strakke

zelfdiscipline beoefent, kan men door het uitdraaien van niet nodige lampen misschien een derde besparen (350 kWh). De consument zou ook afstand kunnen doen van een zeker comfort en geen afwasmachines (450 kWh), droogapparaten (180 kWh) en diepvrieskisten (400 kWh) kunnen gebruiken. Het niet (meer) gebruiken van andere apparaten is in 1985 in Nederland nauwelijks denkbaar. In het allergunstigste geval, dus wanneer alle huishoudingen tot de genoemde bezuinigingen overgaan, zouden de besparingen derhalve 1.380 kWh bedragen, vergeleken met een besparing van 2.281 kWh door technische verbeteringen. Als de technische voorstellen eerst worden uitgevoerd, zou een soberder levenswijze slechts $230 + 90 + 60 + 280 = 660$ kWh aan extra besparingen opleveren. Aangezien veranderingen in gewoonten en het afstand doen van een zeker comfort moeilijk in te voeren zijn (zie Hoofdstuk 8), concluderen we dat het aansporen van de mensen tot een zuinig energieverbruik in huis tot slechts een geringe besparing van elektriciteit zal leiden.

Besparingen op middellange termijn

Tabel 9 geeft ramingen van de verbruiksverhoudingen op middellange termijn voor verschillende soorten huishoudingen.

Tabel 9. Hypothetische verbruikspatronen van elektriciteit in de huishouding in de toekomst

	Besparend huishouden (kWh/jaar)	Gewoon huishouden (kWh/jaar)	Elektrisch huishouden (kWh/jaar)
Koelkast	660	880	880
Diepvriezer	560	800	800
Afwasmachine	180	900	900
Wasmachine	180	600	600
Droogtrommel	200	600	600
Koken	—	—	1.300
Warm water	—	—	1.750
Verlichting	700	1.050	1.050
Centrale verwarmingspomp	250	500	500
Overige apparatuur	370	400	400
Klimaatregeling	—	—	p.m. ²⁾
Elektrische verwarming	—	—	p.m. ²⁾
Totaal	3.100 ¹⁾	5.730	8.780
% van 1972	ca. 115	ca. 210	ca. 330

¹⁾ Exclusief extra gasverbruik ter vervanging van 1.150 kWh elektriciteit.

²⁾ Klimaatregeling en elektrische verwarming zouden het totale verbruik verveelvoudigen.

Het 'gewone' huishouden gebruikt gas voor het koken en de warmwatervoorziening en beschikt verder over alle apparaten van het thans gebruikelijke type. Het 'zuinige' huishouden gebruikt apparaten van het energiebesparende type. Het 'elektrische' huishouden gebruikt elektriciteit voor het koken en de warmwatervoorziening, maar verschilt verder niet van het gewone huishouden. Het betreft hier uiteraard globale schattingen.

III. Energieverbruik in andere gebouwen

III.1. Inleiding

In deze sectie zullen indicaties worden gegeven over aard en omvang van mogelijke besparingen op energieverbruik in utiliteitsgebouwen (zie par. I voor een omschrijving hiervan).

Twee aspecten worden in hun samenhang bezien:

- het brandstofverbruik in de verwarmingsinstallatie (ten behoeve van verwarming en klimaatregeling);
- het verbruik van elektriciteit (ten behoeve van ventilatie, koeling en verlichting).

In tegenstelling tot de situatie voor woningen is klimaatregeling voor utiliteitsgebouwen dikwijls een noodzaak: vooral grote gebouwen kunnen anders een zeer onaangenaam leefklimaat vertonen. Daarom wordt er hier *wel* aandacht aan besteed. Indien klimaatregeling wordt toegepast in een gebouw, leidt dit tot een extra elektriciteitsverbruik dat, omgerekend in primaire energie, van dezelfde orde van grootte is als het verbruik voor verwarmingsdoeleinden (vergelijk Tabellen 11 en 12). De vraag in hoeverre de toepassing van klimaatregeling noodzakelijk is, wordt in deze sectie buiten beschouwing gelaten. Een nadere studie van de overwegingen waarop een beslissing tot installatie van klimaatregeling wordt gebaseerd, lijkt echter zinvol.

De besparingsmogelijkheden vallen uiteen in twee hoofdgroepen, nl. installatietechnische en bouwkundige maatregelen. De eerste vergen gewoonlijk extra investeringen, de tweede dikwijls niet of nauwelijks; deze kunnen zelfs tot lagere investeringen leiden.

In het algemeen is bij het ontwerpen van nieuwe gebouwen de mogelijkheid aanwezig om te komen tot een geïntegreerd ontwerp van het gebouw, het verwarmings-, het klimaatregelings- en zelfs het verlichtingssysteem.¹⁾ In principe leidt dit tot een aanzienlijk efficiënter gebruik van energie. Uiteraard is praktische ervaring van groot belang bij dergelijke gecompliceerde ontwerpen, alvorens men schattingen zou kunnen doen ten aanzien van bereikbare besparingen.

Voor de berekeningen en analyses in deze sectie is steeds een 'referentiegebouw' gebruikt met de volgende gegevens (Tabel 10).

Tabel 10. Het referentie-kantoorgebouw

Bouwwolume (10^3 m^3)	100
Lengte (m)	80
Breedte (m)	25
Hoogte (m)	50
Bruto vloeroppervlak (10^3 m^2)	30
Netto vloeroppervlak (10^3 m^2)	20
Glasaandeel (% van buitenwand)	60
k-waarde buitenwand ($\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)	1,75
Verlichtingsniveau (lux)	800
Bezetting (personen)	2.000

¹⁾ Zie ook de Vakantie-Leergang voor Warmtetechniek 1972 (Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Den Haag).

Aan de hand van gegevens over bestaande utiliteitsbouw en te verwachten bouwactiviteiten en met het referentiegebouw als uitgangspunt zal een raming van de mogelijke energiebesparingen worden gegeven. Op deze wijze is het, ondanks het veelal ontbreken van betrouwbare en voldoende gedetailleerde cijfers en verwachtingen omtrent energieverbruik in utiliteitsgebouwen (zie Hoofdstuk 2, paragraaf III.4.3.), toch mogelijk een behoorlijk inzicht in de te verwezenlijken besparingen te krijgen.

III.2. De besparingsmogelijkheden

III.2.1. Bouwkundige maatregelen

Hier staan de mogelijkheden van verhoogde isolatie van het gebouw voorop, zowel met betrekking tot warmteverlies in de winter als warmtetoever in de zomer. Dit laatste voorzover klimaatregeling aanwezig is. Tabel 11 geeft een beeld van de warmtebehoefte van het referentiegebouw in de winter, afhankelijk van toegepaste isolatiewaarde en glasaandeel.

Tabel 11. Warmtebehoefte in de winter, afhankelijk van k-waarde en glasaandeel (referentiegebouw)

	Directe verwarming	Warmtebehoefte (10^{12} J)		
		Verwarming van ventilatielucht	Totaal	%
$k = 1,75 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$				
- glasaandeel 60%	9,1	9,5	18,6	100
- glasaandeel 30%	6,6	6,8	13,4	72
$k = 0,58 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$				
- glasaandeel 60%	7,5	9,5	17,0	91
- glasaandeel 30%	4,0	6,8	10,8	58

Er is bij de berekeningen in Tabel 11 en 12 van uitgegaan dat dubbele ramen worden toegepast ($k = 3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$). Hoewel dit op zichzelf een besparing betekent ten opzichte van enkele ramen ($k = 6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) is er in deze studie van uitgegaan dat toepassing van dubbele ramen reeds tot de normale praktijk behoort. Bezie men het energieverbruik ten behoeve van koeling, dan blijkt dit behalve van k-waarde en glasaandeel ook afhankelijk te zijn van het zonweringsstelsel (Tabel 12).

Tabel 12. Energieverbruik voor koeling (referentiegebouw)

	Elektriciteitsbehoefte		
	10^{12} J	(MWh)	%
$k = 1,75 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; glasaandeel 60%			
- binnenzonwering	6,6	(1840)	100
- reflectieglas	5,0	(1400)	76
- buitenzonwering	5,2	(1450)	79
$k = 1,75 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; glasaandeel 30%			
- binnenzonwering	5,6	(1560)	85
- reflectieglas	5,4	(1490)	81
- buitenzonwering	5,1	(1415)	77
$k = 0,58 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; glasaandeel 60%			
- binnenzonwering	6,6	(1840)	100
- reflectieglas	5,0	(1400)	76
- buitenzonwering	5,4	(1490)	81
$k = 0,58 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; glasaandeel 30%			
- binnenzonwering	5,8	(1600)	87
- reflectieglas	5,2	(1450)	79
- buitenzonwering	5,3	(1470)	80

De aandacht wordt erop gevestigd dat als gevolg van de complexiteit van het gestelde probleem het niet mogelijk is een eenvoudige uitleg te geven van de wijze waarop de cijferreeksen in Tabel 11 en 12 werden berekend.

Aangenomen wordt dat door isolatieverbetering 15% op de behoefte voor directe verwarming kan worden bespaard, en voorts dat in geval van gebouwen met klimaatregeling 21% op de elektriciteitsbehoefte voor koeling kan worden bespaard door verbeterde zonwering.

Een andere besparingsmogelijkheid is gelegen in de keuze van de gebouwvorm. Een gebouw met ronde omtrek heeft een minimum geveleppervlak (waardoor de verliezen optreden) per eenheid vloeroppervlak. Bij een rechthoekig gebouw wordt deze verhouding ongunstiger naarmate het meer van de vierkante vorm afwijkt. Daar staat echter tegenover, dat bij vermindering van de hoeveelheid geveleppervlak per eenheid vloeroppervlak ook meer ruimte niet meer aan de buitenkant grenst. Dit betekent dat meer elektrische verlichting nodig is, met als gevolg additionele warmtetoevoer. Dit laatste kan het effect van de verminderde warmtetoevoer in de zomer door het kleinere geveleppervlak zelfs overtreffen. Afzuiging van de warmte aan de verlichtingsarmaturen, zodat zij niet in het vertrek treedt maar verdwijnt via het ventilatiesysteem, brengt hierin verbetering (Tabel 13).

Tabel 13. Relatief brandstofverbruik voor klimaatregeling, afhankelijk van gebouwvorm en afzuiging verlichtingswarmte (referentiegebouw)

	Brandstofverbruik ¹⁾ (%)
Gebouw 80 X 25 m	
– normale armaturen	100
– afgezogen armaturen	87
Gebouw 45 X 45 m	
– normale armaturen	107
– afgezogen armaturen	78

¹⁾ Over het hele jaar gerekend.

De in Tabel 13 vermelde cijfers doen vermoeden dat het zin heeft te streven naar mindering van via het verlichtingssysteem in een ruimte ingebrachte warmte. Vervanging van de veelal toegepaste uniforme plafondverlichting door een systeem met algemene verlichting van laag niveau (400 lux) aangevuld met lampen ter plaatse van het werkvlak kan ca. 30% besparen op het elektriciteitsverbruik voor verlichting. De hieruit voortvloeiende geringere koelbelasting vermindert het verbruik voor koeling met ca. 5%. Wat de in Tabel 13 geschetste situatie betreft, wordt dit voordeel teniet gedaan door het feit dat om praktische redenen afzuiging van de warmte van de werkverlichting niet mogelijk is. Wat wel overblijft is de besparing op het verbruik voor verlichting; dit is ca. 15% van het elektriciteitsverbruik van het referentie-kantoorgebouw.

III.2.2. Installatietechnische maatregelen

Deze maatregelen zijn bij de huidige verhoudingen in brandstofkosten en investeringskosten (midden 1973) slechts bij uitzondering rendabel, ondanks de vaak

aanzienlijke besparingen op brandstofverbruik die er mee kunnen worden verkregen. Verdere ontwikkelingen zullen dus moeten worden afgewacht vooraleer van deze maatregelen werkelijk effect kan worden verwacht. De voornaamste mogelijkheden worden hieronder behandeld.

Warmteterugwinning uit ventilatiesystemen

Ventilatiesystemen in gebouwen worden ontworpen voor het afzuigen van geconditioneerde lucht en het vervangen hiervan door buitenlucht (soms tot 100%), die weer op de gewenste temperatuur en vochtigheidsgraad moet worden gebracht. Dit proces gaat met veel verlies van energie gepaard. Dit verlies kan worden verminderd door de energie voor het conditioneren (dit is het verwarmen, koelen en bevochtigen) van de ventilatielucht zoveel mogelijk binnen het systeem te bewaren bij het voortgaande proces van luchtverversing.

Voor een dergelijk doel zijn reeds een aantal technieken ontwikkeld, zoals de roterende regeneratieve warmtewisselaar ('heat wheel'), het 'run around'-systeem en de 'heat pipe'. Met deze systemen kunnen brandstofbesparingen van ca. 40% op de totale behoefte voor verwarming, bevochtiging en koeling van een gebouw worden bereikt.¹⁾ Aangenomen wordt dat op de warmtebehoefte voor ventilatie 70% kan worden bespaard (zie ook Tabel 11).

Warmtepomp

Daar het rendement van een warmtepomp daalt bij toenemend temperatuurverschil tussen warmtebron en verwarmingsmedium, dient dit temperatuurverschil bij voorkeur niet groter dan 50°C te zijn. Met een warmtebron van 15°C kan men bijvoorbeeld verwarmingswater van 50°C verkrijgen, geschikt voor vloeren- en plafondverwarming, luchtverwarming en voorziening met warm water. In een dergelijke situatie kan het traditionele radiatorsysteem in een gebouw vervallen.

Bij een verdampingstemperatuur van 10°C (bron van 15°C) en een condensortemperatuur van 55°C (verwarmingsmedium 50°C) ligt het omzettingsrendement op $16,2 \times 10^6 \text{ J}$ aan warmte per kWh aan elektrische energie of per $3 \times 3,6 = 10,8 \times 10^6 \text{ J}$ primaire energie. Zou men deze warmte verkrijgen langs conventionele weg, dan is (bij een verondersteld rendement

van 75%) $\frac{16,2}{0,75} = 21,6 \times 10^6 \text{ J}$ aan primaire energie

nodig. De besparing door toepassing van de warmtepomp zou dus zijn:

$$\frac{21,6 - 3 \times 3,6}{21,6} \times 100\% = 50\% \text{ van de primaire energie.}$$

De werkgroep heeft enkele toepassingsmogelijkheden van de warmtepomp nauwkeuriger bezien. Voorlopig moet de conclusie luiden dat exploitatiekosten en afschrijving tezamen voor deze toepassingen aanzienlijk hoger liggen dan voor traditionele oplossingen. Bovendien zijn deze kostenverhoudingen relatief

¹⁾ Op te merken valt dat hergebruik (recycling of terugvoering) van de lucht bij klimaatregeling tevens een waterbesparing inhoudt. Dit punt zal in de toekomst (nog) belangrijker worden.

ongevoelig voor stijging van de energieprijzen. Zo bleek dat eerst bij een verviervoudiging van de gasprijs in combinatie met een verdubbeling van de elektriciteitsprijs voor de gebruiker (t.o.v. het niveau van 1 januari 1974 en bij gelijkblijvende overige kosten) een economisch evenwicht tussen baten en lasten voor de consument zou worden bereikt. Verbetering van deze situatie zou moeten worden gezocht in de richting van het aanzienlijk verder opvoeren van het praktische rendement van de warmtepomp [8]. Bij deze berekeningen is uitgegaan van een gebouw zonder klimaatregeling. Is deze wel aanwezig, dan wordt het beeld gunstiger.

Kracht/warmtesystemen

Voor de behandeling van deze systemen wordt verwezen naar Hoofdstuk 4, waar zowel toepassing in de industrie, in de stadsverwarming, in utiliteitsgebouwen en in de tuinbouw aan de orde komen. Hier zij slechts opgemerkt dat toepassing van kracht/warmtesystemen in utiliteitsgebouwen onder de huidige omstandigheden alleen in bepaalde bijzondere gevallen interessant is. Men moet hierbij vooral denken aan gebouwen waarbinnen continu bedrijf plaatsvindt, zoals ziekenhuizen, computercentra, enz.

III.2.3. Maatregelen van 'huishoudelijke' aard

Lagere afstelling van de thermostaat des nachts en/of in de weekeinden

Wanneer ervan wordt uitgegaan dat

- de normale binnentemperatuur 22°C is;
- de verlaagde binnentemperatuur 18°C is;
- het gebouw niet van een bijzonder zware constructie is;

dan kan de warmtebehoefte met 20 à 25% afnemen indien de thermostaat des nachts en in de weekeinden lager wordt afgesteld en met 10 à 15%, indien dit alleen in de weekeinden wordt gedaan.

Of het mogelijk is, de thermostaat des nachts lager af te stellen, wordt onder meer bepaald door de geïnstalleerde verwarmingscapaciteit. Bij het weer op temperatuur brengen van het gebouw wordt gewoonlijk gedurende enige tijd het volle vermogen van de installatie gevraagd.

Ten behoeve van de gewenste ramingen (zie Tabel 16) is aangenomen dat 23% op de behoefte voor directe verwarming kan worden bespaard door de thermostaat des nachts en in de weekeinden lager af te stellen.

Tabel 15. Verdeling bouwvolume per sector over centrale verwarming (c.v.), c.v. + ventilatie en klimaatregeling

	Centrale verwarming		Bouwvolume in 10 ⁶ m ³		Klimaatregeling	
	1975	1976 t/m 1985	Centrale verwarming + Ventilatie		1975	1976 t/m 1985
			1975	1976 t/m 1985		
Nijverheid	190	100	40	55	5	10
Handel en verkeer	190	100	35	50	10	15
Onderwijs	110	80	15	10	15	10
Gezondheidszorg	55	20	35	40	5	5
Overheid	35	20	8	10	2	5
Overige	170	115	20	15	—	—
	<u>750</u>	<u>435</u>	<u>153</u>	<u>180</u>	<u>37</u>	<u>45</u>
Totalen voor het te verwachten bouwvolume in de periode 1985 t/m 2000:						
- centrale verwarming	: 556 X 10 ⁶ m ³					
- centrale verwarming + ventilatie	: 380 X 10 ⁶ m ³					
- klimaatregeling	: 65 X 10 ⁶ m ³					

III.3. Mogelijke besparingen

Op basis van gepubliceerde gegevens en verwachtingen [9, 10] kan een raming van bestaand en te verwachten bouwvolume en een globale verdeling over sectoren worden gemaakt (zie Tabel 14).

Tabel 14. Bestaand en te verwachten bouwvolume en verdeling over de verschillende sectoren

Bouwvolume	10 ⁶ m ³
- Bestaand in 1975	940
- Toevoeging 1976 t/m 1985	660
- Toevoeging 1986 t/m 2000	1.000
Verdeling over sectoren	%
- Nijverheid	ca. 25
- Handel en verkeer	ca. 25
- Onderwijs	ca. 15
- Gezondheidszorg	ca. 10
- Overheid	ca. 5
- Overige	ca. 20

In Tabel 15 is een nadere verdeling van het bouwvolume per sector geraamd over centrale verwarmingsinstallaties (c.v.), c.v. plus ventilatie en klimaatregeling.

Bestaande gebouwen

Lang niet alle genoemde maatregelen kunnen worden toegepast in bestaande gebouwen (dit zijn alle gebouwen die voor 1976 zijn gereed gekomen). Tabel 16 geeft een overzicht van de mogelijkheden.

Op basis van de cijfers van de Tabellen 14, 15 en 16 laten de totale besparingen aan warmte- en elektriciteitsbehoefte zich voor 1985 begroten op 13,2 X 10¹⁵ J. Het aandeel van de elektriciteitsbesparing hierin is echter klein (ca. 0,1 TWh). Veronderstelt men dat de besparing geheel op gasverbruik wordt gerealiseerd en gaat men uit van een nuttig rendement van deze grotere apparatuur van 75%, dan ontstaat een besparing aan primaire energie van 4/3 X 13,2 = 17,6 X 10¹⁵ J (0,45% van het nationaal verbruik in 1985).

Toekomstige gebouwen

Alle in paragraaf III.2. genoemde maatregelen zijn mogelijk bij nieuwe ontwerpen, zij het in uiteenlopende mate (zie Tabel 17).

Voor het in de periode 1976-1985 te realiseren bouwvolume is een schatting gemaakt van de

Tabel 16. Besparingsmogelijkheden voor bestaande gebouwen¹⁾ (gebouwd vóór 1976)

Installatie	Maatregel	Toepassingsmogelijkheid ²⁾ in % van het bouwvolume			Besparing in 10 ¹⁵ J per 10 ⁵ m ³ ³⁾ ⁴⁾
		a	b	c	
Centrale verwarming	Verbetering isolatie. Verhoging van de temperatuur des nachts en in de week-einden	20	20	60	0,15 X 9,1
		60	20	20	0,23 X 9,1
Centrale verwarming + ventilatie	Warmteregereneratie en vochtuitwisseling	0	80	20	0,70 X 9,5
	Verbetering isolatie	40	20	40	0,15 X 9,1
	Verhoging van de temperatuur des nachts en in de week-einden	60	20	20	0,23 X 9,1
Klimaatregeling	Verbetering isolatie	60	20	20	0,15 X 9,1
	Verbetering zonwering	10	30	60	0,21 X 6,6

¹⁾ Hierbij wordt uitgegaan van de cijfers voor het 100.000 m³ grote referentiegebouw.

²⁾ a = maatregel reeds toegepast, c.q. gepland;

b = maatregel niet toepasbaar

c = maatregel wel toepasbaar.

³⁾ Voor deze percentages zie de voorgaande bespreking ter zake.

⁴⁾ Zie de Tabellen 11 en 12.

Tabel 17. Mate van toepasbaarheid van diverse besparingsmaatregelen voor het in 1976 t/m 1985 te realiseren bouwvolume

Installatie	Maatregel	Toepassingsmogelijkheden ¹⁾ in % van het bouwvolume		
		a	b	c
Centrale verwarming	Bouwkundig	50	10	40
	Installatietechnisch	20	70	10
Centrale verwarming + ventilatie	als boven	60	10	30
	als boven	20	70	10
Klimaatregeling	als boven	70	10	20
	als boven	20	70	10

¹⁾ a = maatregel reeds voorzien; b = maatregel niet toepasbaar; c = maatregel wel toepasbaar. } Een en ander op basis van in 1973 geldende kostenverhoudingen.

mogelijke besparingen. Alle in paragraaf III.2.1. genoemde bouwkundige maatregelen, alsook verlaging van de temperatuur des nachts en in de week-einden zijn daarbij toepasbaar geacht.

De berekeningen zijn verder analoog aan die voor de bestaande bouwwerken. Daar zij wel aanzienlijk ingewikkelder zijn, is van expliciete weergave afgezien.

Het resultaat is een besparing op de totale warmtebehoefte van 10,1 X 10¹⁵ J en op de totale elektriciteitsbehoefte van 1,3 TWh (4,7 X 10¹⁵ J). Hieruit blijkt dat de besparing op elektriciteit bij deze nog te realiseren gebouwen een veel belangrijker rol speelt dan bij de bestaande gebouwen.

Een en ander leidt tot een besparing op het verbruik van primaire energie van 4/3 X 10,1 + 3 X 4,7 = 27,6 X

10¹⁵ J (of 0,65% van het nationaal verbruik in 1985).

De besparingsmogelijkheden op middellange termijn kunnen aanzienlijk groter zijn dan het voor 1985 voorziene niveau van 1,1% van het Nederlands energieverbruik. Men mag verwachten dat de genoemde energiebesparende maatregelen meer en meer tot het normale ontwerp gaan behoren, terwijl bij verdere ontwikkeling profijt kan worden verwacht van toepassing van regenererende ventilatiesystemen, van warmtekrachtsystemen en wellicht van warmtepompen. Besparing op elektriciteit gaat dan ook relatief een steeds belangrijker rol spelen. Een redelijke verwachting van het niveau van besparing op primaire energie in 2000 zou 70 tot 100 X 10¹⁵ J kunnen zijn, mede gezien het aanzienlijke bouwvolume dat, althans volgens [10], tussen 1986 en 2000 nog zal worden gerealiseerd.

IV. Niet-conventionele verwarmingsmogelijkheden (zonnestraling)

IV.1. Inleiding

Zoals in het voorgaande is aangetoond, kan door het nemen van een aantal maatregelen, zoals het thermisch isoleren van woningen en gebouwen en het verbeteren van verwarmingssystemen en -apparaten belangrijk worden bespaard op het energieverbruik. Maar dan blijft er nog altijd het probleem op lange termijn, dat er een energiebron moet worden gevonden die aardolie of aardgas kan vervangen. Dient voor verwarmingsdoeleinden geheel te worden overgeschakeld op elektriciteit uit kernenergie of zijn er daarnaast andere mogelijkheden?

Voorzover thans kan worden overzien, valt aan een drietal andere mogelijkheden te denken:

- wijk- of stadsverwarming op basis van de overtollige warmte van elektrische centrales (zie Hoofdstuk 4);
- het benutten van de warmtevoorraad in de bodem, met tussenschakeling van een warmtepomp om het vereiste temperatuurniveau te bereiken;
- het benutten van zonne-energie (zie Hoofdstuk 1).

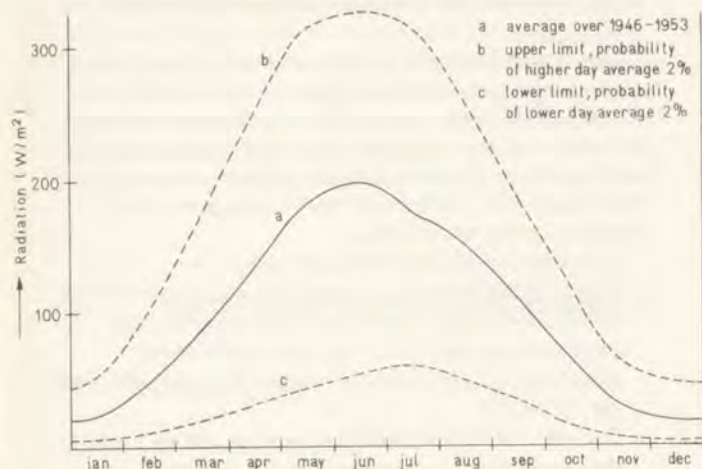
Voor het beoordelen van de tweede mogelijkheid zouden meer onderzoeksgegevens ter beschikking moeten komen (zie paragraaf III.2.2. van dit hoofdstuk). Naar verluidt zou aan een grondoppervlak van 200 à 300 m² voldoende warmte kunnen worden onttrokken voor een thermisch goed geïsoleerde woning [11]. Wanneer dit juist is dan verdient het systeem zeker nadere bestudering.

De derde mogelijkheid, het gebruik van zonne-energie, zal hier wat uitvoeriger worden behandeld, met het doel een duidelijker beeld te verkrijgen van de perspectieven die zij onder Nederlandse omstandigheden biedt. Er zal daarbij uitsluitend worden gesproken over het opvangen en voor verwarming gebruiken van zonnestralingenergie. Het omzetten van zonne-energie in elektriciteit en het gebruik maken op grote schaal van

de fotosynthese zal nog zeer veel fundamenteel onderzoek vereisen.

IV. 2. Het opvangen van de zonnestraling

Door de noordelijke ligging van ons land, en de hoge bewolgingsgraad in de winter (85%) vertoont de gemiddelde stralingsintensiteit zeer grote verschillen in de loop van het jaar. In Figuur 6 is het verloop grafisch uitgezet. De stralingsintensiteit is per etmaal gemiddeld. De wisselvalligheid van het weer is in de figuur tot uiting gebracht door ook de boven- en ondergrens (elk met een overschrijdingskans van ca. 2%) aan te geven.



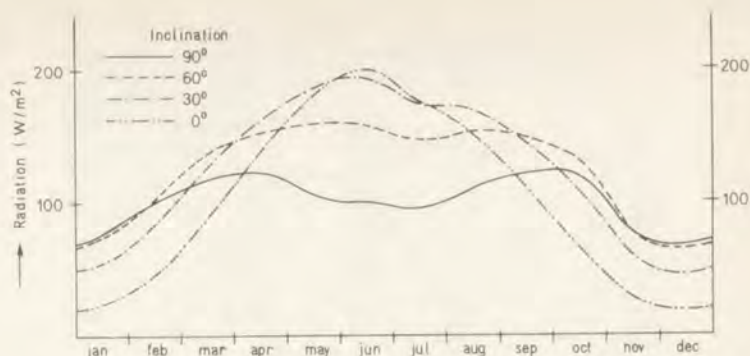
Figuur 6. Verloop over het jaar van het daggemiddelde van de totale zonnestraling op een horizontaal vlak (Wageningen) [12].

De krommen van Figuur 6 betreffen de straling op een horizontaal vlak. Rekening houdend met het feit dat de straling bij heldere zonneschijn hoofdzakelijk uit de richting van de zon komt en tijdens bewolking hoofdzakelijk diffuus is, kan uit Figuur 6 en uit gegevens over gemiddelde aantallen uren zonneschijn een schatting worden gemaakt van de intensiteit van de straling op een naar het zuiden hellend oppervlak. Deze omrekening is nodig omdat collectoren die de zonne-energie moeten opvangen in die stand het meest effectief zijn.

Figuur 7 geeft het resultaat van de omrekening; beoordeeld naar de stralingsintensiteit in de wintermaanden blijkt een helling van omstreeks 60° het meest aantrekkelijk te zijn. Het is echter denkbaar dat om esthetische redenen aan een kleinere helling de voorkeur moet worden gegeven. De verdere berekeningen zijn daarom voor twee hellingshoeken, 30° en 60° , uitgevoerd.

In de gebruikelijke uitvoering lijken de collectoren op platte broeikassen, met op de bodem een zwart of donkergroen geverfde plaat die de zonnestraling absorbeert, en aan de bovenzijde een of meer glasplaten om het warmteverlies van de collector naar de omgeving te beperken.

Een door de collector stromend koelmedium voert de geabsorbeerde energie af naar het gebruikspunt en, als er een overschot is, naar de opslag. Als koelmedium kunnen zowel water als lucht worden gebruikt; de opslag kan geschieden in water, grof grind of zouten met een smeltpunt tussen 30° en 60°C . Onder gunstige



Figuur 7. Daggemiddelden van de totale zonnestraling op een naar het zuiden hellend oppervlak (schatting).

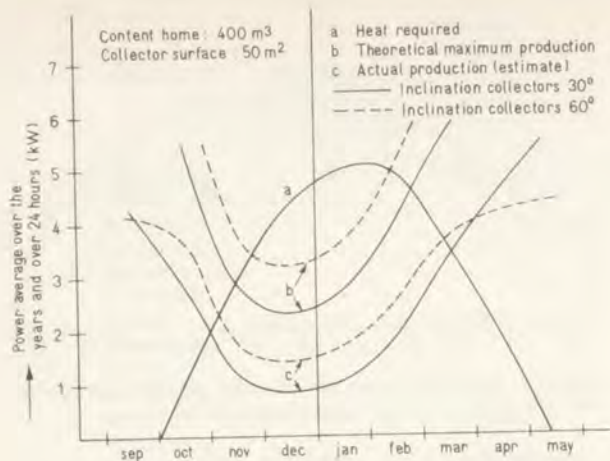
omstandigheden, dat wil zeggen een hoge stralingsintensiteit en weinig wind, kan het rendement van de collectoren meer dan 70% bedragen.

IV.3. Toepassing in een doorsnee woning

Uitgegaan wordt van een woning met een inhoud van 400 m^3 , gebouwd in een rij. Op het dak van een dergelijke woning kan tot ca. 50 m^2 collectoroppervlak worden aangebracht. Plaatsing van een groter collectoroppervlak per woning is denkbaar, bijv. door aanpassing van de architectuur en door het benutten van de zuidgevel, maar het is onzeker hoever men hiermee in de praktijk kan gaan. Voorzichtigheidshalve is daarom bij het schatten van de invloed op het Nederlands energieverbruik van deze toepassing van zonne-energie uitgegaan van 50 m^2 collectoroppervlak per woning. De krommen (b) in Figuur 8 geven aan hoeveel energie in de wintermaanden bruto kan worden opgevangen. Kromme (a) illustreert de gemiddelde warmtebehoefte van de woning van 400 m^3 : hierbij is uitgegaan van zeer goede isolering (Zweedse normen) en van 60% warmteterugwinning uit de afgewerkte ventilatie-lucht.

De netto warmteproductie (kromme (c)) wordt bepaald door het rendement van de collectoren. In het algemeen is dit aanzienlijk minder dan de eerder genoemde 70%. Dit vindt vooral zijn oorzaak in het feit dat bij het toepassen van warmteterugwinning slechts weinig profijt kan worden getrokken van straling van geringe intensiteit, zoals die in de winter vaak voorkomt. De bijbehorende (beperkte) opwarming van de koellucht en de warmteterugwinning overlappen elkaar namelijk grotendeels met betrekking tot het opwarmen van de verse ventilatielucht [13].

Behalve voor verwarming van eengezinswoningen in een rij kan zonne-energie ook dienen voor verwarming van meergezinshuizen (flats) en utiliteitsgebouwen. Van deze laatste twee categorieën kan worden gesteld dat doorgaans minder buitenoppervlak per eenheid van inhoud beschikbaar is en dus minder ruimte voor collectoren, maar ook minder warmteverlies per eenheid van inhoud. Bij vrijstaande woningen liggen de verhoudingen in het algemeen juist omgekeerd. De mogelijkheden (ook voor plaatsing van meer collectoroppervlak) zullen van geval tot geval verschillen. Slechts een compleet ontwerp kan deze aantonen. Niet vergeten mag worden dat zonne-energie ook thans reeds bijdraagt aan de verwarming van huizen en gebouwen; afhankelijk van o.a. de ligging en het glas-



Figuur 8. Mogelijkheden voor verwarming met zonne-energie van een thermisch goed geïsoleerde woning (schatting).

oppervlak kan de zonnestraling gedurende het stookseizoen de binnentemperatuur gemiddeld één tot enkele graden Celsius verhogen.

IV.4. Financiële aspecten

Bij verdere uitwerking van de gegevens van Figuur 8 blijkt dat, afhankelijk van de helling van de collectoren, 50 tot 60% van de energiebehoefte van de doorsnee woning met zonne-energie kan worden gedekt, gerekend over het stookseizoen. Van april t/m oktober is uiteraard een voldoende groot warmte-overschot aanwezig om in de warmwaterbehoefte te voorzien.

Er zij hier nogmaals op gewezen dat de genoemde 50 à 60% is gebaseerd op de veronderstelling dat gemiddeld 50 m² collectoroppervlak per woning aanwezig is. Met een groter collectoroppervlak kan uiteraard een hoger percentage worden bereikt, maar de verbetering is niet recht evenredig, want ook de aard van de opslag speelt hierbij een rol. Opslag over een half jaar zou het warmteoverschot in de zomer geheel ter beschikking brengen van de winterperiode. Het genoemde collectoroppervlak van 50 m² zou dan ruim voldoende zijn. Bij een opslag voor enkele dagen daarentegen is zelfs het grootst denkbare oppervlak nog onvoldoende omdat zonne-arme perioden van vele dagen in Nederland geen uitzondering zijn. Nadere studie op dit punt is vereist.

Mede gelet op verschillende gegevens uit de VS [14] moet de minimale prijs van de collectoren op f 50,-/m² worden gesteld; voor 50 m² dus op f 2500,-. Daarbij komen nog kosten voor de extra voorzieningen voor de warmteopslag, de regulering van het systeem, en het transport van de warmte uit de collectoren naar de opslag.

Hiertegenover staat de besparing door het vervallen van de centrale verwarmingsketel, aangezien door de beschikbaarheid van een warmteopslag kan worden volstaan met een gasboiler voor het bijstoken. Het lijkt aannemelijk dat deze besparing de kosten voor de extra voorzieningen althans voor een belangrijk deel kan compenseren, zodat de kosten van de collectoren de doorslaggevende factor vormen.

Bij een aardgasprijs van f 0,25/m³ (excl. vastrecht en BTW), ongeacht de inflatie, vertegenwoordigt de gewonnen energie een besparing van f 370,- per jaar

(op basis van het gasverbruik van een goed geïsoleerde woning: 2.400 m³ aardgas/jaar voor verwarming; 280 m³/jaar voor waterverwarming). Hiervoor kan wellicht een bedrag tot f 3000,- extra worden geïnvesteerd.

Er kan dus worden geconcludeerd dat het gebruik van zonnewarmte voor huisverwarming en warmwatervoorziening onder Nederlandse omstandigheden vermoedelijk economisch aantrekkelijk gaat worden als de prijs van het aardgas van f 0,11/m³ (1 januari 1974) tot f 0,25/m³ is gestegen bij overigens gelijkblijvende kosten. Dit tijdstip lijkt niet meer zo ver weg.

IV.5. Invloed op het Nederlands energieverbruik

Gezien het voorgaande en indien thans een begin wordt gemaakt met het onderzoek- en ontwikkelingswerk dat nodig is ten behoeve van het gebruik van zonne-energie in Nederland, zou mogelijk rond 1985 een begin van marktpenetratie kunnen worden waargenomen. Voor de periode 1985-2000 wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- Nieuwbouw: 80.000 woningen per jaar.
- Sloop: 40.000 woningen per jaar (zonder centrale verwarming, slecht geïsoleerd); alsmede 40.000 woningen per jaar (met c.v., matig geïsoleerd), afkomstig uit de groep die tussen 1972 en 1985 werd gerenoveerd.
- Per saldo dus geen groei meer van het totaal aantal woningen per jaar (stabilisering van de bevolking), slechts kwaliteitsverbetering.
- In de nieuwbouw een lineair tot 40% toenemende fractie woningen met zonneverwarming.
- In de bestaande bouw, matig geïsoleerd, een lineair tot 10% toenemende fractie woningen met zonneverwarming.
- In de beschouwde periode zal zonneverwarming 50-60% van de warmtebehoefte dekken van een huis dat ermee wordt uitgerust.

Tabel 18 geeft het resultaat dat op basis van deze veronderstellingen ontstaat.

De indexcijfers voor het energieverbruik per woning in Tabel 18 zijn als volgt tot stand gekomen. Aan de huidige slecht geïsoleerde woning met centrale verwarming is het niveau 100 toegekend. De andere cijfers volgen uit de globale berekening dat de helft van de warmtebehoefte van een goed geïsoleerde woning uit zonne-energie kan worden verkregen en dat door goed thermisch isoleren de energiebehoefte van een woning tot de helft wordt teruggebracht.

Op basis van Tabel 18 zou in 2000 door toepassing van zonne-energie in 7,5% der woningen $\frac{0,13 \times 25 + 0,24 \times 25}{0,15 \times 50 + 2,65 \times 75 + 2,15 \times 50} \times 100\% = \text{ca. } 3\%$ worden bespaard op het verbruik van andere energiedragers voor woningverwarming en warmwatervoorziening.

Uiteraard zal in werkelijkheid veel van de na 1985 bestaande energie-situatie afhangen, maar toch wijst het voorgaande scenario erop dat toepassing van zonne-energie slechts langzaam zal penetreren.

Op lange termijn is het potentieel van zonne-energie

Tabel 18. Raming van het aantal woningen met zonneverwarming en van het energieverbruik in 2000

Type verwarming	Isolatie	Huizenbestand 1985 ¹⁾ (X 10 ⁶)	Huizenbestand 2000 (X 10 ⁶)		Index energieverbruik	
			geen zonneverwarming	met	geen zonneverwarming	met
geen centrale verwarming	slecht ²⁾	0,75	0,15	—	50	—
met centrale verwarming	slecht ²⁾	—	—	—	100	75
	matig	3,25	2,52	0,13	75	50
	goed	0,95	1,91	0,24	50	25
Totaal		4,95	4,58	0,37		

¹⁾ Zie paragraaf II.1.5.

²⁾ Situatie in 1973.

voor thermische doeleinden groot: wanneer het lukt om voor 70% van alle woningen en andere gebouwen op verantwoorde wijze voldoende ruimte voor collectoren te vinden en een aantal andere problemen op te lossen, kan worden gedacht aan ca. 20% van het nationaal energieverbruik (althans op basis van de huidige verhoudingen; zie Tabel 1).

V. Samenvatting en conclusies

V.1. Samenvatting

V.1.1. Woningverwarming

Voorgesteld wordt:

- alle woningen gebouwd na 1975 aanzienlijk beter te isoleren dan thans gebruikelijk, en meer beperkte isolatieverbetering aan te brengen in alle woningen, gebouwd vóór 1976, die in 1985 van centrale verwarming zullen zijn voorzien;
- in de woningen, die van deze betere thermische isolatie zijn voorzien, de luchttemperatuur met ca. 2°C te verlagen (hetgeen mogelijk is met behoud van de behaaglijkheid);
- in zoveel mogelijk woningen een aantal brandstofbesparende wijzigingen aan te brengen zoals toepassen van thermostatische regeling per vertrek, verlaging van de binnentemperatuur 's nachts (automatisch), individuele warmteverbruiksmeting (bij blokverwarming) en warmteterugwinning bij ventilatie.

Door de voorgestelde maatregelen kan het energieverbruik in 1985 worden teruggebracht met $236,5 \times 10^{15}$ J, hetgeen overeenkomt met een besparing van 33% op het energieverbruik voor verwarming en van 5,7% op het totale energieverbruik. Uitgedrukt in het prijspeil van 1974 kan bij nieuwbouw de isolatie zichzelf terugverdienen door verlaging van de brandstofkosten. Voor de verbetering van de isolatie van bestaande woningen zijn economisch gezien redelijke mogelijkheden aanwezig.

Enkele belangrijke aspecten die nadere aandacht verdienen zijn: de wijze van doorwerken van stijgende energieprijzen in de woningbouw, de vraag hoe maatregelen voor bestaande woningen kunnen worden gestimuleerd en de mate waarin maatregelen in niet van centrale verwarming voorziene woningen ten goede

zullen komen aan comfortverhoging en niet aan energiebesparing.

Meer onderzoek dient voorts te worden gewijd aan het probleem van de 'koudebruggen'. Dit zijn bepaalde plaatsen in de scheiding tussen binnen en buiten met een relatief hoge warmtegeleiding, zoals metalen raamkozijnen. Bij overigens goede isolatie kunnen zij een belangrijke bron van warmteverlies vormen. Het belang van standaardisatie dient vooral onderstreept te worden met betrekking tot de seriefabrikage van dubbele ramen.

V.1.2. Gasapparatuur in de woning

Een verdere energiebesparing kan worden verkregen door verbetering van de gebruiksrendementen van zowel verwarmings- en warmwatertoestellen. De voornaamste maatregelen daarvoor zijn:

- invoering van de verbrandingsgasklep;
 - vervanging van de waakvlam door elektrische ontsteking;
 - verbeteringen aan branders en verwarmend oppervlak.
- Indien ervan wordt uitgegaan dat de onder woningverwarming behandelde maatregelen reeds zijn toegepast, kunnen nog de volgende additionele hoeveelheden energie worden bespaard in 1985 (in 10^{15} J):

Keukengeysers	2,6
Badgeysers	6,8
Gasboilers	2,3
Combiketels	25,6
Kookapparatuur	3,3
Centrale verwarmingsketels	22,2

Dit resulteert in een totale besparing van $62,8 \times 10^{15}$ J of 1,5% van het Nederlandse primaire energieverbruik in 1985.

Indien laatstgenoemde maatregelen zouden worden toegepast zonder dat de onder woningverwarming genoemde maatregelen zijn gerealiseerd, ligt het besparingspotentieel een factor 1,5 à 2 hoger. Belangrijke aspecten zijn standaardisering, informatieve etikettering, de wijze van doorberekening van de kosten en de veiligheid.

V.1.3. Elektrische apparatuur in de woning

Beziet men het verbruik van elektriciteit in de huishouding (excl. verwarming en koeling), dan kan het volgende worden geconcludeerd:

- Zonder besparende maatregelen wordt het elektriciteitsverbruik in huishoudens in 1985 geschat op

190% van dat in 1972. Dit is een lagere schatting dan in Hoofdstuk 2 gegeven; het verschil vertegenwoordigt 3% van het nationaal energieverbruik in 1985.

- Door overschakeling op gas, in plaats van elektrische verwarming voor koken en warm water, alsmede in afwasmachine en wasautomaat, het gebruik van dikkere isolatie in koelkast en diepvriezer, het gebruik van een warmtewisselaar in de droogtrommel, het verbeteren van het rendement van verlichtingsarmaturen en stofzuiger, en tenslotte het beter gebruik van de centrale verwarmingspomp kan het totale verbruik aan primaire energie voor die doeleinden waarvoor in het huishouden thans elektriciteit wordt gebruikt in 1985 worden beperkt tot 125% van het niveau van 1972.

Dit vertegenwoordigt een besparing op het nationaal energieverbruik in 1985 van 1,8%. De genoemde maatregelen lijken vrijwel allemaal thans reeds economisch haalbaar voor de gebruiker.

De volgende belangrijke aspecten verdienen de aandacht. Een huishouden kan zich 'van alle gemakken' voorzien voor weinig meer dan het gemiddelde verbruik in 1972. Bij gebruik van niet-besparende toestellen verbruiken men al gauw het dubbele en wanneer men ook elektrisch koken en elektrische waterverwarming toepast, dan verbruikt men het drievoudige. In het geval van elektrische woningverwarming en klimaatregeling wordt het uiteraard een veelvoud.

Aansporing aan de huishoudens om elektriciteit te besparen door zuinigheid of zelfs door niet te verbruiken, heeft minder potentieel effect dan technische besparingsmaatregelen. Echte bezuiniging blijkt een te grote wijziging van het huidige leefpatroon te vereisen. Opgemerkt zij, dat deze conclusie niet hoeft te gelden voor andere in dit hoofdstuk onderzochte terreinen: op het gebied van de woningverwarming bijvoorbeeld lijkt zuinig gedrag wel een aanmerkelijke bijdrage te kunnen leveren.

Tenslotte dient te worden vermeld dat de vraag of ook op middellange termijn het benodigde gas ter vervanging van de elektriciteit inderdaad beschikbaar zal zijn, niet is onderzocht.

V.1.4. Utiliteitsgebouwen

In vóór 1976 gebouwde gebouwen kunnen de volgende maatregelen in meer of mindere mate worden toegepast: verbetering van isolatie, lagere afstelling van de thermostaat des nachts en in de weekeinden, uitwisseling van warmte met hergebruik van vocht en verbetering van de zonwering. Voor toekomstige bouwwerken (periode 1976-1985) kan bovendien worden gedacht aan verkleining van het glasaandeel in de gevel, de keuze van een passende vorm van het gebouw, afzuiging van verlichtingswarmte en wijziging van het verlichtingssysteem. Toepassing van deze maatregelen leidt, met inachtneming van de mogelijke mate van toepassing, tot een totale besparing in 1985 van $45 \times 10^{15} \text{ J}$ (1,1% van het nationale energieverbruik).

Voor bestaande utiliteitsbouw zullen met de besparing doorgaans aanzienlijke investeringskosten gepaard gaan. Voor de toekomstige utiliteitsbouw behoeft dat, althans wat bouwkundige maatregelen

betreft, veelal niet het geval te zijn.

Installatietechnische maatregelen, zoals toepassing van regenererende ventilatiesystemen, warmte-krachtsystemen en warmte-pompen, zullen voorlopig slechts in bijzondere gevallen lonend zijn. Verder ontwikkelingswerk is hier noodzakelijk.

Het toepassen van de genoemde maatregelen lijkt te moeten berusten op een combinatie van stijgende energieprijzen, wettelijke maatregelen en algemene bewustwording van de noodzaak tot energiebesparing. Het bouwvolume in de utiliteitsbouw wordt immers voor het grootste deel gerealiseerd ten behoeve van particuliere ondernemers; voor energiebesparing zal dus een goede bedrijfseconomische motivering aanwezig moeten zijn.

V.1.5. Verwarming met zonne-energie

Het verwarmen van huizen en gebouwen door middel van het opvangen van zonnestralingsenergie met collectoren is in principe technisch mogelijk. Voor een standaard eengezinshuis zou ca. 50 m^2 collectoroppervlak nodig zijn om de helft van de warmtebehoefte te dekken (onder Nederlandse omstandigheden), mits de woning goed is geïsoleerd. Door architectonische aanpassing van de vorm van de woning (groter collectoroppervlak), door verbetering van het rendement van de collectoren en door verbetering van de warmteopslag kan een groter gedeelte van de warmtebehoefte worden gedekt. Vooral de ontwikkeling van de energieprijzen zal bepalen in welk tempo de zonne-energie als middel tot huisverwarming in Nederland de markt zal veroveren. Uit een voorzichtige evaluatie blijkt dat zonne-energie pas na 2000 een bijdrage van betekenis aan de nationale energievoorziening zal kunnen leveren.

In de woningbouw moet echter om zwaarwegende redenen een grote mate van praktijkervaring worden opgedaan alvorens kan worden begonnen aan een grootscheeps programma voor verwarming met zonne-energie. Het is daarom wenselijk dat thans in Nederland wordt begonnen met het onderzoeken en ontwikkelingswerk dat nodig is om over enkele tientallen jaren wellicht te kunnen profiteren van toepassing van zonne-energie voor verwarming en warmwatervoorziening van huizen en gebouwen.

V.1.6. Algemene opmerkingen

- Veel van de in het voorgaande genoemde maatregelen vereisen de actieve medewerking van zeer grote groepen individuele consumenten, willen ze effect sorteren. De overheid lijkt derhalve een belangrijke rol toebedeeld en dit roept de vraag op met welke bestuurlijke maatregelen het gewenste doel kan worden bereikt.
- De besproken maatregelen zijn overwegend als min of meer op zich zelf staand behandeld. De vraag is gerechtvaardigd of mogelijk nog meer bereikt kan worden indien de 'energie-huishouding' van een woning, een gebouw of groepen hiervan als een geïntegreerd systeem wordt gezien. Men kan daarbij dan wellicht ook nog de verwerking van afval en de watervoorziening van de huishoudens betrekken [15]. Voorwaarde voor energiebesparing langs deze weg is echter dat een sterk schaaleffect in het

rendement van de installatie(s) aanwezig is. Economische voordelen kunnen verder alleen worden verwacht als functies van de subsystemen in het geïntegreerde systeem daadwerkelijk kunnen worden gecombineerd. Vervlechting van de subsystemen alleen levert geen besparing, maar wel complicaties en onoverzichtelijkheid op.

- Met betrekking tot de geprojecteerde besparingsmogelijkheden zij voorts opgemerkt dat er nog geen algemeen aanvaarde wetenschappelijke methode is om de warmtebehoefte van woningen en gebouwen te berekenen. Tussen theorie en praktijk blijken herhaaldelijk nog grote verschillen te bestaan. De schaarste aan betrouwbare metingen onder verschillende omstandigheden is daarvan wel de belangrijkste oorzaak. Een voortgezette inspanning op dit terrein moet daarom met kracht worden bepleit. Dat betekent uiteraard dat de in dit hoofdstuk vermelde berekeningen niet geheel betrouwbaar zijn. Zowel wat grotere als wat kleinere besparingsmogelijkheden kunnen met goede

argumenten worden verdedigd. Waar deze onzekerheid zich voordeed, heeft de werkgroep steeds geprobeerd een middenweg tussen optimisme en pessimisme te bewandelen.

- Tenslotte dient nog te worden opgemerkt dat alle genoemde maatregelen met betrekking tot gasapparaten en thermische isolatie besparen op het gasverbruik in de woning en het gebouw, maar geen invloed hebben op de verliezen aan gas welke optreden tussen (groot-)leverancier en aansluitpunt. Bij een lager eindverbruik zouden deze dus relatief belangrijker worden. Het blijkt echter dat deze 'verliezen' (die overigens lang niet alleen aan lekkage zijn toe te schrijven) thans minder dan 1% van het verbruik vertegenwoordigen [16].

V.2. Conclusies

Tabel 19 geeft een overzicht van de resulterende conclusies en de belangrijkste consequenties.

Tabel 19. Mogelijkheden voor besparingen op het energieverbruik in woningen en gebouwen

Maatregelen	Pro	Contra	Besparing 1985 (in % van het nationaal energieverbruik)	Besparing 2000
<ul style="list-style-type: none"> Goede isolatie van nieuwbouwwoningen. Isolatieverbetering bestaande woningen. Verlaging luchttemperatuur in goed geïsoleerde woningen. Aanbrengen van een aantal andere energiebesparende wijzigingen in woningen. Verbeteringen aan gasapparatuur (verbrandingsgasklep, vonkontsteking, wijzigingen branders en verwarmend oppervlak). Verbeteringen aan elektrische huishoudelijke apparatuur (waar mogelijk gas i.p.v. elektriciteit voor verwarmingsdoelen, dikkere isolatie koelkast en diepvriezer, warmtewisselaar in droogtrommel, opvoeren rendementen verlichtingsarmaturen en stofzuigers en beter gebruik c.v.-pomp). Invoering van een serie maatregelen, voor zover toepasbaar, in bestaande en nieuwe utiliteitsgebouwen (verbetering isolatie, lagere afstelling thermostaat des nachts en in de weekeinden, warmte-uitwisseling en hergebruik van vocht, verbetering zonwering, keuze gebouwworm, afzuiging verlichtingswarmte, wijziging verlichtingsystemen). Een begin maken met de bouw van experimentele huizen met zonneverwarming. 	<p>Economisch verantwoord.</p> <p>Meeste maatregelen economisch haalbaar.</p> <p>Geen extra investeringen vereist voor bouwkundige maatregelen</p>	<p>Investerings vereist. Een zekere overheidssteun is nodig.</p> <p>Zekere investeringen nodig. Het gaat om een groot aantal kleine fabrikanten.</p> <p>Het gaat om grote groepen individuele verbruikers</p> <p>Extra investeringen vereist voor installatie-technische maatregelen. Wettelijke maatregelen nodig.</p>	<p>5,7%</p> <p>1,5% (indien bovengenoemde maatregelen reeds zijn toegepast).</p> <p>1,8%</p> <p>1,1%</p>	<p>Kan oplopen tot ca. 10%</p> <p>Kan 3% zijn, echter onzeker i.v.m. mogelijke structurele wijzigingen in patroon ruimteverwarming. Wellicht 2%</p> <p>Wellicht 2%</p> <p>Bijdrage in energievoorziening: 1%</p>
		Totaal (potentieel)	10%	

VI. Samenstelling van de werkgroep

De werkgroep die Hoofdstuk V heeft opgesteld, was als volgt samengesteld:

prof.ir. C.W.J. van Koppen (voorzitter)	Technische Hogeschool, Eindhoven
ir. P. Euser (secretaris)	Technisch-Physische Dienst TNO-TH, Delft
ir. H. Borst	Samenwerkende Elektriciteits-productiebedrijven (SEP), Arnhem
ir. H. van Bremen	Stichting Ratiobouw, Rotterdam
ir. M. A. Engels	Bureau Van Heugten, Nijmegen
ir. P.H.H. Leijendeckers	Bureau Van Heugten, Nijmegen
ir. H.M. Roos	Gasunie, Groningen
ir. K. Wassenaar	Samenwerkende Elektriciteits-productiebedrijven (SEP), Arnhem
ir. J.A. Over	Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag

Voorts werd een bijdrage gevraagd en verkregen van:
dr.ir. E.T. Ferguson Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven

VII. Literatuur

- [1] Publikatie Centraal Bureau voor de Statistiek; 'De Nederlandse energiehuishouding', no. 4, 1972.
- [2] H. van Bremen; C.v.-installaties in woningen, installatiekosten en aantal verwarmde vertrekken. Verzameling Bouwstudies, no. 27; Bouwcentrum, Rotterdam, 1972.
- [3] Stichting Bouwresearch, Rotterdam. Publikatie: 'Wand- en vloerconstructies gezien door een thermohygrische bril'.
- [4] PNEM-enquête: 'Particulier huishoudelijk verbruik in aaneengesloten bebouwing (1969-1970)'. Gepubliceerd sept. 1971.
- [5] Elektriciteit in Nederland 1972. Uitgave Arnhemse Instellingen, Arnhem, 1973.
- [6] Consumentengids, maart 1969, sept. 1970, febr./sept./okt. 1971, juli 1972, okt. 1973.
- [7] Persoonlijke mededeling (SEP).
- [8] E.R. Ambrose; The heat pump: performance factor and possibilities for improvement. Bijdrage aan NATO Science Committee Conference: Technology of efficient energy utilization, Les Arcs, Frankrijk, 8-12 okt. 1973.
- [9] Statistisch Zakboek 1972. Uitgave Staatsdrukkerij, 1973.
- [10] J.H. Derksen; Bouwen, groei en fluctuaties in de bouwnijverheid. Rapport Nederlands Economisch Instituut, 1973.
- [11] K. Waterkotte; Erdreich, Wasser, Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus. Elektrowärme International, 30 (1972), no. A1, blz. A39 e.v.
- [12] D.A. de Vries; Solar radiation at Wageningen. Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen, Nederland, 55 (1955), no.6, 277-304.
- [13] C.W.J. van Koppen; De toepassingsmogelijkheden van zonne-energie voor huisverwarming en warmwatervoorziening onder Nederlandse omstandigheden; een oriënterende studie. Rapport WPS3-73.07.R183. Laboratorium voor Warmte-techniek, TH Eindhoven.
- [14] Solar Energy. Quarterly Journal, Pergamon Press Ltd, Oxford. Editor in chief: P.E. Glaser (Arthur D. Little Inc.). Vrijwel alle nummers.
- [15] Energy Today, 1, No. 1 (17 sept. 1973) meldt: 'Integrated Utility Systems show promise' (Trends Publishing Inc., National Press Building, Washington D.C. 20004).
- [16] Th.G. van Zijl; Lekinterpretaties. Gas, 93 (1973), 432-9.

Hoofdstuk 6. Besparingsmogelijkheden in Verkeer en Vervoer

redactie door ir. J. Overeem

I. Verkeer en vervoer als maatschappelijk verschijnsel

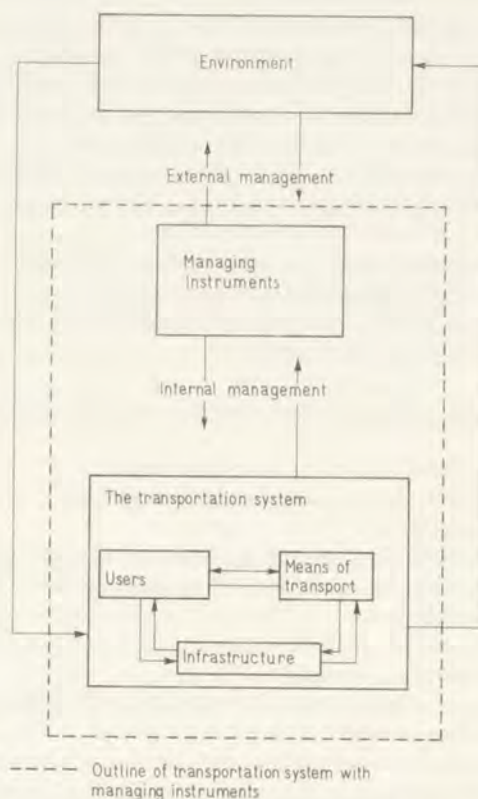
Het binnenlandse verkeer en vervoer is verantwoordelijk voor ca. 10% van het Nederlands energieverbruik. De mogelijke energiebesparing in verkeer en vervoer zal dus in verhouding tot het nationale energieverbruik slechts gering kunnen zijn. Er zijn echter een aantal redenen die een onderzoek over de besparingsmogelijkheden in verkeer en vervoer en de mogelijke maatschappelijke gevolgen hiervan bijzonder actueel maken, nl.: de kwetsbare positie van het verkeer en vervoer door de grote afhankelijkheid van één primaire brandstof (aardolie), de relatief grote invloed van de overheid als beheerder van de infrastructuur en de grote verwevenheid van verkeer en vervoer met vrijwel alle facetten van het maatschappelijk leven. In deze paragraaf zal op dit laatste in 't kort worden ingegaan.

De behoefte aan vervoer is een gevolg van in de tijd wisselende menselijke activiteiten, die ruimtelijk gescheiden plaatsvinden. Het vervoer kan dan ook worden gezien als een uit het algemeen menselijk activiteitenpatroon afgeleid verschijnsel. Omgekeerd zal het vervoer activiteiten mogelijk maken en stimuleren.

Voor het vervoer wordt gebruik gemaakt van vervoermiddelen (het lopen inbegrepen). Het verschijnsel van bewegende vervoermiddelen wordt verkeer genoemd. Dit kan naar verschillende gezichtspunten worden onderscheiden, zoals: openbaar en particulier verkeer (uit het oogpunt van organisatie); auto-, fiets-, en voetgangersverkeer (vervoermiddel), spitsuur- en niet-spitsuurverkeer, werkdag- en weekendverkeer (tijd); stedelijk- en niet-stedelijk verkeer (plaats); woon-werk, zakelijk, sociaal en recreatief verkeer (soort activiteiten). Elke verkeerssoort vraagt om technisch aangepaste ruimtelijke voorzieningen (verkeersinfrastructuur) die gemeenschappelijk kunnen worden gebruikt.

Verkeer en vervoer kunnen worden opgevat als een uit de elementen gebruikers, vervoermiddelen en infrastructuur opgebouwd systeem, dat beïnvloed wordt door en invloed uitoefent op de omgeving waarin sociale, psychologische, economische, ecologische, ruimtelijke en technische componenten te onderscheiden zijn (Figuur 1).

Veranderingen in het verkeers- en vervoerssysteem zullen dan ook gevolgen hebben voor de omgeving, terwijl omgekeerd wijzigingen in het verkeer en vervoer kunnen worden bewerkstelligd door veranderingen in de omgevingsfactoren. Alvorens maatregelen te beramen die het systeem beïnvloeden is het nodig oorzaak en gevolg te onderkennen en zo mogelijk te kwalificeren en te kwantificeren. Tot voor kort werden beleidsbeslissingen voornamelijk



Figuur 1. Relatie tussen het vervoerssysteem en de omgeving.

gebaseerd op de drie elementen van het verkeers- en vervoerssysteem (gebruikers, vervoermiddelen en infrastructuur) en hun onderlinge relaties. Besluitvorming reageerde in hoofdzaak op storingen in de verkeersafwikkeling.

De laatste jaren krijgt men meer aandacht voor de samenhang van verschijnselen. Dit komt o.m. tot uiting in het verschijnen van studies naar de onderlinge beïnvloeding van de vier fasen in de vervoersplanning in engere zin: de behoefte aan vervoer, de verdeling van het vervoer naar richting, de verdeling van het

Tabel 1. Totaal aantal km jaarlijks afgelegd door Nederlandse personenauto's in indexcijfers (1960 = 100)¹.

jaar	totaal	tussen huis en kantoor of bedrijf	in uitoefening van beroep of bedrijf	in vakantie	voor overig particulier gebruik
1960	100	100	100	100	100
1963	161	220	138	207	200
1965	232	345	176	330	353
1967	309	549	206	444	526
1970	420	888	240	604	791

¹ 1961 t/m 1967 volgens CBS-statistieken, 1970 gebaseerd op voorlopige CBS-gegevens en een raming van het personenauto-park van 2,4 miljoen medio 1970.

vervoer naar vervoermiddel en de keuze van de route. Mede door de sterke groei van het particuliere autoverkeer (Tabel 1) wordt men zich eveneens meer bewust van effecten van het verkeer en vervoer op bijvoorbeeld het ruimtegebruik, de omgeving en het milieu, en het beslag op de natuurlijke hulpbronnen.

Deze bewustwording heeft o.a. tot gevolg dat in de vervoersplanning gezocht wordt naar methoden, die meer rekening houden met omgevings- en milieufactoren dan de traditionele extrapolerende methoden. Men hoopt op deze wijze een beter inzicht te verkrijgen in de rol die het vervoer in het dagelijks leven der enkelingen speelt – waarbij met name rekening wordt gehouden met sociale doeleinden – als basis voor betere methoden van besluitvorming. Een mogelijk kader voor een systeemanalyse van verkeers- en vervoersplanning is weergegeven in Figuur 2. Hierbij is rekening gehouden met de sociaal-economische componenten.

In grote trekken zijn hier vier fasen te onderscheiden [1]:

- het identificeren van de doelstellingen;
- het aangeven van alternatieve benaderingen (strategieën);
- het nabootsen (door middel van een simulator) en het aangeven van de invloed op gebruikers en niet-gebruikers;
- het waarderen van de alternatieven en de keuze van de te volgen strategie.

In het planningproces worden tenminste de volgende elementen verwerkt:

- Waarden, de normatieve elementen, die door de samenleving als geheel zijn aanvaard. Deze waarden worden geformuleerd als abstracte begrippen.
- Richtdoelen, de richtingen waarin het streven van de gemeenschap zich zal begeven. Gewoonlijk

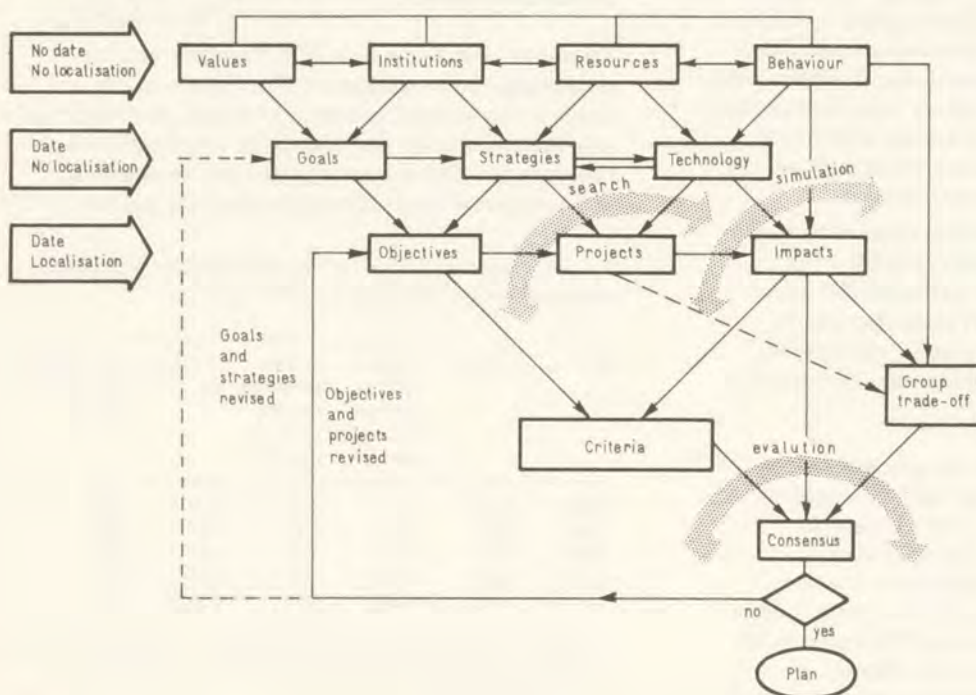
worden zij geformuleerd zonder verwijzing naar tijd en plaats.

- Objectdoelen, afgeleid van een gelijktijdige evaluatie van doelen en hulpbronnen. Zij komen voort uit de politieke strategie en zij zijn als zodanig gewoonlijk gedefinieerd ten aanzien van tijd en plaats.
- Normen, die de maatstaven (of punten van referentie) zijn voor het bereiken van elke doelstelling.

Met betrekking tot het identificeren van de doelen zijn enkele centrale uitgangspunten geformuleerd in [2], waaronder de volgende:

- * – Verkeer en vervoer dienen een integraal deel uit te maken van planning voor de samenleving als geheel. Zowel individuele als door de gemeenschap erkende waarden dienen de basis te vormen voor deze planning.
- Publieke participatie bij planning en besluitvorming dient te worden bevorderd. Dit moet niet leiden tot het overheersen van particuliere wensen boven de behoeften van de gemeenschap.
- Het verkeers- en vervoerssysteem dient een vlotte, veilige en comfortabele verplaatsing mogelijk te maken binnen een bepaald gebied, waarbij een redelijkerwijs zo groot mogelijk pakket van bestemmingen binnen het bereik van iedere inwoner van dat gebied gebracht wordt.
- De leefomstandigheden dienen verbeterd, zeker niet verslechterd te worden door verkeers- en vervoersvoorzieningen; er dient dus bij het ontwerpen van het verkeers- en vervoerssysteem gewaakt te worden over zowel de kwaliteit van het sociale milieu als van het natuurlijke milieu. Een belangrijke eis die aan de kwaliteit van het milieu moet worden gesteld is het gevoel van veiligheid, waardoor tevens aan agressief optreden het voedsel wordt ontnomen.
- * – In de verkeers- en vervoerssector dient niet alleen te worden gestreefd naar rendement: er dient een

Figuur 2. Het normatieve kader. Samenstellende delen van de sociaal-economische omgeving [1].



billijke en evenredige verdeling te worden bereikt van voor- en nadelen tussen gebruikers en zij die slechts zijdelings ermee te maken hebben.

- Het verkeers- en vervoerssysteem dient bij te dragen tot een efficiënt gebruik van de ruimte en een verantwoord gebruik van de natuurlijke hulpbronnen.

Met deze opmerkingen is geprobeerd aan te tonen dat het onderwerp van de onderhavige studie slechts een van de vele facetten is van het verkeers- en vervoerssysteem. Verkeer en vervoer zijn, meer dan enige andere activiteit, vervlochten met vrijwel elk aspect van het dagelijks leven. Indien ergens ingrepen met behoedzaamheid dienen te geschieden, dan is het wel in deze sector. Zeker bij verkeer en vervoer dient dan ook de betrekkelijke waarde van energiebesparing in haar relatie tot het geheel te worden bezien.

II. Enkele besparingsmogelijkheden door indirecte beïnvloeding van het verkeer en vervoer

II.1. De verdeling van activiteiten in de ruimte

De in Nederland ontwikkelde plannen in het kader van de Wet op de Ruimtelijke Ordening (bijv. streekplannen en gemeentelijke structuur- en bestemmingsplannen), beogen een zo goed mogelijke wederzijdse aanpassing van de ruimte en samenleving. Deze plannen zouden mede moeten worden getoetst aan overwegingen van zo gering mogelijk energieverbruik. Daarvoor is nodig dat maatstaven worden ontwikkeld en gehanteerd voor de volgende facetten:

- de in de plannen gerealiseerde bebouwendichtheid;
- de mate van bereikbaarheid van woningen, voorzieningen en bedrijven voor energie-efficiënte vervoermiddelen;
- een zodanige situering van elkaar beïnvloedende activiteiten, dat met overbrugging van een zo gering mogelijke afstand de behoeften kunnen worden bevredigd.

Bij dit laatste is te denken aan activiteiten als wonen – werken – winkelen en vrijetijdsbesteding maar ook aan de winning van grondstoffen – de vervaardiging van halffabrikaten en eindprodukten – de distributie van eindprodukten en de wederzijdse dienstverlening van instellingen.

Door vergroting van de mogelijkheden voor bijv. werken en ontspanning in de nabijheid van de woning kan een daling optreden in het aantal afgelegde personen- en voertuigkilometers. Een bijkomend effect van de geringere gemiddelde verplaatsingsafstand kan zijn dat verschuivingen optreden in het gebruik van de vervoermiddelen bijv. van personenauto naar bromfiets en fiets.

In een publikatie [3, p. 77] wordt melding gemaakt van een simulatiestudie voor het jaar 2000. Aangenomen werd dat het gedragspatroon ongewijzigd zou blijven, maar dat door afstemming van de situering van nieuwe woongebieden en werkcentra ten opzichte van elkaar en door het invoeren van grotere woondichtheden (30 i.p.v. 15 woningen per ha) een vermindering van het aantal af te leggen reizigerskilometers van ca.

25% zou kunnen worden bereikt, bij een gelijkblijvend aantal verplaatsingen.

Overigens dient men te bedenken dat in 1972 ca. 65% van het aardolieverbruik door verkeer en vervoer plaatsvond in de beroepsfeer (al die activiteiten die samenhangen met de vervaardiging en de afzet van produkten en diensten) en ca. 35% in de particuliere en overheidssfeer, inclusief woon-werkverkeer [4].

De in het kader van streek-, structuur- en bestemmingsplannen opgestelde verkeers- en vervoersplannen en verkeerscirculatieplannen zullen eveneens op energieverbruik moeten worden getoetst. Een interessante vraag in dit verband is of het criterium ter beoordeling van verkeers- en vervoersplannen gebaseerd op minimale *reistijd* geheel of gedeeltelijk vervangen kan worden door minimale *afstand*.

Gezien de verwantschap tussen verkeer en vervoer en maatschappelijke activiteiten en het weinige dat bekend is van mogelijke invloeden van velerlei maatregelen die ingrijpen in het huidige functioneren van het verkeer en vervoer, lijkt het bijzonder gewenst dat er gerichte experimenten plaatsvinden.

II.2. Spreiding van activiteiten in de tijd

Nagegaan zou moeten worden in hoeverre door het spreiden van activiteiten in de tijd energiebesparingen kunnen worden bereikt. Hierbij zou rekening moeten worden gehouden met het door spreiding van werktijden mogelijk veroorzaakte extra energieverbruik voor andere doeleinden (bijvoorbeeld verlichting en verwarming). Hoewel te verwachten is dat door maatregelen van deze aard minder energiebesparing wordt verkregen dan door maatregelen gericht op concentratie van activiteiten in de ruimte, is spreiding in de tijd aantrekkelijk, omdat zij op kortere termijn kan worden gerealiseerd. Bij eerdere pogingen hiertoe is echter gebleken dat dit op vele weerstanden stuit. Het meest belangrijke energiebesparende resultaat van deze benadering is de afvlakking van de spits in het verkeer, waardoor de beschikbare capaciteit van infrastructuur en vervoermiddelen (openbaar vervoer) beter wordt benut en congestieverliezen worden verminderd. Als nadeel kan gelden dat spreiding van werktijden het tot stand komen van auto-pools in het woon-werk-verkeer bemoeilijkt.

Voorbeelden van maatregelen zijn:

- variabele werktijden binnen een bedrijf;
- spreiding van aanvangs- en sluitingstijden van elkaar in de tijd *niet* sterk beïnvloedende activiteiten bijv. bepaalde takken van dienstverlening en industriële nijverheid;
- verschuiving sluitingstijden van winkels tot na werktijd (gedeeltelijk reeds het geval);
- bevoorrading van binnensteden (goederenvervoer) buiten de spitsuren.

Op grond van buitenlandse ervaring blijkt een gecoördineerde spreiding van werktijden tussen bedrijven onderling meer effect te sorteren dan variabele werktijden binnen een bedrijf [5].

II.3. Vermindering van de vervoersbehoefte

II.3.1. Noodzaak van verplaatsingen

Tot voor kort werd de verkeers- en vervoersplanning gebaseerd op extrapolatie van trends uit het verleden. Daarbij werd de behoefte aan vervoer beschouwd als een autonoom gegeven, waarbij het vooral ging om de vraag in welke mate deze behoefte zou toenemen. Tengevolge hiervan is weinig bekend over de sociaal-psychologische en economische factoren die de vervoersbehoefte bepalen. Onderzoek in deze richting is dringend gewenst.

II.3.2. Mogelijkheden van telecommunicatie¹⁾

De bestaande telecommunicatiediensten zoals post, telefoon, telegraaf en telex, kunnen reeds in vele communicatiebehoeften voorzien zonder dat daarvoor verplaatsing van personen nodig is. Voor vele soorten van contacten is het verplaatsen echter nog steeds gebruikelijk. Het is te verwachten dat nieuwe telecommunicatiediensten in een aantal gevallen de behoefte aan vervoer zullen verminderen. De eerste ervaringen met de beeldtelefoon voor zakelijk verkeer duiden erop, dat er inderdaad vele gevallen zijn waarin het elkaar bij het gesprek ook zien een belangrijke extra informatie geeft, waardoor meer subtiele gesprekken mogelijk worden dan met alleen maar telefoon.

Er zullen echter toch altijd gevallen zijn waarin, ook al om psychologische redenen, een persoonlijk contact de voorkeur verdient. Nog belangrijker zullen misschien de komende mogelijkheden worden om op afstand te vergaderen. Er zijn hier een aantal vormen van 'vergaderen per televisie' denkbaar. Er is reeds enige ervaring verkregen met speciaal ingerichte conferentiestudio's. De vergadering vindt dan plaats in twee zulke studio's waarbij men elkaar ziet en hoort en de illusie ontstaat dat men tezamen in één ruimte vergadert. Ook hiermee zijn de eerste ervaringen bemoedigend. Een dergelijke dienst is ook in te passen in een beeld-telefoon dienst. De studio's zouden dan minder op studio's lijken maar op enigszins aangepaste kantoor-ruimten. Een andere vorm is analoog aan het nu reeds bekende telefoonvergaderen waarbij een aantal abonnees via een speciale vergaderschakeling met elkaar verbonden wordt. Ieder blijft dan op zijn eigen plaats. De technische mogelijkheden en de waardering van potentiële gebruikers van dergelijke diensten worden momenteel onderzocht op vele plaatsen in de wereld, ook in ons land. De invloed van het invoeren van deze nieuwe telecommunicatiediensten op het reizen is moeilijk voorspelbaar. Hierop gerichte studies geven nog weinig houvast. Ook de relevante economische factoren zijn nog onduidelijk. Maar zeker is dat, hoewel de nieuwe diensten in vele gevallen het reizen in principe overbodig kunnen maken, er toch nog factoren zijn, psychologisch en economisch, waardoor men aan reizen toch de voorkeur zal geven. Zelfs is het mogelijk dat men door de nieuwe telecommunicatiemiddelen in nauw contact met meer mensen kan komen en dat hierdoor het reizen zelfs gestimuleerd wordt! [6]. Verder onderzoek is wenselijk.

¹⁾ Bijdrage van Dr. F.W. de Vrijer.

III. Directe besparingsmogelijkheden in verkeer en vervoer

Het energieverbruik kan worden beschouwd als een factor die begrenzings kan opleggen aan verkeer en vervoer. Deze sector legt in Nederland beslag op ca. 10% van het energieverbruik en de verwachting is dat dit percentage tot 1985 geen wezenlijke verandering zal ondergaan.

Het is redelijk te veronderstellen, dat de potentiële behoefte aan mobiliteit nog geenszins is bevredigd: bevolkingsgroei en toenemend autobezit zullen volgens de raming in Hoofdstuk 2, par. III.4.4., in 1985 het energieverbruik voor verkeer en vervoer doen toenemen tot het tweevoudige van dat in 1970, en zulks ondanks de in deze raming aangenomen daling met ruim 10% van het gemiddelde jaarkilometrage van personenauto's. Het is niet ondenkbaar dat andere maatschappelijke ontwikkelingen — zoals bijv. een voortgaande Europese integratie — een grotere behoefte aan vervoer en daarmee een groter energieverbruik teweeg zullen brengen.

Hoewel verkeer en vervoer slechts 10% van het totale energieverbruik voor hun rekening nemen, bestaat die energie vrijwel uitsluitend in de vorm van aardolie-producten. Ca. 20% van het binnenlands aardolie-verbruik vindt dan ook plaats in deze sector (zie Hoofdstuk 2). Daarenboven zijn juist in het verkeer en het vervoer buitengewoon grote economische en technische inspanningen vereist wil men deze, het meest door beperking van de beschikbaarheid bedreigde, energiedrager door andere vervangen.

Het energetisch rendement van de meest gebruikte vervoermiddelen is laag te noemen in vergelijking met rendementen in andere sectoren (zie Hoofdstuk 1, Figuur 3). In theorie kunnen technische ontwikkeling gericht op rendementsverbetering, alsmede substitutie van minder efficiënte door meer efficiënte transportmiddelen en -systemen relatief veel effect sorteren. Tabel 2 kan van nut zijn bij het identificeren van de gebieden waarop de besparingsstudies in deze sector het eerst moeten worden gericht.

Tabel 2. Brandstofverbruik in 1972 in de sector verkeer en vervoer (Bronnen: Hoofdstuk 2, CBS en Shell Nederland).

	10 ¹⁵ J	%	%
Motorbenzine:	163,8 ¹⁾	62,6	
— personenauto ²⁾			54,4
— bedrijfsauto ²⁾			6,3
— bromfiets/motorfiets ²⁾			1,9
Autogasolie (Diesel):	53,3	20,4	
— personenauto ²⁾			1,1
— bedrijfsauto ²⁾			15,7
— landbouwverkeer ²⁾			3,1
— spoorwegverkeer ²⁾			0,5
Gasolie binnenvaart ²⁾	44,6	17,0	
Totaal	261,7	100%	
Vliegtuigbrandstoffen ³⁾	36,9	14,1	
Bunkers zeegaande schepen ³⁾	504	193	

¹⁾ Waaronder 82% superbenzine.

²⁾ Raming Shell Nederland N.V.

³⁾ Ingenomen binnen Nederlands gebied.

Bunkers van zeegaande schepen vormen een zeer grote post. Hoewel de financiële opbrengst aan Nederland

toeval, wordt slechts een deel als Nederlands verbruik aangemerkt.

Vliegtuigbrandstoffen vormen een betrekkelijk kleine, maar niet te verwaarlozen en bovendien relatief groeiende fractie van het binnenlandse verbruik, waarvoor hetzelfde geldt als voor de bunkers van zeegaande schepen. De internationale lucht- en scheepvaart vallen echter veel meer in Europees dan in een Nederlands kader en worden daarom hier niet verder behandeld. De binnenvaart houdt zich vrijwel uitsluitend bezig met vrachtvervoer en is van de verschillende vormen van vrachtvervoer de meest efficiënte, qua energieverbruik per tonkilometer.

De besparingsstudie zal zich dan ook concentreren op het binnenlandse verkeer en vervoer te land. Ruim 80% van het Nederlandse energieverbruik in de verkeers- en vervoerssector is hiermee gemoeid. Luchtverkeer, binnenvaart en internationaal wegvervoer zullen in dit hoofdstuk dan ook slechts ter sprake komen voorzover zij in direct verband staan met bovengenoemd onderwerp. Het indirecte energieverbruik in de verkeers- en vervoerssector, onder meer nodig voor de vervaardiging en exploitatie van vervoermiddelen en infrastructuur, wordt niet behandeld. Dit indirecte verbruik wordt in de Verenigde Staten geschat op ruim 30%¹⁾ van het directe energieverbruik [7]. Bepaalde substitutiemogelijkheden zullen worden behandeld, alsmede de mogelijkheden die technische vernieuwing en bestuurlijke maatregelen bieden. Het accent zal hierbij gelegd worden op de vervoertechnische aspecten.

III.1. Directe beïnvloeding van het verkeer en vervoer

III.1.1. Energieverbruik van de vervoermiddelen

In Tabel 3 worden voor de meest voorkomende vervoerstechnieken globale kengetallen gegeven voor het energieverbruik van de vervoermiddelen per eenheid van vervoersprestatie. Op deze wijze wordt het energieverbruik gerelateerd aan de door het vervoermiddel geleverde eenheid produkt: de reizigerskilometer dan wel de tonkilometer²⁾.

De gegevens zijn afkomstig uit verschillende publikaties [8 t/m 13] van een aantal stedelijke vervoersbedrijven en van eigen ramingen. De gevonden waarden per vervoermiddel vertonen een grote variatie, hetgeen te verklaren is uit verschillende aannamen voor factoren als: type vervoermiddel, bezettings- en beladingsgraad, gebruik naar plaats en tijd (bijv. lokaal en interlokaal verkeer en spitsuur en niet-spitsuurverkeer) en de rijsnelheid.

Voor enkele van de in Tabel 3 genoemde factoren is enige differentiatie toegepast nl. voor de gewichtsklasse van personen- en bedrijfsauto's, lokaal en interlokaal verkeer en gemiddelde werkelijke bezettings- en beladingsgraad tegenover de theoretisch haalbare bezettings- en beladingsgraad. Hierdoor wordt enig

¹⁾ In Nederland is dit cijfer nagenoeg gelijk, zoals we zullen zien in Hoofdstuk 8, paragraaf 1.6.

²⁾ De vervoersprestatie van een vervoermiddel is het produkt van het aantal vervoerde personen (reizigers) dan wel van het vervoerde gewicht in tonnen en de afgelegde afstand in kilometers.

inzicht verkregen in de maximale ruimte voor energiebesparing.

Daar de cijfers ten dele zijn gebaseerd op ramingen afkomstig uit diverse bronnen, dienen zij met de nodige omzichtigheid te worden gehanteerd. Het is van groot belang dat er gedifferentieerd statistisch materiaal op dit gebied beschikbaar komt. Men dient te bedenken dat de vermelde waarden niet gedifferentieerd zijn naar het tijdstip van het gebruik van het vervoermiddel en naar de snelheid waarmee het vervoer plaatsvindt.

Tijdens de spitsperiode zal het energieverbruik van de personenauto en het openbaar vervoer aanzienlijk veranderen omdat de bezettingsgraad van het openbaar vervoer in deze periode vrijwel 100% of meer bedraagt, terwijl die van personenauto's in het algemeen lager zal zijn dan de gemiddelde waarde van ca. 40%. In deze periode vraagt de personenauto vooral extra energie door verkeersopstoppingen. Als gevolg hiervan zal het energieverbruik van het openbaar vervoer in de spitsperiode een aanzienlijk gunstiger beeld opleveren vergeleken met dat van de personenauto dan uit de in Tabel 3 gegeven gemiddelde waarden volgt. De afhankelijkheid tussen het energieverbruik en bezettingsgraad en snelheid zal in de volgende paragrafen nader worden bezien.

Ten einde het energieverbruik van vervoermiddelen met elektrische tractie te kunnen vergelijken met vervoermiddelen met benzine- of dieselmotoren zijn de cijfers voor het directe energieverbruik omgerekend naar het verbruik aan primaire brandstof. Als omrekeningsfactoren zijn aangenomen: voor benzine 1,15, waarin begrepen de energie nodig voor winning, transport en raffinage (ca. 6%) van ruwe olie, alsmede het transport van de produkten naar de distributiepunten: voor elektrische tractie 3,2 waarbij een rendement van 33% is aangenomen voor de elektrische centrale en een omrekeningsfactor van 1,06 naar de primaire energiedragers (olie, aardgas en kolen).

Ondanks de omzichtigheid waarmee de gegeven waarden in Tabel 3 gehanteerd moeten worden, geeft de orde van grootte van deze cijfers enige indicatie voor de richting waarin energiebesparing in het verkeer en vervoer bij de thans in gebruik zijnde vervoermiddelen dient te worden gezocht indien het aantal reizigers-tonkilometers als gegeven worden beschouwd.

Achtereenvolgens zullen worden behandeld:

- verschuivingen naar meer energie-efficiënte vervoermiddelen;
- verhoging van de bezettings- en beladingsgraad;
- wijzigingen in de verkeersafwikkeling.

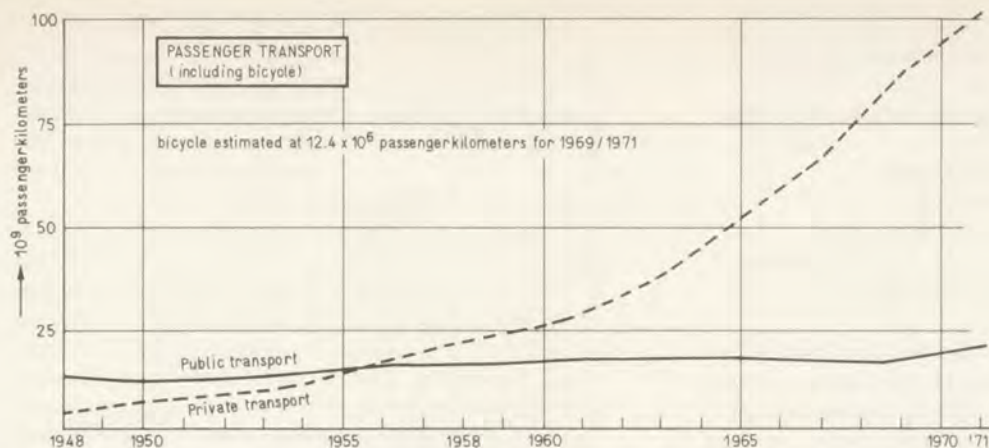
III.1.2. Mogelijke verschuivingen in het voertuiggebruik

De meest opmerkelijke verschuiving in het voertuiggebruik na de Tweede Wereldoorlog is die van het openbaar naar particulier vervoer (Fig. 3).

Het totaal aantal reizigerskilometers bedroeg in 1970 bijna het viervoudige van dat in 1955, bij een groei van het personenautopark tot ongeveer het negenvoudige. Met een vrijwel gelijkblijvend aantal reizigerskilometers voor het openbaar vervoer verschuift

Tabel 3. Energieverbruik van wijzen en middelen van vervoer

	Theoretisch max. bezetting of belading (volwassenen)	Gemiddeld- de bezet- ting of belading %	Gemiddel- de snelheid (km/uur)	Theoretisch energieverbruik bij max. bezetting of belading Voertuig- brandstof of elek. X 10 ⁶ J per reiz. km of per ton km	Primaire energie	Energieverbruik bij gemiddelde bezetting of belading Voertuig- brandstof of elektriciteit X 10 ⁶ J per reiz. km of per ton km	Primaire energie	Rendement brandstofverbruik (km per liter) bij max. bezetting	bij gem. bezetting
<i>Reizigersvervoer</i>									
lopen	1	100	4-5	0,20-0,25	0-1	0,20-0,25	0-1	-	-
fietsen	1	100	12-15	0,06-0,11	0-0,23	0,06-0,11	0-0,23	-	-
brommer 2 takt	1	110	30-40	0,65	0,72	0,72	0,80	40	40
brommer 4 takt	1	110	30-40	0,50	0,55	0,55	0,60	60	60
<i>Personenauto</i>									
klein, stedelijk	4	40	20-35	0,7	0,8	1,8	2,1	11,5	12,2
klein, interlokaal	4	45	70-80	0,6	0,7	1,3	1,5	14,5	15
middelgr. stedel.	5	32	20-35	0,9	1,0	2,7	3,1	7,2	8,1
middelgr. int. lok.	5	36	80-90	0,8	0,9	2,3	2,6	8,2	8,5
groot, stedelijk	5	32	20-35	1,4	1,6	3,8	4,4	4,5	5,8
groot, interlokaal	5	36	80-90	1,2	1,4	3,1	3,6	5	6,3
gemiddelde Ned. personenauto						1,8	2,1		11
<i>Openbaar vervoer</i>									
stadsbus	95	20-25	15-20	0,18	0,22	0,9	1,1		
streekbus	65	15-20	30-40	0,12	0,14	0,6	0,7		
tram, per rijtuig	95	20-25	15-20	0,07	0,22	0,3	1,0		
metro, per treinstel	300	15-20	25-30	0,10	0,32	0,4	1,3		
dieseltrein, kort traject, (< 100 km) per rijtuig	100	38	90	0,34	0,39	1,03	1,18		
elektr. trein, lang traject, (> 100 km) per rijtuig	100	38	90	0,11	0,36	0,34	1,08		
<i>Vrachtervervoer (tonnen)</i>									
32 ton lorry (diesel)	20	60	70	0,75	0,85	1,3	1,5		8,5
bestelwagen	1	60	40	5,2	5,9	8,4	9,7		
gem. Ned. vrachtauto			70			3,6	4,1		
gem. Ned. vrachtauto lange afstand (>100 km)			70			1,7	1,9		3,5
gem. Ned. vrachtauto kort traject (< 100 km)			50			7,8	9,0		
dieseltrein kort traject (<100 km)			85	0,62	0,73	0,69	0,80		
elektr. trein, lange afstand (>100 km)			85	0,14	0,45	0,16	0,51		
binnenvaarttuig			15-30	0,19	0,21	0,20	0,23		
pijpleiding									



Figuur 3. De verdeling openbaar — particulier vervoer in het personenvervoer sinds 1948 uitgedrukt in reizigerskilometers (Bron CBS).

in deze periode de verhouding openbaar vervoer — particulier vervoer van 50%-50% naar 17%-83%. De drijvende krachten achter deze ontwikkeling zijn de groei van het personenautobezit, de suburbanisatie, verminderende woondichtheden, koopgewoonten, e.d. Een zelfde, zij het minder spectaculaire, ontwikkeling doet zich voor bij het vrachtvervoer. Bij een verdubbeling van het vrachtwagenpark in de periode 1960-1970 nam het totaal aantal tonkilometers toe met een factor van ca. 2,3 en verschoof het aandeel van de verschillende vervoerstechnieken volgens Tabel 4.

Tabel 4. Binnenlands goederenvervoer in 1960 en 1970 (Bron: CBS).

	1960	1970
Wegvervoer	40,2%	54,2%
Spoorwegen	25,2%	7,2%
Binnenvaart	34,6%	38,6%
	100%=9,8X10 ⁹ ton km	100%=ca. 23X10 ⁹ ton km

Uit een oogpunt van energieverbruik is dit een ongunstige ontwikkeling. Nagegaan zal worden welke mogelijkheden aanwezig zijn om deze trends om te buigen. Het motorbrandstofverbruik is gelijk verdeeld over lokaal en interlokaal vervoer [14, p.30-31]. De mogelijke verschuivingen in het voertuiggebruik verschillen voor lokaal vervoer en voor interlokaal vervoer.

Lokaal vervoer

Afhankelijk van de aard van de behoefte aan vervoer, de karakteristiek van de verplaatsing (bijv. afstand) en de beschikbaarheid van vervoermiddelen (mogelijkheid tot keuze) zijn de volgende verschuivingen mogelijk:

- van bromfiets naar fiets of lopen;
- van personenauto naar fiets, lopen of bromfiets;
- van personenauto naar openbare vervoermiddelen;
- van grote naar kleine personenauto.

De fiets dient met nadruk genoemd te worden als het meest ideale vervoermiddel voor lokaal vervoer zowel uit een oogpunt van energiebesparing als van diverse andere externe factoren (bijv. ruimtebeslag en milieu). Ook verkeerstechnisch benadert de fiets de kwaliteit van de auto met uitzondering van de factor comfort:

het is een individueel flexibel vervoermiddel, zonder parkeerproblemen, waarmee de snelheid van de personenauto in het lokale verkeer in vele gevallen wordt benaderd.

De aanleg van veilige en tegen weer en wind beschutte stedelijke fietspaden zou dan ook sterk dienen te worden bevorderd. Daar de gemiddelde ritafstand van de personenauto van middelgrote steden en agglomeraties resp. 2,4 km en 4,6 km bedraagt [14, p. 49] en deze afstanden als fietsafstanden zijn te beschouwen (10 à 20 minuten), behoort een verschuiving personenauto-fiets zeer wel tot de mogelijkheden.

Een tweede mogelijke verschuiving is die van de personenauto naar lopen, wellicht te bevorderen door een parkeerbeleid dat langere loopafstanden toelaat, in combinatie met de aanleg van attractieve wandelroutes. Indirect wordt hiermee tevens een mogelijke verschuiving gestimuleerd van personenauto naar openbaar vervoer. De verbetering van de kwaliteit van het openbaar vervoer (door vrije baan, hoge frequentie, comfort, gemakkelijk overstappen, e.d.) is een van de middelen om deze verschuiving te bevorderen. Vermelding verdienen voorts de potentiële mogelijkheden van de taxi, o.a. als voor- en natransportmiddel voor het lijngebonden openbaar vervoer, en de diverse mogelijke tussenvormen van bus- en taxivervoer. Ten slotte zou de trend naar steeds grotere en snellere auto's kunnen worden omgebogen door bijv. het invoeren van een belasting naar cilinderinhoud. Al deze verschuivingen kunnen worden tot stand gebracht door een overheid, die de ene vervoerswijze boven de andere begunstigt. Zij kunnen bestaan uit:

- verbetering, dan wel aanleg van infrastructuur;
- subsidie bij aanschaf en exploitatie van de meest gewenste vervoermiddelen;
- oplegging van beperkingen aan minder gewenste vervoermiddelen, zoals beperking van parkeerruimte.

Aangezien er weinig inzicht bestaat in de effecten van de diverse maatregelen, zijn gerichte experimenten bijv. in een aan te wijzen stad (of steden) van groot belang (zie ook paragraaf II.1.).

Een hypothetische verschuiving van 50% van het huidige lokale personenautovervoer naar fiets en lopen (30%), bromfiets (10%) en openbaar vervoer (10%) levert een energiebesparing van ca. 1,2% op het nationale energieverbruik.

Interlokaal vervoer

Mogelijke verschuivingen in het interlokale verkeer en vervoer zijn:

- van personenauto naar fiets, bromfiets en openbaar vervoer;
- van grote naar kleine personenauto;
- van vliegtuig naar (snelle) trein;
- van vrachtauto naar binnenschip en trein;
- van kleine vrachtauto naar grote vrachtauto mits dezelfde beladingsgraad wordt bereikt,

Ook hier zal gezocht moeten worden naar middelen die de gewenste vervoerstechnieken bevoordelen, dan wel het gebruik van minder gewenste vervoerstechnieken afremmen. Een van de mogelijkheden is een goed gecoördineerd gebruik van vervoerstechnieken, zowel in het personen- als in het goederenvervoer. Het voordeel van de grotere flexibiliteit van de personenauto en de vrachtauto kan gecombineerd worden met het voordeel van een grotere energie-efficiency van het railvervoer door gecombineerde weg-rail-vervoerssystemen (park-and-ride en kiss-and-ride voor het personenvervoer en piggy-back voor het vrachtvervoer¹)).

Een indruk van de orde van grootte van de mogelijke energiebesparingen geven de volgende hypothetische voorbeelden:

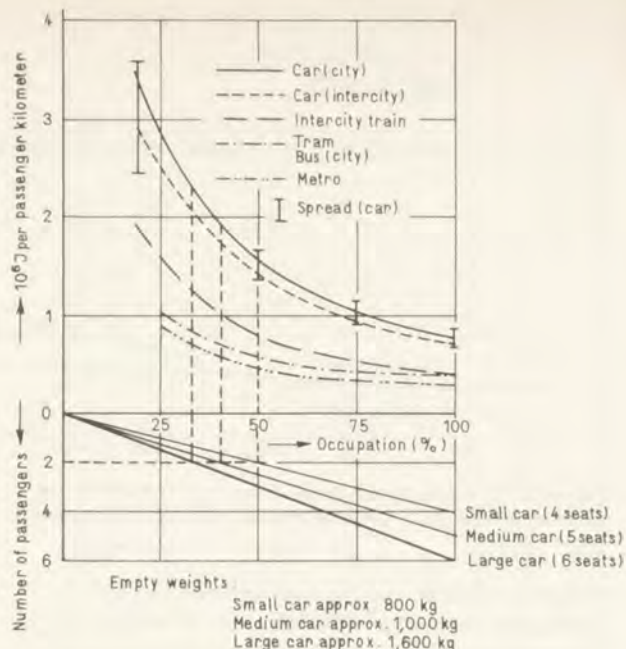
- Een verschuiving van 25% van het interlokale personenautovervoer naar fiets (2,5%), bromfiets (5%), bus (7,5%) en trein (10%) levert een energiebesparing op van ca. 0,4% op het nationale energieverbruik.
- Een verschuiving van 50% van het lange afstand-goederenvervoer (meer dan 100 km) van vrachtauto naar trein (25%) en binnenschip (25%) geeft een besparing op het nationale energieverbruik van ca. 0,2%.
- Een verschuiving van 100% van het korte afstand-passagiersluchtvervoer (tot 600 km vanaf Amsterdam, excl. overzee) naar snelle trein (ca. 200 km per uur) levert een energiebesparing van ca. 0,1% van het nationale energieverbruik.

III.1.3. Verhoging van bezettings- en beladingsgraad

Een hogere bezettings- en beladingsgraad in personenvervoer en goederenvervoer kan aanzienlijke energiebesparingen opleveren, afhankelijk van de vervoerstechniek ten koste waarvan deze verhoging wordt bereikt. In feite is een hogere bezettings- en beladingsgraad het gevolg van een verschuiving binnen een vervoerstechniek (bijv. personenautobestuurder wordt personenautopassagier) dan wel een verschuiving van de ene vervoerstechniek naar de andere (bijv. voet-

¹) Park-and-ride = systeem waarbij met de personenauto wordt gereden naar een parkeerplaats bij een halte van het openbaar vervoer aan de rand of elders in de stad, vanwaar men met openbaar vervoer naar de binnenstad of naar elders wordt gebracht.

Kiss-and-ride = identiek aan park-and-ride, met het verschil dat men met de personenauto naar de halte wordt gebracht, dan wel opgehaald bijv. met de echtgenote als bestuurster. Piggy-back = systeem waarbij de geladen vrachtauto op een trein wordt gezet voor lange ritten tussen steden. Het omgekeerde (wagon op vrachtauto) komt ook voor.



Figuur 4. Het energieverbruik per vervoermiddel per reizigerskilometer, afhankelijk van de bezettingsgraad (rechtstreeks verbruikte brandstof of door elektriciteitsopwekking verbruikte brandstof).

ganger wordt passagier van personenauto). In Fig. 4 is van enkele vervoerstechnieken het energieverbruik per reizigerskilometer weergegeven als functie van de bezettingsgraad. Door het toenemende vervoerde gewicht bij hogere bezettingsgraad neemt het energieverbruik per reizigerskilometer minder dan evenredig af met de bezettingsgraad.

De bezettingsgraad voor de personenauto in 1971 was als volgt [15]:

woon-werkverkeer	1,2 personen per personenauto
zakenverkeer	1,15 personen per personenauto
recreatieverkeer	3,5 personen per personenauto
overig verkeer	2,3 personen per personenauto

Het gewogen gemiddelde bedroeg 1,75 personen in een personenauto. Door de relatieve toeneming van de categorieën recreatie en overig verkeer is de gemiddelde bezettingsgraad gestegen van 1,49 in 1960 naar 1,75 in 1971.

Er zijn in principe een tweetal manieren om een hogere bezettings- en beladingsgraad te bereiken:

- een zelfde vervoersprestatie leveren met minder vervoermiddelen;
- een zelfde vervoersprestatie leveren met een zelfde aantal kleinere vervoermiddelen.

Een van de mogelijkheden voor verhoging van de bezettingsgraad van personenauto's is auto-pooling, waarbij autobezitters beurtelings optreden als bestuurder in bijv. het woon-werkverkeer. Auto-pooling kan worden bevorderd door:

- medewerking van de bedrijven bij het identificeren van werknemers met een vrijwel identieke vervoersbehoefte;
- het zodanig opstellen van auto-onkostenvergoedingen dat het met elkaar rijden wordt aangemoedigd;
- herziening van de aftrek van de inkomstenbelasting voor woon-werkverkeer;
- het mogelijk maken van het gebruik door personen-

auto's met hoge bezetting van vrije banen voor openbaar vervoer.

In tegenstelling tot de ervaring in Nederland tijdens de energiecrisis, blijkt auto-pooling in de V.S. plaatselijk een succes, waarbij gemiddeld 3,85 inzittenden per auto worden gemeld [16].

Aangezien het woon-werkverkeer per personenauto ruim 1% van het nationale energieverbruik vraagt, zou een verhoging van de bezettingsgraad van 1,2 naar 2,4 personen door middel van auto-pooling een besparing van ca. 0,5% opleveren. Het stimuleren van auto-pooling is strijdig met het spreiden van activiteiten in de tijd. Bovendien zal de niet in het woon-werkverkeer gebruikte personenauto gebruikt worden voor andere doeleinden (winkelen, kinderen naar school brengen, e.d.). De behoefte aan een tweede en derde auto kan hierdoor echter afnemen.

Een andere mogelijkheid voor het verhogen van de bezettingsgraad is het legaliseren van liften en de stimulering hiervan door de aanleg van speciale liftplaatsen. Aangezien het zeer de vraag is of autobezitters van deze faciliteiten gebruik zullen maken, lijkt het energiebesparende effect van een dergelijke maatregel nihil.

Een hogere beladingsgraad in het lokale goederenvervoer is afhankelijk van de plaatselijke situatie, te bereiken door de vestiging van distributiecentra aan de rand van de steden.

III.1.4. Wijzigingen in de verkeersafwikkeling

Snelheid

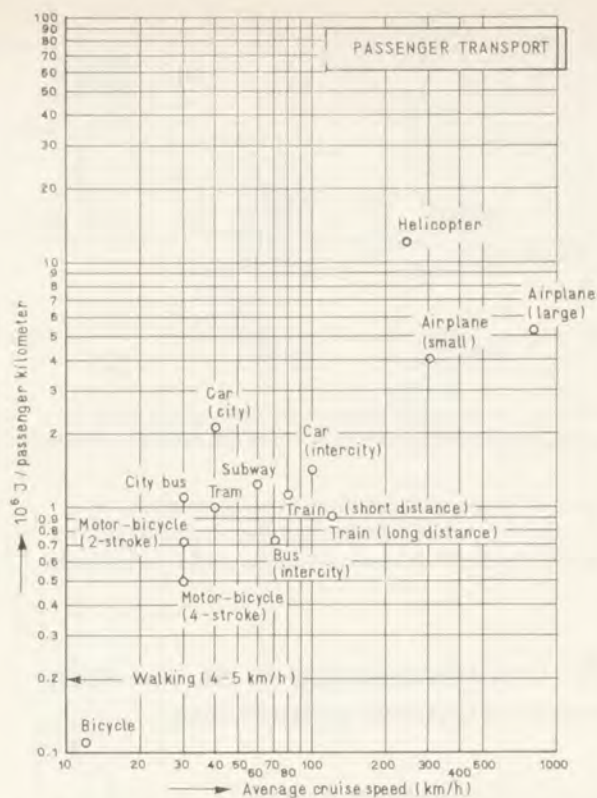
In Fig. 5 en 6 is het gemiddelde energieverbruik per reizigerskilometer resp. tonkilometer van verschillende vervoerstechnieken weergegeven als functie van de snelheid. In Fig. 7 is het energieverbruik per reizigerskilometer van een drietal klassen personenauto's weergegeven. Duidelijk blijkt dat een hogere snelheid leidt tot een hoger energieverbruik. De vraag welke waarde de samenleving hecht aan snelheid krijgt er hiermee een dimensie bij.

Het instellen van maximumsnelheden (80 km/u voor vrachtverkeer en 100 km/u voor personenauto's) op buitenwegen zal een besparing van ca. 0,5% van het nationale energieverbruik opleveren. Afgewacht moet worden wat het effect van deze maatregel is op de verkeersveiligheid. Een ander indirect effect van deze maatregel kan zijn dat het gebruik van het openbaar vervoer zal toenemen.

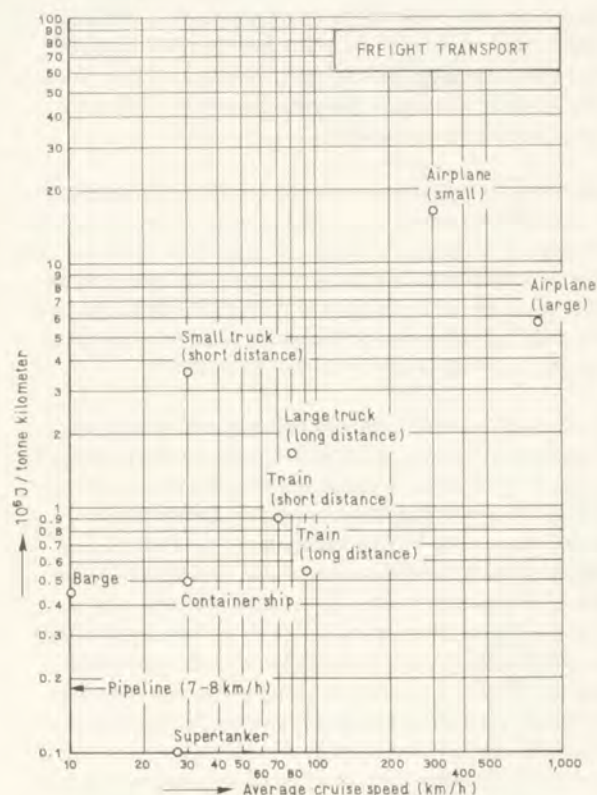
Voorts zij gewezen op het veelal rijden met koude motor (lokale personenautoverkeer op korte afstand), wat gepaard gaat met een relatief hoog energieverbruik (Fig. 7).

Overige maatregelen

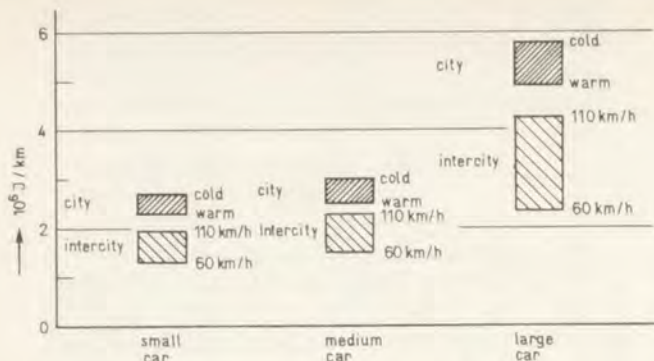
Hieronder vallen al die verkeers technische maatregelen die erop zijn gericht een vlotte verkeersafwikkeling te bevorderen, ten einde congestieverliezen te voorkomen. Te denken valt hier aan verkeerssignaling, ongelijkvloerse kruisingen, kruispuntverbeteringen, opheffen van wegversmallingen, aanleg van fietspaden, nieuwe autowegen, e.d. Nagegaan moet hier worden of het tegengaan van congestieverliezen niet de mogelijke verschuivingen genoemd onder III.1.2. zodanig tegen-



Figuur 5. Specifiek energieverbruik ten opzichte van de gemiddelde kruissnelheid (reizigersvervoer). De cijfers voor het energieverbruik zijn gebaseerd op rechtstreeks brandstofverbruik of brandstofverbruik voor opwekking van elektrische energie.



Figuur 6. Specifiek energieverbruik ten opzichte van de gemiddelde kruissnelheid (vrachtvervoer). De cijfers voor het energieverbruik zijn gebaseerd op rechtstreeks brandstofverbruik of brandstofverbruik voor opwekking van elektrische energie.



Figuur 7. Specifiek energieverbruik voor diverse klassen particuliere auto's ten opzichte van de gebruiksomstandigheden.

werken (oproepen van meer vervoer, ongewenste ruimtelijke ordening, enz.) dat het eindresultaat het energieverbruik op een ongewenst hoger peil brengt.

IV. Ontwikkelingen in de voertuig- en voortstuwingstechniek

IV.1. Historische ontwikkeling¹⁾

Alles wat tot stand komt is een resultaat van het brengen van orde in materie en energie (zie ook Hoofdstuk 1, par. IV). Deze orde bestaat uit een natuurlijke orde, die de mens 'slechts' had te ontdekken, en de daaraan toegevoegde bijdrage vanuit het menselijk ordeningsvermogen. Bij het huidige gemechaniseerde vervoer neemt de invloed van de mens een dermate indrukwekkend karakter aan dat men geneigd is te vergeten dat de door de natuur geboden bruikbare orde van fundamenteel belang blijft.

Alvorens de mogelijke bijdrage van de technologische ontwikkeling aan de energiebesparing in het verkeer en vervoer te bespreken wordt dan ook eerst geschetst van welke mogelijkheden de mens zich in de loop van de tijd heeft weten te bedienen. In Fig. 8 is gepoogd een neerslag te geven van de boeiende ontwikkelingsgang van de verkeers- en voortstuwingmiddelen.

Toen de mens voor zijn verplaatsing nog geheel was aangewezen op zijn eigen spierkracht was het medium waarop hij dit vooral tot uitwerking kon brengen het water, waarin drijvende voorwerpen gemakkelijk beweegbaar zijn. Het voortpagaaien van bundels riet, papyrus of de holle boomstam was waarschijnlijk de eerste wijze van verplaatsen waarbij de mens een geordend gebruik maakte van door de natuur geboden mogelijkheden. Voor zover bekend is dit niet ouder dan ca. 7500 jaar en relatief jong vergeleken met het beheerst gebruik van vuur dat vermoedelijk van ca. 450.000 jaar geleden dateert (Hoofdstuk 1, par. II). Enkele duizenden jaren later werd de ontdekking dat de wind op water drijvende voorwerpen kon voortbewegen in techniek omgezet: het zeilen. Het bijzondere hiervan was dat de energiebron zich geheel buiten het

verkeersmiddel bevond, een ideale omstandigheid, die pas veel later wordt geëvenaard bij verplaatsingsmethoden als het van de wal af gesleepte schip en de door middel van elektrische tractie voortbewogen trein, tram of trolleybus.

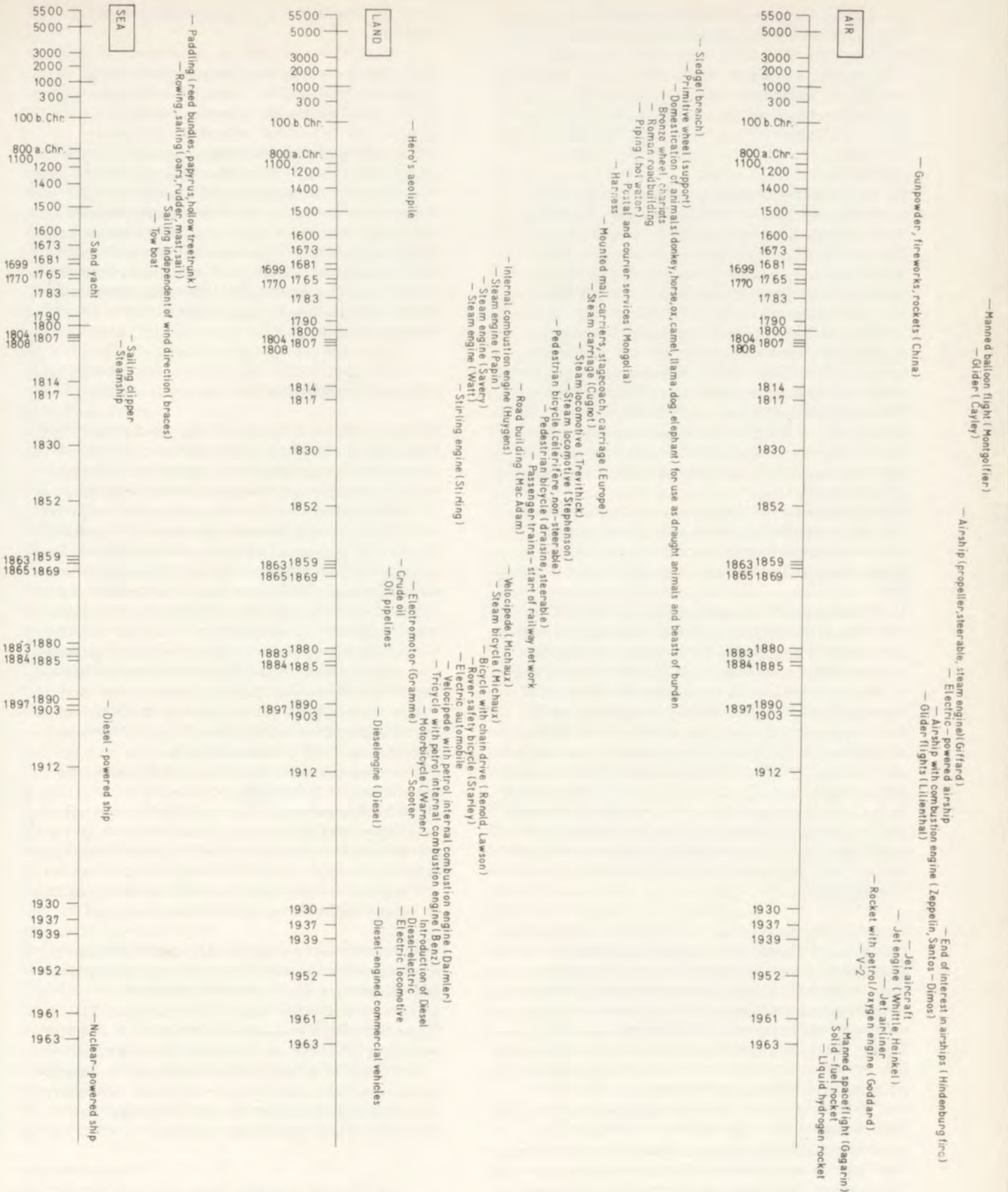
Het zeilen te land (o.a. Stevin's zeilwagen in 1600) of op het ijs is nooit verder gekomen dan recreatieve toepassingen, een lot overigens waartoe later ook het zeilen en het paardrijden bleken te zijn voorbestemd. In het begin van de zestiende eeuw kon de wereldomvattende zeilvaart ontstaan met nog wel roeibare schepen (windstille!), die zich ook in andere richtingen konden voortbewegen dan die van de windrichting door gebruik te maken van strakker gesneden zeilen scheef t.o.v. het schip (het brassen). De negentiende eeuwse klipper markeert het einde van de ontwikkeling van het zeilschip. Het zeil blijft het stoomschip nog ca. vijftig jaar van dienst, maar tegen het einde van de 19e eeuw wordt het niet meer gebruikt voor de commerciële scheepvaart.

De eerste ontwikkeling van het vervoer te land blijft achter bij die te water door de veel moeilijker terreinomstandigheden. Toch verloopt de eenmaal begonnen ontwikkeling vrijwel analoog. De eerste voortbeweging met hulpmiddelen te land is waarschijnlijk ca. 7000 jaar geleden een door een mens of dier voortgetrokken tak waarop een lading wordt vervoerd: een primitieve slee. Ongeveer gelijk met de zeilboot beschikt men over een ruw wiel voor ondersteuning van moeilijk verplaatsbare objecten. Enkele duizenden jaren later na het temmen van het paard en de vervaardiging van een bruikbaar bronzen wiel kan de (strijd)wagen ontstaan. Het trek- en lastdier bracht een elegante oplossing voor het energieprobleem: de energie wordt ontleend aan de verbranding van voedsel met behulp van zuurstof uit de omringende lucht. De alomtegenwoordigheid van de zuurstof scheidt voor het dier (en de mens!) de mogelijkheid zich vrijelijk te bewegen. Een voorbeeld van de natuurlijke orde waarvan de mens gebruik maakt en waaraan hij in het geval van het trek- en lastdier iets toevoegt: het dwingen tot gehoorzaamheid, de vinding van een effectief tuig voor het inspannen (ca. 1100, afkomstig uit Centraal-Azië) en het verzorgen van het dier tot en met het fokken. Vanaf de middeleeuwen wordt het vervoer te land beheerst door het trekdier, genoemd kunnen worden de postiljon, de diligence (het begin van openbaar vervoer) en de (privé)koets voor de adel en later ook voor de welgestelden.

De basis voor de doorbraak in de vervoerstechniek in de twintigste eeuw wordt rond 1800 gelegd door de succesvolle toepassing van de stoommachine, o.a. bij het drooghouden van kolenmijnen in Engeland. De stoommachine kan worden opgevat als een bijzonder staaltje van menselijk ordeningsvermogen: de reeds bekende energiebronnen water en vuur leveren in onderlinge samenwerking energie.

Toen men vertrouwd was geraakt met het idee dat ondanks de gladheid wielen op spoorstaven konden voortrollen (wrijving) begon via het vervoer van kolen uit de mijn de eeuw van de spoorweg (1825). Al eerder in 1770 had Cugnot zijn stoomwagen gebouwd en had Fulton in 1807 een verbaasde menigte laten zien dat een schip met afgenomen zeilen en zonder wind maar met behulp van een stoommachine zich toch kon voortbewegen, terwijl later in 1869 Michaux erin slaagde

¹⁾ Bijdrage van prof. ir. J.J. Broeze.



Figuur 8. De evolutie van de voortstuwings- en vervoerssystemen.

een kleine stoommachine op de inmiddels ontwikkelde fiets te monteren. Het is goed hierbij te bedenken dat het fundamentele principe voor het succes van het verbrandingswerktuig als aandrijving voor een verkeersmiddel niet verschilt van dat van bijvoorbeeld het lasten trekdiert: het overal ter beschikking staan van zuurstof. Dat betekent dat het verkeersmiddel zelf slechts het kleinste deel van de voor de energie benodigde stoffen hoeft mee te voeren.

De zware, massieve ketel en het benodigde toezicht waren oorzaak voor het allerwege zoeken naar andere middelen voor de mechanisering van wegvoertuigen. Men vond dit in de verbrandingsmotor waarin een aangezogen gas-luchtmengsel zijn energie op een bewegende zuiger overbrengt (o.a. Lenoir in 1852 en de viertaktmotor van A. Beau de Rochas in 1862). Al in 1673 had C. Huygens door toepassing van vuur en buskruit een zuiger in beweging gebracht. Na de ontdekking van aardolie in 1859, die eerst vooral gebruikt werd voor lampolie, duurde het tot 1885 alvorens Daimler en Benz de interne verbrandingsmotor en de aardolie als brandstof met elkaar combineerden door montage op resp. de *vélocipède* en een driewieler. Dat was het begin van de stormachtige ontwikkeling van de personenauto.

De benzinemotor liet zich ontwikkelen tot een lichte, flexibele aandrijfmotor, die zonder gevaar door een leek is te bedienen. In de voor auto's gewenste vermogens kent de benzinemotor nog steeds geen concurrent.

De benzinemotor maakt ook een snel verlopende ontwikkeling in de luchtvaart mogelijk. Het succes van de gebroeders Wright in 1903 leidt nog geen 40 jaar later tot een massale toepassing in de Tweede Wereldoorlog en tot het civiele gebruik enige jaren daarna. Wanneer hogere vermogens dan 3 MW worden gevraagd, is de benzinemotor minder geschikt. Whittle had in 1930 de straalmotor ontwikkeld die gemakkelijk vermogens van meer dan 7 MW kan leveren. Deze ontdekking geeft een optimale integratie van het energieomzettingsproces en het voortstuwingsproces: het eerste heeft de zuurstof uit de omringende lucht nodig, het tweede die omringende lucht zelf en het geheel wordt met een minimum aan mechanische middelen tot een potente voortstuwingsmachine.

De ontwikkelingen in weg- en luchtverkeer beïnvloedden op hun beurt scheepvaart en spoorwegen. Door de toenemende vraag naar lampolie en benzine bleven meer en meer zwaardere aardoliederivaten over waarvoor men afzet zocht en vond in de scheepvaart als vervanging van kolen voor het stoken van de ketels. Diesel (1897) ontwikkelde een motor die deze derivaten kon verwerken als brandstof. De dieselmotor met een hoog rendement bleek geschikt voor de scheepvaart (tot 25 MW per motor), de spoorwegen en de zware bedrijfswagens. De uit de luchtvaart voortgekomen gasturbine wordt met succes toegepast in zeeschepen, maar voor de spoorwegen bleek zij minder geschikt. Daar werd de stoomlocomotief uiteindelijk vervangen door elektrificatie. Aangezien het primaire aandrijvermogen met zijn brandstofvoorziening zich buiten de trein bevindt, ontstond een relatief snelle, lichte trein. Voorwaarde voor toepassing is een voldoende hoge rijfrequentie om de kosten van de aanleg van de bovenleiding te rechtvaardigen. Waar dit niet het geval is

wordt de dieselmotor of de dieselelektrische tractie toegepast.

Atoomenergie (scheepvaart) en raketmotoren zijn de jongste resultaten van het menselijk ordeningsvermogen op het gebied van de voortstuwingstechniek. De mogelijkheden zijn in principe bekend, evenals van de hierna te bespreken wankelmotor, gelaagde mengselmotor, gasturbine, Stirlingmotor (principe bekend sinds 1816) en elektrische auto. Dit geldt ook voor andere brandstoffen dan benzine zoals bijvoorbeeld methanol, waterstof, aardgas, enz. Het is voor de toekomst waarschijnlijk vooral van belang te weten welke mogelijkheden bij voorkeur tot verdere ontwikkeling moeten worden gebracht, de te voorziene beperkingen inzake grondstoffen, energie, milieu en ruimte in aanmerking genomen.

IV.2. Voertuigtechniek

Bij de voor de voortstuwing van een voertuig benodigde energie kan onderscheid worden gemaakt naar de diverse weerstanden die moeten worden overwonnen. Bij de beweging van voertuigen op wielen is sprake van *rolweerstand*. Deze is onder andere afhankelijk van snelheid en gewicht. Bij voertuigen op een luchtkussen of met magnetische levitatie is er ook bij stilstand energie nodig om het voertuig boven de baan te houden: een *draagenergie*, die hoewel anders van karakter, vergeleken kan worden met de rolweerstand. Deze is voornamelijk afhankelijk van het gewicht van het voertuig. De *luchtweerstand* is evenredig met het frontale oppervlak, de luchtweerstandscoefficiënt en het kwadraat van de snelheid van het voertuig. Van deze factoren is vooral de vormgeving van het voertuig slechts binnen bepaalde grenzen te beïnvloeden. De snelheid daarentegen kan vaak met grotere vrijheid worden gekozen. De *hellingweerstand* is evenredig aan het gewicht van het voertuig en de hellingshoek. De *versnellingsweerstand* bij het accelereren van het voertuig is recht evenredig aan het gewicht van het voertuig. In de praktijk worden in een gegeven situatie (snelheid, helling) de acceleratiemogelijkheden van het voertuig bepaald door de dan optredende weerstanden en het geïnstalleerde voortstuwingsvermogen.

Volledigheidshalve zij vermeld dat voor vliegtuigen en schepen soortgelijke beschouwingen kunnen worden opgezet waarin eveneens de sterke relatie tussen energieverbruik en snelheid tot uitdrukking komt. Binnen Nederland vormen alleen het subsone vliegtuig voor korte afstanden en — voor de toekomst misschien — de STOL¹⁾ en VTOL²⁾ reële mogelijkheden. Schepen zijn in Nederland alleen voor vrachtvervoer van belang, met uitzondering wellicht van de in Nederland nog niet veel voorkomende draagvleugelboot.

¹⁾ STOL = Short Take-Off and Landing

²⁾ VTOL = Vertical Take-Off and Landing

IV.2.1. Wegvoertuigen

Op normale vlakke wegen bedraagt de rolweerstand, uitgedrukt als percentage van de verticale belasting:

voor personenauto's	1,2–1,7%
voor zware bedrijfswagens	1 –1,3%

De rolweerstand is afhankelijk van de volgende factoren: *Bandspanning*. Dit is een belangrijke factor. De rolweerstand bij 2 bar kan 50–80% hoger zijn vergeleken met een bandspanning van 3 bar.

Bandconstructie. Radiaalbanden hebben door de grotere stijfheid van het loopvlak, en daardoor kleinere vervormingen, een lagere rolweerstand dan diagonaalbanden. De verlaging ligt in de orde van grootte van 5 tot 10%. Van de Nederlandse personenauto's is momenteel ca. 75% en van de vrachtauto's en bussen ca. 70% met radiaalbanden uitgerust. De besparingsmogelijkheden zijn gering, aangezien om technische redenen niet alle voertuigen van radiaalbanden kunnen worden voorzien.

Snelheid. De rolweerstand is vrijwel onafhankelijk van de rijnsnelheid tot ca. 80 km/uur voor diagonaalbanden en tot ca. 120 km/uur voor radiaalbanden. Daarboven begint de rolweerstand progressief toe te nemen. Bij 100 km/uur bedraagt de rolweerstand ongeveer 25% van de totale rijweerstand van personenauto's en bij zware bedrijfswagens bedraagt de rolweerstand bij 80 km/uur ongeveer 45% van de totale rijweerstand.

Wegdek. Op normale wegen is de invloed van het type wegdek op de rolweerstand gering. De rolweerstand op zeer slechte wegen kan uiteraard toenemen en op zandwegen kan de rolweerstand erg hoog worden.

Loopvlak rubbercompound. Deze invloed kan groot zijn. Het rubber toont hysteresisverliezen, die rolweerstand veroorzaken. In het algemeen blijkt, dat de rubbersoorten met hogere hysteresis een beter slipgedrag vertonen, maar een hogere rolweerstand bezitten dan loopvlakrubbers met lage hysteresis. Bij vrachtwagenbanden moet men in verband met de hoge belastingen en dikke rubberlagen een compound toepassen, die geringe hysteresis heeft. Dit om een overmatige warmteontwikkeling en een aantasting van de sterkte van de band te voorkomen.

De rolweerstandscoëfficiënten van truckbanden zijn dan ook lager, evenals de slipweerstand, vergeleken met personenwagenbanden.

Belasting. De rolweerstand zal ongeveer evenredig met de belasting toenemen. Vermindering van belasting (en dus ook van gewicht) is derhalve gunstig uit een oogpunt van energiebesparing. De ontwikkeling van personenauto's in de richting van grotere veiligheid zal een relatieve gewichtsvermeerdering met zich brengen, zodat geen aanmerkelijke besparingen op dit punt worden verwacht.

Slijtage. Een versleten band zal in het algemeen een iets geringere rolweerstand bezitten.

Luchtweerstand

Bij personenauto's ligt de luchtweerstandscoëfficiënt bij normale carrossievormen tussen 0,3 en 0,5. Door vormverandering is hierin weinig verbetering mogelijk omdat in het ontwerp vele andere factoren een rol spelen. Voor vrachtauto's en autobussen zijn de mogelijkheden tot verbetering nog veel geringer doordat de vormgeving grotendeels wordt bepaald door de wette-

lijk vastgestelde maximale afmetingen en de daarbinnen te realiseren laadcapaciteit. De luchtweerstandscoëfficiënten liggen hier in de orde van 0,8 à 1,1. Het spreekt vanzelf dat uit een oogpunt van energiebesparing bij het ontwerpen van vervoermiddelen gestreefd moet worden naar een zo laag mogelijke waarde van de weerstandscoëfficiënt.

Acceleratieweerstand

Naarmate een auto een groter geïnstalleerd vermogen heeft bij gelijkblijvend gewicht is de bereikbare acceleratie groter. Sterke acceleratie vraagt meer vermogen dan geringe. Vermindering van het geïnstalleerd vermogen, waardoor de motor gemiddeld zwaarder belast wordt, leidt tot verbetering van het rendement (dus tot een besparing van energie). Op de buitenweg zal de auto echter snel moeten kunnen passeren, waardoor aan het geïnstalleerd vermogen i.v.m. veiligheid een ondergrens is gesteld. In het stadsverkeer treedt veelvuldig vertraging en versnelling op. Het brandstofverbruik in stadsverkeer kan 50 à 100% hoger liggen dan bij een constant volgehouden snelheid van 50 km/uur, zodat een verkeersafwikkeling met een zo gelijkmatig mogelijke snelheidsverdeling een bijdrage tot energiebesparing kan leveren. Het verkrijgen van een gelijkmatige snelheidsverdeling van wegvoertuigen in het stadsverkeer vindt zijn grenzen in de eisen die gesteld worden aan de gebouwde omgeving en in (verkeers-) technische en economische overwegingen. Het verschijnsel van stilstaande vervoermiddelen, wachtende voor verkeerslichten en in verkeersopstoppingen (in Tokio wordt naar schatting gemiddeld 1/3 deel van de tijd die een auto in het stadsverkeer doorbrengt aan wachten besteed) zal daarom blijven optreden. In Japan heeft de erkenning van dit feit geleid tot de ontwikkeling van het 'engine automatic stop and starting'-systeem dat automatisch de motor doet stoppen als het voertuig tot stilstand is gekomen en laat starten door indrukken van koppeling en gaspedaal [17].

Invloed van de rijnsnelheid

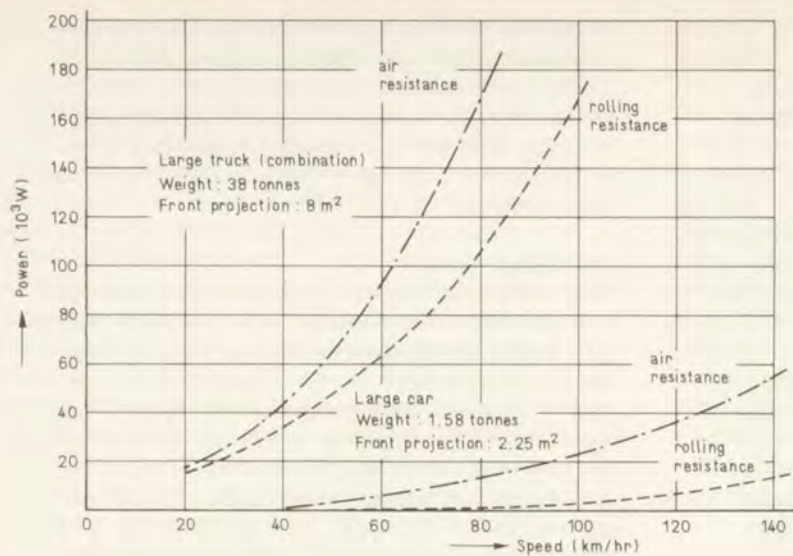
De luchtweerstand neemt kwadratisch toe met de snelheid. Door de progressieve toename van de rolweerstand voor snelheden boven de 80 en 120 km/uur neemt het specifieke energieverbruik bijna kwadratisch toe met de snelheid (zie Figuur 9).

Een belangrijke besparing kan worden bereikt door een betere naleving van de wettelijk vastgestelde maximumsnelheid van 80 km/uur voor vrachtauto's¹⁾ en door het instellen van een maximumsnelheid voor personenauto's van bijvoorbeeld 100 km/uur. De totale besparing zou ca. 0,5% van het nationale energieverbruik kunnen opleveren.

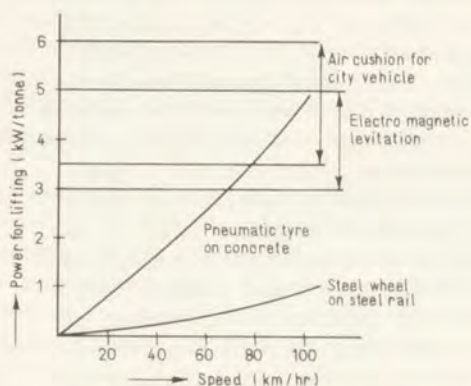
IV.2.2. Railvoertuigen

Voor railvoertuigen gelden mutatis mutandis dezelfde beschouwingen over de diverse weerstanden als voor wegvoertuigen. Er blijkt evenwel een uit een oogpunt

¹⁾ Als alle 15.000 vrachtautocombinaties in Nederland een snelheid van 80 km/uur aanhouden, zal 167 miljoen liter dieselolie per jaar kunnen worden bespaard (Test NOB-Wegtransport, december 1973); dit komt overeen met ruim 0,2% van het nationale energieverbruik.



Figuur 9. Het vermogen benodigd voor het overwinnen van de lucht- en rolweerstand van personenauto's en vrachtauto's als functie van de snelheid.



Figuur 10. Rolweerstand of draagenergie voor verschillende draagtechnieken in voor stadsvoertuigen relevante snelheden.

van energieverbruik typerend verschil te bestaan tussen *rijtuigen* en *zweeftuigen*. Bij eerstgenoemde is de benodigde rolweerstand afhankelijk van de snelheid en bij stilstand dus nul (de rolweerstand van stalen wielen op een stalen rail is een factor 5 minder dan die van luchtbanden op een goed wegdek). In het tweede geval is het voor dragen benodigde vermogen praktisch constant. Aangezien de overige weerstanden afhankelijk zijn van voertuiggewicht of -snelheid, zal er een 'break even'-snelheid zijn (afhankelijk van de rolweerstandkarakteristiek van het rijtuig en het voor dragen benodigde vermogen van het zweeftuig). Boven deze grens vraagt het zweeftuig en daaronder het rijtuig de minste energie (Figuur 10).

Het acceleratievermogen en de dienstnelheid van railvoertuigen kunnen nauwelijks worden beïnvloed met het oogmerk energie te besparen. Beide worden namelijk bepaald door het feit dat op een vaste baan volgens een dienstregeling *moet* worden gereden wil men een optimale service en veiligheid aan reizigers en vrachtagenten bieden. Mede door de vrije baan en de mogelijkheid van het laten uitlopen van de trein bij het stoppen (coasting) is het energieverbruik gunstig ten opzichte van andere landtransporttechnieken.

IV.2.3. Nieuwe vormen van stedelijk vervoer

Het personenverkeer ondergaat in alle geïndustrialiseerde landen een turbulente ontwikkeling. De omvang van dit verkeer neemt toe. Door deze groei en door het feit dat de keuze van het vervoermiddel in toenemende mate op de personenauto valt, wordt, vooral in stedelijke gebieden, de alom bekende verkeersproblematiek van congesties, parkeerperikelen, onveiligheid en velerlei andere invloeden op ons leefmilieu opgeroepen. Naast maatregelen om in de bestaande vervoerssystemen dit ongerief te verminderen, o.a. door opvoering van de vervoersprestatie en door uitbreiding van de capaciteit, worden nieuwe vervoersvormen ontwikkeld, gericht op het bieden van vervangende en/of aanvullende vervoermogelijkheden.

Gedurende de laatste jaren zijn talrijke nieuwe stedelijke vervoersvormen gepresenteerd waarin een eerste indeling kan worden gemaakt naar de aard van de geleiding. Men kan onderscheiden de vrije routekeuze op de weg, het spoorgebonden verkeer en een mengvorm van beide (dual-mode).

Vrije routekeuze

Hieronder vallen o.a. de telefoonbus en de witkar. Bij deze vormen van vervoer wordt gebruik gemaakt van autobus, personenauto of langzaam rijdende elektromobiel. Ten aanzien van het energieverbruik en de mogelijkheden tot energiebesparing wordt verwezen naar hetgeen daarover in volgende paragrafen wordt vermeld.

Spoorgebonden verkeer

Voorbeelden hiervan zijn: rollend trottoir, automatisch geleide cabines op luchtbanden, op luchtkussens of met magnetische levitatie. Over energieverbruik en vervoersprestatie van deze voertuigen zijn nagenoeg geen praktijkcijfers bekend, zodat met kwalitatieve aanduidingen op basis van de kenmerken moet worden volstaan.

Continu vervoer. Deze vorm, waartoe het rollend trottoir en de kleine cabines kort na elkaar op een ket-

ting behoren, komt alleen in aanmerking voor speciale verbindingen met grote verkeersdichtheid over korte afstanden (2 km). Aangezien dit vervoer grotendeels de plaats inneemt van het voetgangersverkeer, is hier van energiebesparing geen sprake. Integendeel.

Automatisch personenvervoer (Personal Rapid Transit). Dit zijn kleine cabines voor 2 à 4 personen, die op een uitgebreid netwerk automatisch en zonder stoppen naar een opgegeven bestemming bewegen. Het systeem is gericht op vervanging van de personenauto waar deze te veel schaarse ruimte in beslag zou nemen. Daarom zal het vooral in dicht bebouwde stedelijke gebieden tot zijn recht komen. Het energieverbruik zal slechts dan gunstiger zijn dan dat van de personenauto indien voor het gehele systeem een bezettingsgraad van 25–30% kan worden bereikt (zie Figuur 11).

Lijngebonden cabinevervoer. Dit systeem bestaat uit cabines, hangend aan of staand op een eigen infrastructuur, en volautomatisch opererend langs vaste lijnen die de stadscentra verbinden met de woongebieden. De afstanden tussen de stations bedragen 400 à 800 m. Deze vorm is in principe equivalent aan het bestaande openbaar vervoer, maar dan met een aanzienlijk opgevoerd serviceniveau en rijcomfort. Uit Figuur 10 blijkt dat toepassing van nieuwe draagvormen, zoals luchtkussens of magnetische levitatie, bij de gangbare snelheden in het stedelijk vervoer zeker geen energiebesparing bieden temeer omdat bij deze nieuwe draagvormen uit praktische overwegingen de lineaire inductiemotor als aandrijving zal worden gebruikt. Dit motortype heeft een lager rendement dan de normale roterende elektromotor.

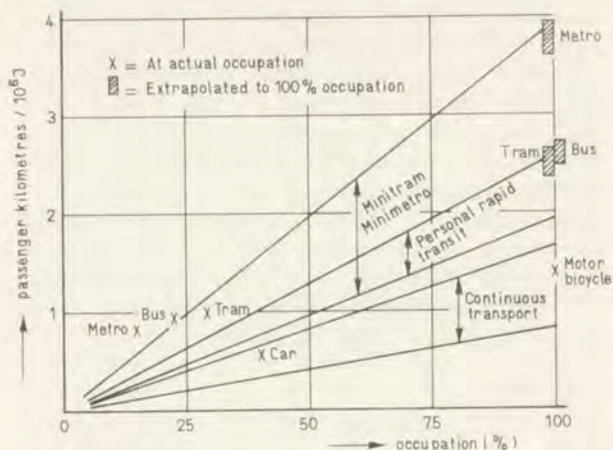
Dubbel systemen (Dual-mode systems)

De vervoermiddelen kunnen bij dit systeem gebruik maken zowel van de weg (vrije routekeuze) als van een netwerk (spoorgebonden, beperkte routekeuze). In tegenstelling tot de hiervoor beschreven systemen die geïndividualiseerde collectieve vervoerssystemen genoemd kunnen worden is hier meer sprake van een gecollectiveerd individueel vervoerssysteem. Zowel personenauto's als kleine bussen en lichte vrachtwagens zouden van het systeem gebruik kunnen maken. Als aandrijfbron worden genoemd de verbrandingsmotor en de elektromotor met uitwendige stroomrail en/of boordaccu's, dan wel een combinatie van beide. Naar verwacht zal dit systeem niet vóór 1980 operationeel kunnen worden. Wat betreft het energieverbruik kunnen de personenvervoertuigen vergeleken worden met de eerder genoemde, zodat uit het oogpunt van energiebesparing geen extra voordelen zijn te verwachten.

Vergelijking van nieuwe en bestaande vormen van stedelijk vervoer

Een vergelijking ten aanzien van het energieverbruik is gegeven in Figuur 11. De hiervoor bepalende factor, namelijk de bezettingsgraad, is onbekend en daarom als variabele ingevoerd. Het blijkt dat de nieuwe vormen van stedelijk vervoer niet zonder meer zuiniger met energie zijn dan het huidige openbare vervoer. Slechts als, onder meer door het hogere serviceniveau, de bezettingsgraad toeneemt, zullen deze nieuwe ontwikkelingen in dit opzicht voordelig kunnen worden. Overigens moet er met nadruk op worden gewezen dat

deze figuur, wegens het ontbreken van praktijkcijfers, slechts indicatieve waarde heeft.



Figuur 11. Rendement in reizigerskilometers per 10^6 J voor bestaande en nieuwe vormen van stedelijk vervoer, afhankelijk van de bezettingsgraad (rechtstreeks verbruikte brandstof of door opwekking van elektriciteit verbruikte brandstof).

IV.3. Voortstuwingsstechniek

IV.3.1. Wegvoertuigen

Bromfiets

De in de bromfiets gemonteerde krachtbron is momenteel vrijwel uitsluitend een éencylinder tweetaktmotor met krukkastspoeling en mengsmering met een brandstofverbruik van 1 liter per 40 à 45 km. Dit komt neer op een energieverbruik van ca. $0,7 \times 10^6$ J per reizigerskilometer. Hierin zou op betrekkelijk korte termijn (enkele jaren) verbetering kunnen worden gebracht door o.a. betere carburatie en betere spoeling. Bij handhaving van de huidige cylinderinhoud kan het energieverbruik met 25 à 30% worden vermindert. De viertaktmotor, die thans een ca. 25% lager brandstofverbruik heeft dan de tweetaktmotor, zou met verbeterde carburatie nog eens 15 à 20% minder brandstofverbruik kunnen hebben. Door verbetering van de motoren en overgang van tweetakt- op viertaktmotoren zou een brandstofbesparing van ca. 40% mogelijk zijn. Dat zou dan resulteren in een energieverbruik van $0,4 \times 10^6$ J per reizigerskilometer, een verhoging van de aanschaffingsprijs met f 50,- à f 100,- en een veelvuldiger, nauwkeuriger en dus duurder onderhoud.

Het huidige brandstofverbruik van bromfietsen bedraagt ca. 100.000 ton per jaar, dat is 2% van het totale motorbrandstofverbruik. Daar is met de genoemde maatregelen een besparing van ca. 40.000 ton per jaar op mogelijk. Dit komt neer op iets minder dan 1% van het huidige totale verbruik van motorbrandstof. Een belangrijk aspect bij de verdere ontwikkeling van bromfietsmotoren is de luchtverontreiniging. Vermindering van het brandstofverbruik zal tevens een vermindering van de emissie van schadelijke uitlaatgassen tot gevolg hebben, mits echter op dit punt geen extreme eisen worden gesteld. Het is daarom van belang dat het gekunstelde pakket van technische eisen waaraan de bromfiets thans moet voldoen, zodanig wordt herzien dat motorconstructies mogelijk worden die uit een oogpunt van

brandstofverbruik, milieuverontreiniging en lawaai-hinder optimaal zijn.

Aangezien een bromfiets weinig vermogen heeft en bovendien een relatief groot aantal bromfietsen alleen voor korte afstanden (gemiddeld 2 à 3 km) wordt gebruikt, heeft de ontwikkeling van de elektrische stadsbrommer (zoemfiets) mogelijk een kans. Hij produceert geen uitlaatgassen, is dus schoon en bovendien geruisloos. Momenteel is de prijs zeer hoog en het zal nog moeten blijken of de leek-gebruiker een levensduur van de batterij weet te bereiken die een economisch acceptabele exploitatie mogelijk maakt. Het totale rendement, gerekend van de brandstof in de elektriciteitscentrale af, wordt geschat op ca. 20%, hetgeen in dezelfde orde van grootte ligt als de huidige tweetaktbromfiets.

Personenauto

De huidige personenauto neemt ongeveer 50% van het verbruik van motorbrandstoffen voor haar rekening. Verreweg het grootste deel van de personenauto's is voorzien van de conventionele benzinemotor. Er zijn betrekkelijk geringe aantallen die resp. op gas lopen (LPG = liquefied petroleum gas), met een draaizuiger-motor of met een dieselmotor zijn uitgerust.

Conventionele benzinemotor. De hoge verbrandingswaarde (ca. $48 \times 10^6 \text{ J/kg}$) van benzine en het grote specifieke vermogen van de benzinemotor (ca. 500 W/kg) maken een gunstige verhouding mogelijk tussen de nuttige lading en het voertuiggewicht. Het rendement van de benzinemotor in Nederland bedraagt gemiddeld ca. 25%. Door verbeterde carburatie en andere technische maatregelen is dit rendement nog wat te vergroten. Bij lage belasting daalt dit rendement echter aanzienlijk. Invoering van de Amerikaanse milieu-eisen in Europa zou een aanzienlijke daling van het rendement (tot ca. 20%) tot gevolg hebben.

Conventionele motor op LPG of aardgas. Door de zwaardere en grotere hogedruktank bedraagt het specifieke vermogen van deze motor ca. 300 W/kg. Het rendement van de motor is ongeveer gelijk aan dat van de conventionele benzinemotor. Door de veel schonere verbranding is er echter minder reiniging van het uitlaatgas nodig en het daarmee samenhangend rendementsverlies zou dus minder zijn dan dat bij de benzinemotor.

Draaizuigermotor. (Wankelmotor) Thermodynamisch is deze te vergelijken met de conventionele benzine-motor. Het rendement ligt echter aanmerkelijk lager, o.a. door de ongunstiger vorm van de verbrandingskamer. De Wankelmotor heeft, in vergelijking met de conventionele benzinemotor, nog een aantal technische nadelen die een snelle opmars onaannemelijk maken. Uit het oogpunt van energiebesparing is de Wankelmotor in elk geval geen vooruitgang.

Benzinemotor met gelaagde vulling. ('stratified charge' motor). In deze motor wordt de vulling van de cilinder zodanig geregeld dat de ontsteking plaatsvindt in een gas-luchtmengsel dat rijker aan brandstof is dan in de rest van de cilinder. De gemiddelde mengverhouding is daardoor armer dan bij de conventionele benzine-motor, zodat het brandstofverbruik lager en het rendement, vooral bij gedeeltelijke belasting, hoger (ca. 30%) is. Het specifieke vermogen is gelijk aan dat van de

conventionele benzinemotor en de uitlaatgassen zijn aanmerkelijk schoner. Deze motor betekent dus een in diverse opzichten interessante ontwikkeling.

Personenauto's met benzinemotoren hebben, afhankelijk van de bezettingsgraad (in Nederland gemiddeld 40%), het rittype (stad of buitenweg), het gewicht van de auto, het motorvermogen en de rijstijl, een energieverbruik tussen 0,7 en $4,4 \times 10^6 \text{ J}$ per reizigerskilometer (zie Tabel 3). In Nederland bedraagt dit gemiddeld $1,8 \times 10^6 \text{ J}$ per reizigerskilometer. Door hun gunstige eigenschappen qua prijs, gewicht, volume en geluid zullen de conventionele benzinemotor, de motor met gelaagde vulling en, in mindere mate, de draaizuiger-motor zeer aantrekkelijk blijven, resp. worden voor de aandrijving van personenauto's. Het is daarbij van groot belang dat de eisen ten aanzien van de uitlaatgassen mede worden bepaald met het oog op het energieverbruik.

Dieselmotor. Het specifieke vermogen van de dieselmotor (350 à 250 W/kg) ligt 30 à 50% lager dan dat van de benzinemotor, zodat hij voor inbouw in personenauto's relatief groot en zwaar is. Bij dieselmotoren in personenauto's wordt daarom bewust een kleiner vermogen en een lager prestatieniveau gekozen. De dieselmotor heeft het hoogste rendement van alle bekende automotoren, namelijk 35–38%, en dit wordt slechts weinig verlaagd door reiniging van het uitlaatgas (het rendement wordt dan 32–35%). Door een overgang van conventionele benzinemotoren (rendement 25%) op dieselmotoren zou derhalve een brandstofbesparing van ca. 40% te bereiken zijn. Een volledige omschakeling van het motorvoertuigenpark op dieselmotoren zou derhalve een besparing van ca. 2% van het nationale energieverbruik opleveren¹⁾.

Het ligt in de verwachting dat dieselmotoren met een relatief geringer gewicht en volume kunnen worden ontwikkeld. Verder kunnen nadelen als geluid en trilling door technische verfijningen worden opgeheven. De hogere prijs van de dieselmotor zal echter wel een nadeel blijven. Uit overwegingen van energiebesparing zou de ontwikkeling van dergelijke dieselmotoren voor personenauto's krachtig moeten worden gestimuleerd.

Motoren met uitwendige verbranding. (stoommachine en Stirlingmotor). De stoommachine (Rankine cyclus) heeft een laag rendement (ca. 15%). Aangezien er aan een motor van dit type nog meer praktische bezwaren zijn verbonden (lange starttijd, groot volume) lijkt deze onaantrekkelijk voor de aandrijving van personenauto's. De Stirlingmotor heeft potentieel een even hoog rendement als de dieselmotor. Andere potentiële voordelen zijn het lage geluidsniveau, geen of weinig luchtverontreiniging en de onafhankelijkheid van aardolieproducten als brandstof. De ontwikkeling van deze motor is nog volop aan de gang en wanneer bestaande nadelen ten opzichte van de dieselmotor (o.a. de minder goede regelbaarheid, de veel hogere prijs en het lage specifieke vermogen) kunnen worden opgelost, lijkt ook de Stirlingmotor een aantrekkelijke aandrijving voor de personenauto.

¹⁾ De dan noodzakelijke verandering in de verwerking van ruwe olie op de raffinaderijen zal belangrijk zijn en zal mede in de overwegingen moeten worden betrokken.

De vrachtauto en de autobus

De vrachtauto, met uitzondering van de kleine bedrijfsauto, en de autobus zijn in Nederland vrijwel alle voorzien van een dieselmotor. Aangezien de dieselmotor van alle huidige motoren het hoogste rendement heeft, zal deze dan ook vrijwel zeker de standaardaandrijving blijven vormen. Geluid en uitlaatemissie zijn aanmerkelijk te verbeteren zonder veel nadelige invloed op het rendement. Dit zou kunnen worden aangemoedigd door adequate wettelijke eisen, gekoppeld aan een verbetering van de wetshandhaving.

Voor de motoren met uitwendige verbranding gelden dezelfde opmerkingen als bij de personenauto. Aanvullend dient nog de gasturbine te worden vermeld. Deze kan bij vollast theoretisch een even hoog rendement bereiken als de dieselmotor (ca. 35%). Hiertoe dient dan wel een warmtewisselaar van klein volume en lange levensduur te worden ontwikkeld. Bij lagere belasting ligt het rendement van de gasturbine ongunstiger. Gasturbines met een vermogen lager dan ca. 300 kW vereisen relatief nauwe toleranties bij de vervaardiging. Dit, samen met de minder snelle regelbaarheid, maakt dat toepassing in andere dan grote voertuigen voorlopig niet te verwachten is.

Elektrische aandrijving voor wegvoertuigen

De hiervoor beschreven aandrijffaggregaten gebruiken aardolieproducten als brandstof. Daar de aardolievoorraden bij voortgang van de huidige toeneming in het verbruik snel minder zullen worden, is het van belang na te gaan of andere aandrijvingen voor gebruik in wegvoertuigen in aanmerking komen.

Afgezien van energietoevoer van buitenaf (zoals bij de trolleybus) is het enige systeem dat thans reeds een zekere ontwikkeling heeft doorgemaakt de elektrische aandrijving waarbij de energie in een accubatterij wordt meegevoerd. Het verst is momenteel de lood-zwavelzuuraccu ontwikkeld. Zijn specifieke energie ligt in de orde van $0,10 \times 10^6 \text{ J/kg}$; het specifieke vermogen ligt in de orde van grootte van 40 W/kg (dat is resp. 1% en 10% van dat bij de conventionele benzinemotor).

Het rendement van deze vorm van aandrijving is, met inbegrip van de opwekking van de elektriciteit in een centrale, ca. 15%. Dat is onder bepaalde omstandigheden (o.a. stadsverkeer) vergelijkbaar met dat van de conventionele benzinemotor. Bij de in ontwikkeling zijnde snelle stadsbus, -bestelwagens en -personenauto's en bij de reeds bestaande langzame bezorgingsvoertuigen wordt het rendement ca. 20%, (ondanks de hogere rolweerstand tengevolge van het hoge gewicht) omdat:

- tijdens stilstand geen stroom wordt verbruikt;
- de remenergie grotendeels kan worden teruggewonnen (besparing ca. 10%).

De ontwikkeling van deze voertuigen is vanuit het gezichtspunt van energiebesparing niet ongewenst. Overigens is de reeds aan de gang zijnde ontwikkeling van deze voertuigen gebaseerd op het feit dat zij geen enkele verontreiniging in het stadsmilieu teweeg brengen en weinig geluid maken. De energiebesparing alleen zou immers ook kunnen worden verkregen wanneer de door de batterij veroorzaakte beperkingen eveneens zouden worden aanvaard voor een auto met conventionele benzinemotor. Die zou dan namelijk ca. 30% lichter kunnen worden.

Of de invoering van snelle batterij-stadsvoertuigen

economisch haalbaar zal zijn, hangt onder andere af van:

- de bereikbare levensduur van de batterijen;
- het geringe laadvermogen van de voertuigen;
- de beperkte actieradius van de voertuigen;
- het eenvoudig verwisselbaar zijn van de batterij en het beschikbaar zijn van een netwerk van batterij-servicestations;
- de mogelijkheid om de hoge investeringskosten op te brengen;
- fiscale voorrechten ten opzichte van voertuigen met verbrandingsmotoren.

Het is niet uitgesloten dat na 1985 de natrium-zwavelbatterij of een ander type met hoge energiedichtheid tot produktierijpheid zal zijn gekomen. Indien de energiedichtheid van de stroombron ca. tienmaal groter zou worden dan bij de loodaccu, worden laadvermogen en de actieradius aanzienlijk verbeterd.

Bij de huidige stand van zaken is niet te voorzien of en wanneer een brandstofcellenbatterij met een energiedichtheid en een specifieke energie in dezelfde orde van grootte als bij de verbrandingsmotor produktierijp zou kunnen worden.

Een hybride aandrijving (een kleine motor met inwendige verbranding, aangevuld met een kleine batterij of vliegwiel en een elektromotor voor energie-absorptie en -suppletie) maakt een verhoging van het effectieve rendement met ca. 30% t.o.v. de inwendige verbrandingsmotor mogelijk. De noodzakelijke technische ontwikkeling en de hoge produktiekosten maken een snelle doorbraak van dit aandrijfsysteem niet waarschijnlijk.

IV.3.2. Railvoertuigen

Huidige voortstuwingstechnieken

Het vervoer door middel van een bijeenbehorend stelsel van voertuigen en een daartoe bestemde baan die behalve een dragende, ook een geleidende functie heeft kent in beginsel diverse uitvoeringsvormen.

In Nederland wordt momenteel uitsluitend de vorm met stalen spoorstaven en stalen wielen toegepast en wel als tram, metro en trein. De voortstuwing is daarbij steeds elektrisch en wel op twee manieren:

- volelektrisch, waarbij de tractiemotoren elektrische energie ontvangen die d.m.v. stroomafnemers continu van buiten af wordt toegevoerd;
- dieselelektrisch, waarbij de elektrische energie aan boord wordt opgewekt met een dieselaggregaat.

Afhankelijk van motortype en vermogensregeling, hebben de tractiemotoren met de daarbij behorende transmissie een rendement van 80 à 90%. Het totale rendement van de volelektrische tractie bedraagt ca. 27% gerekend van de brandstof in de elektriciteitscentrale tot aan de trekhaak. Het totale rendement van de dieselelektrische tractie bedraagt eveneens ca. 27%, gerekend van de dieselbrandstof tot aan de trekhaak. Beide voortstuwingswijzen zijn technisch ver ontwikkeld en er zijn dan ook geen aanmerkelijke verbeteringen te verwachten.

De maximumsnelheid van de trein wordt bepaald door de vervoersfunctie (reizigers/goederen; internationaal/nationaal; intercity; stadsgewestelijk, enz.) en eventueel door de combinaties van vervoersfuncties, die op dezelfde infrastructuur moeten worden vervuld.

De trappen in de maximumsnelheid: 120, 160, 200, 250 km/uur en hoger worden o.m. bepaald door stijgende kosten van de infrastructuur, de trasering van de baan, de mogelijkheden van de energievoorziening, het comfort van de reizigers, de onderhoudskosten van de baan en van het rollend materieel. Voor goederentreinen zal de maximumsnelheid 120 km/uur zijn, in uitzonderingsgevallen 140 km/uur. Voor reizigers-treinen 200 tot 250 km/uur in de landen met grote afstanden (in ons land 160 km/uur), met waarschijnlijk een doordringen in het snelheidsgebied van 250 tot 300 km/uur.

Alhoewel nog geenszins vaststaat waar de maximumsnelheidsgrens van het huidige tweerail-systeem zal liggen, is het niet uitgesloten, dat andere technieken, zoals bijv. optil- of zweeftechnieken, tot ontwikkeling zullen komen. Alvorens echter het pad van een waarschijnlijk per reizigerskilometer zeer hoog energie-verbruik te gaan, zal eerst de vraag moeten worden beantwoord of er tussen de snelle trein en de intra-europese luchtbus de behoefte zal bestaan aan een nieuwe vervoerstechniek.

Zowel voor de nieuwe technieken, als voor de hoge snelheden bij de trein (350 km/uur en hoger) geldt, dat er nog onvoldoende kennis is van bijv. aerodynamische instabiliteitsverschijnselen, exponentieel toenemende luchtweerstand en daardoor toenemend energieverbruik. In verband daarmee is invoering op grote schaal binnen de komende 10 à 15 jaar niet te verwachten.

Nieuwe voortstuwingstechnieken

Gasturbine-elektrische aandrijving. Deze wordt vanwege het geringe gewicht en volume per geïnstalleerd vermogen momenteel toegepast in de zeer snelle treinstellen die onder meer in Noord-Amerika en Europa ontwikkeld zijn. Door het minder gunstige deellastrendement van de gasturbine is het totale rendement lager dan bij dieselelektrische tractie, nl. ca. 20%.

Lineaire inductie-motor. Deze zal vooral in combinatie met elektro-magnetische draag- en geleidingssystemen worden toegepast. Het rendement van de lineaire motor wordt geschat op 40 à 60%, afhankelijk o.a. van de grootte van de luchtspleet en van de pool-modulatie. Vooral nog is deze voortstuwing qua energieverbruik dan ook sterk in het nadeel ten opzichte van aandrijving met conventionele elektromotoren. De lineaire *synchrone* motor kan een rendement leveren van 50 à 95%. De verwachting is echter dat deze pas na 1985 produktierijp zal worden.

V. Conclusies

V.1. Indirecte beïnvloeding van het verkeer en vervoer

1. Het aanmoedigen van de energiebewustheid t.a.v. het vervoer door o.a.:
 - de bevolking bij het tot stand komen van plannen voor ruimtelijke ordening en voor verkeer en vervoer te betrekken;
 - bevordering van de ontwikkeling en het gebruik van

- kleine, minder snelle en/of met bescheidener vermogen uitgeruste personenauto's;
- gebruik te maken van het prijsmechanisme.
- 2. Toetsing van plannen voor ruimtelijke ordening en voor verkeer en vervoer op bijv. de volgende factoren:
 - een zodanige situering van elkaar beïnvloedende activiteiten dat een minimum aan vervoer wordt opgeroepen;
 - bereikbaarheid van woningen, bedrijven en voorzieningen door energie-efficiënte vervoermiddelen zoals fiets, lopen, bromfiets en openbaar vervoer;
 - bebouwingsdichtheid.
- 3. Onderzoek- en ontwikkelingsprojecten zijn gewenst o.a. op de volgende gebieden:
 - de achtergronden van de behoefte aan vervoer;
 - de mogelijkheden en beperkingen van telecommunicatiemiddelen als vervanging voor verkeer en vervoer;
 - de mogelijkheden en beperkingen van spreiding van activiteiten in de tijd;
 - de mogelijkheden, beperkingen en gevolgen van ingrepen in het verkeer en vervoer zoals de beperking van het stedelijk personenautoverkeer in samenhang met de stimulering van andere verplaatsingsmethoden zoals fiets, openbaar vervoer, huurauto- en taxisystemen, e.d.

V.2. Directe beïnvloeding van het verkeer en vervoer

1. Mogelijke verschuivingen in het voertuiggebruik, gericht op een hoger energie-rendement zijn:
 - van bromfiets naar fiets en lopen;
 - van personenauto naar fiets, lopen en bromfiets;
 - van personenauto naar openbare vervoermiddelen (waaronder de taxi);
 - van grote naar kleine personenauto;
 - van vrachtauto naar binnenschip en trein;
 - van vliegtuig naar (snelle) trein.

Deze verschuivingen kunnen wellicht worden bevorderd doordat de overheid de ene vervoerswijze bevoordeelt boven de andere.

2. Verhoging van de bezettings- en beladingsgraad in resp. het personen- en goederenvervoer, o.a. te bereiken door een optimale organisatie. Een voorbeeld in het personenvervoer is de bevordering van auto-pooling in het woon-werk-verkeer.
3. Wijzigingen in de verkeersafwikkeling gericht op het stellen van grenzen aan het gedrag m.b.t. de rijsnelheid en het verminderen van de verkeerscongestie.

V.3. Voertuigtechniek¹⁾

1. Door wijzigingen in het ontwerp van wegtransport-middelen is weinig energiebesparing te bereiken. Overigens valt te denken aan een vermindering van het geïnstalleerd vermogen, waaraan i.v.m. de veiligheid een ondergrens is gesteld.
2. Stimulering van goed onderhoud is gewenst. Hierbij is o.a. het handhaven van de juiste bandenspanning van belang.
3. Nieuwe vervoerstechnieken, zowel stedelijk als

¹⁾ Voor het energieverbruik t.g.v. milieumaatregelen zie Hoofdstuk 7.

interstedelijk, worden pas interessant uit een oogpunt van energiebesparing wanneer hoge bezettingsgraden kunnen worden bereikt in combinatie met vervanging van vervoerwijzen met een relatief hoog energieverbruik (personenauto en vliegtuig).

V.4. Voortstuwingsstechniek

Enkele veelbelovende mogelijkheden uit een oogpunt van energiebesparing in de voortstuwingsstechniek zijn:

- de viertaktmotor voor de bromfiets;
- een verbeterde dieselmotor voor de kleine personenauto;
- de benzinemotor met gelaagde vulling;
- de hybride aandrijving;
- de Stirlingmotor;
- de elektrische aandrijving (echter vooral belangrijk uit oogpunt van milieuzorg).

Stimulering van onderzoek en toepassing van deze mogelijkheden is gewenst.

VI. Samenstelling van de werkgroep

De werkgroep die Hoofdstuk 6 heeft samengesteld, bestond uit de volgende leden:

ir. J.A. Over (voorzitter)	Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag
H.G. Douma	Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag
ir. R. van der Graaf	Technische Hogeschool, Eindhoven
dr. W. Horn	Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag
ir. P. Karsten	Van Doorne's Automobiel-fabriek (DAF), Eindhoven
ir. P.D. van der Koogh	Instituut voor Wegtransport-middelen TNO, Delft
prof. ir. W.A. Koumans	Technische Hogeschool, Eindhoven
ir. F. Oudendal	Nederlandse Spoorwegen, Utrecht
dr. F.A. Schneider	Technische Hogeschool, Eindhoven
ir. J. Overeem (secretaris)	Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag

Voorts werd een bijdrage gevraagd en verkregen van:

prof. ir. J.J. Broeze	Emeritus hoogleraar, Technische Hogeschool, Delft
ir. A. Dijks	Technische Hogeschool, Delft
dr. F.W. de Vrijer	Philips, natuurkundig laboratorium, Eindhoven

VII. Literatuur

- [1] A. Bieber; Transportation Planning and Systems Analysis, The Urban Transportation Planning Process. OECD, Paris, 1971.
- [2] Proceedings of the seminar on the role of Transportation in Urban planning, development and environment. UN Economic and Social Council, Munich, 1973.¹⁾
- [3] Oriënteringsnota ruimtelijke ordening, derde nota over de ruimtelijke ordening in Nederland, deel I. 's-Gravenhage, 1974.
- [4] Nota over de beperking van de olie-aanvoer en de gevolgen daarvan, nota van de regering aan de Tweede Kamer der Staten-Generaal. 's-Gravenhage, december 1973.
- [5] J. Kuiper; Gespreide werktijden: wat haalt het uit? Verkeerstechniek, 25 (1974), no. 1, 14-8.
- [6] L.M. Day; An assessment of travel/communications substitutability. Futures, 6 (1974), no. 5, 559-72.
- [7] D.P. Grimmer, K. Luszczynski; Lost Power. Environment, 14 (1972), no.3, 14 - 22, 56.
- [8] G. Leach; The motor car and natural resources. Inquiry into the impact of the motor vehicle on the environment. Working paper No. 4, OECD, Paris, 1972.
- [9] G. Leach; Transport moves off oil. New Scientist, 60 (1973), nr. 871, 396-400.
- [10] R.A. Rice; System Energy as a factor in considering Future Transportation, ASME-Paper 70-WA/Ener-8, New York, 1970.
- [11] E. Hirst; Energy consumption for transportation in the U.S., Oak Ridge National Laboratory, California, March 1972.
- [12] S. Gratch and others; The energy crisis: alternatives for transportation. Automotive Engineering, 87 (1973), no. 3, 40-4.
- [13] J.B. Zabel; Privévervoer versus openbaar vervoer. TNO Nieuws, 27 (1972), no. 5, 190-8.
- [14] Mens en Milieu, deel 2, Zorg voor zuivere lucht. Publikatie 17, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag, 1973.
- [15] C.B.S., Jaarstatistiek voor het personenvervoer, 1971.
- [16] Auto-pool in Amerika al jaren succesvol. Verkeerstechniek, 25 (1974), no. 2, 89-90.
- [17] Tokio Nieuws, no. 9, januari 1974.

¹⁾ Van de Nederlandse bijdrage aan deze werkbijeenkomsten is inmiddels een Nederlandse vertaling gepubliceerd: H. Wiggerts, M.E. Beck; Verkeer en Stad. Publ. 74-1, Rijks Planologische Dienst, Den Haag, 1974.

Hoofdstuk 7. Energiebehoefte voor het milieu

door prof. dr. ir. N. W. F. Kossen

I. Inleiding

Het doel van dit hoofdstuk is een raming te maken van de energie die nodig is om de conditie van het milieu in Nederland in 1985 op een redelijk niveau te brengen of te handhaven. Dit vraagstuk is reeds geruime tijd in Nederland onderwerp van discussie geweest en velen zijn van mening dat de situatie ingrijpende en gerichte maatregelen vereist. De zaak wordt nog gecompliceerder nu het besef begint te groeien dat onze huidige energievoorziening geen ongelimiteerde groei toelaat. Over de voorraden steenkool, olie en aardgas zijn reeds in Hoofdstuk 1 gegevens verstrekt. Kernenergie is in ontwikkeling, maar op dit gebied zijn lang niet alle problemen opgelost. Hierbij komt dat elke vorm van energie-opwekking op zichzelf milieubelastende aspecten vertoont. Alle maatregelen om de milieusituatie te verbeteren, kosten in de regel energie. De combinatie van energie-schaarste en de factor milieubelasting maakt het gewenst de reeds genoemde raming te verrichten.

Kwaliteitsnormen

Wat is nu een 'redelijk niveau'? Een netelige vraag

waarop geen waterdicht antwoord is te geven. Zelfs de meest primitieve samenlevingen belasten, evenals elk ander levend organisme, hun milieu. Het heeft dus geen zin het zogeheten ongestoorde milieu ter plaatse als maatstaf te nemen. Bovendien is in Nederland nauwelijks meer een stuk grond overgebleven dat niet op de een of andere wijze (ten gevolge van inpoldering, be- of ontbossing, landbouw, veeteelt) is beïnvloed. Het huidige milieu is evenmin een aanvaardbare norm. Daarvoor komen momenteel te veel plant- en diersoorten te snel in de verdrukking, terwijl ook voor de mens zelf de milieusituatie (zij het in enkele gevallen tijdelijk), onaanvaardbaar kan zijn (stank en 'smog' in Rijnmond, afvalwatersituatie in oude, thans geïndustrialiseerde veenkoloniale gebieden en langs de Donge bij de Belgische grens, lawaai en luchtverontreiniging in de omgeving van drukke verkeerspunten in grote steden tijdens de spitsuren, etc.).

Het grotendeels ontbreken van erkende kwaliteitsnormen bemoeilijkt het verrichten van ramingen van de hoeveelheid energie die nodig is ter bestrijding van de verschillende vormen van milieuverontreiniging, waar-



Foto 1. Energieverbruik heeft invloed op de omgeving (Shellfoto).

mee we te maken hebben. We zijn daarom uitgegaan van de volgende waarden (tenzij anders in de tekst vermeld):

luchtverontreiniging	: 10% norm ¹⁾
watervontreiniging	: 10% norm
bodemverontreiniging	: niet relevant (maatregelen kosten zeer weinig energie, zie II.3.)
geluidsverontreiniging	: niet relevant (maatregelen kosten vrijwel geen energie, zie II.4.)
thermische verontreiniging	: in de atmosfeer – niet relevant (vermindering kost geen energie, zie II.5.) warmte in oppervlaktewater – temperatuur dient minder dan 1°C te stijgen.

De 10% norm betekent dat de emissies in 1985, ook absoluut gezien veel lager zullen zijn dan thans. Verdere verlaging (bijvoorbeeld van 10% naar 1%) zou de hoeveelheid benodigde energie ongeveer verdubbelen en de

¹⁾ De 10% norm houdt het volgende in. Momenteel vindt, al of niet na het treffen van maatregelen, een emissie (bijv. van NO_x) plaats van een bepaalde grootte. Zonder extra maatregelen is deze emissie in 1985 evenredig toegenomen met de vergroting van de emissiebron (bijv. verkeer, huishoudens etc.). De eis die wordt gesteld is dat de werkelijke emissie in 1985 niet meer dan 10% mag bedragen van die welke zonder extra maatregelen in 1985 zou optreden.

kosten vertienvoudigen [1]. Men bereikt dan zeer snel een niveau waarop verdere maatregelen weinig zinvol zijn. Als voorbeeld van de 10% norm kan de Amerikaanse eis voor uitlaatgassen van auto's worden genomen: reductie binnen vijf jaar met 90% van de uitgestoten koolwaterstoffen, koolmonoxyde en stikstofoxyden (C_xH_y, CO en NO_x) van 1971 t/m 1976 [2].

Opzet van het hoofdstuk

Men onderscheidt in de discussie over de milieuproblematiek chemische en fysische verontreinigingen. De in dit hoofdstuk toegepaste indeling is gegeven in de Tabel 1 en 2.

Tabel 1. Soorten verontreiniging

Chemische verontreiniging	: lucht
	water
	bodem
Fysische verontreiniging	: geluid
	warmte

Tabel 2. Bronnen van verontreiniging

Industrie
Elektrische centrales
Huishoudens + commerciële gebouwen
Landbouw
Veeteelt
Verkeer

In Tabel 3 zijn de bronnen en de soorten in één schema ondergebracht, teneinde de voornaamste soorten ver-



Foto 2. Schoonmaken en -houden van de omgeving vergt energie (foto Lindemann KG, Düsseldorf).

Tabel 3. Aard en herkomst van verontreinigingen

	Industrie	Elektrici-teits-opwekking	Huishoudens en utiliteitsgebouwen	Landbouw	Veeteelt	Verkeer
Lucht	Zwavedioxyde, stikstofoxyden, stof, stank, koolwaterstoffen, fluorwaterstof, koolmonoxyde, zwavelwaterstof, zwavelkoolstof, chloor (zoutzuur)	Zwavedioxyde, koolmonoxyde, stikstofoxyden, stof	Zwavedioxyde, stikstofoxyden, koolmonoxyde	Zwavedioxyde	Stank	Koolmonoxyde, zwavedioxyde, stikstofoxyden, koolwaterstoffen, lood, stank, roet, asbest
Water	BOD ¹⁾ , stikstof, fosfor, vergiften, zouten	Verwaarloosd	BOD, fosfor, stikstof	Stikstof, vergiften	BOD, fosfor, stikstof	Olief, koolwaterstoffen (zie lucht)
Bodem ²⁾	Niet en wel biologisch afbreekbaar afval, etc.	—	Papier, plastic, metaal, glas, etensresten, afvalwater ³⁾ , puin, etc.	—	Mest, etc.	Autowrakken, (auto-) banden en afgewerkte olie
Geluid	Uitlaten, stoom afblazen, pompen, overslag, etc.	Verwaarloosd	Interne lawaai-productie	Verwaarloosd	Verwaarloosd	Uitlaten, laagvliegers
Warmte	Opwarming lucht en water	Opwarming water (en lucht)	Opwarming lucht	Verwaarloosd	Verwaarloosd	Opwarming lucht

¹⁾ BOD = Biological Oxygen Demand. Dit is een maat voor de hoeveelheid biologisch afbreekbare stof in het water [3].

²⁾ Lekkages uit ingegraven pijpleidingen voor olie of gas, hoewel een milieubelasting (en energieverlies; zie ook het slot van paragraaf V.1.6 van Hoofdstuk 5) betekend, zijn niet hier beschouwd daar zulks een ongewild en incidenteel karakter draagt.

³⁾ Te onderscheiden in organische stof (assimileerbaar) en slib (niet-assimileerbaar).

ontreiniging per bron aan te geven. De rest van het hoofdstuk is gewijd aan een bespreking van de energie die nodig is voor de bestrijding van de verschillende soorten verontreiniging.

Met nadruk moet worden gezegd dat dit hoofdstuk niet is geschreven om aan te geven dat de extra energie ten behoeve van het milieu onmiddellijk moet worden gebruikt of om te pleiten voor het achterwege laten van milieumaatregelen.

Het zal blijken dat de hoeveelheid energie, nodig voor de genoemde milieukwaliteitsnormen, in de orde van grootte van 5% van de totale energiebehoefte ligt; een niet onbelangrijke hoeveelheid in het licht van komende energieschaarste. Maar er kan ook op worden gewezen dat een soberder levensstijl ons in staat zou stellen heel wat meer energie te besparen dan de genoemde 5%.

II. Energiebehoeften voor het treffen van milieumaatregelen

Elke paragraaf begint met een raming van het niveau dat in 1985 door een bepaalde vorm van verontreiniging

Tabel 4. Geraamde niveaus van verontreinigingen ten gevolge van het verbranden van fossiele energiedragers (in gewichtsdelten betrokken op de brandstof)

	Aardgas	Benzine	Dieselolie	Stookolie
Zwavedioxyde (SO ₂)	0,02‰ (odori-seren)	1,0‰	20‰ (auto's) 30‰ (schepen)	16‰ (huisbrand) 60‰ (zware stookolie)
Stikstofoxyden ¹⁾ (NO _x)	1,5‰	35‰	45‰	10‰ (centrales) 1,5‰ (huisverwarming)
Koolmonoxyde (CO)	< 1‰	360‰	20‰	< 1‰
Koolwaterstoffen (C _x H _y)	—	50‰	9‰	—
Lood (Pb)	—	0,6‰	—	—
Roet	0,15‰	1‰	1‰ ²⁾	3‰ (centrales) 2‰ (huisverwarming)

¹⁾ De hier genoemde waarden liggen tussen de uitersten die zijn genoemd in [5, p. 20-4, 32, 77]. Zie voorts [6, 7, 8].

²⁾ Bij goede afstelling van de motor.

zal worden bereikt, indien geen tegenmaatregelen worden genomen. Daarna worden de beschikbare mogelijkheden besproken en de hoeveelheid energie die dit zal kosten.

II.1. Luchtverontreiniging

Voor de belangrijkste stoffen die luchtverontreiniging veroorzaken wordt verwezen naar Tabel 3. Luchtverontreiniging ontstaat voor een belangrijk deel door het verbranden van fossiele energiedragers (steenkool, olie, gas). In Tabel 4 is een raming gegeven van de mate van verontreiniging ten gevolge van het gebruik van energiedragers in hun huidige vorm. Gegevens over het verkeer (inclusief bromfietsen en dieselloertuigen) zijn voornamelijk afkomstig van Laseur et al. [4]. Gegevens over stookolie en aardgas zijn voor het grootste deel verstrekt door ir. Faber (CTI-TNO) en ir. Verhoog (Esso). Steenkool is buiten beschouwing gelaten omdat in 1985 het geringe en bovendien sterk gecentraliseerde verbruik geen belangrijke bijdrage zal leveren tot de luchtverontreiniging.

Tabel 5. Verbruik energiedragers (steenkool buiten beschouwing gelaten) per sector in 1985 (Bron: Hoofdstuk 2).

	Aardgas ¹⁾	10 ⁶ ton brandstof			Vliegtuig- brandstof
		Benzine	Dieselolie	Stookolie	
Industrie (incl. olieraffinage)	9,0	—	—	15,4	—
Elektriciteitsopwekking	9,9	—	—	11,7	—
Huishoudens en utiliteitsgebouwen	16,9	—	—	4,5	—
Kasverwarming	1,7	—	—	0,6	—
Verkeer					
— over de weg	—	6,4	2,7	—	—
— binnenscheepvaart	—	—	1,7	—	—
— luchtvaart	—	—	—	—	3,0

¹⁾ 1 m³ = 0,72 kg

Tabel 6. Schatting van de emissies in 1985

	10 ³ ton verontreinigingen					roet en vaste stof (%)
	zwaveldioxyde	stikstofoxyden	koolmonoxyde	koolwaterstoffen	lood	
	SO ₂ (%)	NO _x (%)	CO (%)	C _x H _y (%)		
Industrie (incl. olieraffinage)						
— energieopwekking	925 (43)	170 (21)	≤ 25 (1)	—	—	50 (16)
— procesemissie ¹⁾	310 (14)	50 (6)	180 (7)	300 (45)	—	190 (61)
Elektriciteitsopwekking	700 (32)	130 (16)	25 (1)	—	—	40 (13)
Huishoudens en utiliteitsgebouwen	75 (4)	35 (4)	≤ 25 (1)	—	—	15 (5)
Kasverwarming	35 (2)	10 (1)	5 (—)	—	—	5 (2)
Verkeer ²⁾	110 (5)	420 (52)	2.400 (90)	360 (55)	4	10 (3)
Totaal	2.155	815	2.600	660	4	310

¹⁾ Lineaire extrapolatie gegevens Beek [10].

²⁾ Luchtvaart is verwaarloosd.

Uit de gegevens van de Tabellen 4 en 5 kunnen de totale emissies in 1985 ten gevolge van brandstofverbruik worden berekend (zie Tabel 6). Emissies ten gevolge van het luchtverkeer zijn verwaarloosd, o.a. op basis van de gegevens ontleend aan het rapport Agard AR-40 [5, 9]. De gegevens over industriële procesemissie in Tabel 6 zijn afkomstig hetzij van Beek [10] of van schattingen die in persoonlijke gesprekken met vertegenwoordigers van de industrie of research-instituten zijn verkregen. Uiteraard is Tabel 6 niet nauwkeuriger dan de verbruikscijfers, vermeld in Tabel 5.

De sectoren, omvattende de verwarming van huizen, utiliteitsgebouwen en kasverwarming, zijn in wat nu volgt verwaarloosd wegens hun gering belang.

Industriële energieopwekking en elektriciteitsopwekking

De belangrijkste emissies zijn stikstofoxyden (NO_x), zwaveldioxyde (SO₂) en vaste stoffen.

De emissie van NO_x verwacht men te kunnen verlagen door betere verbrandingsystemen. Dit kost geen extra energie, de haalbare reductie van het NO_x-gehalte van de verbrandingsgassen is slechts 10 à 20% voor bestaande ketels en 50% voor nieuw te ontwerpen ketels.

De SO₂-emissies kunnen op twee manieren worden verminderd:

- verwijdering van zwavel uit de olie (in Figuur 1 wordt een voorbeeld van zo'n proces gegeven);
- verwijdering van SO₂ uit de rookgassen.

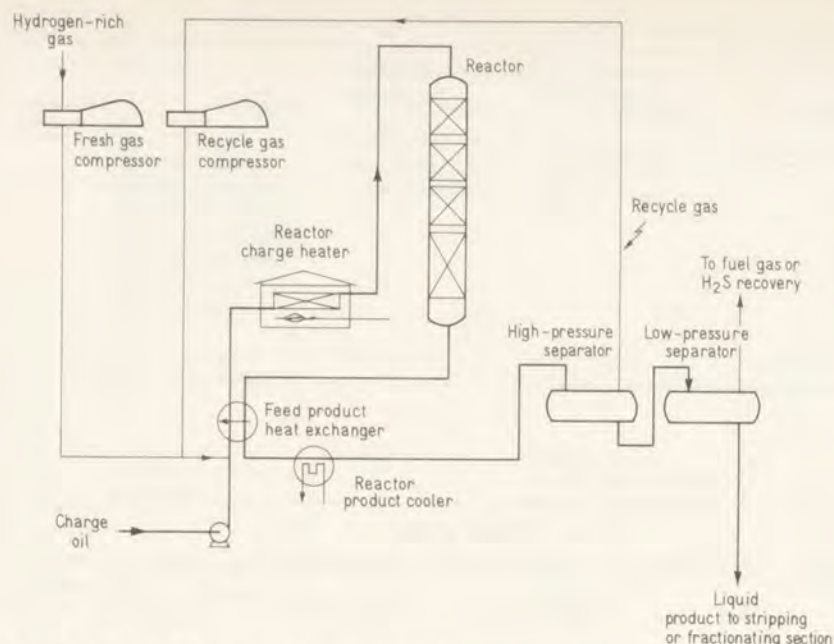
De eerste methode vraagt, als gevolg van de hoge temperatuur van de ontzwaveling en het waterstofverbruik,

een hoeveelheid extra brandstof van 6 à 10%, afhankelijk van de soort olie en de graad van ontzwaveling. Aangezien voor dichtbevolkte gebieden als Nederland de aan ontzwaveling te stellen eisen vrij streng zijn, hebben we 10% energieverlies aangehouden. Dit komt neer op 0,1 X (500 + 490) = 99 X 10¹⁵J of niet minder dan ca. 2,4% van het nationale verbruik aan primaire energie in 1985 (zie Tabellen 7, 9 en 20 van Hoofdstuk 2). Men zie ook Hoofdstuk 3.

De tweede methode vergt een hoeveelheid energie die onder andere wordt bepaald door de drukval tijdens de nabehandeling van de rookgassen. Literatuur over dit onderwerp is zeer uitgebreid, een weerspiegeling van het feit dat er nog geen methode is gevonden die zonder meer bruikbaar en goed is.

Twee methoden zullen hier worden behandeld:

- De droge methode [11] (injectie van mangaanoxydepoeder in rookgas, afscheiding in cycloon en elektrostatische precipitatie). De verwijdering bedraagt 90% met een drukval van 150 mm WK. Energiebehoefte voor 990 X 10¹⁵J aan stookolie in 1985 bedraagt 1,2 X 10¹⁵J ten behoeve van de cycloon en 0,4 X 10¹⁵J ten behoeve van de precipitator. Samen 1,6 X 10¹⁵J. Dit is energie in de vorm van elektriciteit. Omgerekend in primaire energie is dus 3 X zoveel nodig: 4,8 X 10¹⁵J.
- De natte methode [12]. Wassen in venturiscrubber met magnesium oxyde-slurry. Drukval 400 mm WK, 90% verwijdering: 3,2 X 10¹⁵J elektrische energie, hetgeen zou overeenkomen met een verbruik aan primaire energie van 9,6 X 10¹⁵J.



Figuur 1. Principe schema van een Shell-'trickle'-ontzwavelingsinstallatie.

De gemiddelde behoefte aan primaire energie zou dus $7,2 \times 10^{15} \text{ J}$ zijn.

Beide methoden zijn wellicht niet erg praktisch, maar ze geven als uitersten een goed beeld van bij rookgasontzwaveling betrokken energiebehoefte. Een probleem dat bij beide genoemde methoden optreedt, is de verwerking van het gevormde slik. Er zijn echter ook methoden in ontwikkeling waarbij geen afvalproducten worden gevormd (binding van SO_2 aan koperoxyde, gevolgd door regeneratie [13]). Het is duidelijk dat, vanuit het standpunt van energiebesparing, verwijdering van zwavel uit rookgasen de voorkeur verdient. Echter moeten dan vele (kleinere) installaties bij de gebruikers worden gebouwd, in plaats van slechts enkele (grotere) installaties bij de leveranciers. Bovendien wordt door rookgasontzwaveling meteen de emissie van vaste stof sterk vermindert.

* Men dient zich wel te realiseren dat de verschillen in energiebehoefte tussen ontzwaveling van stookolie en van rookgasen in de praktijk minder groot zullen zijn. Bij de ontzwaveling van rookgasen wordt de energiebehoefte niet alleen bepaald door de eerder genoemde drukval over de absorptie- of adsorptie-apparaat, maar ook door:

- hantering van het absorptie/adsorptiemiddel en het exotherme karakter van het proces;
- in het geval van de natte methode de energie nodig voor het weer voldoende opwarmen van het gas dat de schoorsteen moet verlaten;
- in het geval van processen welke elementaire zwavel of zwavelzuur leveren, de warmte voor de desorptie van de zwaveldioxyde uit het beladen absorptie/adsorptiemiddel.

Voor de vele tot dusver bekende processen kan een en ander tot sterk uiteenlopende totale energiebehoeften leiden. Uitgaande van de terugwinning van elementaire zwavel en de installatie van apparatuur voor optimale warmteterugwinning kan dit variëren van 2½% (voor een droog proces als het 'Shell Flue Gas Desulphurisation Process') tot 8% (voor een nat proces als het 'Well-

man-Lord Process'). Als gevolg hiervan is in de praktijk de verhouding tussen de energiebehoeften voor ontzwaveling van stookolie en van rookgasen ten hoogste 4 : 1. In het algemeen lijkt het realistisch rekening te houden met een globale verhouding van 2 : 1 [14]. De ondergrens van de in Tabel 8 vermelde extra energiebehoefte voor de bestrijding van emissies van industrieel energieverbruik en elektriciteitsopwekking heeft dus

* vooral een theoretisch karakter. Maar de energiebesparing is slechts een van de overwegingen die hier een rol spelen en dit maakt het onmogelijk te voorspellen welke methode eventueel zal worden gekozen.

Emissie bij industriële processen

Het is bijzonder moeilijk te berekenen hoeveel extra energie er nodig zou zijn voor het tegengaan van de emissie bij industriële processen. Aannemende dat de luchtverontreinigingen voor het grootste deel afkomstig zijn van de chemische procesindustrie kan een grove schatting worden gemaakt. De chemische procesindustrie in Nederland verbruikt ca. 10% van de nationale primaire energie als grondstof en energieopwekker te zamen. Uitgaande van het feit dat 10% van de investeringen in deze industrie worden uitgegeven aan milieumaatregelen [15], en aannemende dat het bijkomende energieverbruik evenredig is aan de investering, zou dit betekenen dat in de chemische procesindustrie ca. 1% van de nationale energiebehoefte wordt besteed aan water- en luchtzuivering. Dit komt overeen met ca. $42 \times 10^{15} \text{ J}$ in 1985. Dit cijfer zou dan gelden voor water- en luchtzuivering te zamen, n.b. alleen voor de chemische procesindustrie. Voor de gehele industriële procesindustrie zijn soortgelijke becijferingen mogelijk, maar dan zullen waarschijnlijk cijfers van lager dan 10% t.b.v. het milieu mogen worden aangehouden. Beschouwingen zoals voor SO_2 , NO_x en roet zijn gegeven bij de energieopwekking, zijn ook geldend voor de industriële processen. De totale proces-emissies zullen voor de chemische industrie echter beduidend lager zijn dan voor de emissie bij haar energieopwekking (Tabel 6).

Tabel 7. Energiebehoefte voor milieumaatregelen bij de staal- en aluminiumfabrikage (1985)

	Productie (ton)	Totale energie per ton (10^9 J)	Totaal energie-verbruik (10^{15} J)	% energie t.b.v. milieu	Totale energie t.b.v. milieu (10^{15} J)
Staal	$7,5 \times 10^6$	30	225	1	2,3
Aluminium	$0,35 \times 10^6$	250	87,5	2	1,8

Voor de staal- en aluminiumindustrie zijn globale schattingen mogelijk. Deze zijn in Tabel 7 weergegeven (zie ook Hoofdstuk 3).

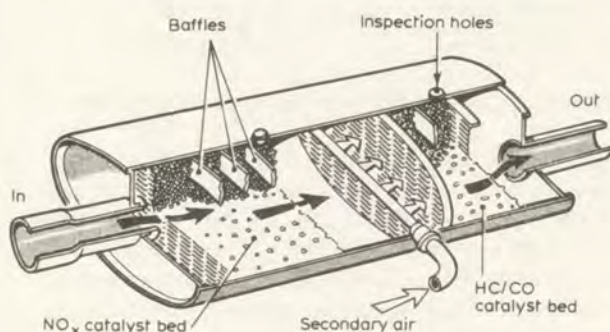
Deze hoeveelheden energie zijn gering; zij vormen ca. 0,1% van het nationaal primair energieverbruik in 1985.

Verkeer

In de Verenigde Staten werd enige jaren geleden een programma voorgesteld om in 6 jaar tijd de emissie ten gevolge van het autoverkeer (C_xH_y , CO, NO_x) met 90% te verminderen [2]. De schattingen voor extra brandstofgebruik ten behoeve van deze maatregel variëren van 15 tot 30% [16]. Voor Europese wagens is deze schatting beslist te hoog in verband met de veel kleinere motorvermogens waardoor de emissie per auto en per km veel geringer is dan in de V.S.

Verlaging van CO en C_xH_y is mogelijk door betere afstelling van de motor en andere, mogelijke wijzigingen [2, 17]. Dit behoeft niet noodzakelijkerwijs tot extra brandstofverbruik te leiden.

Verlaging van de lood- en NO_x -emissie kost echter wel extra energie¹⁾ [5], waarbij 10% als laagste en 20% als hoogste limiet wordt genomen. In Figuur 2 wordt een voorbeeld gegeven van een katalytische omvormer voor de uitlaatgassen van een auto.



Figuur 2. Een voorbeeld van een katalytische omvormer met twee bedden, waarbij secundaire lucht wordt gebruikt bij het tweede bed, de katalytische naverbrandingsstap [2].

Emissie door bromfietsen kan aanmerkelijk worden beperkt door over te gaan op viertakmotoren (zie Hoofdstuk 6). Dit houdt tevens een aanzienlijke besparing in van brandstof voor bromfietsen (40%). Daar bromfietsen 5 à 6% van alle motorbenzine verbruiken betekent dit een totale besparing van ca. 2% ($5,4 \times 10^{15}$ J) in 1985.

Over maatregelen ter beperking van de emissie van dieselmotoren is ons niets bekend. Weliswaar geeft een goed afgestelde dieselmotor minder verontreiniging dan een benzinemotor, maar deze goede afstelling blijft nog wel eens achterwege. De belangrijkste verontreiniging (bij goede afstelling) is NO_x , maar aangezien we niet

¹⁾ Voor het (veel energie bij de fabricage vergende) gebruik van loodarme benzine zie men Hoofdstuk 3.

over gegevens omtrent vermindering hiervan bij de dieselmotoren beschikken is deze sector niet in de hierna volgende berekening opgenomen.

In totaal komen we zo voor het verkeer op een extra energieverbruik van tussen de 8 en 18% benzine ofwel $22 \text{ à } 49 \times 10^{15}$ J (0,5 à 1,2% van het nationaal energieverbruik in 1985).

Stank

Ofschoon de stank een apart probleem kan zijn, is de omvang ervan moeilijk uit te drukken in tonnen/jaar. Wel is een schatting te maken van de energiebehoefte voor de bestrijding van het euvel aan de bron.

De belangrijkste bronnen zijn:

- verkeer;
- veehouderij;
- industrie.

Voor het verkeer geldt dat de maatregelen die de NO_x -CO- en C_xH_y -emissie beperken ook de stank tot een laag niveau zullen terugbrengen, zodat hier geen extra kosten mee gemoeid zijn.

De veehouderij (waaronder ook gerekend vee fok-, en destructiebedrijven) kan, vooral lokaal, een grote stankbelasting leveren. Hetzelfde geldt voor vismeelbedrijven e.d. Energie is nodig voor afzuiging en wassen van de lucht. Enkele schattingen zijn: destructiebedrijven: 29×10^{12} J en vee fokkerijen: $1,522 \times 10^{12}$ J. Aangehouden is hier een totale hoeveelheid van $2,9 \times 10^{15}$ J, ook rekening houdend met andere bronnen (vismeel etc.).

Stankemissies van de industrie kunnen worden verdeeld in twee sectoren: emissies afkomstig van de chemische en van de overige industrie. De extra energiebehoefte voor stankbestrijding in de chemische industrie is opgenomen in de globale schatting onder het hoofd 'industriële procesemissies'. Een aantal maatregelen in de chemische industrie zal trouwens zeer weinig energie vragen (zoals het gebruik van betere afdichtingen).

Hoewel de stankoverlast, veroorzaakt door andere industrieën in de regel niet groot is, kunnen er verrassingen optreden als men het energieverbruik voor de bestrijding ervan berekent. Zo komt in verfverwerkende bedrijven jaarlijks in moffelovens 12.500 ton oplosmiddel vrij bij een concentratie van 0,25 vol.% in lucht. Als men deze hoeveelheid oplosmiddel in lucht katalytisch wil naverbranden kost dit ca. 293×10^{12} J. Overgang op met water verdunbare lakken lost dit probleem op. In het algemeen is het extra energieverbruik ten behoeve van stankbestrijding gering vergeleken met het energieverbruik voor andere milieumaatregelen.

In Tabel 8 is per bron de benodigde energiebehoefte ten behoeve van maatregelen ter vermindering van de luchtverontreiniging weergegeven. In deze tabel is,

indien één schatting niet mogelijk was, een minimum- en een maximumwaarde aangegeven.

Tabel 8. Energie ten behoeve van bestrijding van luchtverontreiniging¹⁾

	10 ¹⁵ J	% van het nationaal verbruik in 1985
Industrieel energieverbruik en elektriciteitsopwekking	7,2 - 99	0,2 - 2,4
Industriële procesemissie ²⁾	46,1	1,1
Verkeer ³⁾	22 - 49	0,5 - 1,2
Veeteelt	2,9	0,1
Totaal ⁴⁾	78,2 - 197	1,9 - 4,8

¹⁾ Huishoudens, utiliteitsgebouwen en kasverwarming zijn verwaarloosd.

²⁾ Inclusief zuivering afvalwater chemische industrie.

³⁾ Gebruik van loodvrije benzine niet inbegrepen (dit zou op zich 0,3 à 0,5% van het nationaal energieverbruik 1985 extra kosten).

⁴⁾ Het hogere cijfer heeft een lagere graad van waarschijnlijkheid (het is onwaarschijnlijk dat alle olie zal worden ontzwaveld).

II.2. Waterverontreiniging

Afgezien van thermische waterverontreiniging (die hierna in II.5. wordt behandeld) kan men de waterverontreiniging indelen in vijf klassen:

- zuurstofverbruikende stoffen;
- algengroei stimulerende stoffen;
- ziekteverwekkende organismen;
- vergiften (cyanide, landbouwvergiften, etc.);
- overige stoffen (chloride, sulfaat, slib, gips, etc.).

Het heeft weinig zin een gedetailleerde balans te maken van de hoeveelheden van deze stoffen. De voornaamste bronnen van deze verontreinigingen zijn al vermeld in Tabel 3.

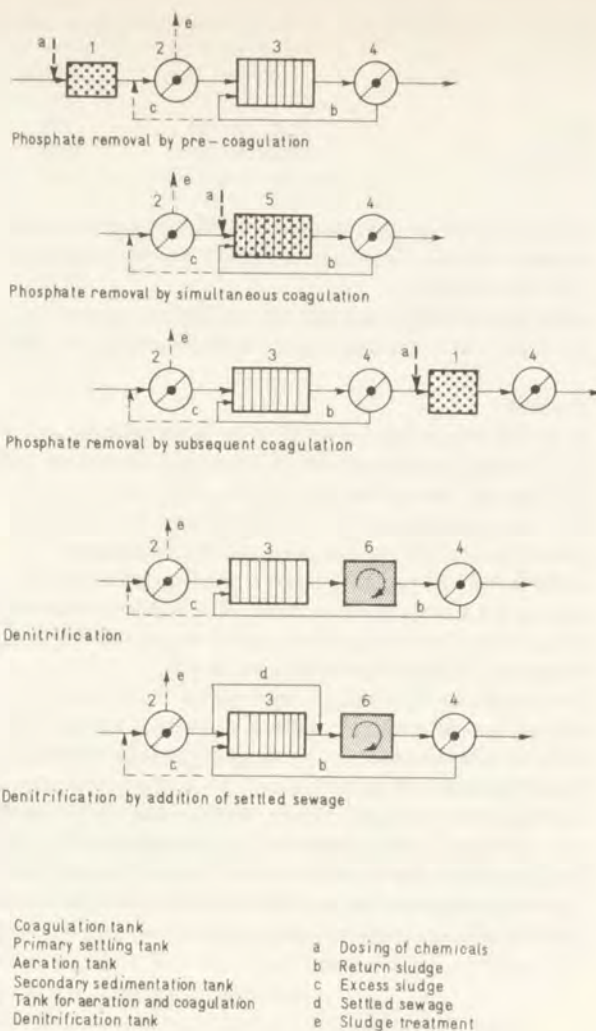
De eerste drie groepen kunnen biologisch of chemisch worden verwijderd in afvalwaterzuiveringsinstallaties uitgerust voor een zg. 'derde trap zuivering'. Deze 'derde trap' neemt met name de tweede groep voor haar rekening, terwijl voor de behandeling van de derde groep een desinfectant kan worden toegevoegd (zie Figuur 3).

Verreweg de meeste energie voor deze installaties zit in het beluchten — (54 X 10⁶ J/inw. eq./jaar).

Verder vraagt het verzamelen en lozen van het afvalwater nog enige energie. Rekening houdende met lozingen door industrieën (uitgezonderd die in de veenkoloniale gebieden) wordt het totale werkelijke energieverbruik ten behoeve van deze waterzuivering in 1985 geschat op: 1,5 X 10¹⁵ J¹⁾. Hierbij is uitgegaan van 13,9 miljoen inwoners en een vervuiling die in gelijke mate wordt veroorzaakt door de industrie en door de bevolking. Men kan ervan uitgaan dat ca. 90% van de afbreekbare verontreinigingen wordt verwijderd. De veenkoloniale industrieën (aardappelmeel- en strokartonfabrieken) vormen, met hun vervuilingspotentieel van 20 X 10⁶ inw./eq. gedurende 3 maanden per jaar, een probleem apart.

Biologische zuivering is moeilijk voor deze seizoenbedrijven in verband met de lange aanloopperiode bij

¹⁾ Gegevens verstrekt door prof. ir. Huisman.

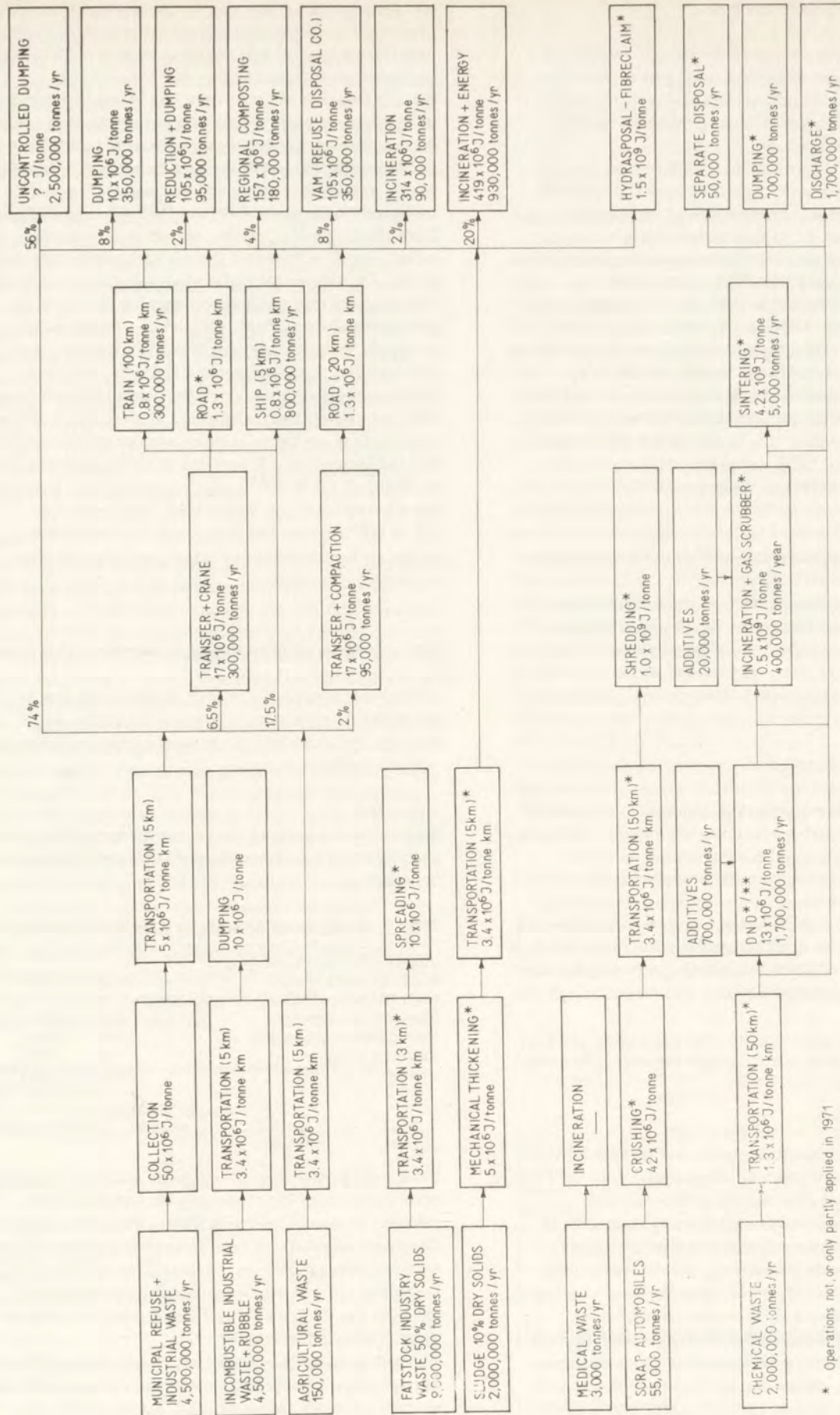


Figuur 3. Stroomschema's voor derde trap zuivering [18].

gebruik van deze methode. Een groot deel van de vervuiling kan worden geëlimineerd door over te gaan op een ander productieproces, dat geen grote verandering in de energiebehoefte met zich meebrengt.

De verwijdering van vergiften kost vergeleken met de biologische zuivering relatief weinig energie. Voor de 'overige stoffen' geldt dat lozing van dergelijke stoffen (voornamelijk zouten) op zee geen probleem geeft. Ook dit kost relatief weinig energie.

Ruim geschat komt men zo voor de totale energiebehoefte in Nederland in 1985 ten behoeve van de afvalwaterzuivering op ca. 2,9 X 10¹⁵ J. Verder is energie nodig om uit ons verontreinigde oppervlaktewater drinkwater te maken (2,1 X 10¹⁵ J), zodat de totale energiebehoefte ten behoeve van verbetering van de waterkwaliteit naar schatting 5,1 X 10¹⁵ J zal bedragen. Dit is elektrische energie, hetgeen overeenkomt met ca. 15 X 10¹⁵ J aan primaire energie. Hoe weinig dit is, blijkt als we dit cijfer vergelijken met de hoeveelheid die naar wordt verwacht in 1985 in Nederland zal worden gebruikt voor het verwarmen van water in huishoudens met boilers en geysers (laten we aannemen 250 m³ aardgas maal 4,95 X 10⁶ huizen hetgeen 43,5 X 10¹⁵ J betekent). Met een reëel bereikbare besparing op het warmwatergebruik kan de energie, nodig voor de waterzuivering, dus worden 'terugverdiend'.



* Operations not, or only partly applied in 1971
 ** Detoxification, neutralisation and dehydration

Figuur 4. Behoeftte (in 1971) aan primaire energie bij het wegwerken van vast vuil.

II.3. Bodemverontreiniging

Onder bodemverontreiniging wordt hier verstaan de verontreiniging van de bodem door vast of vloeibaar afval dat op of in de bodem terecht komt. In Tabel 3 zijn een aantal voorbeelden van potentiële bodemverontreinigingen gegeven.

De voor het bestrijden van de bodemverontreiniging benodigde energie wordt gebruikt voor transport en verwerking (storten, composteren of verbranden). Een overzicht van de hoeveelheden energie, die voor de bestrijding van de bodemverontreiniging nodig zijn, is gegeven in rapport SVA/569 van de Stichting Verwijdering Afvalstoffen [19]. Men komt daar tot een schatting voor 1985 van in totaal ca. $4,1 \times 10^{15}$ J. Figuur 4, afkomstig uit genoemd rapport en betrekking hebbend op 1971, geeft een indruk van de wijze waarop deze hoeveelheid energie is verdeeld over de verschillende processen. Een aantal technieken die in dat jaar gedeeltelijk of nog in het geheel niet werden toegepast maar in 1985 wel gebruikelijk zullen zijn, zijn eveneens in de figuur aangegeven.

II.4. Milieuverontreiniging in de vorm van geluid

Overmatig geluid (lawaai) kan een zeer hinderlijke vorm van milieubelasting zijn. Maatregelen zijn hier zeker op hun plaats. De belangrijkste bronnen zijn:

- industrie;
- huishoudens (versterkers, T.V., radio, stofzuigers, etc.);
- verkeer.

Industrie

Geluidsoverlast ten gevolge van industriële activiteiten kan een groot aantal oorzaken hebben (stoom afblazen, ventilatoren, pompen en compressoren, laden en lossen, tandwielkasten, etc.). Vermindering van dit lawaai is een kwestie van ander ontwerp, ophanging, aanbrenging van geluidsisolerend materiaal en dergelijke. Het energieverbruik ten gevolge van deze maatregelen is nihil; evenals de geluidsenergie zelf een verwaarloosbare post op de energiebalans vormt.

Huishoudens

Betere geluidisolatie van woningen behoeft geen extra energie te kosten.

Verkeer

De belangrijkste lawaaibronnen in het verkeer zijn vrachtauto's, bromfietsen en vliegtuigen. Voor de bestrijding van het door auto's en bromfietsen veroorzaakte lawaai is geen extra energiebehoefte te verwachten. De bestaande uitlaatsystemen waarin het geluiddempende gedeelte ca. 3% van het krukasvermogen bij vollast opneemt, garanderen een betrekkelijk lawaaiarm gebruik mits er niet aan wordt 'gesleuteld', en goed onderhoud plaatsvindt. Lawaai-overlast die (ondanks goed werkende uitlaatsystemen) toch optreedt, is veeleer een gevolg van te hard rijden of van te geringe afstand tussen huizen en autosnelwegen. De invoering van snelheidsbeperkingen (indien inderdaad in acht genomen) bespaart bovendien nog energie en plaatselijk aan te brengen barrières tegen het lawaai kosten weinig energie. Het is op deze plaats

wellicht nuttig, op te merken dat door goed op elkaar afgestelde verkeerslichten een 'groene golf' ontstaat, waardoor zowel lawaai, emissie en energieverbruik van het verkeer verminderen.

Bij vliegtuigen is het probleem iets ingewikkelder. Bij de huidige generatie vliegtuigmotoren kan men geluid-dempend materiaal aanbrengen, maar dit geeft geen vermindering van het lawaai van de uitlaat. Schattingen van de extra energie die voor de toepassing van dit materiaal nodig is, variëren van 0,5% (Boeing 737) tot 3,5% (Boeing 707). Indien ook het lawaai van de uitlaat wordt verminderd zijn de verliezen aanzienlijk groter. De nieuwe generatie vliegtuigmotoren voldoet aan internationaal gestelde normen ten aanzien van geluidproductie en heeft vergeleken met de vorige generatie een gunstiger specifiek brandstofverbruik. Het specifiek vliegbereik van vliegtuigen met deze motoren is echter niet gunstiger. Gemiddeld genomen lijkt het extra brandstofverbruik wegens maatregelen tegen geluidsoverlast te kunnen worden gesteld op 1% van het totale verbruik van brandstoffen voor vliegtuigen in 1985, of $1,3 \times 10^{15}$ J. Met verwijzing naar hetgeen werd gezegd over het wegverkeer, is dit cijfer van $1,3 \times 10^{15}$ J tevens het totaal voor de hele verkeerssector en tezelfdertijd het totaal voor alle lawaai-bestrijdende maatregelen.

II.5. Milieuverontreiniging in de vorm van warmte

Vrijwel alle energie die in onze samenleving wordt verbruikt, komt uiteindelijk vrij in de vorm van warmte. Hierdoor treedt een stijging op van de temperatuur van lucht en water.

Atmosfeer

De directe verwarming van de atmosfeer in Nederland in 1985 vindt haar oorzaak in de in Tabel 9 opgesomde bronnen:

Tabel 9. Directe verwarming van de atmosfeer in 1985 (10^{15} J)

Industriële energieopwekking (inclusief olieraffinage)	586	(20%)
Elektriciteitsopwekking (inclusief kernenergie)	600	(21%)
Huishoudens + gebouwen	1.018	(35%)
Kasverwarming	109	(4%)
Verkeer	580	(20%)
Totaal	2.893	

Industriële energieopwekking vindt voor een deel plaats door het vormen van stoom die als zodanig wordt gebruikt of waaruit elektrische energie wordt opgewekt. Daarnaast worden ook hete verbrandingsgassen direct als energiedrager gebruikt (kraakfornuizen, cementbereiding, etc.). Als grove schatting is aangenomen dat 50% van de in de industrie opgewekte warmte in de atmosfeer terecht komt.

Van alle opgewekte elektriciteit wordt slechts 10% of minder gebruikt voor het verwarmen van water (boilers, vaatwasmachines, wasmachines); dit resulteert niet (althans niet dan via een gecompliceerde omweg) in verwarming van de atmosfeer. Daarnaast verdwijnt 10% van de primaire energie via de schoorsteen, althans in centrales op basis van fossiele brandstof [20].

Deze zullen in 1985 echter nog veruit het grootste gedeelte van de elektriciteitsopwekking voor hun rekening nemen. Grof geschat komt dan ca. 50% van de totale voor elektriciteitsopwekking verbruikte energie vrij als warme lucht.

De totale hoeveelheid warmte die in de lucht komt (ca. 3×10^{18} J) lijkt vrijwel te verwaarlozen in het licht van de constatering dat jaarlijks op aarde in totaal ca. $5,4 \times 10^{24}$ J zonne-energie wordt ingestraald.

Nederland, dat zich op de 52^e breedtegraad bevindt, ontvangt hiervan ca. 110×10^{18} J per jaar (zie ook Hoofdstuk 5). Hieraan zal dus in 1985 ca. 3% door menselijke energie-opwekking worden toegevoegd. Lokaal (bijv. boven Rijnmondsteden) kan de warmte-emissie zeer veel hoger zijn dat het gemiddelde, met ernstige gevolgen voor de immissieniveaus door lage schoorstenen, om althans één der consequenties te noemen. We weten nog niet wat de gevolgen van een aarde-omvattende verhoging van de temperatuur zou zijn [21]. De enige maatregel waarmee verwarming van de lucht kan worden verminderd is het gebruiken van minder en niet van meer energie.

Water

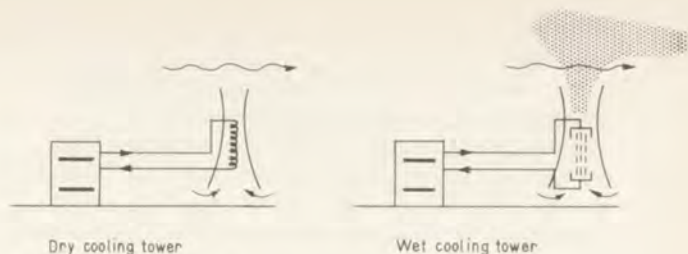
Voor oppervlaktewater geldt in Nederland momenteel de officieuze norm dat de temperatuur van gebruikt koelwater nergens hoger mag zijn dan 30°C in geval van lozing, hoewel deze norm wordt aangevochten door een aantal biologen [22]. Discussie daarover hoeft hier niet te worden gevoerd, omdat het zeker tot na 1985 mogelijk is toekomstige elektriciteitscentrales te vestigen bij grote oppervlaktewateren (IJsselmeer, Deltagebied, e.d.) waardoor de verhoging van de temperatuur van het oppervlaktewater ter plaatse gemiddeld niet meer dan 1°C behoeft te zijn [23]. Om een temperatuurschok bij het lozingspunt te vermijden is een goede menging noodzakelijk. Nadeel van deze oplossing is het transport van elektriciteit over grotere afstanden dan bij een meer gespreide opwekking. De alternatieven, nl. vestiging bij bestaande of voormalige estuaria en gespreide vestiging, kunnen naast elkaar worden beschouwd. Bij deze laatste vorm van vestiging kan ter vermindering van warmtelozingen op het oppervlaktewater gebruik worden gemaakt van natte respectievelijk droge koeltorens (Fig. 5) [23]. Zie Tabel 10.

Tabel 10. Extra energie voor beperking warmtelozing in oppervlaktewater

Wijze van situering	Nadelen	Extra energie ¹⁾ %	Extra energie (10^{15} J)
Bij estuaria	Lange transportleidingen voor elektriciteit	0,5	6
Gespreid, natte koeltorens	Mist	ca. 4	48
Gespreid, droge koeltorens	Lawaai	ca.10	120

¹⁾ Vergeleken met primaire energiebehoefte elektriciteitsopwekking 1985.

Het transport over grotere afstand bij het eerste alternatief veroorzaakt slechts een zeer gering extra energieverbruik. Voor het Nederlandse elektriciteitsnet bedraagt het totale netverlies ca. 2% van het primair



Figuur 5. Schets droge respectievelijk natte koeltorens.

energieverbruik voor elektriciteitsopwekking. Hiervan komt ca. 1/6 ten laste van het hoogspanningsnet, het resterende deel gaat verloren in het laagspanningsnet. De schatting is dat het verlies in het hoogspanningsnet, dat voor transport over grote afstanden wordt gebruikt, met minder dan een factor 2 zal toenemen. Aangezien de verliezen in het laagspanningsnet ongewijzigd blijven, is een extra verlies van 0,5% voor het eerste alternatief dus een veilige schatting.

Voor het industriële verbruik is slechts een ruwe schatting mogelijk. De hoeveelheid energie die nodig is voor het verpompen van het koelwater van de Nederlandse industrie door warmtewisselaars bedraagt ca. $3,6 \times 10^{15}$ J. Het koelwater wordt, na passeren van de warmtewisselaars, meestal geloofd op het oppervlaktewater. Indien wordt besloten al het koelwater van de Nederlandse industrie te hergebruiken via natte of droge koeltorens, dan kost dit een hoeveelheid energie, variërend van 1 tot 2,5% van de over te dragen hoeveelheid warmte. Dit komt overeen met $5,9$ à $14,7 \times 10^{15}$ J.

De som van de hier genoemde bedragen vertegenwoordigt een totale energiebehoefte van tussen 12 en 135×10^{15} J.

II.6. Algemene ramingen

Een overzicht van het mogelijke additionele energieverbruik in 1985 ten behoeve van maatregelen van milieuzorg is weergegeven in Tabel 11. Waar nodig is een minimum- en een maximumraming gegeven.

Tabel 11. Extra energieverbruik voor milieumaatregelen in 1985

	10^{15} J	% van het nationaal energieverbruik ¹⁾
Lucht	78,2 – 197	1,9 – 4,8
Water	15	0,4
Bodem	4,1	0,1
Geluid	1,3	< 0,1
Warmte	12 – 135	0,3 – 3,3

¹⁾ 4.154×10^{15} J in 1985 (zie Hoofdstuk 2).

III. Conclusies en aanbevelingen

III.1. Conclusies

De energiebehoefte ten gevolge van milieumaatregelen in 1985 bedraagt naar schatting 110 à 350×10^{15} J, hetgeen overeenkomt met 2,7 tot 8,5% van het totale

primaire energieverbruik (voor energetische doeleinden) in 1985.

Deze hoeveelheden zijn afhankelijk van de te stellen normen en van de toegepaste methoden.

Vooral bestrijding van de luchtverontreiniging kost relatief veel energie. Dit hangt samen met de behandeling van uitlaatgassen van motoren in het verkeer en van emissies in de chemische procesindustrie. Ontzwaveling van stookolie zou een aanzienlijk groter additioneel energieverbruik ten gevolge hebben dan verwijdering van zwaveldioxyde uit rookgassen. Ook het gebruik van loodarme benzine leidt tot een groot additioneel energieverbruik [5].

Voorts zal het afzien van het gebruik van oppervlaktewater als koelmedium bij de elektriciteitsopwekking aanleiding geven tot relatief aanzienlijk extra energieverbruik.

III.2. Aanbevelingen

1. Uit de studie blijkt dat op een aantal gebieden veel te weinig gegevens beschikbaar zijn om tot voldoende kwantificeerbare conclusies te komen. De belangrijkste voorbeelden zijn:

- de normstelling: de 10% norm die hoofdzakelijk is gebruikt, is nauwelijks gefundeerd;
- emissies ten gevolge van dieselmotoren: energieverbruik voor reductie van stikstofoxyden-emissie;
- emissies door het overig gemotoriseerd verkeer: effecten van andere typen motoren en de kansen voor introductie op grote schaal van deze motoren;
- industriële procesemissies: de gebruikte schatting is wel erg grof.

Vooral het scheppen van normen is nog slecht ontwikkeld en zou in aanmerking komen voor verdere studie. Ook de industriële procesemissies en hun relatie met het additioneel energieverbruik voor bestrijding dienen nader te worden onderzocht. Beide onderwerpen zullen een grote inspanning vragen, als men tot betrouwbare cijfers wil komen. Het verdient aanbeveling een onderzoek naar het stellen van normen eerste prioriteit te geven.

2. Uit het oogpunt van energieverbruik verdient het verwijderen van zwaveldioxyde uit rookgassen van stookolie de voorkeur boven het ontzavelen van de stookolie zelf. Nagegaan zou kunnen worden of en op welke wijze onderzoek op dit terrein kan worden gestimuleerd.

3. Gezien het energie-intensief karakter van voorgestelde maatregelen tot bestrijding van emissies in het verkeer (katalytische naverbranding, loodarme benzine) zou een diepgaand onderzoek naar andere mogelijkheden ter bereiking van de gewenste doelen nuttig kunnen zijn.

4. Uit het oogpunt van energieverbruik zou zo lang mogelijk moeten worden gewacht met het afzien van het gebruik van oppervlaktewater als koelmedium voor elektriciteitsopwekking. Het gaat hier echter om een afwegingsproces waarin genoemde overweging slechts één van een aantal verschillende factoren vertegenwoordigt.

5. Het feit dat een doeltreffende bestrijding van de waterverontreiniging relatief geringe hoeveelheden energie behoeft te kosten is mede een argument voor de hoge prioriteit die hieraan reeds uit andere overwegingen dient te worden gegeven.

IV. Samenstelling van de werkgroep

Hoofdstuk 7 is opgesteld door prof. dr. ir. N.W.F. Kossen (Technische Hogeschool, Delft).

De hiervoor benodigde gegevens zijn dankzij de medewerking van een aantal personen en instanties ter beschikking gekomen. In het bijzonder dienen te worden genoemd:

prof. ir. L. Huisman	Technische Hogeschool, Delft
D.A. van Meel	Centraal Technisch Instituut TNO, Apeldoorn
ir. T. Teeuwen	Stichting Verwijdering Afvalstoffen, Amersfoort.

V. Literatuur

- [1] F. Muller, W. Pelupessy; Economische waardering van de schaarse lucht in Rijnmond. *Economisch Statistische Berichten*, 56 (1971), No. 2791, 293-306.
- [2] A. Curtis; Sharp turn for clean car thinking. *New Scientist*, 58 (1973), No. 844, 271.
- [3] Mens en Milieu, kringlopen van materie. Publ. 18, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 1973.
- [4] J. Laseur, A.J. Oortgiesen en J.A. de Ridder; Emissies van wegverkeer en scheepvaart. Scriptie, L.H. Wageningen, 1973.
- [5] Mens en Milieu, zorg voor zuivere lucht. Publ. 17, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 1973.
- [6] J. Kolar; Stickoxid - Emissionen aus Feuerungen. *Tü Essen*, 11 (1970), No. 10, 323-6.
- [7] A.J. Elshout, H. van Duuren; De emissie van stikstofoxyden als gevolg van verbrandingsprocessen in vuurhaarden van thermische centrales. *Elektrotechniek*, 46 (1968), No. 12, 251-6.
- [8] C.E. Blakeslee, H.E. Burbach; Controlling NO_x emissions from steam generators. *J. Air Pollution Control Association*, 23 (1973), No. 1, 37-42.
- [9] R.F. Sawyer; Atmospheric pollution by aircraft engines and fuels. *Agard Advisory Report No. 40*, 1972.
- [10] W.J. Beek; Mens en Milieu, prioriteiten en keuze. Publ. 8, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 1971.
- [11] T. Uno et al.; Scale-up of a SO₂ control process. *Chem. Eng. Progress*, 66 (1970), No. 1, 61-5.
- [12] I.S. Shah; MgO absorbs Stackgas SO₂. *Chem. Eng.*, 79 (1972), No. 14, 80.
- [13] R.E. Conser, R.F. Anderson; New Tool combats SO₂ emissions. *The Oil and Gas Jnl.*, 29 oktober 1973, 81-6.
- [14] Inlichtingen van Shell Internationale Petroleum Mij., afd. MFD, Den Haag.
- [15] Nederlandse chemische industrie investeert tien procent in milieu. *PT Aktueel*, 6 juni, 1973, 1.
- [16] The potential for energy conservation. Executive Office of the President, Washington D.C., 1972.
- [17] Wankel back fire. *The Economist*, 247 (1973), No. 6769, 84-5.
- [18] A.J.C. Koot, De toekomstige behandeling van huishoudelijk afvalwater. Vijfde Vakantiecursus in behandeling van afvalwater, 21/22 mei 1970, Delft.

- [19] Benodigde hoeveelheid energie t.b.v. de afvalverwijdering. Rapp. SVA/569, Amersfoort, 1973.
- [20] J.H. Bakker, J.J. Went; Electrical energy needs and environmental problems, now and in the future. Publ. 7, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 1971.
- [21] Global effects of environmental pollution. Symp. AAAS, Dallas, V.S. Ed. S.F. Singer, 1970. Reidel Publ. Co., Dordrecht.
- [22] J. Verwey; Het milieu en de koelwatertemperaturen van elektrische centrales. Publ. 2, Stichting Natuur en Milieu, 1973.
- [23] P.J. Wemelsfelder; Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening; mogelijkheden en consequenties. Publ. 12, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 1972.

Hoofdstuk 8. Economische en sociale aspecten van energiebesparing

door de werkgroep Sociaal- economische Facetten

I. Economische aspecten van het energievraagstuk

door drs. J. A. Bourdrez en prof. dr. L. H. Klaassen¹⁾

I.1. Inleiding

De versnelling in technologische ontwikkelingen en mogelijkheden tijdens en na de Tweede Wereldoorlog heeft een zeer grote impuls gegeven aan de economische groei in de verschillende industrielanden. Hoewel de verschillende ontwikkelde landen zich nog in het sterk stijgende gedeelte van een economische groeicurve bevinden, is het zonder meer duidelijk dat in een vroeger of later stadium factoren tot gelding zullen komen welke deze groei gaan afremmen. Enige jaren geleden was het nog niet geheel duidelijk wanneer deze omslag zou komen, en waar het buigpunt in de groeicurve zou komen te liggen. Inmiddels zijn er echter aanwijzingen gekomen, dat dit keerpunt in de nabije toekomst zal worden bereikt.

Een sterke economische groei houdt in dat het verbruik van grondstoffen, waaronder die voor energie-opwekking, sterk zal toenemen. De toegenomen vraag naar een bepaald goed zal in eerste aanleg leiden tot een stijgende prijs voor dat goed²⁾; deze prijsstijging brengt de toegenomen relatieve schaarste van dat goed tot uitdrukking. Ook kan de toegenomen schaarste in bepaalde gevallen tot vervangingsverschijnselen leiden: een ander goed zal dan tot op zekere hoogte de plaats van het eerstgenoemde goed gaan innemen. Het schaarser worden van belangrijke grondstoffen remt de groei van de productie van goederen. De als gevolg van schaarste stijgende prijs van een bepaalde grondstof zal echter tegelijkertijd de winning van die grondstof stimuleren. De exploitatie van een grondstoffenreserve kan immers bij een lage prijs uit economisch oogpunt onaantrekkelijk zijn maar bij een hogere wereldmarktprijs wel lonend worden. De economische groei kan ook worden afgeremd door een schaarste aan kapitaal en aan hooggekwalificeerde arbeid of door betalingsbalansproblemen (bijv. als gevolg van gestegen grondstoffenprijzen). Tevens kunnen onder bepaalde omstandigheden schaarste aan ruimte en belasting van het milieu de groei remmen. Zo kan de industriële en agrarische productie het milieu zodanig beïnvloeden, dat 'vrije' goederen zoals water en lucht schaarse en daardoor economische goederen kunnen worden.

Het is duidelijk dat wij in het huidige tijdsgewricht een groot aantal gevarieerde technische mogelijkheden tot onze beschikking hebben. Het is echter eveneens zeer duidelijk geworden dat niet alles wat praktisch uitvoerbaar of wenselijk is, kan worden gerealiseerd, omdat daarvoor onvoldoende kapitaal en gekwalificeerde mankracht aanwezig zijn. Dit, te zamen met de toenemende schaarste van andere produktie-factoren (zoals grondstoffen) houdt in dat de maatschappij prioriteiten zal moeten stellen. De vraag dient zich dan aan welke ontwikkelingen gestimuleerd of versneld, welke getemporeerd en welke beëindigd of in het geheel niet aangevangen moeten worden. In dit verband dient te worden opgemerkt dat er een nauw verband bestaat tussen energieverbruik, industriële en agrarische produktie en de verkeers- en vervoerssector. De overheid zal meer dan voorheen worden genoodzaakt fundamentele beslissingen voor langere termijn te nemen, waarbij zij een redelijk duidelijk beeld voor ogen moet hebben van de richting waarin de maatschappij zich zou moeten en kunnen ontwikkelen.

I.2. Het probleem van de energieschaarste

De industriële ontwikkeling in de landen van het Westen en in de Oostblok-landen en in mindere mate de economische ontwikkeling en de sterke bevolkingsgroei in de derde wereld leiden tot een steeds grotere vraag naar energie. De fysieke hoeveelheid der nog aanwezige fossiele brandstoffen is eindig. De technisch en economisch winbare hoeveelheden zijn echter nog beperkter; zelfs indien wordt aangenomen dat verbeteringen in winningstechniek en hogere wereldmarktprijzen de winbare reserves nog kunnen vergroten. Dit betekent dat wij in de toekomst zullen komen te staan voor een relatief tekort; thans zijn de aanwijzingen in deze richting het duidelijkst voor aardolie en aardgas. Deze relatieve schaarste aan fossiele brandstoffen moet onvermijdelijk tot uitdrukking komen in de prijs: de wereldmarktprijs van aardolie is in het jongste verleden dan ook sterk gestegen. De relatieve prijsstijging zal enerzijds dwingen tot efficiënter gebruik en anderzijds aanleiding zijn tot het in exploitatie nemen van nieuwe winningsgebieden. Beide factoren zullen de relatieve schaarste doen verminderen. Voor het verkrijgen van inzicht in de mate waarin de energieprijzen aanbodverruimend zal kunnen werken, verdient het aanbeveling een inventarisatie te maken van de wereldvoorraden aan fossiele brandstoffen, ingedeeld naar kostprijs (de prijs van het op de markt brengen).

De belangen van de internationale oliemaatschappijen zijn in dit verband voor een deel strijdig met die van de olieproducerende landen. Het is duidelijk dat de mening van de oliemaatschappijen met betrekking tot de produktie-omvang in een bepaald oliewingsgebied aanzienlijk kan verschillen van die van de regering van

¹⁾ Paragraaf I.6. werd samengesteld door drs. S. Koorn en drs. M.J. Stoffers; paragraaf I.7. door ir. G.W. van Stein Callenfels.

²⁾ 'Vrije' goederen vormen een uitzondering op deze regel. Dit zijn hulpbronnen die in zo overvloedige mate beschikbaar zijn, dat zij vrijelijk kunnen worden gebruikt.

het betreffende land. Jarenlang hebben regeringen aangedrongen op produktieverhoging. Hierin is thans een ommekeer gekomen nu zij zich realiseren dat de reserves niet onuitputtelijk zijn en de olieprijs aanzienlijk kunnen stijgen. Dit laatste zal des te sterker optreden naarmate de produktie meer wordt beperkt. Bovendien heeft de huidige valuta-onrust bijgedragen tot de opinie dat olie in de grond meer waard kan zijn dan geld op de bank.

Het gevolg is dat de regeringen van sommige olieproducerende landen nu de voorkeur geven aan een produktieniveau dat lager ligt dan dat waaraan de oliemaatschappijen en hun afnemers de voorkeur zouden geven. Voor de genoemde regeringen gaat het om een vraagstuk van optimalisatie van de bijdrage van de bestaande oliereserve tot de nationale welvaart. Zij moeten daarbij rekening houden met een van de produktie afhankelijke toekomstige prijsstijging en met een zekere reductiefactor voor de waarde van energiedragers die later worden geleverd. Een en ander zal er toe leiden dat de produktie over een langere tijd zal worden uitgesmeerd dan zonder het besef van de eindigheid der reserves het geval zou zijn geweest.

Verband tussen energieschaarste en schaarste aan grondstoffen

Daar de relatieve schaarste van verschillende essentiële grondstoffen zich in verschillende mate zal voordoen, zal ook de te verwachten stijging der wereldmarktprijzen uiteenlopen. Ook zullen in tal van gevallen nationale overheden heffingen leggen op schaarse grondstoffen: deze kunnen per land en per grondstof verschillend zijn. Als gevolg van dit alles zullen de prijsverhoudingen tussen de verschillende grondstoffen, halffabrikaten en eindprodukten zich aanmerkelijk wijzigen. Dit op zijn beurt zal zowel eindverbruikspatronen als economische structuren in vele landen veranderen. Ook kan het leiden tot een andere arbeidsverdeling tussen de industriële landen en de ontwikkelingslanden.

Toepassing van andere produktieprocessen kan het gebruik van belangrijke grondstoffen beperken. Zo kan men denken aan kringloopprocessen en aan het hergebruik van afval. Veelal zal besparing op het ene een groter verbruik van iets anders kunnen uitlokken; het minimaliseren van het verbruik van vitale grondstoffen en energie zal dus aanleiding geven tot economische optimalisatieproblemen. Als voorbeeld kan gelden dat bij de verwerking van huishoudelijk en industrieel afval ook energie kan worden opgewekt. Programma's ter bestrijding van milieuverontreiniging kunnen ook een extra energieverbruik met zich meebrengen. Omdat voor het transport van grondstoffen, halffabrikaten en eindprodukten, aanzienlijke hoeveelheden energie nodig zijn, kan ook dit aspect tot een andere geografische arbeidsverdeling leiden. Het optimaliseringsproces — met moeilijk kwantificeerbare milieu-aspecten, enz. als randverschijnselen — wordt dus een zeer complex geheel. Om dit optimaliseringsproces correct te kunnen uitvoeren is een goed inzicht nodig in de energie-inhoud van de verschillende produkten. Deze energie-inhoud is de som van drie componenten:

- de energie nodig voor de fabricage van het produkt: directe energie;

- de energie nodig voor de bij dat fabricageproces benodigde goederen en diensten (incl. de distributie): indirecte energie;
 - de energie nodig voor de vervaardiging van benodigde produktiemiddelen, zoals machines, gebouwen, wegen, enz.: ook een vorm van indirecte energie.
- Het is noodzakelijk bindende afspraken te maken inzake de toerekening van deze componenten.

1.3. Verband tussen prijs van en vraag naar energie

Door heffingen (invoerrechten, accijnzen, BTW, enz.) kan de overheid de prijs van een goed en daarmee de vraag ernaar en het aanbod ervan beïnvloeden. De overheid kan dus in principe via een — al dan niet gedifferentieerd — heffingstelsel de prijs voor energie dusdanig beïnvloeden dat een door haar meer gewenste economische structuur ontstaat. Dit laatste overigens steeds in samenhang met eventuele heffingen in andere sectoren: zo zal o.a. in de consumptieve sector niet alleen een prijsverhoging van energie, maar — bij een gelijkblijvend inkomen — ook een prijsverhoging van andere goederen en diensten de vraag naar energie beperken. Ditzelfde effect zal ook worden bereikt door afremmen van de groei van het besteedbare inkomen (bijvoorbeeld door verhoging van de inkomstenbelasting). De mate waarin de vraag naar energie wordt beïnvloed hangt dus niet alleen af van de prijzen van energie in haar verschillende gebruiksvormen, maar ook van die van velerlei andere goederen en diensten, inclusief die van de overheid.

Hoe heffingen op het verbruik van energie het produktieproces en de economische structuur beïnvloeden hangt niet alleen af van de energie-inhoud van de vervaardigde produkten, maar ook van de wijze waarop deze energie-inhoud is opgebouwd. Men moet voor een inzicht hierin de gehele produktie- en consumptieketen de revue laten passeren:

- a) *ingevoerde grondstoffen en halffabrikaten*
 - directe energie nodig voor winning en produktie;
 - indirecte energie, geïnvesteerd in goederen en diensten, vervoer, installaties, infrastructuur, enz., benodigd voor de winning en produktie;
- b) *in eigen land gewonnen grondstoffen*
 - directe energie nodig voor winning en produktie;
 - indirecte energie, geïnvesteerd in goederen en diensten, vervoer, installaties, infrastructuur, enz., benodigd voor het winningsproces;
- c) *vervaardiging van eindprodukten*
 - direct en indirect energieverbruik voor het produktieproces;
 - indirect energieverbruik, geïnvesteerd in produktie-installaties;
 - direct en indirect energieverbruik, benodigd voor intern vervoer (en opslag);
- d) *direct en indirect energieverbruik benodigd voor vervoer, distributie en opslag van de eindprodukten;*
- e) *direct en indirect energieverbruik benodigd voor behandeling van het door de produktie ontstane*

Tabel 1. Input-output-tabel 1968 (in lopende prijzen; toerekening van indirecte belastingen aan kopers) in 10⁶ gulden.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Landbouw, bosbouw en visserij	Steenkolenmijnbouw	Overige delfstoffenwinning	Voedingsmiddelenindustrie, dierlijk	Voedingsmiddelenindustrie, overig	Dranken en tabaksproducten	Textielindustrie	Schoeisel- en kledingindustrie	Papierindustrie	Chemische industrie	Olieraffinaderijen	Metallurgische industrie	Metaalproducten en machinebouw	Elektrotechnische industrie	Transportmiddelenindustrie	Overige industrieën
1. Landbouw, bosbouw en visserij	912	6	—	5587	1209	19	20	2	15	1	—	—	—	—	—	29
2. Steenkolenmijnen	1	4	—	—	1	—	1	1	—	165	—	10	2	1	2	4
3. Overige delfstoffenwinning	7	—	—	5	3	—	—	—	—	120	141	—	—	—	—	91
4. Voedingsmiddelenindustrie (dierlijke produkten)	34	—	—	479	261	2	1	—	—	27	—	—	—	—	—	6
5. Voedingsmiddelenindustrie (overige produkten)	2881	—	—	65	1885	91	10	—	2	132	—	—	1	—	—	3
6. Voortbrenging van dranken en tabaksproducten	8	—	—	—	16	32	—	—	—	16	—	—	—	1	—	—
7. Textielindustrie	28	1	—	2	10	1	680	339	12	23	—	—	14	13	17	100
8. Schoeisel- en kledingindustrie	—	1	—	—	—	—	—	113	3	8	—	—	—	—	8	—
9. Papierindustrie	5	1	11	21	166	31	22	6	403	117	—	2	29	45	4	315
10. Chemische industrie	375	5	15	14	55	13	237	11	111	1098	155	26	79	71	51	118
11. Olieraffinaderijen	69	—	29	48	87	9	21	5	28	134	—	18	25	22	13	72
12. Metallurgische industrie	—	2	—	—	2	—	—	—	1	19	—	1956	604	166	101	59
13. Vervaardiging van metaalproducten en machinebouw	62	10	29	83	71	16	7	8	7	143	12	36	535	118	363	181
14. Elektrotechnische industrie	18	3	12	4	12	4	3	1	4	27	8	22	102	104	144	50
15. Transportmiddelenindustrie	95	1	38	31	45	6	6	7	3	26	2	15	29	16	239	40
16. Overige industrieën	109	16	38	46	127	99	47	129	20	257	31	26	184	147	189	1656
17. Openbare nutsbedrijven	24	2	31	36	78	14	46	11	26	148	31	68	60	47	35	136
18. Bouwnijverheid	119	10	13	15	46	9	20	13	14	121	15	34	114	73	40	64
19. Handel	218	4	2	114	319	52	89	66	116	202	7	103	121	79	72	295
20. Woningexploitatie	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21. Zeescheepvaart en luchtvaart	—	—	3	—	1	1	1	1	—	7	—	1	6	6	1	8
22. Overige vervoersbedrijven	62	5	42	77	82	18	27	24	14	88	—	21	45	64	36	160
23. Overige diensten	222	8	29	46	88	26	89	58	42	221	39	70	168	157	70	323
24. Niet inbegrepen onder bovenstaande categorieën	30	32	—	21	42	20	36	39	29	46	10	115	182	123	70	64
25. Totaal ontvangen onderlinge leveringen	5279	111	292	6694	4606	463	1363	834	850	3146	451	2523	2300	1253	1455	3774
26. Invoer	290	58	21	322	3683	373	1285	658	517	2079	2406	898	1250	1527	1247	1498
27. Afschrijvingen	460	50	155	107	229	54	129	54	98	435	157	155	165	155	137	320
28. Indirecte belastingen	246	10	14	219	436	76	53	74	88	258	102	97	233	112	208	266
29. Subsidies	-32	—	—	-47	429	—	-3	—	—	-60	—	-2	—	—	—	—
30. Lonen en salarissen	1040	397	88	608	1180	398	862	836	481	1587	121	570	2450	1651	1640	2983
31. Overige inkomens	4210	-20	445	208	708	293	194	245	204	1216	300	313	719	1149	205	1108
32. Subtotaal (toegevoegde waarde)	5924	437	702	1095	2982	821	1235	1209	871	3436	680	1133	3567	3067	2190	4877
33. Bruto productie	11493	606	1015	8111	11271	1657	3883	2701	2238	8661	3537	4554	7117	5847	4892	9949

industriële afval en van het afval in de consumptieve sector¹);

f) direct en indirect energieverbruik noodzakelijk voor het geheel of gedeeltelijk compenseren van de gevolgen van milieu-aantasting.

Zoals uit deze opsomming blijkt, bestaat de energie-inhoud van een produkt (en het daarbij behorende afval) uit een ingevoerd en een in het verbruikende land toegevoegd gedeelte. De waarde van het eerste gedeelte wordt vooral bepaald door de prijzen op de wereldmarkt van energie in haar verschillende vormen. In deze prijzen komt een eventuele relatieve schaarste voor de wereld als geheel tot uiting. De nationale overheid kan slechts achteraf, via invoerrechten, een heffing leggen op deze waarde. Het tweede gedeelte

¹) Bij de behandeling van afval kan ook energie worden opgewekt.

leent zich beter voor heffingen op de energieprijzen; deze kunnen plaatsvinden aan de produktieve en/of de consumptieve kant.

1.4. De energieprijzen als instrument

Via prijsverhoging van energie zal het verbruik ervan — onder overigens gelijkblijvende verhoudingen — op de plaatsen waar dit het hoogste is, het eerst worden afgeremd. Daarmee werkt het prijsmechanisme een zuiniger maar vooral ook efficiënter verbruik in de hand.

Een nadere beschouwing leert dat prijsbeleid in het bijzonder daar succes zal hebben waar de energie-inhoud per eenheid produkt groot is en waar de vraagelasticiteit²) van dit produkt hoog is. Het effect

²) De vraagelasticiteit van een produkt kan worden uitgedrukt als het breukgetal van de procentuele reactie van de gevraagde hoeveelheid op elke procentuele verandering van de prijs.

Openbare nutsbedrijven	Bouwnijverheid	Handel	Woningexploitatie	Zeescheepvaart en luchtvaart	Overige vervoerbedrijven	Overige diensten	Niet inbegrepen onder boven- staande categorieën	Totaal onderlinge leveringen 1 t/m 24	Uitvoer goederen	Uitvoer diensten	Consumptie, gezinnen	Consumptie, overheid	Investering bedrijven	Investering overheid	Voorraden	Totaal finale vraag 26 t/m 32	Bruto productie
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
—	10	—	—	5	—	46	—	7861	2342	—	1160	30	—	—	100	3632	11493
29	1	4	—	—	1	10	5	242	—	—	—	20	—	—	-30	364	606
326	18	—	—	—	—	1	5	717	271	—	10	17	—	—	—	298	1015
—	—	—	—	7	—	164	—	981	3380	—	3655	10	10	—	75	7130	8111
—	—	1	—	7	—	195	7	5280	2267	—	3639	15	—	—	70	5991	11271
—	—	—	—	14	—	223	—	310	360	—	939	8	—	—	40	1347	1657
1	14	9	—	4	7	35	—	1310	1673	—	873	13	—	14	—	2573	3883
—	2	—	—	3	11	—	2	151	463	—	2132	5	—	—	-50	2550	2701
1	51	197	—	3	13	34	14	1491	644	—	66	17	—	—	20	747	2238
80	305	40	—	3	21	134	2	3019	4500	119	784	39	50	—	150	5642	8661
175	171	71	—	37	174	92	1	1301	1786	59	280	41	40	—	30	2236	3537
49	132	—	—	—	6	—	—	3097	1382	—	—	12	23	—	40	1457	4554
21	868	61	—	7	53	30	3	2724	2065	110	649	163	1447	129	-170	4393	7117
68	202	15	—	1	44	8	—	856	3815	50	604	99	499	24	-100	4991	5847
2	108	186	—	140	394	55	35	1519	1207	429	723	134	840	40	—	3373	4892
5	2257	373	—	23	70	397	—	6246	1362	30	1698	326	193	94	—	3703	9949
136	98	148	—	4	131	163	—	1473	—	—	1710	174	140	—	—	2024	3497
45	956	107	641	3	41	145	—	2658	10	220	463	424	8539	3850	—	13506	16164
19	542	78	—	2	29	105	—	2634	2077	796	8921	32	846	45	50	12767	15401
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3363	—	—	—	—	3363	3363
1	3	18	—	3	18	7	11	97	210	3268	120	13	—	—	—	3611	3708
14	145	2683	—	220	338	337	62	4564	—	1553	945	300	80	—	—	2878	7442
38	202	443	23	69	161	1077	116	3785	—	1145	8307	824	811	136	—	11223	15008
61	61	43	—	39	192	126	123	1503	427	526	-944	-540	—	80	—	-451	1052
1071	6145	4477	664	594	1704	3384	386	53819	30481	8305	40231	2176	13518	4412	225	99348	153167
237	2670	800	—	1452	403	225	666	24565	1040	—	7030	560	4701	49	1175	14555	39120
640	240	690	1040	510	835	425	—	7240	—	—	—	580	—	—	—	580	7820
83	659	389	32	37	247	294	—	4233	-48	85	4182	294	1269	211	—	5993	10226
-5	—	10	—	—	—	—	—	290	-803	—	-203	—	—	—	—	-1006	-716
748	4650	4970	—	772	3438	6940	-370	34040	—	—	—	—	—	80	—	80	38120
723	1800	4065	1627	343	815	3740	370	24980	—	—	—	340	—	—	—	340	25320
2189	7349	10124	2699	1662	5335	11399	—	74783	-851	85	3979	1214	1269	291	—	5987	80770
3497	16164	15401	3363	3708	7442	15008	1052	153167	30670	8390	51240	3950	19488	4752	1400	119890	273057

zal bovendien des te groter kunnen zijn naarmate de energieprijzen zelf hoger is. Het effect van prijsmaatregelen zal zich bij stijgende energieprijzen dan ook achtereenvolgens doen gevoelen op de volgende terreinen:

1. energie-intensieve producten met hoge vraagelasticiteit;
 2. energie-intensieve producten met lage vraagelasticiteit resp. niet-energie-intensieve producten met hoge vraagelasticiteit;
 3. niet-energie-intensieve producten met lage vraagelasticiteit.
- Een analyse van de relatieve betekenis van deze categorieën is zeer gewenst. Hiervoor is nodig:
- a. inzicht in de vraagelasticiteit van producten en de per eenheid vereiste energie;
 - b. inzicht in het gecumuleerde energieverbruik per

bedrijfstak (als eerste stap naar de energie-inhoud van producten).

Eerst wordt nu aandacht besteed aan het probleem van het vaststellen van vraagelasticiteiten, waarna in paragraaf 1.6 wordt beschreven hoe een eerste inzicht wordt verkregen in gecumuleerde energie-verbruiken.

1.5. Vraagelasticiteiten

Het vaststellen van vraagelasticiteiten levert een aantal moeilijk oplosbare problemen op. Aan de hand van specifieke tijdreeksstudies kan in bepaalde gevallen een prijs- en/of inkomensafhankelijkheid worden geschat. Deze schattingen worden vrijwel steeds gemaakt op basis van marginale prijsfluctuaties.

Er kan echter worden verwacht dat deze prijsfluctuaties in de toekomst van een geheel andere orde van grootte zullen zijn dan in het verleden. De gevonden afhankelijkheden mogen in dat geval niet worden gehanteerd; er

zal naar een andere methode moeten worden gezocht om toch enig inzicht in de vraagelasticiteiten te verkrijgen. Indien de overheid een op de beïnvloeding van energieverbruik gericht heffingsbeleid als essentieel element van haar energiepolitiek wil hanteren, dan zal zij ook moeten weten in welke stadia de verschillende soorten energietoevoegingen aan een bepaald produkt plaatsvinden, alsmede in welke energievorm deze toevoeging geschiedt¹). In een verder uitgewerkt energiemodel zal ook aandacht moeten worden besteed aan de benodigde directe en indirecte energie voor behandeling van industrieel en consumptief afval, alsmede die welke nodig is voor het opheffen van de gevolgen van door het betreffende produktieproces veroorzaakte milieubelastingen. Eveneens zullen in zo'n model relevante andere goederen en diensten (bijvoorbeeld transport) een plaats moeten vinden: heffingen ter vermindering van het wegverkeer hebben een wezenlijke invloed op het totale energieverbruik. Ook de invloed van de omvang van het besteedbare inkomen (met aspecten als inkomstenbelasting, inkomensnivellering) op het energieverbruik zal in de beschouwing moeten worden betrokken. Bij het opzetten van energiemodellen dienen twee benaderingswijzen naast elkaar te worden toegepast. In de eerste benadering wordt uitgegaan van macro-economische grootheden, zoals Bruto Nationaal Produkt, 'input-output'-tabellen²), enz. Met behulp van dit soort gegevens kunnen bijvoorbeeld de relaties tussen energieverbruik enerzijds en Bruto Nationaal Produkt, betalingsbalans, enz. anderzijds worden vastgesteld en kan het gecumuleerde energieverbruik per bedrijfstak alsmede het geaggregeerde energieverbruik in huishoudingen worden berekend. De tweede benadering is die waarbij wordt uitgegaan van micro-economische gegevens. Hierbij worden onderwerpen bestudeerd als het energieverbruik bij bepaalde industriële processen, de energie-inhoud van bepaalde produkten, de mogelijkheid om produkten met grote energie-inhoud te vervangen door produkten met een geringere energie-inhoud, enz. Ook zijn er de onderlinge vervangingsmogelijkheden welke tussen de verschillende primaire energiebronnen bestaan waardoor inzicht op korte termijn wordt bemoeilijkt. In beginsel liggen nl. per toepassing en dus per bedrijfstak deze mogelijkheden anders. Onderzoekingen [1] hebben duidelijk aangetoond, dat in de ene bedrijfstak de vervanging van de ene energiedrager door een andere bij een belangrijk geringer prijsverschil rendabel kan zijn dan in een andere bedrijfstak. Het macro-economisch model verschaft een aantal resultaten die kunnen dienen als feitenmateriaal voor het micro-economisch model. Op zijn beurt dient het micro-economisch model materiaal te verschaffen voor het bepalen van de invloed van wijzigingen in bepaalde produktieprocessen op macro-economische grootheden en structuren.

¹) Een complicatie van andere aard is het feit dat ook lagere overheden energieprijzen vaststellen. Voor bepaalde energievormen is dit zelfs overwegend het geval. Een effectief prijsbeleid, gericht op efficiënter energieverbruik vereist dus een hechte samenwerking tussen centrale en lagere overheden.

²) Zie paragraaf 1.6.

1.6. Geaccumuleerd energieverbruik per bedrijfstak

door drs. S. Koorn en drs. M.J. Stoffers

Het rechtstreekse energieverbruik in een bepaalde bedrijfstak is relatief eenvoudig vast te stellen. Men gaat daartoe na welke hoeveelheden van de verschillende soorten brandstoffen (steenkool, gas, elektriciteit en vloeibare brandstoffen) de bedrijfstak heeft verbruikt en vervolgens berekent men hoeveel energie deze vertegenwoordigen. Om de produktie van de desbetreffende bedrijfstak mogelijk te maken is echter meer, vaak veel meer energie nodig geweest, want ook voor de produktie van de door die bedrijfstak verbruikte grondstoffen/halfabrikaten en diensten is energie verbruikt. Deze energie heeft dus eveneens gediend om de produktie mogelijk te maken.

De som van deze beide componenten wordt hier aangeduid als het geaccumuleerde energieverbruik voor de bedrijfstak. Bij het berekenen van de geaccumuleerde energie per bedrijfstak wordt in deze paragraaf geen rekening gehouden met de indirecte energie voor duurzame kapitaalgoederen of voor door de bedrijfstak verbruikte geïmporteerde grondstoffen/halfabrikaten. Het geaccumuleerd energieverbruik in de bedrijfstakken die de grond- en hulpstoffen hebben geleverd, bestaat eveneens uit de som van de beide componenten.

Omdat alle bedrijfstakken direct of via tussenschakels halfabrikaten en diensten aan elkaar leveren, kan men het indirecte energieverbruik dat in de aan een bedrijfstak geleverde halfabrikaten en diensten is geïnvesteerd slechts schatten nadat men het directe energieverbruik van elke tak kent en ook weet welke leveringen van de andere bedrijfstakken deze voor zijn produktie nodig heeft. Deze kennis kan worden ontleend aan een zgn. 'input-output'-tabel. Tabel 1 geeft als voorbeeld een input-output-tabel voor 1968, waarin 23 bedrijfstakken worden onderscheiden.

De eerste 24 rijen en kolommen van deze tabel registreren voor welke geldswaarde de verschillende bedrijfstakken goederen en diensten aan elkaar of aan zichzelf hebben geleverd. Zo is bijvoorbeeld het getal 120 in Tabel 1 (3^e rij; 10^e kolom) de waarde (in 10⁶ gulden) van het verbruik door de chemische industrie van goederen en diensten voortgebracht door de bedrijfstak 'overige delfstoffenwinning'. Het getal 912 (rij 1; kolom 1) geeft aan wat de sector landbouw, bosbouw en visserij zelf heeft verbruikt aan door haar voortgebrachte goederen en diensten.

Kolom 34 (de eerste 24 getallen) geeft de waarde van de totale produktie aan goederen en diensten van de verschillende bedrijfstakken. In de eerste 24 rijen van de kolommen 26 t/m 32 vindt men de uiteindelijke afzet van de verschillende bedrijfstakken, onderscheiden naar uitvoer, consumptie, investeringen en voorraadvoering. In rij 26 vindt men de waarde per bedrijfstak van bij de produktie verbruikte ingevoerde goederen en diensten. De rijen 27 t/m 31 tenslotte geven de zgn. primaire produktiekosten per bedrijfstak (afschrijvingen, indirecte belastingen minus subsidies, lonen en salarissen en overige inkomens).

De tabel bevat een groot aantal belangrijke verbanden en is geschikt voor bepaalde wiskundige bewerkingen (zgn. matrix-transformaties), welke kunnen leiden tot de gewenste geaccumuleerde energieverbruiken per bedrijfstak. Hierbij zij opgemerkt dat een 'input-output'-

Tabel 2. Het rechtstreeks en geaccumuleerd energieverbruik in een aantal bedrijfstakken, gerangschikt naar energie-intensiteit (1972)

		Steenkool	Olie	Gas	Elektriciteit	Totaal	Elektriciteit ⁵⁾
Chemie	R ¹⁾	0,54	17,21	18,21	1,76	37,72	—
	Cum ²⁾	1,00	22,07	25,58	—	48,65	2,14
Metallurgie	R	8,00	2,39	3,73	2,01	16,13	—
	Cum	17,75	8,33	19,64	—	45,72	4,10
Zee- en luchtvaart	R	0,00	36,51	0,00	0,00	36,51	—
	Cum	0,08	39,82	0,75	—	40,65	0,17
Papier	R	0,00	1,09	8,96	0,88	10,93	—
	Cum	0,21	3,64	14,53	—	18,38	1,26
Voeding (dierlijk)	R	0,00	0,75	1,80	0,21	2,76	—
	Cum	0,17	5,69	6,74	—	12,60	0,54
Landbouw, bosbouw en visserij	R	0,00	3,86	2,98	0,16	7,00	—
	Cum	0,08	6,03	5,53	—	11,64	0,38
Overige industrieën	R	0,08	1,55	2,93	0,42	4,98	—
	Cum	0,38	3,43	6,03	—	9,84	0,67
Overig vervoer	R	0,00	5,90	0,59	0,42	6,91	—
	Cum	0,13	7,37	2,18	—	9,68	0,54
Textiel	R	0,00	0,96	1,97	0,46	3,39	—
	Cum	0,13	2,93	5,02	—	8,08	0,67
Bouwnijverheid	R	0,00	2,26	0,00	0,17	2,43	—
	Cum	0,33	4,10	2,26	—	6,69	0,42
Machinebouw	R	0,04	0,54	0,59	0,25	1,42	—
	Cum	1,17	1,97	3,10	—	6,24	0,59
Overige diensten	R	0,00	2,22	1,59	0,17	3,98	—
	Cum	0,04	3,31	2,85	—	6,20	0,25
Handel	R	0,00	2,18	1,05	0,17	3,40	—
	Cum	0,04	3,73	2,05	—	5,82	0,29
Voeding (overig)	R	0,00	0,63	1,42	0,21	2,26	—
	Cum	0,08	2,09	3,39	—	5,56	0,38
Transportmiddelenindustrie	R	0,04	0,67	0,59	0,25	1,55	—
	Cum	0,75	1,97	2,72	—	5,44	0,54
Genotmiddelen	R	0,04	0,59	1,88	0,21	2,72	—
	Cum	0,08	1,30	3,06	—	4,44	0,29
Kleding, schoeisel	R	0,00	0,59	0,38	0,33	1,30	—
	Cum	0,08	1,93	2,43	—	4,44	0,50
Elektrotechnische industrie	R	0,04	0,46	0,59	0,25	1,34	—
	Cum	0,54	1,47	2,30	—	4,31	0,42
Woningbezit	R	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	—
	Cum	0,04	0,71	0,38	—	1,13	0,08
<i>Energiebedrijven</i>							
Elektriciteitscentrales	R ³⁾	0,1	0,7	2,4	0,1	3,3	—
	Cum ⁴⁾	0,1	0,7	2,6	—	3,4	0,1
Kolenmijnbouw	R	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	—
	Cum	0,1	0,0	0,2	—	0,3	0,0
Olieraffinaderijen	R	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	—
	Cum	0,0	0,1	0,0	—	0,1	0,0
Gasbedrijven	R	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	—
	Cum	0,0	0,0	0,0	—	0,0	0,0

¹⁾ Rechtstreeks energieverbruik in 10⁶J per fl. aan totale primaire produktiekosten.

²⁾ Geaccumuleerd energieverbruik in 10⁶J per fl. aan totale primaire kosten van eindafleveringen.

³⁾ Rechtstreeks energieverbruik in J per J aan totale geproduceerde energie.

⁴⁾ Geaccumuleerd energieverbruik in J per J aan totale eindafleveringen van energie.

⁵⁾ Het geaccumuleerd elektriciteitsverbruik dient buiten de optelling te blijven om dubbel telling te vermijden.

tabel als hier behandeld steeds een momentopname is, welke geldt voor één bepaald jaar.

De resultaten van deze bewerkingen voor 1972 zijn weergegeven in Tabel 2. Daar van een voorlopige 'input-output'-tabel gebruik is gemaakt, zijn ook de resultaten van een voorlopig karakter¹⁾.

Het geaccumuleerde energieverbruik blijkt per bedrijfstak in zeer verschillende mate af te wijken van het rechtstreeks energieverbruik. Een duidelijk voorbeeld is het zeer hoge energieverbruik voor de verbruikte goederen en diensten in de metallurgische produktie. Deze industrie steunt op een grote toeleverende produktie,

¹⁾ Deze resultaten zijn een nuttige aanvulling op de in Hoofdstuk 3 vermelde gegevens.

die in de eigen bedrijfstak plaatsvindt, hetgeen tezamen met de energie-intensiteit van deze toeleverende produktie het grote verschil veroorzaakt tussen geaccumuleerd en rechtstreeks energieverbruik. Het hoge elektriciteitsverbruik draagt daar ook toe bij door de verhoudingsgewijs grote omzettingsverliezen in de elektrische bedrijven.

De voedingsmiddelenindustrie (dierlijke produkten) vertoont eveneens dit verschijnsel, als gevolg van de grote toeleverende produktie in de landbouw. Ook het verschil tussen rechtstreeks en geaccumuleerd energieverbruik in de machinestaalbouw, de elektrotechnische industrie en de transportmiddelenindustrie is aanzienlijk, vooral door de grote toeleverende produktie die in de metallurgische industrie plaatsvindt en die vervolgens in de genoemde bedrijfstakken doorwerkt. In verschil-

lende in hun algemeenheid niet energie-intensieve bedrijfstakken kunnen energie-intensieve onderdelen voorkomen, bijv. de tuinbouw als onderdeel van de landbouw, bosbouw en visserij en de wegenbouw als onderdeel van de bouwnijverheid.

Bij de energiebedrijven valt op, dat per geproduceerde eenheid energie in de vorm van steenkool ca. 30% geaccumuleerd verbruik nodig is. Dit is vooral het gevolg van het gebruik van steenkool en gas voor de eigen elektriciteitsopwekking. De gasbedrijven hebben nagenoeg geen eigen verbruik van energie.

Per eenheid elektrische energie zijn gemiddeld 3,4 eenheden energie in de vorm van steenkool, gas of aardolie nodig (direct en indirect verbruik samengenomen). Op basis van deze uitkomst bedraagt het rendement dus ca. 30%, hetgeen slechts weinig lager is dan het rechtstreekse rendement (33,7% in 1972).

Ten behoeve van een juiste interpretatie van de resultaten worden hier de beperkingen van de analyse expliciet weergegeven.

- Bij de berekening van het geaccumuleerde energieverbruik in een bedrijfstak is het bij de ingevoerde producten behorende geaccumuleerde energieverbruik niet in beschouwing genomen, dan wel, indien het importbrandstof betreft, is verondersteld dat het daarbij eenzelfde energieverbruik betreft als bij productie in Nederland. Weliswaar is het mogelijk een indruk te krijgen van de aard van de ingevoerde goederen en diensten, maar de produktietechniek per producerend land en dientengevolge het energieverbruik kan aanzienlijk afwijken.
- Het energieverbruik dat nodig is voor het tot stand brengen van de produktiemiddelen en de infrastructuur is, zoals reeds vermeld, buiten beschouwing gelaten.
- Er is geen onderscheid gemaakt tussen producten met een uiteenlopende energie-inhoud binnen een enkele bedrijfstak. De onnauwkeurigheid wordt groter naarmate er meer verschillende produktieprocessen tezamen worden gewogen en naarmate de samengevoegde bedrijven qua specifieke energiebehoefte sterker uiteenlopen. Een nauwkeuriger uitkomst ontstaat indien het mogelijk is meer sectoren te onderscheiden. Zo zou een splitsing van de landbouwsector in tuinbouw en overige sectoren en van de chemie in stikstofbindingsbedrijven, petrochemie en overige chemie een aanzienlijke verbetering betekenen. Door gebrek aan geschikte gegevens is een dergelijke splitsing thans nog niet aan te brengen.
- Een grote praktische moeilijkheid is dat het berekende geaccumuleerde energieverbruik een momentopname is en slechts geldt voor 1972. Bij een gewijzigde structuur van de produktie (bijvoorbeeld technische verbeteringen of overschakeling op andere brandstoffen) kan de situatie veranderen.

De resultaten geven een beeld van de energie-intensiteit van bedrijfstakken en de verdeling van het verbruik over de brandstofsoorten. Er kan nog geen nauwkeurige berekening worden gemaakt van het geaccumuleerde kostenaandeel per bedrijfstak van deze energieverbruiken. Men kan per energiedrager en zelfs per brandstofsoort verschillende producten c.q. toepassingsmogelijkheden onderscheiden die een verschillende prijs hebben. Een vermenigvuldiging van het gegeven energie-aandeel in

joules met een prijs per joule heeft dan ook weinig zin. Maar met een enigszins gewijzigde opzet van de eerder genoemde wiskundige methoden kan wel een globaal beeld van geaccumuleerde kostenaandelen in de totale primaire produktiekosten worden geconstrueerd. De resultaten van de berekeningen worden in Tabel 3 gegeven.

Deze cijfers geven ook aan welke invloed een aanvaankelijke prijsstijging van een brandstof bij volledige doorberekening tenslotte zal hebben op de afleveringsprijzen voor produkten van de verschillende bedrijfstakken. Een prijsstijging als hier bedoeld wordt veroorzaakt door stijgingen van de primaire kosten in de relevante energieproducerende bedrijfstak (dus van invoerkosten, lonen, afschrijvingen). Zo verhoogt bijvoorbeeld een aanvaankelijke prijsstijging van steenkool met 100% zowel de kosten van de eigen bedrijfstak (door het verbruik van zelf geproduceerde kolen) als de kosten van de andere bedrijfstakken, waardoor uiteindelijk de prijs van steenkool niet met 100%, maar met 115,31% stijgt. Wanneer de aanpassing volledig is voltooid, is de olieprijs met 0,03% gestegen, de gasprijs met 0,11% en de elektriciteitsprijs met 2,08%. Evenzo stijgen bij volledige doorberekening de prijzen van landbouwprodukten met 0,05%, de prijzen van dierlijke voedingsmiddelen met 0,07%, enz. (zie Tabel 3). Zolang er nu niets anders meer gebeurt, is een nieuwe evenwichtstoestand bereikt.

Tabel 3. Aandeel (in %) van de geaccumuleerde energiekosten in de totale produktiekosten (1972)

	Totaal	Steenkool	Olie	Gas	Elektriciteit
Metallurgie	17,03	8,48	1,74	2,19	4,62
Chemie	11,94	0,51	5,47	3,54	2,42
Zee- en luchtvaart	10,81	0,04	10,21	0,23	0,33
Overig vervoer en PTT	8,26	0,21	6,46	0,49	1,10
Papier	4,82	0,07	1,26	2,04	1,45
Handel	4,05	0,10	2,82	0,56	0,57
Voeding (dierlijk)	4,02	0,07	1,93	1,10	0,92
Landbouw, bosbouw en visserij	3,51	0,05	1,91	0,86	0,69
Overige diensten	3,42	0,09	2,00	0,81	0,52
Overige industrieën	3,41	0,14	1,61	0,85	0,81
Bouwnijverheid	2,93	0,26	1,62	0,35	0,70
Textiel	2,76	0,05	1,22	0,70	0,79
Metaalprodukten, machinebouw	2,70	0,55	1,06	0,39	0,70
Kleding en schoeisel	2,69	0,04	1,74	0,33	0,58
Transportmiddelen	2,57	0,35	1,25	0,35	0,62
Voeding (overig)	2,03	0,05	1,01	0,52	0,45
Elektrotechnische industrie	1,89	0,26	0,82	0,30	0,51
Genotmiddelen	1,76	0,05	0,96	0,41	0,34
<i>Energiebedrijven</i>					
Elektriciteit	33,37	2,08	8,06	19,37	3,86
Kolen	21,83	15,31	0,32	6,07	0,13
Olie	5,43	0,03	4,54	0,20	0,66
Gas	0,61	0,11	0,29	0,09	0,12

Uit Tabel 3 blijkt dat de metallurgie gevoelig is voor stijging van de steenkool- en elektriciteitsprijzen en de chemische industrie voor stijging van de olie- en gasprijzen. Scheep- en luchtvaart en de overige vervoersbedrijven (met dure brandstoffen als benzine) zijn zeer gevoelig voor de olieprijs. De andere bedrijfstakken vertonen een geaccumuleerd kostenaandeel van 2-5%. Bij de energiebedrijven vertonen de elektriciteitsbedrijven

Tabel 4. Gewogen geaccumuleerde kostenaandelen (in %) voor energie per uiteindelijke afzetcategorie (1972)

	Steenkool		Olie		Gas		Elektriciteit		Totaal	
	A ¹⁾	B ²⁾	A	B	A	B	A	B	A	B
Goederenuitvoer	0,61	1,05	1,88	9,50	1,04	2,80	1,02	1,07	4,55	14,42
Dienstenuitvoer	0,12	0,12	5,08	5,40	0,41	0,41	0,59	0,59	6,20	6,52
Consumptie gezinnen	0,08	0,08	1,61	3,52	0,51	3,03	0,45	1,71	2,65	8,34
Consumptie overheid	0,15	0,29	1,66	6,95	0,42	2,36	0,47	2,89	2,70	12,49
Investerings overheid	0,25	0,25	1,53	1,53	0,36	0,36	0,66	0,66	2,80	2,80
Investerings bedrijven	0,23	0,23	1,30	1,30	0,33	0,33	0,53	0,53	2,39	2,39
Voorraden	0,31	0,31	0,80	0,80	0,44	0,44	0,46	0,46	2,01	2,01
Totale afzet (samengewogen)	0,27	0,40	1,87	5,06	0,62	2,26	0,64	1,27	3,40	8,98

¹⁾ A = exclusief de energiebedrijven.

²⁾ B = inclusief de energiebedrijven.

een zeer hoog energiekostenaandeel (dat gevoelig is voor de gasprijs) en ook het aandeel voor de kolenmijnbouw is hoog.

Vervolgens kan men nu de gevolgen van een prijsstijging van energie nagaan voor de uiteindelijke afzetcategorieën (de uitvoer van goederen en diensten; de consumptie van gezinnen en van de overheid; de investeringen van overheid en bedrijven). Daartoe dienen de kostenaandelen voor energie per bedrijfstak tezamen met haar aandelen in de uiteindelijke afzetcategorieën te worden gewogen. Het resultaat van dit wegingsproces vindt men in Tabel 4.

Uit Tabel 4 blijkt dat in 1972 het geaccumuleerde kosten-aandeel voor energie hoog was voor de goederenuitvoer (vooral door rechtstreekse uitvoer van olie en aardgas) en voor de consumptie in de overheidssector. Het aandeel voor de gezinsconsumptie en voor de dienstenuitvoer was aanzienlijk, maar voor investeringen en voorraden bedroeg het slechts 2–3%. Dit zou een aanwijzing kunnen zijn dat de derde component van de energie-inhoud van producten, de indirecte energie voor de vervaardiging van benodigde produktiemiddelen (zie secties I.2 en I.3) in de meeste gevallen relatief gering is. Het hoge kostenaandeel bij de uitvoer van diensten is vooral een gevolg van het grote aandeel van lucht- en scheepvaart in deze categorie. Voorts blijken de vaste brandstoffen slechts een geringe rol te spelen in de kosten van de afzet in de verschillende categorieën, terwijl olie door een relatief hoge prijs (in 1972) het kostenpatroon domineert. Dit ondanks het feit dat in de meeste bedrijfstakken het gasverbruik het grootst is. De beperkingen van de voorgaande kostenanalyse zijn dezelfde als genoemd bij de berekening van het geaccumuleerde energieverbruik. Een extra complicatie is hier nog het gebruik van gemiddelde prijzen per brandstofsoort. Waar mogelijk is gebruik gemaakt van prijzen voor grootverbruik en kleinverbruik, maar betrouwbare gegevens over prijzen per bedrijfstak waren niet beschikbaar.

Als algemene conclusie kan gelden dat energie in het kostenpatroon van de produktie en de afzet een geringe of te verwaarlozen rol speelde in 1972. Dit met uitzondering van bedrijfstakken als de metallurgie, de chemie en het vervoer, de kolenmijnbouw en de elektriciteitsproduktie en de uiteindelijke afzetcategorieën goederenuitvoer (in feite slechts directe uitvoer van energie-dragers) en overheidsconsumptie.

I.7. Energiebesparing en investering

door ir. G. W. van Stein Callenfels

In het voorgaande is de mogelijkheid aan de orde gesteld om met behulp van een energieprijnsbeleid een efficiënter gebruik van energie te stimuleren. Het spreekt vanzelf dat een dergelijk beleid het eerst succes zou kunnen hebben in een energie-intensieve bedrijfstak. Het is daarom de moeite waard, te onderzoeken op welke wijze hogere energieprijzen de realisering van minder energie-verbruikende produktieprocessen zullen beïnvloeden.

Een optimale benutting van energie vereist investeringen. Van die investeringen wordt een zeker rendement verwacht en dat beheerst op zijn beurt de invloed van een investering op de fabrikagekosten van het eindprodukt.

Energie verbruiken is een thermodynamisch proces. Het verschil tussen de temperaturen bij toevoer en afvoer van de energie bepaalt de mate van nuttig gebruik (principe van Carnot). De temperatuur bij toevoer wordt vaak begrensd door de beschikbare materialen en zij kan alleen maar worden verhoogd door het gebruik van brandstoffen met een hoge verbrandingswaarde. De temperatuur bij afvoer kan worden verlaagd door een vergroting van het warmtewisselend oppervlak. Maar hiervoor zijn grotere en duurdere installaties nodig (zie ook Hoofdstuk 3). Voor elke achtereenvolgende te besparen energie-eenheid is een steeds groter investeringsbedrag vereist. Hoe lager de afvoertemperatuur, hoe groter het volume en hoe minder warmte-inhoud en warmte-overbrenging. De economische wet van de afnemende meeropbrengsten gaat hier volledig op. Het algemene beeld, gebaseerd op de in de industrie bestaande noodzakelijkheid van rendementen op additionele investeringen vindt men in zijn eenvoudigste vorm in Figuur 1.

Een investering tussen 1 en 2 op de grafiek wordt sneller terugverdiend dan een investering tussen 2 en 3, omdat de energiebesparingen groter zijn. De afnemende opbrengst vermindert gestaag de prikkel tot een meer optimale energiebesparing. Indien er in ruime mate energie aanwezig is, bestaat daartegen weinig bezwaar; in tijden van schaarste echter zal de industrie alleen maar wijzen van energiebesparing aanvaarden als het rendement op de ermee gepaard gaande investeringen voldoende is. Indien het nationale belang zulke besparingen noodzakelijk maakt, zouden bijzondere financiële faciliteiten kunnen worden ingevoerd ter wijziging van de rendementsnormen. Ook dient in dit

opzicht te worden opgemerkt dat naarmate de energiebesparingsinstallaties gecompliceerder worden, de kosten van hun onderhoud en hun exploitatie hoger zullen zijn.

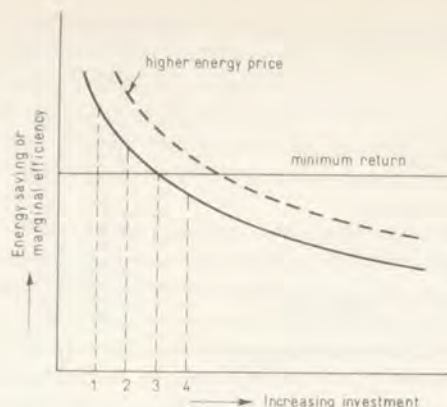
Ontwikkeling van nieuwe processen

Nog niet zo lang geleden hebben verscheidene gezaghebbende personen, onder wie prof. Robinson van de Universiteit van Surrey, verklaard dat de energieprijs zeer wel zou kunnen worden verdrievoudigd ter bevordering van energiebesparing, milieubescherming en risicodekking. Indien de energiekosten een aanmerkelijk deel van de produktiekosten uitmaken, zou kunnen worden verondersteld, dat een *zodanige maatregel op zichzelf een waardevolle drijfveer* zou zijn voor de ontwikkeling van nieuwe fabriekprocessen. Maar een dergelijke veronderstelling is *onjuist*, hetgeen als volgt kan worden aangetoond. Laten we aannemen dat in bepaalde gevallen de energiekosten ca. 20% van de produktiekosten uitmaken. Indien de energiekosten driemaal zo hoog zouden worden en daardoor tot de ontwikkeling van een nieuw fabriekproces zouden noodzaken, en de prijs van het gefabriceerde produkt concurrerend op de wereldmarkt zou moeten blijven, dan zou de door dat nieuwe proces te verbruiken energie niet meer kunnen zijn dan een derde van de oorspronkelijke hoeveelheid. Indien men de produktiekosten zou laten stijgen en doorberekenen, zou ofwel het produktieproces het domein worden van degenen die nog steeds aan goedkope energie zouden kunnen komen, ofwel de produkten worden vervangen door een volkomen ander produkt met dezelfde functie.

De besnoeiing van het energieverbruik met twee-derde is zo ingrijpend dat het in de meerderheid der gevallen een onmogelijkheid is. Als men dan bovendien nog bedenkt, dat een nieuw proces in het algemeen hogere afschrijvingen vereist wegens de aan een nieuwe ontwikkeling inherente risico's, dan zou het proces zelfs nog minder energie moeten verbruiken. Uit dien hoofde heeft de ontwikkeling van een nieuw proces alleen maar kans op welslagen als daarmee een combinatie van betere investering, onderhoud of kwaliteit kan worden bereikt, waaraan een zekere besparing op energieverbruik zou kunnen bijdragen.

1.8. De oliecrisis van 1973/74

In de Verenigde Staten en Europa is het al sinds enige jaren duidelijk dat in de periode van 1975-1985 een betrekkelijke schaarste aan olie zal bestaan. Op basis van verscheidene overwegingen was men van mening dat de produktie geen gelijke tred zou kunnen houden met de gebruikelijke verdubbeling van het wereldolieverbruik per tien jaar (tot nog toe verdubbelde het wereldenergieverbruik per vijftien jaar). Al eerder werd erop gewezen dat een verwacht tekort aan een bepaalde grondstof in het algemeen wordt weerspiegeld in de prijs van die grondstof. Evenwel is de prijs van olie aan de bron vele jaren tamelijk constant gebleven. Hier dus geen weerspiegeling van de relatieve schaarste. Daarom moet verwacht worden dat de prijs van ruwe olie in de komende 10 jaar aanzienlijk zal stijgen. Dit leidt ons tot de vraag: 'Wat is een reële prijs voor ruwe olie?' En op die vraag is het antwoord niet gemakkelijk. Behalve energiedrager is ruwe olie een grondstof voor de petrochemische



Figuur 1. Model van het verband tussen energiebesparingen, voortvloeiende uit een bepaalde maatregel en de daartoe vereiste investering.

industrie. Indien slechts beschouwd als energiedrager, zou een redelijke prijs overeenkomen met de kostprijs voor vervangende vormen van energie. Dat zouden kunnen zijn: energie opgewekt door een conventionele kerncentrale of een snelle kweekreactor, olie gewonnen uit leisteen of uit teerzand, vloeibare brandstoffen uit steenkool, zonne-energie, getijdenenergie, enz. Globale gegevens indiceren dat energie opgewekt met behulp van andere bronnen dan de traditionele pas economisch verantwoord is, indien de prijs van energie twee à drie maal de prijs van 1972 bedraagt.

Wordt de ruwe olie uitsluitend als grondstof voor de petro-chemische industrie beschouwd, dan zou de prijs kunnen worden gesteld op de kostprijs van op andere wijze geproduceerde olie, bijvoorbeeld door omzetting van steenkool. Ook in dit geval zijn er aanwijzingen dat dan de olieprijs ongeveer driemaal de prijs van 1972 zal moeten bedragen. Er zijn echter nog andere belangrijke factoren welke de prijs van ruwe olie mede bepalen. Deze factoren zijn o.a. de monopolistische positie der belangrijkste olie-producerende landen en de grote kwetsbaarheid van de economieën van vooral de geïndustrialiseerde landen voor een vermindering van de aanvoer van ruwe olie.

Een (te) lage prijs voor ruwe olie en daarmee voor energie in het algemeen kan er toe leiden dat de energie niet altijd voldoende efficiënt wordt gebruikt en dat een te grote energieconsumptie plaatsvindt. Zoals reeds eerder aangeduid, zal een verhoging van de energieprijs, en in het bijzonder van die van ruwe olie, enerzijds leiden tot een efficiënter gebruik van energie in de bedrijfs- en gezinshuishoudingen en anderzijds tot wijzigingen in de structuur en de onderlinge verhoudingen der verschillende bedrijfstakken, en tot veranderingen in het consumptiepatroon der gezinshuishoudingen. Indien de verhoging van de prijs geleidelijk plaatsvindt kan de economische structuur zich ook geleidelijk aanpassen, zodat geen ernstige ontwrichtingen van het economisch leven zullen plaatsvinden. Het crisisachtig karakter van de huidige olieproblematiek is een gevolg van de abrupte en grote prijsaanpassing, gecombineerd met de dreiging van een ernstige beperking van de levering van ruwe olie. De afgedwongen plotselinge aanpassing van de economie aan een verdubbelde olieprijs kan tot distorsies leiden omdat in bepaalde gebieden der economie de aanpassing zich niet zo snel en soepel kan voltrekken als wel gewenst

zou zijn. De ongunstige neveneffecten kunnen zich voordoen in de vorm van bedrijfssluitingen, werkloosheid, distributie, enz. De verdubbeling van de prijs van ruwe olie zal in vele landen de betalingsbalans ongunstig beïnvloeden en ter plaatse een deflatoir effect¹⁾ teweegbrengen. Het is niet uitgesloten dat deze prijsverhoging ook een ongunstig effect zal hebben op het monetaire stelsel in de wereld, waardoor het bijvoorbeeld noodzakelijk kan worden om een 'olie-dollar' in te stellen, waarvan het gebruik aan beperkingen zal moeten worden gebonden. Voor de ontwikkelingslanden zou de prijsverhoging zelfs een dubbel ongunstig effect kunnen hebben: het is niet denkbeeldig dat zij niet alleen met een verhoogde prijs voor ruwe olie worden geconfronteerd, maar ook met een extra prijsverhoging van industriële producten uit o.a. de ontwikkelde landen.

Een oplossing van de problemen, ontstaan door het verminderen van leveranties door bepaalde olie-producerende landen en door de sterk gestegen ruwe olieprijs, kan zowel aan de aanbodkant als aan de vraagkant worden gezocht. Het lijkt uit zowel politiek als economisch oogpunt van belang dat een oplossing wordt gevonden waarbij de afhankelijkheid van het buitenland, in het bijzonder van een kleine groep olie-producerende landen, minder groot wordt of in elk geval niet in aanmerkelijke mate zal toenemen. Dit houdt onder meer in dat het zoeken naar en het produceren van olie in eigen land en het daarbij behorende continentale plat zal moeten worden geïntensiveerd, en dat tezamen met West-Duitsland naar een technische oplossing om steenkool in gas om te zetten wordt gezocht, waarbij het — bij de hogere prijs voor energie — ook nog economisch rendabel kan zijn. Ook kan samenwerking met bijvoorbeeld de Verenigde Staten op het gebied van onderzoek naar het gebruik op grote schaal van zonne-energie van belang zijn.

1.9. Een wereldenergiepolitiek

De voorgaande beschouwingen hadden vooral betrekking op Nederland. Terecht zou de opmerking kunnen worden gemaakt dat we in feite niet met een Nederlands doch met een mondiaal probleem te maken hebben. Te gemakkelijk wordt daaraan evenwel vaak de conclusie verbonden dat de met energie samenhangende problemen op wereldniveau dienen te worden behandeld. Niet dat een dergelijke uitspraak op zich onjuist zou moeten worden genoemd; zij is echter te vaag. Het is bepaald ongewenst dat er in algemene termen over een wereldenergiebeleid wordt gesproken. Degene die het woord noemt, dient uiteen te zetten wat eronder moet worden verstaan. Wie krijgt er wat? Welke rechten zou men moeten verliezen en welke zou men moeten verkrijgen? Wat is de rol van de landen die primaire energiedragers produceren? Is een wereldenergiebeleid hetzelfde als een wereldprijsbeleid voor energie of zullen ook distributiesystemen een rol moeten spelen? In wiens hand zal de macht hierover gelegd moeten worden en wie zal erop toezien dat deze macht op de juiste wijze wordt gebruikt? Zolang deze problemen

¹⁾ Dit houdt in dat de totale nationale besparingen lager worden, waardoor minder kan worden geïnvesteerd dan nodig is voor handhaving van volledige werkgelegenheid.

niet nader en grondig zijn onderzocht is het zinvol zich te concentreren op een nationaal energiebeleid dat eerlijk rekening houdt met mondiale belangen.

1.10. Samenvatting en conclusies

1. Het zou nuttig zijn een inventaris op te stellen van de wereldreserves aan fossiele brandstoffen, gerangschikt naar hun kostprijs, om aldus te weten te komen in welke mate een hogere energieprijs de winbare voorraad zou vergroten.
2. De grote bedragen die in de toekomst moeten worden geïnvesteerd in de energievoorziening, nopen tot het vaststellen van prioriteiten, die een weloverwogen beperking van het energieverbruik met zich zouden kunnen brengen.
3. We dienen meer te weten te komen over de energie-inhoud van producten, indien we tenminste een verantwoord gebruik willen maken van de energieprijs als een instrument ter beheersing van vraag en aanbod. Bovendien moeten we een beter begrip verkrijgen van de elasticiteit van de vraag naar voor deze producten benodigde energie.
4. Tot voor kort speelde de energie alleen maar een wezenlijke rol in de metallurgie, de chemische industrie, de vervoerssector, de steenkoolwinning, de elektriciteitsopwekking en in de export van energiedragers.
5. De ontwikkeling van een nieuw productieproces heeft alleen maar een kans van slagen als daarbij een combinatie van verbeterde investering, onderhoud en kwaliteit kan worden verwezenlijkt, waarbij een besparing op het energieverbruik een bijdrage zou kunnen leveren.
6. Er zou een begin moeten worden gemaakt met de opzet van een gedetailleerd model, dat zich bezighoudt met de invloed van het energieverbruik op het totale patroon van goederen en diensten in Nederland.
7. Zo lang er nog geen duidelijk beeld is van een uitvoerbaar en aanvaardbaar energiebeleid voor de gehele wereld, moet het energiebeleid worden afgestemd op nationale schaal.

II. Energiebesparing als maatschappelijk vraagstuk

door prof. dr. H. M. Jolles

II. 1. Inleiding

Sinds nu bijna twee jaar geleden met deze studie werd begonnen, zijn we in Nederland, evenals in andere landen, geconfronteerd met een energiecrisis van een omvang als nog niet eerder het geval was. Men zou haar kunnen zien als de kleine catastrofe die onlangs

door Pen in verband met de problematiek van de ecologie, zo wenselijk werd geacht. Na het acuut worden van het olietekort in onze landen tegen het eind van 1973 beleefden we een situatie, die ons in staat heeft gesteld na te gaan, hoe de mensen in het algemeen op een dergelijke crisis reageren. En ofschoon we nog steeds niet over een consistent en betrouwbaar geheel aan feitenmateriaal beschikken kunnen toch al wel enkele algemene opmerkingen over deze reacties worden gemaakt. In de eerste plaats valt dan op, dat na de eerste meldingen van een dreigend tekort in ruime mate is gereageerd op verzoeken van de overheid om vrijwillig bepaalde bezuinigingen in de privésfeer en op het werk na te streven. Dat zou erop kunnen wijzen, dat velen niet zó zeer de slaaf zijn van hun gedragspatroon, dat daarin niet zonder al te veel moeilijkheden bepaalde veranderingen kunnen worden aangebracht.

Het bleek al spoedig, dat men in het algemeen de oliecrisis toch niet zozeer opvatte als een eerste aankondiging van wat ons op het terrein van de energietekorten nog meer te wachten staat, maar overwegend als een kwestie van politieke problemen die door politieke maatregelen zou kunnen worden opgelost. De snelle en krachtige aanpassing van het overheidsbeleid in Nederland droeg veeleer bij tot versterking dan tot verzwakking van het standpunt dat wij ten onrechte aan het schrikken waren gebracht. Het in alle opzichten ongelukkig verloop van de benzinedistributie heeft hiertoe eveneens overduidelijk bijgedragen.

Het zicht op de eigenlijke energieproblematiek zal nu grotendeels door impulsen van andere aard moeten worden gevoed. Het spreekt vanzelf, dat gelet op deze omstandigheden een publikatie als de onderhavige, waarin het energiebesparingsprobleem als zodanig aan de orde wordt gesteld, met des te meer belangstelling zal worden ontvangen, en dat alle daarin voorgestelde maatregelen terdege zullen worden bezien in het licht van het algemene overheidsbeleid en zijn premissen.

11.2. Ontwikkelingen in het denken over natuurlijke hulpbronnen

Het denken in termen van besparing binnen het bestek van bestedingen die men gewend was te doen, is een verschijnsel van de laatste tijd. Dat is alleszins begrijpelijk. Sinds de opkomst en de indrukwekkende ontwikkeling van de natuurwetenschappen, met name in de 17de en 18de eeuw is het denken in onze samenlevingen overheerst geweest door het besef, dat wij stonden en nog staan voor een onuitputtelijke reserve aan mogelijkheden tot verdere ontwikkeling, dat beperkingen slechts een kwestie van onvoldoende kennis en beheersing waren en dat er geen reden was om aan te nemen, dat bij voldoende inspanning niet steeds weer nieuwe fasen aan die ontwikkeling zouden kunnen worden toegevoegd. Twee omstandigheden hebben de instandhouding van dit geestelijk klimaat ten zeerste bevorderd. De eerste was de nog onvoltooidoede verkenning en inbezitneming van het aardoppervlak, waardoor men heel lang heeft kunnen denken, dat er altijd nog wel weer een 'ergens anders' was, waar nieuwe dingen mogelijk zouden zijn en waar onvermoede ontwikkelingen zouden kunnen plaatsvinden. De mens had, om zo te zeggen, de ruimte. De tweede omstandigheid was het exploiteren van de

grote en in het begin nog zeer onvolledig bekende voorraden aan fossiele brandstoffen als basis voor winning van energie voor diverse doeleinden. De geweldige expansie, naar binnen en naar buiten, van de Westerse wereld, zou zonder deze omvangrijke reserves aan fossiele brandstof niet in die vorm denkbaar zijn geweest. En ook hier heeft, tot voor zeer kort, de gedachte overheerst dat er altijd nog weer meer zou zijn en dat dit alleen maar moest worden ontdekt.

Deze en andere factoren hebben een cultureel klimaat doen ontstaan, en een daarbij passende geestesgesteldheid, getypeerd door expansie en groei en door een overtuiging dat men over onbeperkte reserves aan grondstoffen, energiebronnen en menselijk vernuft zou kunnen beschikken.

Eerst in de 20ste eeuw is op beperkte schaal sprake van een zekere afbrokkeling van dit geheel aan overtuigingen. Een van de eerste symptomen van een verandering in het denken was de 'conservation movement' in de Verenigde Staten in de dertiger jaren. Het was een eerste duidelijke aanwijzing, dat het tot dusverre gevolgde agrarische beleid uiteindelijk zou leiden tot uitputting van landbouwgronden en tot ernstige vormen van erosie. De gedachte aan bodembehoud, aan 'soil conservation', weldra ook in andere delen van de wereld tot enige erkenning gekomen, was een duidelijke aanwijzing dat men het 'elders' als eindig, als beperkt en als bedreigd ging beschouwen en dus als iets waarmee zuinig moest worden omgegaan.

Nog wat later zien wij de bezorgdheid groeien over de mogelijke beperktheid van de minerale hulpbronnen, in het bijzonder de metalen. E. de Vries' 'De aarde betaalt' [2] is zeker voor ons land één van de eerste aanwijzingen voor een verandering in het denken op dit punt, al kan men zeker niet zeggen dat deze eerste waarschuwing een onmiddellijke en algemene respons verwierf.

De bezorgdheid over de energiesituatie in de wereld is van nog recenter datum en ze is nog allerminst algemeen en gelijkgericht. En evenmin kan men stellen, dat ze zich voordoet in een geestelijk klimaat dat veel ruimte biedt aan het denkbeeld dat wij wellicht voorgoed terug moeten naar een lager niveau van energiebestedingen. De crises die wij tot dusverre hebben meegemaakt, hebben een ander karakter gehad. De grote economische crisis van de jaren dertig, hoe ernstig ze ook was en hoezeer ze ook haar stempel op generaties van mensen heeft gedrukt, was toch geenszins gedragen door het besef dat welvaart niet meer mogelijk zou zijn en dat men tot een permanente verlaging van het levenspeil zou moeten terugkeren. Het was, zo meende men, toch vooral een kwestie van onvoldoende beheersing van het conjunctuureel proces en vooral door de invloed van Keynes is de schok al spoedig overwonnen in de overtuiging dat iets dergelijks niet nog eens zou kunnen gebeuren.

Welvaart is bij voortdurend verkrijgbaar, mits men maar de juiste economische instrumenten hanteert en tijdig bijstuurt. Het probleem is verder alleen dat van de verdeling.

Nog sterker was dit gevoel tijdens de jaren van materiële schaarste gedurende de Tweede Wereldoorlog. Hier ging het uitsluitend om een door bijzondere omstandigheden geremde verdeling van elders wel overvloedig aanwezige goederen. Schaarste was hier slechts een gevolg van een tijdelijke misdadige politieke anomalie.

De zich nog steeds verder verwijdende kloof tussen rijke en arme landen in onze dagen past evenwel niet meer in het klassieke patroon, al wordt door velen nog steeds de opvatting verdedigd, dat het een kwestie is van onbillijke verdeling van in wezen toch voor ieder overvloedige mogelijkheden van bestaan en ontwikkeling. Maar het gevoel van onzekerheid neemt toe.

De huidige energiecrisis speelt zich daarom af in een merkwaardig en daardoor uiterst belangwekkend decor van tegenstrijdige modellen van schaarste. Het gaat hierbij niet meer om een crisis als de eerder genoemde ecologische, waarbij men door de nodige maatregelen tot behoud en beheer zowel het vroegere en stabielere evenwicht als de overvloed in ere kan herstellen. Het gaat ook allerminst om een crisis die alleen een gevolg is van onverstandige politieke manoeuvres en dientengevolge van tijdelijke aard, al spelen dergelijke factoren zeker mee om haar acuut te maken. De energiecrisis heeft allerlei kenmerken van een 'eindfase-crisis', waarbij het er om gaat te onderkennen dat bepaalde groeicurves, zeker voor een aantal jaren, zullen afzakken en dat de enorme voorraden fossiele brandstof die de basis van onze ontwikkeling en welvaart van de laatste twee eeuwen vormden, weldra niet meer toereikend zullen zijn, terwijl met vrij grote zekerheid kan worden gesteld dat vervangende energiebronnen nog vele jaren van onderzoek en voorbereidende arbeid en investering zullen eisen voor zij op grote schaal kunnen worden gebruikt.

Daar komt nog een andere factor bij. De zojuist gehanteerde typering van de energiecrisis, die de noodzaak van een aanmerkelijke periode van soberheid inhoudt, teneinde de beschikbare voorraden zodanig te besteden dat zij toereikend zijn totdat nieuwe energievormen beschikbaar zullen zijn, vooronderstelt een onvoorwaardelijk vertrouwen in het technologisch kunnen van de mens, zowel ten aanzien van de ontwikkeling van die nieuwe mogelijkheden als van de raming van de daarvoor benodigde tijd. En hier komt nu een ander verschijnsel in het beeld, nl. een sterk verbreide en groeiende achterdocht jegens het technologisch kunnen, in het bijzonder gevoed door de steeds verder om zich heen grijpende verontrusting over de aantasting van het natuurlijk milieu. De bestrijding van de energiecrisis wordt aldus bemoeilijkt door een gebrek aan vertrouwen in de daarvoor noodzakelijke technologie. De bezwaren in verschillende kringen tegen de Kalkar-toeslag vormen hiervan een recent voorbeeld.

Het gecompliceerde hierbij is, dat veel van deze vormen van verontrusting zelf weer pleidooien tot gevolg hebben om terug te keren naar een situatie op energiegebied, die in eerste instantie juist deze verontrusting had opgeroepen. Een deel van de bezwaren tegen de bouw en exploitatie van kerncentrales wordt immers stellig mede gedragen door de gedachte dat de meer traditionele energievormen niet die nadelen en gevaren met zich brengen en dat er dan ook geen reden is om van die traditionele vormen af te stappen. Er is tenslotte nog genoeg.

Eén van de kernmerken van een crisis is, dat bij velen onzekerheid bestaat over de vraag hoe men op haar moet reageren en hoe zij moet worden geïnterpreteerd. Eén van de middelen daartoe is het bijeenbrengen en

verschaffen van informatie over de huidige situatie op energiegebied en de te verwachten ontwikkelingen. Dat is nog wel niet een afdoende remedie tegen crisis-gevoelens die door het zo ingewikkelde samenspel van houdingen en strevingen van mensen worden gevoed, maar het is in ieder geval een onmisbare voorwaarde. Het is de taak van deze afsluitende bijdrage de sociale betekenis van het hiervóór bijeengebrachte materiaal in het kort te belichten. Dat kan op zijn best een voorlopige analyse zijn, want de beoefenaars der gedragswetenschappen zijn over de gehele linie aan een grondige bestudering van deze materie nog niet toegekomen, en zij worden deels door eenzelfde wantrouwen tegenover de technologie gehinderd als de verontrusten waarvan eerder sprake was.

II.3. Maatschappelijke kanten van resultaten der studie

Laten wij thans nagaan, welke uit maatschappelijk oogpunt relevante conclusies uit de voorgaande hoofdstukken kunnen worden getrokken.

In de eerste plaats valt het op, dat de beheersing van het energieverbruik en dus ook de besparing hierop niet centraal mogelijk is, omdat het hier gaat om een groot aantal besparingen, die elk maar een betrekkelijk bescheiden effect op het totale verbruik zullen kunnen hebben. Energieverbruik is een zeer gespreid gebeuren en besparing daarop is alleen denkbaar als resultante van ontelbaar vele beslissingen door zeer velen op zeer vele plaatsen. In die zin heeft besparing een diffuus karakter.

In de tweede plaats hebben de overzichten, met name in de Hoofdstukken 1 en 2, wel duidelijk gemaakt, dat de energieproductie afhankelijk is van de beschikbaarheid van grondstoffen en hulpmiddelen, die zeer ongelijkmatig over de aarde verspreid worden aangetroffen en ten aanzien waarvan een land als Nederland slechts bescheiden beheersingsmogelijkheden heeft. Dat impliceert, dat energiebesparing niet alleen gebonden is aan op de aarde aanwezige voorraden en technische mogelijkheden, doch minstens zo sterk aan politieke beslissingen, politieke coalities die daartoe worden aangegaan, en dientengevolge ook aan politieke verhoudingen en conflicten die tussen partners kunnen ontstaan.

In de derde plaats maakt vergelijking van de verschillende hoofdstukken van deze studie wel duidelijk, dat de aard van het energieverbruik en ook de aard van de mogelijke besparingen ten eerste verschillen en ook door veelal zeer verschillende factoren worden bepaald. Dat maakt het waarschijnlijk, dat enig energiebesparingsbeleid in het gunstigste geval een bundeling zal kunnen zijn van een samenstel van uiteenlopende maatregelen getroffen op verschillende plaatsen door verschillende personen of instanties met uiteenlopende graden van beheersing van het gebied. Het onderscheid tussen primaire en secundaire energie en de verschillende toepassingsmogelijkheden voor energiedragers (vooral die op basis van olie) zowel binnen als buiten de sfeer van energie-opwekking maken duidelijk, dat men zich een energiebeleid niet als één gesloten homogeen stelsel dient voor te stellen.

In de vierde plaats maakt een vergelijking van hetgeen

in de verschillende sector-analyses naar voren is gekomen duidelijk dat de besparingsmarges in de onderscheiden gebieden van menselijke activiteit grote onderlinge verschillen vertonen. Zij lijken, wanneer men ze afmeet aan het energieverbruik van de betrokken sectoren, het geringst in die gebieden van industrieel verbruik, waar het gaat om grote produktiesystemen, waar een ver ontwikkelde en scherpe kostenbewaking plaatsvindt en waar bijgevolg ook de mogelijkheden van een zo zuinig mogelijk energieverbruik reeds lange tijd tot de elementen van aandacht van de bedrijfsleiding behoren. Het spreekt vanzelf, dat hierbij zowel het energieprijnsbeleid van de energieproducenten als van de overheid een zeer belangrijke rol speelt. Dat de marges van besparing hier niet groot zijn, betekent niet dat men ze zou mogen verwaarlozen, aangezien de hoeveelheid verbruikte energie vaak zeer groot is. Een veel minder stringente verbruiksbewaking bestaat ten opzichte van het huishoudelijk verbruik (ten gevolge van bijvoorbeeld onvoldoende warmte-isolering). Vooral op dit gebied bestaat nog steeds de gedachte dat er energie in overvloed is en hierin wordt men aangemoedigd door de steeds verder gaande ontwikkeling van huishoudelijke apparatuur, het elkaar verdringen op de markt van steeds meer nieuwe, vernuftige hulpmiddelen, alsmede het feit dat de energievormen (gas, elektriciteit, olie en zelfs steenkolen) op de markt mede als concurrenten optreden en in belangrijke mate in elkanders plaats kunnen treden, zoals bleek toen in Nederland voor de eerste maal het aardgas in gebruik werd genomen.

In de vijfde plaats blijkt, dat wij ten aanzien van besparing van energie en de ontwikkeling van nieuwe mogelijkheden te maken hebben met uiteenlopende tijdslijmieten, waarbinnen de spanningen tussen beschikbare reserves en behoeften zich zullen voordoen. Daar komt bij dat de verwachtingen op het ene gebied een grotere mate van betrouwbaarheid bezitten dan op het andere. Dat brengt tweemaal onzekerheid teweeg. Ten eerste weet de burger ten aanzien van de verdere toekomst op bepaalde energiegebieden helemaal niet waar hij aan toe is, hoe lang de onzekerheid kan duren, hoe lang de schaarste zich zal doen gevoelen en wat de thans door deskundigen gedane uitspraken waard zijn. Ten tweede gaat het in de meeste gevallen bij beheersing van de energievoorziening om ingrepen en beslissingen op veel langer termijn dan die waaraan de burgers, en ook de politici, tot dusverre gewend waren. Dat vereist derhalve een investering, zowel in materiële zin als in vertrouwen en geduld, die in ieder geval één regeringsperiode stellig te boven zal gaan.

In de zesde plaats is in deze studie, (zij het niet zozeer systematisch of omvattend) ingegaan op de vraag, of het dreigend energietekort ook gevolgen zou kunnen hebben voor de produktie van goederen of diensten. Twee deelstudies mogen hier in herinnering worden geroepen: de produktie van kunststoffen (plastics) en van ammoniak, waarvoor belangrijke hoeveelheden energiedragers vereist zijn. Hoewel daarbij de mogelijke energiebesparingen reeds werden besproken, dient daarnaast ook de vraag te worden gesteld of de produktie zelf beperkt zou kunnen worden, en wat daarvan de repercussies zouden zijn. Dit klemmt te meer, omdat bij de analyse van het energieverbruik in de huishoudelijke sector wel bepaalde ontwikkelingen in de produktie-

sfeer expliciet worden afgeraden, zoals trends in de richting van centrale verwarmingsketels met ingebouwde valwindafleider, 'no-frost' koelkasten en waskasten. En in nog sterkere mate komt dit element tot uitdrukking in het hoofdstuk over verkeer en vervoer, waarin duidelijke verschuivingen in het gebruik (en daarmee onherroepelijk ook in de produktie) van bepaalde transportmiddelen worden aanbevolen, waarbij bijvoorbeeld de auto (zowel voor personen- als voor vrachtovervoer) niet buiten schot blijft.

Ten slotte valt uit Hoofdstuk 7 af te leiden, dat het milieu een nieuw gebied van energiebestedingen is, waarvan wij nog zo weinig weten dat mogelijkheden tot optimaal energieverbruik eerst op wat langere termijn duidelijker zichtbaar zullen worden. Wel is het van belang hier op te merken dat uit Hoofdstuk 7 kan blijken, hoezeer de energiecrisis en de milieucrisis zowel in onderling verband als los van elkaar dienen te worden gezien.

Het treffen van milieubescherpende maatregelen kan immers in feite leiden tot vergroting van het energietekort, terwijl anderzijds de doorwerking van zo'n tekort (getuige de voor het milieu meteen gunstige uitwerking van de autoloze zondag) op dit milieu dus weer zijn invloed kan laten gelden.

II.4. De energieverbruiker

Tot dusverre is in deze beschouwing nog slechts gesproken over diverse mogelijkheden om tot besparing van energieverbruik te komen. Aan de technisch-wetenschappelijke kant zijn die mogelijkheden zeker aanwezig, zij het, zoals we zagen, in ongelijke mate en met ongelijk potentieel. In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk is erop gewezen, dat het technisch mogelijke en het economisch mogelijke elkaar in hoge mate beïnvloeden en dat eerst een gecombineerde beschouwing van beide tot een meer realistische taxatie van te verwachten ontwikkelingen kan leiden. Dit doet ons nu ook een volgend gezichtspunt in de beschouwing betrekken, nl. dat van de energieverbruiker of consument. Het maakt hierbij uiteraard een belangrijk verschil, of men over energiebesparing spreekt in de zin van aanpassing van de energieproduktie aan schaarste c.q. gestegen prijzen van grondstoffen of andere factoren, dan wel in de zin van beperking van consumptie van beschikbare energievoorraden, bijv. middels distributie, en dus van reservevorming. In het eerste geval heeft het betrekkelijk weinig zin om te gaan nadenken over de vraag, waartoe de consument, binnen zijn patroon van bestedingen, bereid zou zijn op het punt van bezuinigingen dan wel van een doelmatiger gebruik van energie. Tot op grote hoogte zal hij wel mee moeten gaan. Daar komt bij, dat voor een aantal mogelijke besparingen geldt, dat zij zich aan de beïnvloedingsmogelijkheden van de consument onttrekken. Zo maakt het weinig verschil, of de bewoners van slecht geïsoleerde huizen wel of niet bereid zouden zijn rationeler met hun brandstoffen om te gaan zolang een op dit punt gebrekkige bouwwijze van de huizen tot een zo groot permanent warmteverlies leidt.

lets anders komt de problematiek te liggen wanneer men wil onderzoeken of het verbruik van energie door de consument niet slechts een kwestie is van reageren op de veranderingen in het prijsniveau van energie doch ook van eigen leefregels, mede in het licht van eigen en gezamenlijke doelstellingen, en dus ook van eigen vrijheidsmarges. De omvang van die marges bepaalt dan de mate waarin aan het gezichtspunt van de consument betekenis kan worden toegekend. Hierbij spelen verschillende factoren een rol. Het is begrijpelijk, dat de econoom aan deze marges een andere waarde zal toekennen dan de socioloog en de psycholoog en dat hieruit ook verschillende taxaties van mogelijkheden zullen resulteren. Een zestal factoren zal hier kort worden besproken.

1. Het consumentengedrag wordt beïnvloed door het geheel van door de consument c.q. door de betrokken samenleving gestelde prioriteiten in de na te streven doeleinden. Uiteraard staan de individuele en de collectieve prioriteitschema's geenszins los van elkaar. Dat wil zeggen, dat in het doen en laten van de consument gewoontevorming, de eenvormigheid van reageren op externe prikkels en een geheel van min of meer onontkoombare omstandigheden de prioriteitstelling bepalen en dat hierin maar heel langzaam en geleidelijk veranderingen optreden. Het is zelfs zo, dat tot op grote hoogte de reacties van consumenten op veranderingen in het consumptieaanbod kunnen worden voorspeld.

Overeenkomstige processen van gewoontevorming en continuïteit doen zich voor op het vlak van de samenleving als geheel, zoals bijv. tot uiting komt in nationale begrotingen en andere indicatoren van onze waardenhiërarchie. Het is natuurlijk wel goed om daarbij in het oog te houden, dat er grote verschillen kunnen bestaan tussen individuele en collectieve prioriteitschema's, zoals er ook verschillen kunnen en zullen bestaan tussen individuele wensen en het feitelijk gedrag van dezelfde individuen. Dat wil zeggen dat men, om een meer afgerond oordeel over in een samenleving bestaande stelsels van prioriteiten te kunnen geven, over zeer uiteenlopende informatie dient te beschikken.

Men kan stellen dat tot dusverre de component energie in het geheel van onze prioriteiten, zowel op individueel als op collectief vlak, geen dominerende rol heeft gespeeld. Energie was er en het was relatief goedkoop. Zelfs zou men kunnen zeggen dat heel veel van onze waardebeoordelingen min of meer energie-indifferent waren in die zin dat men geen rekening hield met de energiecomponent in de totstandbrenging of het voortbestaan van het betrokken goed. Als het derhalve nu gaat om een te verwachten verandering in de prioriteitstelling, dan zal allereerst de component energie een meer duidelijke plaats in die waarden-schema's moeten gaan innemen. Het is duidelijk dat belangrijke veranderingen in het prijsniveau van energie hierop een grote invloed kunnen hebben en dat deze invloed zich op verschillende levensgebieden verschillend zal doen gelden. Het valt momenteel echter nog niet te voorspellen tot welke keuzen enkelingen zullen komen of wat een overheid zal doen die zou worden geconfronteerd met een te maken keuze tussen energieverbruik en werkgelegenheid.

2. Een andere zaak die nauw met het eerste samenhangt, is het feit dat consumptiepatronen een betrekkelijk grote traagheid vertonen. Dit zal zeker mede het gevolg zijn van de omstandigheid, dat de erbij behorende uitgavenpatronen voor een belangrijk deel in veel wijdere verbanden vastliggen. Dit geldt bijv. voor een groot deel van de uitgaven op het terrein van de dagelijkse levensbehoeften, de uitgaven voor huisvesting, vorming en scholing, de op te brengen belastingen, uitgaven voor woon-werk-vervoer. Fluctuaties in consumptiepatronen spelen zich grotendeels af binnen elk van deze verbruikssectoren en wel binnen de marges die deze sectoren toelaten. Een traagheids-element is ook gelegen in de betrekkelijk grote duurzaamheid van diverse goederen die in de consumptieve sfeer een dominerende rol vervullen, zoals huishoudelijke apparaten, keukenapparatuur, e.d.

Ook om deze redenen zal men moeten verwachten, dat in een periode van langer durende energieschaarste de voornaamste algemene verandering in de consumptiepatronen het duidelijker worden van de energiecomponent als zodanig zal zijn, terwijl concrete invloeden op de consumptieve bestedingen naar de verschillende sociale groeperingen en per levensgebied zeer uiteenlopend kunnen zijn.

3. Verandering van consumptieve patronen is mede afhankelijk van allerlei veelal uiteenlopende tijdscycli. Hieronder vallen zo verschillende zaken als de levensduur van goederen tijdens het gebruik, de termijnen waarvoor verschillende beleidsprogramma's worden voorbereid c.q. tenuitvoergelegd (waaronder bijv. begrotingstermijnen), de onderscheiden vermogens tot het voor een langere periode vooruit denken en daarnaar handelen, zowel in de openbare als in de particuliere sfeer, termijnen van afschrijving van talrijke voorzieningen, de duur van de fasen in de gezinscyclus, de invloed van generatieverschillen, enz. Het zal duidelijk zijn, dat het hier om telkens andere tijdsperiodes gaat en dat het op ingewikkelde wijze over elkaar heen vallen of in elkaar grijpen hiervan mede aansprakelijk is voor een belangrijk stuk stabiliteit in de samenleving en tegelijk voor de relatief geringe elasticiteit waar het betreft het inspelen op crisisfactoren als bijv. de energieschaarste.

De volgende factoren hangen samen met de bovengenoemde drie, maar zij liggen meer in de sfeer van het individuele handelen.

4. Er bestaat een discrepantie tussen het niveau waarop de energieproblematiek aan de orde wordt gesteld en waarbij het uiteindelijk om een kwestie van mondiale omvang en dus ook van mondiale verantwoordelijkheid gaat, en het niveau waarop de enkeling tot een consumptief gedragspatroon komt en consumptieve beslissingen neemt. In dit opzicht is er verwantschap tussen het wereldbevolkingsprobleem en het energieprobleem: in beide gevallen kunnen de verlangens en de beleidslijnen van zeer verschillende aard en richting een gevolg zijn van het feit, dat hetgeen vanuit mondiaal gezichtspunt dringend gewenst is, niet of nauwelijks tot de burger doordringt en dan ook geen wezenlijke gevolgen voor zijn doen en laten heeft.

5. Er bestaat een voortdurend probleem van vorming en voorlichting. Hierbij zijn vooral de beide uitersten van belang. Aan het ene uiterste blijft de consument verstoken van de meest elementaire voorlichting over de energiesituatie, zodat het kostenniveau tot verkeerde conclusies leidt. Goedkope energie suggereert onbeperkte voorraden.

Aan het andere uiterste is er wel sprake van een uitgebreide voorlichting, doch het vormingsproces van de burger is zo ver voortgeschreden, dat de versterkte voorlichting twijfels en onzekerheden oproept of doet voortbestaan. 'De deskundigen weten het blijkbaar ook niet zo goed; ze zeggen allemaal wat anders'.

Bepaalde vormen of soorten van voorlichting ontmoeten wantrouwen en weerstand en de mondige burger moet in een wereld vol tegenstrijdigheden zelf zijn koers als consument uitzetten. En deze koers behoeft niet per definitie de meest zuinige te zijn in de objectieve zin.

6. Dan is er nog de kwestie van het zich op de door de overheid te treffen energiemaatregelen en van de vraag naar hun geloofwaardigheid.

Het bepleiten van zuinigheid door allen bij het voortbestaan van tal van schrijnende ongelijkheden en onbillijkheden in de wereld, en zelfs binnen de eigen samenleving, kan licht de gedachte doen rijzen dat men zelf al genoeg over heeft voor de goede zaak en dat de extra bezuinigingen maar moeten komen van degenen die het in zo veel opzichten veel beter hebben dan wij. Het bepleiten van zuinigheid komt extra slecht aan in een periode waarin allerwegen een welzijnspremissie ingang vindt en waarin tegelijkertijd een eerste correctie op grote inkomensongelijkheden wordt nastreeft. Wie dan zuinigheid door allen bepleit, loopt het gevaar te worden verdacht van een poging om onder het mom van een algemene problematiek terug te willen naar omstandigheden waaronder de verschillen tussen de weinigen en de velen weer sterker worden aangezet. Op zijn minst zal hier op éénduidige wijze moeten worden aangetoond, dat bezuinigingsmaatregelen op energiegebied niet onevenredig zwaarder drukken op de lagere inkomensgroepen.

II.5. Samenwerking tussen wetenschappen

Er is alle aanleiding om een ogenblik stil te staan bij de omstandigheid dat het energieprobleem samenwerking van beoefenaren van verschillende wetenschappen vereist. Deze samenwerking is noch vanzelfsprekend, noch een eenvoudige zaak.

Wetenschapsbeoefenaars worden in hun houding ten opzichte van elkaar ten dele getypeerd door een op onkunde gebaseerde bewondering, ten dele ook door allerlei vormen van wantrouwen, althans gebrek aan vertrouwen in de mogelijkheden en vermogens van de ander. Het valt niet te ontkennen dat de gedragswetenschappen voor een niet onbelangrijk deel zijn geworden tot bergplaats voor tal van vormen van maatschappijkritiek en dat zij ook tot de dragers behoren van de gedachte dat een ongeremde groei en expansie van het natuurwetenschappelijk en technologisch kunnen onze moderne samenlevingen heeft geplaatst voor een aantal bijzonder moeilijk handelbare problemen. Op het terrein van de energieproductie en de studie van energiebesparingsmogelijkheden kan de gedachte maar niet tot

zwijgen worden gebracht dat wij door tal van vooroordelen en misvattingen omtrent elkaars kundigheden, kennis en wetenschappelijke strevingen worden gehinderd bij het bereiken van een aanvaardbaar minimum aan nuttige en zakelijke samenwerking. Aan de andere kant is hier, als op zo vele terreinen van studie, tegelijk de hoop, dat wanneer men naar beoefenaren van diverse wetenschappen bijeen brengt rond een op het oog gemeenschappelijk thema, de samenwerking en gezamenlijke produktiviteit als vanzelf op gang komen en tot bruikbare resultaten voeren. Het één noch het ander is vanzelfsprekend.

Wil er werkelijk samenwerking op energiegebied tot stand komen in de wetenschap, dan zal men zich van enkele uitgangspunten terdege bewust moeten zijn. In de eerste plaats zal men zich dienen te realiseren dat de differentiatie en specialisatie die het gebied der wetenschappen kenmerkt, in elk geval dit grote winstpunt heeft opgeleverd, dat er een diversiteit van stukken kennis en kunde is ontstaan, waarvan op velerlei wijzen gebruik kan worden gemaakt. Dit betekent dat elke wetenschapsbeoefenaar in principe tot de best denkbare bijdrage aan een meer disciplines omvattende problematiek kan komen vanuit zijn eigen specifieke deskundigheid. Hier is het inzicht in mogelijkheden en beperkingen het grootst. In de tweede plaats is de samenwerking tussen de wetenschappen vooral gediend met systematisering der vanuit elke deelnemende discipline te stellen vragen aan anderen, meer dan door een ongericht aanbod van informatie. En in de derde plaats zal er meer begrip dienen te groeien voor het feit dat elke wetenschap haar eigensoortige relaties met de maatschappelijke praktijk heeft en dat ook deze in wat de wetenschap te bieden heeft blijven doorwerken, zoals ze ook invloed hebben op haar contacten met andere wetenschappen.

II.6. Afsluitende opmerkingen

De onder de vorige punten opgesomde conclusies pretenderen niet een ook maar bij benadering afgerond beeld te geven van wat er op grond van de hier bijeengebrachte informatie over het energieprobleem zou zijn te zeggen. Wel willen wij hier nog op een tweetal vraagstukken iets nader ingaan. In de eerste plaats een opmerking over de kwestie van de beheersing van gewenste energiebesparingen door vormen van beleid. En in de tweede plaats zal een aantal wenselijkheden voor verdere studie, met name op sociologisch gebied, worden geformuleerd. Waar in dit rapport gesproken wordt over besparingsmogelijkheden, had dit in overwegende mate betrekking op wat technisch (met inbegrip van investering en rendement) mogelijk is bij de huidige stand van de kennis. Het is echter minstens zo belangrijk in welke mate het gedrag van mensen, groepen en instanties te beïnvloeden is, wil men de technische en economische mogelijkheden ook inderdaad verwezenlijken. Soms wordt gepleit voor het bevorderen van een mentaliteit waarbinnen verspilling als a-social wordt gezien in alle geledingen van de maatschappij. Dit is zonder twijfel een belangrijk gezichtspunt en tot op zekere hoogte ook wel te verdedigen. Ten minste drie overwegingen kunnen daar evenwel tegen worden ingebracht. Ten eerste kan alleen die

verspilling als a-sociaal worden bestempeld en in een samenleving die soberheid hoog waardeert worden bestreden, als zij door de mensen als verspilling wordt herkend. Dit nu is lang niet altijd mogelijk. Op sommige gebieden (bijv. in vele productieprocessen) is voor velen de mogelijkheid tot oordelen zeer beperkt. Op andere gebieden is ook de meest royale produktie bijna immuun voor het verwijt van verspilling. Wie zou bijv. durven stellen dat er verspilling van geneesmiddelen plaatsvindt? Of van statistische gegevens? Je kunt maar niet weten!

In de tweede plaats — en dit hangt samen met het eerste punt, is het voor de samenleving vaak uiterst moeilijk, zo niet onmogelijk, een werkelijk effectieve sociale controle op het consumptief gedrag tot stand te brengen. In een samenleving die zekere graden van individuele vrijheid, ook vrijheid van economisch handelen, aanvaardt en het recht op 'privacy' erkent zijn aan deze vormen van sociale controle grenzen gesteld. Hoewel een mentaliteitsverandering in deze een noodzakelijke voorwaarde moge zijn, is zij allerminst voldoende.

Ten derde dient erop te worden gewezen dat een samenleving waarin prestige in allerlei vormen wordt nagestreefd, een positieve houding aanneemt ten opzichte van vormen van verspilling waarin mensen het door hen verworven prestige uitdrukken. Men kan dat wel willen veranderen door een cultuurpatroon waarin besparing in zekere zin het hoge prestige van de verspilling overneemt, maar dat maakt deze vervanging nog niet tot een eenvoudige kwestie van mentaliteitsbeïnvloeding.

Als wij tegen deze achtergronden de hoofdstukken van dit rapport nog eens doornemen, dan ontmoeten wij een aantal vormen van gebruiksbeheersing, die ook in het verleden reeds zijn toegepast en waarvan de bruikbaarheid is aangetoond of kan worden verondersteld. Allereerst kan zuinigheid worden bevorderd door een concurrentiesituatie, waarin de prijs van alle vormen van energie invloed heeft op de produktie van goederen en op de prijs van die goederen op de nationale of internationale markt. Het zal duidelijk zijn, dat dit element alleen daar een nuttige werking zal hebben waar dergelijke concurrentieverhoudingen bestaan, dus in het bedrijfsleven. Ten tweede kan worden gedacht aan stimuleringsmaatregelen op het gebied van de research die rechtstreeks op mogelijkheden tot energiebesparing is gericht. Hierbij kunnen bedrijfsleven en overheid nuttig samenwerken. Ten derde kan worden gedacht aan vormen van rechtstreeks overheidsingrijpen in de produktie, de distributie of het verbruik van energie, ofwel door een distributiesysteem zoals recentelijk voor olieprodukten heeft bestaan of door bepaalde vormen van wetgeving ter zake. Een bijzondere vorm van overheidsingrijpen is uiteraard gelegen in het regelend optreden op het terrein van de prijsvorming, door prijsbeschikkingen, invoerheffingen, BTW-tarieven, verbruikerstarieven e.d. Wat de tariefstructuren betreft, werd tot dusverre verspilling eerder in de hand gewerkt dan geweerd doordat ook voor huishoudelijk gebruik bij overschrijding van een bepaald maximum een lager tarief werd berekend. Een andere tariefvorming zal overigens repercuties hebben op het gehele terrein van bestedingen, lonen en inkomens en zeker ook een rol spelen in de discussie die de laatste jaren wordt gevoerd

over de herziening van de inkomensongelijkheid.

Een gebied dat speciale aandacht verdient, is het zich houden aan de diverse op energiegebied te stellen normen van zuinigheid. Het is uiteraard bijzonder moeilijk om permanent en effectief te controleren hoe de thermostaten van centrale verwarmingssystemen in woonhuizen zijn afgesteld en of de overgordijnen wel goed worden dichtgetrokken, tenzij men overgaat tot verbruiksdistributie voor particulieren of tot een progressief tarief. Toezicht op het terrein van kwaliteit en gebruiksprestaties van apparaten lijkt voorshands doelmatiger.

Ten slotte dient aandacht te worden besteed aan de propaganda en voorlichting inzake het energieverbruik bij de verschillende energiesoorten. Tot dusverre traden bijv. de openbare nutsbedrijven op energiegebied tegenover elkaar veelal als concurrenten op hetgeen eerder verbruiksstimulerend dan bezuinigend zal hebben gewerkt. In de loop van de jaren werden de voorlichting, met name aan particuliere verbruikers, en ook de niveaus van het toezicht op het verbruik, met het toenemen van het aantal huishoudelijke apparaten en hun energieverbruik, alleen maar aan de steeds hogere eisen aangepast (bijv. door het inbouwen van zwaardere zekeringen, e.d.). Propaganda en voorlichting kunnen in zo'n situatie moeilijk uit elkaar worden gehouden. Tegenwoordig wordt verbruikstimulerende propaganda reeds teruggedrongen; een veel meer op besparing gerichte voorlichting zou van groot nut kunnen zijn. Zowel de particuliere verbruiker als de overheid blijken op dit punt in een nadelige positie te verkeren. De overheid zou zowel dienen te streven naar een verbeterde en continue vergaring van statistische en technische gegevens inzake tal van aspecten van energieproduktie en energieverbruik, alsook striktere normen moeten stellen aan de verschaffing van voorlichting aan de onderscheiden categorieën verbruikers. Het inbouwen van een meer consistent energiebeleid in het gehele overheidsbeleid, vooral op landelijk en internationaal niveau, zal voorts de discussie over deze problematiek zeker stimuleren. Het hieruit resulterende proces van beleidsvoorbereiding en beleidstoetsing kan tevens bij diverse groeperingen van verbruikers een streven stimuleren om zelf ook betere voorlichting te verkrijgen.

Onderzoekprioriteiten

Er behoeft hier geen opsomming te worden gegeven van de soorten van voortgezette studie op technisch en natuurwetenschappelijk gebied die nodig zijn ten dienste van een meer doelgericht programma van energiebesparing; dat is op diverse plaatsen in dit rapport reeds gedaan. Wij willen ter afsluiting van deze sociologische bijdrage volstaan met het noemen van een aantal desiderata op het gebied van het sociaal-wetenschappelijk onderzoek naar deze problematiek. Het moet helaas bij een opsomming blijven; een nadere uitwerking vergt een veel grondiger onderzoek-programmering dan in dit preliminaire stadium mogelijk is; wij hopen echter dat het tot een dergelijke programmering zal komen.

(a) Op verschillende plaatsen in dit rapport is gesteld dat een goede, gedetailleerde en permanente statistische bewaking van de energieproblematiek nog ontbreekt.

De bestaande energiestatistiek vertoont op allerlei punten nog aanmerkelijke lacunes. Het is van het grootste belang, dat de dienstverlening op dit punt door het Centraal Bureau voor de Statistiek wordt uitgebreid. Voorgesteld wordt derhalve gelden ter beschikking te stellen uit rijksmiddelen om hierin ten spoedigste te voorzien. Ook is het gewenst, aan deze materie aandacht te schenken in het kader van de werkzaamheden van de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid.

(b) Het zal duidelijk zijn, dat energiebesparende maatregelen in vele gevallen extra tijd, wetenschappelijke aandacht en andere inspanningen (bijv. ook in de sfeer van overleg, inspraak, e.d.) met zich meebrengen. Vanzelfsprekend mag de vraag worden gesteld hoe zich de hiermee gemoeide kosten verhouden tot de beoogde besparingen. In het algemeen lijkt het ten eerste gewenst voor het gehele gebied van het energieverbruik en voor bepaalde deel terreinen hierbinnen tot een goede kosten-baten analyse te komen.

(c) Telkens weer is in de voorgaande hoofdstukken naar voren gekomen dat bij elk van de mogelijke besparingen een vaak ingewikkeld samenspel van overwegingen tot een vaak even ingewikkelde reeks van beslissingen moet leiden. Daarbij gaat het nogal eens over zaken die pas op middellange of lange termijn actueel worden. Het is daarom van groot belang, dat een stringenter onderzoek plaatsvindt van de besluitvormingsprocessen op energiegebied alsmede van de factoren, die hierbij versnellend dan wel vertragend kunnen werken.

(d) Bij het bespreken van de wenselijkheid van een mentaliteitsverandering, hebben wij al enkele opmerkingen gemaakt om aan te geven hoeveel factoren daarbij aan de orde komen. Dat maakt het eens te meer van belang een studie te maken van de houdingen en gedragingen van enkelingen en groepen op energiegebied en een onderzoek te doen naar de factoren die deze houdingen en gedragspatronen kunnen veranderen. Al zal hierbij een nuttig gebruik kunnen worden gemaakt van een veelheid van onderzoekresultaten op verwante gebieden, toch is onze kennis terzake van dit onderwerp nog zeer gebrekkig.

(e) Op verschillende plaatsen in dit rapport is tevens gesproken over de voorschriften die op de diverse terreinen van kracht zijn. Er zijn richtlijnen en voorschriften die betrekking hebben op de veiligheid in bepaalde productieprocessen, op het comfort in verblijfsruimten, op de lichttoevoer c.q. lichthoeveelheid in werkruimten en tal van andere. Het zal zonder meer duidelijk zijn dat deze voorschriften ook verband houden met verschillende waardensystemen in onze samenleving (veiligheid, vrijheid, gezondheid, billijkheid, enz.). Energiebesparing betekent mede het hoger stellen dan voorheen van de waarde 'zuinigheid' in deze waardenhiërarchie. Dit doet de vraag rijzen welke invloed de verschillende systemen van voorschriften en richtlijnen hebben op de mogelijkheden tot energiebesparing. Het gebied van de woningbouw, waarover in verband met de warmte-isolatie en de daaraan verbonden meerkosten al eerder opmerkingen werden gemaakt, moge hier als voorbeeld dienen. Doch er zijn vele van dergelijke gebieden te noemen. Een onderzoek op dit terrein zou ook het bijkomend

nut kunnen hebben dat de straks op energiegebied te stellen zuinigheidseisen niet al te zeer op zichzelf blijven staan, doch worden geplaatst in een zinvol verband met andere maatschappelijke preferenties, prioriteiten, idealen en vrezes.

Ten slotte dit. Het energievraagstuk stelt ons voor een multidisciplinaire uitdaging. Zoals reeds eerder werd gesteld, hopen wij dat dit vraagstuk zijn plaats zal krijgen in de reeks van vraagstukken, die een interdisciplinaire samenwerking kunnen bevorderen. Dat zal het voor onze overheid en voor de organen van het wetenschaps- en onderzoekbeleid des te zinvoller maken voor het onderzoek op het gebied van de energiebesparing de nodige middelen ter beschikking te stellen.

III. Samenstelling van de werkgroep

De werkgroep die Hoofdstuk 8 heeft samengesteld, bestond uit de volgende leden:

drs. J.A. Bourdrez	Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam
ing. C.G. Booij	AKZO, Arnhem
prof.ir. J.J. Broeze	Emeritus hoogleraar, Technische Hogeschool, Delft
dr. T. Dijs	Nederlands Normalisatie Instituut, Rijswijk
drs. G.E. Engberts	Technische Hogeschool, Delft
dr. ir. E.T. Ferguson	Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven
prof.dr.H.M. Jolles	Gemeentelijke Universiteit, Amsterdam
drs. G.R. Otten	Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam
drs. P. Rademaker	Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven
mevr. E.J. Sevenhuijsen-Hoogewoning	Lid van de Sociaal-Economische Raad, Den Haag
drs.M.J. Stoffers	Centraal Planbureau, Den Haag
G.A. de Vries	Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam
prof.ir. H. Wiggerts	Technische Hogeschool, Delft.
dr.ir. J.G. Wissema	AKZO, Arnhem
ir. J.A. Over (Secretaris)	Stichting Toekomstbeeld der Techniek

Voorts werd een bijdrage gevraagd en verkregen van:
 prof.dr. L.H. Klaassen Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam
 drs. S. Koorn Centraal Planbureau, Den Haag
 ir. G.W. van Stein Hoogovens-Hoesch, Nijmegen
 Callenfels

De werkgroep heeft tevens commentaar geleverd op de niet-technische aspecten van de overige hoofdstukken van deze publikatie. Hun bevindingen zijn verwerkt in dit hoofdstuk en in andere hoofdstukken.

In verband met paragraaf II dienen in het bijzonder te worden genoemd mevrouw Sevenhuijsen-Hoogewoening en dr. Ferguson die schriftelijke bijdragen hebben geleverd aan de besprekingen op basis waarvan deze paragraaf tot stand kwam.

IV. Literatuur

- [1] Energie in Perspectief. Nederlands Economisch Instituut, Rotterdam, 1966.
- [2] E. de Vries, De aarde betaalt. Albani, Den Haag, 1948.

Energiebesparing: mogelijkheden tot besparing en tot het afremmen van de groei van het verbruik

(Samenvatting van de studieresultaten)

door dr.ir. W.J. Beek¹)

Inleiding

De betrekkelijk weinig omvangrijke crises in de aanvoer van ruwe olie tijdens de midden vijftiger en midden zestiger jaren en in het begin van de jaren zeventig vormen een onderdeel van het zich op lange termijn voordoende structurele probleem, hoe onze geïndustrialiseerde en verstedelijkte samenleving van voldoende energie te voorzien ten einde haar sociaal en cultureel te laten functioneren. Het sinds 1950 mogelijk geworden overvloedige energieverbruik tegen een lage kostprijs heeft radicale veranderingen teweeggebracht in de sociale en economische structuur van onze maatschappij en in persoonlijke levensstijlen en leefgewoonten.

Energie is een elementaire behoefte voor de industrie, die meer is gericht op de massaproductie en op goedkoop vervoer op grote schaal dan op de fabricage van eindprodukten. Deze enigszins onevenwichtig verlopen industrialisatie met haar hoge investering per werknemer en — in de beginperiode — een hoge toegevoegde waarde per eenheid produkt, heeft een tekort aangevuld op de betalingsbalans van een land dat in hoge mate afhankelijk was van invoer, terwijl tezelfdertijd de grondslag werd gelegd voor talloze andere activiteiten. Niettemin zijn, afgezien van de overheidsdienst, het plaatselijk bestuur en diensten als gezondheidszorg, verzekering en onderwijs, de Nederlanders nog altijd voornamelijk werkzaam in handel, verkeer en vervoer te land en te water. De rentabiliteit van deze activiteiten is even afhankelijk van de beschikbaarheid en de prijs van energie als die van de productie van massagoederen. Een voortgezette sterke inflatie en de daarmee gepaard gaande eisen voor een werkelijke verhoging van het besteedbare inkomen, te zamen met prijsbeheersing en verhoogde grondstoffenprijzen, hebben de impuls gegeven tot een proces van rationalisatie, mechanisatie en automatisering van de industrie dat leidde tot een *toename van het energieverbruik* per geproduceerde eenheid (de energiebedrijven uitgezonderd) die tweemaal zo groot bleek te zijn als de stijging van de produktiviteit.

Aan de andere kant had de structuur van de secundaire produktie een belangrijke invloed op andere menselijke activiteiten. De industriële activiteiten concentreerden zich langs de Nederlandse kust en hadden daardoor een niet voorzien sneeuwbal-effect. Er ontstonden voor een klein land als Nederland ongewoon grote verschillen in welstand tussen de regio's. De centra van de oude steden raakten hun uitgewogen menging van activiteiten kwijt, terwijl de vervanging van oude door nieuwe, zo deze

al plaatsvond, eenzijdig was gericht. Het noodzakelijke verkeer tussen werkterrein, huis, winkels en dienstencentra leidde tot de aanleg van een dicht wegennet, met inbegrip van autosnelwegen, waardoor de auto, gebruiker van goedkope energie, het voertuig werd voor het maatschappelijk verkeer. Rond de produktiecentra schoten de voorsteden uit de grond. De distributie van consumptiegoederen onderging een radicale verandering, waarbij gebruik werd gemaakt van de toegenomen mobiliteit van de enkeling. De verhoging van het reëel besteedbaar inkomen stimuleerde het energieverbruik voor de veraangenaming van het leven, zoals vakanties in het buitenland, betere en centrale verwarming van de huizen en meer elektrische apparaten voor huishoudelijk gebruik.

De openbare nutsbedrijven (gas, elektriciteit, reinigingsdienst) stonden onder nog sterker druk dan andere industrieën en zij hadden geen andere keus dan te voldoen aan de vraag. De verbruiker, die alleen maar zijn hand hoeft uit te steken om van deze diensten gebruik te maken, heeft er al lang geen idee meer van en geen gevoel meer voor hoeveel energie voor deze dienstverlening nodig is, aangezien de hem daarvoor gepresenteerde rekening een steeds geringer percentage van zijn totale uitgaven uitmaakt. De doorsnee burger ziet zich in het genot van een inkomen dat hem in staat stelt te voldoen aan al zijn fundamentele behoeften. Het werken voor een minimumloon laat hij over aan een omvangrijk en mobiel leger van gastarbeiders, dat op zijn beurt rekent op goedkope energie voor een snel vervoer. Voor de beroepsopleiding van zijn kinderen steunt hij op onderwijsprogramma's die een getrouwe afspiegeling vormen van de hun toegedachte toekomst: sterk gespecialiseerde arbeid die een relatief hoog inkomen oplevert dat in een hoog tempo kan worden besteed.

In dit alles speelt het energieverbruik een hoofdrol. Energie is niet alleen de sleutel tot produktie — zij is tevens de voornaamste bepalende factor van de mobiliteit, de verstedelijking en de handelsbalans. Zij beheerst indirect de levensgewoonten met betrekking tot vakantie, winkelen, het ontstaan van huishoudelijk afval en opvoedkundige waarden.

Maar achter de toekomstige beschikbaarheid van primaire energiedragers zoals ruwe olie en aardgas staat een groot vraagteken. Er zou energie kunnen worden opgewekt via energiestroom-processen (zonne-energie, wind, enz.) maar de hiertoe vereiste technieken zullen slechts langzaam tot wasdom komen en zelfs dan zullen zij nog lange tijd tot niet meer in staat zijn dan het voldoen aan een bescheiden deel van de vraag naar energie, ook al zou nu reeds een begin worden gemaakt met hun volledige praktische ontwikkeling. Bovendien zal de prijs van energie in al haar vormen enige malen

¹) Van den Bergh en Jurgens, Vlaardingen.

zo hoog zijn als de huidige prijs per eenheid. Voor hen die er zich van bewust zijn welke invloed goedkope energie op onze samenleving heeft gehad, zal het duidelijk zijn dat, zelfs indien energie in overvloed beschikbaar komt — maar tegen een hoge prijs — de invloed op de maatschappij even ingrijpend zal zijn als die van de goedkope energie sinds 1950. Het is eigenlijk een verbijsterende zaak dat we nooit een energiebeleid op lange termijn hebben ontwikkeld. Een door de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid genomen initiatief resulteerde onlangs in een oproep tot aanvaarding van een zodanig plan.

In de komende jaren zal de beschikbaarheid van energie niet alleen het voornaamste materiële knelpunt zijn, maar wellicht ook het voornaamste aan de overheid ter beschikking staande instrument om onze samenleving in de gewenste richting te sturen. De belangrijkste aspecten van het energieplan zouden daarom wel eens niet de technische en wetenschappelijke scenario's, maar de scenario's voor de sociale en economische sturing kunnen zijn, want die zijn noodzakelijk als we met een minimum aan verstoring de nieuwe evenwichtstoestand willen bereiken. We hebben voor de overgang naar die nieuwe toestand tijd nodig. En over hoe meer tijd we kunnen beschikken, hoe evenwichtiger we de nieuwe structuur zullen bereiken. Het scheppen van meer aanlooptijd dan die welke ons ter beschikking staat op het huidige niveau van energieverbruik, brengt met zich dat de groei van dat energieverbruik moet worden gebreedeld, dat er energie moet worden bespaard en dat er zuiniger mee moet worden omgegaan. Dit zijn de in deze studie behandelde aspecten. De potentiële mogelijkheden van oude en nieuwe energiebronnen zijn geanalyseerd (Hoofdstuk 1) op korte termijn (tot 1985) en op middellange termijn (1985 — 2000) voor de wereld in haar geheel en meer in het bijzonder voor Nederland. Voorspellingen op lange termijn (na 2000) zijn er niet in opgenomen. Vervolgens wordt een analyse gegeven van het energiegebruik in de verschillende sectoren van het moderne leven en een raming, tot 1985, van het voor bepaalde sectoren specifieke verbruik, waarbij rekening wordt gehouden met mogelijke onderlinge vervangingen van de ene primaire energiedrager door de andere (Hoofdstuk 2). In deze beide hoofdstukken te zamen wordt de achtergrond omschreven waartegen mogelijke besparingen en daartoe strekkende maatregelen worden geprojecteerd: voor de industrie (Hoofdstuk 3), voor de elektriciteitsopwekking (Hoofdstuk 4), voor huishoudelijk gebruik (Hoofdstuk 5), voor verkeer en vervoer (Hoofdstuk 6) en voor maatregelen ten behoeve van het milieu (Hoofdstuk 7).

In het algemeen houden de bevindingen niet meer dan een matige belofte in. Besparingen op het huidige gebruik (gedeeltelijk te bereiken door verbetering van rendementen) bedragen niet meer dan een bescheiden 15 tot 30%, aangenomen dat er geen wijziging plaatsvindt in de huidige structuur van de activiteiten. Dientengevolge wordt het afremmen van de groei van nieuwe en uiterst energie-intensieve activiteiten het voornaamste doel. Om deze reden wordt de studie afgerond met een hoofdstuk over de economische en sociale aspecten van efficiënter en effectiever gebruik van energie (Hoofdstuk 8). Daarnaast zijn er, hoewel

deze slechts hier en daar in de studie ter sprake zijn gebracht, verscheidene op onderzoek en ontwikkeling te baseren keuzemogelijkheden om aan zekere sociale behoeften te kunnen voldoen op een manier die minder energie vergt, namelijk door het wijzigen van onze voorzieningssystemen (bijv. telecommunicatieverbindingen tegenover vervoer).

1. Energievoorraden: de huidige situatie en de vooruitzichten voor de toekomst

De vrije markteconomieën putten in een buitengewoon snel tempo de voorraden aan vloeibare en gasvormige koolwaterstoffen uit. West-Europa, de Verenigde Staten en Japan worden in toenemende mate afhankelijk van het kleine aantal landen die over economisch ontginbare reserves beschikken. De meeste van deze landen liggen in het Midden-Oosten. Hoewel er enige handel in deze primaire energiedragers mogelijk is met andere dan de Arabische olie-producerende landen (de Sowjet-Unie, Noord-Afrika, Canada en Indonesië) zullen deze landen er steeds meer toe overgaan hun reserves te bestemmen voor binnenlands gebruik. Dientengevolge zullen zij hun exporten ervan beperken tot een punt waarop evenwicht ontstaat met hun importen. Indien West-Europa aardgas zou gaan invoeren uit de Sowjet-Unie en Noord-Afrika, zou de situatie op de middellange termijn iets gemakkelijker worden, maar zelfs als men de daarmee samenhangende factoren van afhankelijkheid en veiligheid niet zou tellen, dan nog blijven de aan het benodigde vervoerssysteem verbonden technische en economische problemen enorm. Omstreeks 1980 zal de exploitatie van de voorkomens van olie en gas in de continentale plateau's (Noordzee, Chinese Zee) en in moeilijk toegankelijke gebieden (Alaska, Siberië) een aanzienlijk niveau bereiken. Het Noordzee-plat zal een aanvullende, maar secundaire aanvoerbron voor Noordwest-Europa blijken te zijn. De vele wel toegankelijke maar marginale olie- en aardgasvelden vormen geen reële basis voor de energievoorziening.

Daarom zal West-Europa tussen 1980 en 1985 moeten gaan overschakelen op andere energiedragers dan vloeibare en gasvormige koolwaterstoffen, die daarna bij voorkeur nog slechts zullen worden gebruikt voor specifieke doeleinden (bijv. in petrochemische producten en bij het vervoer). Steenkool, nog steeds in grote hoeveelheden beschikbaar, zou de aangewezen kandidaat zijn. Maar meer dan 80% van alle bekende steenkoolvoorraden bevinden zich in de Sowjet-Unie en in de Verenigde Staten, waardoor opnieuw het vraagstuk van de afhankelijkheid en de veiligheid van West-Europa aan de orde komt.

De technologie van het vergassen en vloeibaar maken van steenkool, die is vereist voor het produceren van veelzijdig bruikbare brandstoffen, is nog verre van volmaakt. Deze technologie zal verder worden ontwikkeld, met name in de Sowjet-Unie en de Verenigde Staten. De voor deze werkzaamheden benodigde installaties zullen dichtbij de steenkoolmijnen worden gevestigd.

Het rendement van het proces zou worden verbeterd indien men kon beschikken over aanvoer van warmte op hoge temperatuur (afkomstig uit kernenergie?). Er is heel wat tijd nodig om deze technologieën te ontwikkelen en nieuwe mijnen te openen, maar aangenomen kan worden dat in het bijzonder in Amerika op middellange termijn een oplossing zal worden gevonden. West-Europa zal daar weinig rechtstreekse baat bij vinden en hoewel enkele Europese landen, zoals West-Duitsland, langs dezelfde wegen met partiële oplossingen zullen komen, zullen de overige landen noch de middelen noch de potentie hebben voor een op geïmporteerde steenkool gebaseerde nationale verwerkende industrie. Dit is het geval met Nederland, waar de mogelijkheid tot het heropenen van zijn kolenmijnen zuiver theoretisch is. De enige praktische oplossing op korte termijn in Nederland is het overschakelen van aardolie op binnenlands aardgas en vervolgens, waar zulks mogelijk is, op geïmporteerde steenkool en op 'vergaste' en 'vloeibaar gemaakte' steenkool. Hierdoor wordt de invoer van ruwe olie beperkt tot die activiteiten die niet gemakkelijk kunnen worden gebaseerd op aardgas of steenkool.

Dan blijft er nog altijd een vraagstuk met betrekking tot de voorziening: een aanzienlijk verhoogd geldvolume aan invoeren. We moeten dus op zoek gaan naar een alternatief en de keuze is beperkt. Op kernfusie valt om technische redenen op de middellange termijn nog niet te rekenen. Wat de stroom-processen betreft (zon, wind, enz.) zou alleen de omzetting van zonne-energie een aanmerkelijke bijdrage kunnen leveren. Indien de voor primaire energie te betalen prijs zou stijgen met de verwachte factor 4, zou dit zonne-proces aantrekkelijk kunnen worden. Ofschoon ons klimaat voor het doel niet ideaal is, is de verwarming van goed geïsoleerde huizen en het verhitten van water voor huishoudelijk gebruik mogelijk. Maar zelfs al zouden we een aanzienlijk deel van ons onderzoek en van de middelen tot verdere ontwikkeling aan dit gebied besteden (en dat

zouden we moeten doen), dan nog is het niet reëel aan te nemen dat maatschappelijk gesproken volgroeiende systemen voor het gebruik van zonne-energie op middellange termijn beschikbaar zouden zijn, zelfs niet voor het betrekkelijk beperkte aantal toepassingen waarvoor deze kan worden aangewend.

Dus met uitzondering van de energie uit kernsplijting (waarover naderhand zal worden gesproken), zijn er geen andere primaire energiedragers in voldoende overvloed aanwezig voor het overbruggen van de kloof tussen vraag en aanbod - een kloof die op middellange termijn wijder zal worden. Dit, te zamen met de noodzakelijkheid tijd te winnen, betekent dat we ons ook moeten concentreren op de kwestie van de behoefte: op het afremmen van de groei van het energieverbruik en op de mogelijkheden tot besparing. Slechts 50-60% (afhankelijk van de aannamen) van de energie-inhoud van de primaire energiedragers komt effectief voor eindgebruik beschikbaar. Nodig is derhalve een programma voor energiebesparing in de industrie, de elektriciteitsbedrijven, het huishoudelijk gebruik, het vervoer en bij de bestrijding van milieuverontreiniging.

Maar zoals in deze studie zal worden aangetoond, zou een zodanig programma - zelfs indien het volledig zou worden uitgevoerd (en dat zou moeten geschieden) - de kloof evenmin dichten. Indien wij ons bruto nationaal inkomen op het huidige peil willen handhaven, dan zullen we op middellange termijn toch nog een aanvullende energiebron nodig hebben. Kernsplijting is dan het enige alternatief, niettegenstaande de nog altijd daarmee gepaard gaande problemen van technische, economische en milieubeïnvloedende aard. Gezien de middellange termijn streeftijd, de lange leveringstijden voor de bouw van kernenergiecentrales en de grote tegenzin van het publiek, is hiervoor een uitgebreid programma vereist. Er zullen snel beslissingen moeten worden genomen over zaken zoals: de omvang en de plaats van deze centrales, de aanvoer van verrijkt uranium en het afvoeren van radio-actief afval. Ook dient een beslissing te worden genomen ten

Tabel 1. Scenario voor de energievoorziening in Nederland, gebaseerd op een algemene analyse van de beschikbare energiedragers

	Middelen ter voorziening in en maatregelen ter beheersing van de vraag	Prioriteiten van onderzoek en ontwikkeling	Beleidsbeslissingen
Tot 1980	<ul style="list-style-type: none"> - Overschakeling van olie op (binnenlands) aardgas waar dit rechtstreeks mogelijk is - Energiebesparingen - Afremmen van groei van activiteiten met hoog energieverbruik 	<ul style="list-style-type: none"> - Energiebesparingen - Verrijking van uranium - Opruiming van radio-actief afval - Vervoer en opslag van waterstof - Zonne-energie - Kernfusie 	<ul style="list-style-type: none"> - Een energieplan met bijzondere aandacht voor aantal en omvang van kerncentrales op de middellange termijn - Een programma voor voorlichting en opvoeding van het publiek - Nieuwe normen voor de isolatie van huizen
1980 tot 2000	<ul style="list-style-type: none"> - Waar nodig verdere overschakeling op steenkool en brandstoffen uit steenkool - Energievoorziening uit kernsplijtingsreactoren - Overschakeling van veel-naar minder-energie-vergende systemen 	<ul style="list-style-type: none"> - Gebruik van zonne-energie en andere stroom-energie en hun opslag - Systeemonderzoek van de relatie tussen kwaliteit van de voorziening en energiegebruik in alle sectoren van de vraag - Kernfusie - Energie-opwekking uit afval - Gebruik van cryogeen transport van elektriciteit in combinatie met waterstof 	<ul style="list-style-type: none"> - Een gedetailleerd energieplan voor de lange termijn - Een industrialisatieplan (bijv. industrieën voor massaproductie versus fabricage van eindproducten)

aanzien van de omzetting van deze energie in vormen die geschikt zijn voor eindgebruik. De keus gaat tussen elektriciteit en waterstof als schone intermediaire dragers. Eerstgenoemde vertoont betrekkelijk hoge omzettingskosten en -verliezen. Het vervoer van waterstof is technisch weliswaar niet geheel rond (verliezen en kosten zijn namelijk nog steeds onbekende grootheden) maar het heeft een aantal voordelen: gemakkelijk op te slaan, hoog rendement in brandstofcellen – indien beschikbaar – en goed te gebruiken voor de rechtstreekse reductie van ijzererts. Het is mogelijk dat het bestaande gasleidingsnet voor dit doel zou kunnen worden aangepast.

De ontwikkeling van de technologie voor het exploiteren van waterstof als energiedrager zal ook op lange termijn voordelen opleveren, aangezien ook zonne-energie moet worden opgeslagen in een doeltreffend distributiesysteem. Dit brengt ons tot het volgende scenario voor de energievoorziening in Nederland (Tabel 1).

2. Nationale energiebalansen

De periode tot 1972

In 1955 verhieldden de aandelen van steenkool, aardgas en aardolie zich als 2:0:1 en in 1972 ongeveer als 1:9:10. Het snelle doordringen van olie en aardgas in de Nederlandse energievoorziening was toe te schrijven aan een in omvang toenemende markt en ook aan het prijsbeleid van de overheid inzake het in Groningen gevonden aardgas. Voor het huishoudelijk gebruik verliep de overgang snel. In de industrie ging het wat langzamer, al naar gelang van het afschrijvingsbeleid. Nieuwe oliestookovens voor industrieel gebruik betekenden een efficiënter en economischer energiegebruik. Het *specifieke energiegebruik per eenheid produkt* in de energiebedrijven nam af, maar de toename van de totale produktie deed het totale energiegebruik van deze bedrijven toch stijgen. De massale toename van het gebruik van binnenlands aardgas gaf ten onrechte de indruk dat Nederland onafhankelijker was geworden wat betreft de bruto nationale energievoorziening.

Deze onafhankelijkheid is natuurlijk maar betrekkelijk. In absolute zin steeg het energiegebruik per hoofd van de bevolking tussen het begin van de jaren vijftig en van de jaren zeventig tot het drievoudige.

Er was een bijzonder grote toename van het energiegebruik voor ruimteverwarming, dat binnen de 8 tot 9 jaar verdubbelde als gevolg van een steeds grotere toepassing van centrale verwarming, van hogere gemiddelde kamertemperaturen, langere verwarmings-tijden en het gebruik van verwarming tijdens korte koude perioden in voor- en najaar. De feitelijke weersomstandigheden in een winter hebben een overheersende invloed op de voor ruimteverwarming gebruikte energie.

Een soortgelijke toename viel te constateren in het elektriciteitsverbruik, aanvankelijk vooral voor huishoudelijke doeleinden. Maar later kwam daarbij een toenemend industrieel gebruik (automatisering, mechanisering). Deze ontwikkeling valt ook waar te nemen in het totale energiegebruik van de industrie.

Elektrische centrales vormen een uitzondering op deze regel. Een hoger rendement en de vergrote capaciteit van de eenheden hebben hun specifiek energiegebruik sterk doen afnemen.

Het gebruik van energie in de vervoerssector, de laatste grote contribuant, toonde een soortgelijke ontwikkeling: verdubbeling in 8 jaar.

Het algemene beeld voor 1972 wordt gegeven in de Tabellen 3a en 3b.

Tabel 3b. Gebruik van elektrische energie¹⁾ in 1972 en 1985 (raming)

	1972	1985
Absoluut (TWh) ²⁾	42,3	122
In % van totaal		
Openbare nutsbedrijven ³⁾	11	11
Raffinaderijen	2,5	2
Industrie	39	37,5
Woningen	23,5	26,5
Gebouwen	21	21
Vervoer	2	1,5
Ander gebruik	1	0,5
Totaal	100	100

¹⁾ Via openbare net.

²⁾ 1 TWh = 3,6 X 10¹⁵ J.

³⁾ Eigen gebruik en transmissieverliezen.

Tabel 3a. Gebruik van primaire energie¹⁾ in Nederland in 1972 en in 1985 (raming)

	1972				1985				
	2.281 (= 100)				4.154 (= 100)				
Totaal verbruik (10 ¹⁵ J)	171,5				299				
Verbruik per hoofd bev. (10 ⁹ J)									
In % van totaal	totaal	steenkool	aardgas	olie	totaal	steenkool	aardgas	olie	kernenergie
Openb. nutsbedrijven ²⁾	20	0,5	15	4,5	29	—	12	12	5
Raffinaderijen	7,5	—	—	7,5	5	—	—	5	—
Industrie ³⁾	24,5	3	17,5	4,0	23	2,5	10,5	10	—
Woningen	21	0,5	13	7,5	18	—	15,5	2,5	—
Gebouwen ⁴⁾	8	—	3,5	4,5	6,5	—	4,5	2	—
Vervoer	13	—	—	13	14	—	—	14	—
Ander gebruik ⁵⁾	6	1,5	4,0	0,5	4,5	0,5	2,5	1,5	—
Totaal	100	5,5	53,0	41,5	100	3	45	47	5

¹⁾ Excl. non-energetisch gebruik van olie en bunkeren voor internationaal vervoer.

²⁾ Incl. opgewekte elektriciteit.

³⁾ Incl. energiegebruik van de chemische industrie, gebaseerd op olieraffinageprodukten.

⁴⁾ Dit omvat het energiegebruik in niet als woningen gebruikte gebouwen.

⁵⁾ Onder meer tuinbouw, landbouw, defensie, bouw, cokesovens.

Tabel 2. De basis voor een scenario tot 1985

	1960	1972	1985
Bevolking (10 ⁶)	11,5	13,3	13,9
Beroepsbevolking (% van totaal)	36,5	35,9	39,7 ³⁾
Aantal gezinnen (10 ⁶)	2,8	3,4	4,1
Jaarlijkse toename van industriële productie (%) ¹⁾	6,8	5,0	6,0
Aantal woningen (10 ⁶)	2,9	4,0	5,0
Aantal personenauto's (10 ⁶)	0,5	2,9	5,6
Aantal inwoners per auto	22	4,5	2,7
Km per auto per jaar (10 ³)	16,4	16,0	14,3
Bedrijfsvoertuigen (10 ³)	163	264	394
Dieseloliegebruik (%) ²⁾	20	35	43

¹⁾ Excl. energiebedrijven en niet-energetische olieproducten.

²⁾ Praktisch geen vermeerdering van het percentage dieselmotoren voor bestelwagens.

³⁾ Toenemend aantal werkende vrouwen.

Een scenario voor de periode 1972-1985

Er is een poging gedaan tot het opstellen van een energiescenario voor Nederland tot 1985. Het is gebaseerd op de vooronderstellingen die men in Tabel 2 zal aantreffen. In het scenario wordt geen rekening gehouden met belangrijke pogingen tot het realiseren van specifieke besparingen. Het dient als een achtergrond waartegen de mogelijke besparingen die in de onderstaande paragrafen worden besproken, worden geprojecteerd. Maar wel wordt rekening gehouden met de invloeden van bepaalde verzadigingen en veranderingen:

- de voorziening met aardgas zal zich in 1980 stabiliseren op het niveau van de fysieke limiet;
- de benuttingsfactor van de bestaande raffinaderijen zal stijgen van 82% in 1972 tot 88% in 1975 en tot 94% vanaf 1976. Na 1974 wordt geen groei van de raffinagecapaciteit voorzien;
- het energieverbruik in de tuinbouw zal slechts een kleine stijging van 2% per jaar vertonen wegens de zware concurrentie (Zuid- en Oost-Europa, vooral Roemenië);
- centrale ruimte-verwarming zal verder toenemen van 32% in 1972 tot 85% in 1985. Vóór 1985 zullen huizen met een verbeterde isolatie geen aanmerkelijk deel gaan uitmaken van het totale huizenbestand;
- in het verleden was er een daling van het jaarlijks aantal afgelegde kilometers per auto, omdat nieuwe gebruikers in eerste aanleg geen intensieve gebruikers waren. Na 1970 begon die kilometrage weer te stijgen, aangezien de nieuwe gebruikers van de voorafgaande jaren zich aan het normale gebruik aanpasten en het percentage nieuwe gebruikers per jaar begon te dalen. Tegen 1985 zal er weer een algemene daling optreden van het aantal kilometers per auto per jaar wegens het toenemend aantal tweede auto's en de verkeersdrukke (Tabel 2). De auto met elektrisch aandrijvingsvermogen zal vóór 1985 geen noemenswaardig aandeel hebben;
- in het handelsverkeer zal het wegvervoer het vervoer per spoor en per schip nog meer gaan vervangen. Vrachtauto's zullen zwaarder worden en intensiever worden gebruikt en er zullen er meer worden uitgerust met een dieselmotor (zie Tabel 2);
- het verbruik van bunkerolie zal slechts een bescheiden stijging vertonen, omdat er *geen groei wordt verwacht in de capaciteit van de olieraffinage*

(en de olievelden in de Noordzee liggen voor onze deur).

De andere fundamentele vooronderstellingen voor het energiescenario tot 1985 zijn:

- de prijsstijgingen van primaire energie zullen geen aanzienlijke invloed hebben op de vraag, aangezien de kosten van energie gewoonlijk slechts een klein gedeelte uitmaken van de totale verkoopprijs en deze prijs heeft, in het algemeen gesproken, weinig invloed op de omvang van de vraag;
- aardgas kan op een vrije markt worden verkregen en ofschoon de prijs ervan zal stijgen met de olieprijs, is de prijselasticiteit zodanig, dat de vraag er niet werkelijk door wordt beïnvloed;
- het industriële energieverbruik is (bijna) recht evenredig aan de industriële productie;
- van het verbranden van afval kan geen wezenlijke bijdrage aan onze energievoorziening worden verwacht.

Voor alle andere onderwerpen is een verrassingsvrije extrapolatie gebruikt (zie de Tabellen 3 en 3a). De enige twijfelachtige bijdrage is afkomstig van de berekening in de sector van de gebouwen wegens tamelijk onbetrouwbare gegevens en de onbekende omvang van de uitvoer naar West-Duitsland (die is toe te schrijven aan een prijsverschil, dat verwacht wordt te blijven bestaan). Het gebruik in de sector bedrijven is evenwel minder dan 10% van het totale gebruik. Op deze basis is de voorspelling van een stijging van het totale verbruik aan primaire energie in Nederland tussen 1972 en 1985 met een factor van 1,8 redelijk nauwkeurig. Het verbruik per hoofd van de bevolking zal met ongeveer 75% stijgen. De percentsgewijze bijdragen van aardgas en olie zullen in 1985 gelijk zijn aan die van 1972; het kleine percentage van het steenkoolaandeel zal in 1985 gehalveerd zijn, terwijl de kloof zal worden overbrugd door de bijdrage van kernenergie. In 1985 zal men voor 50% aangewezen zijn op buitenlandse bronnen voor steenkool en olie, dus net als nu. Het aandeel van de elektriciteit op de totale energierekening zal met een factor van 1,5 stijgen, van 20% (1972) tot 29% (1985).

Het is hoogst onwaarschijnlijk dat de toekomst volgens dit scenario zal verlopen. Het zich vastklampen aan de hoop op 'natuurlijke' verzadigingsinvloeden en op gemakkelijk ten uitvoer te leggen veranderingen die al kloppen met de verwachtingen, is niet voldoende om de kloof tussen vraag en aanbod te overbruggen. Er zal daarnaast een stringent programma voor energiebesparing moeten worden opgesteld. Een algemene energiebesparing van ongeveer 20% op de raming voor 1985 kan worden verkregen zonder wezenlijke schade toe te brengen aan ons economisch leven en dit zou de stijging van het verbruik per hoofd van de bevolking tijdens de periode van 1972-1985 verminderen tot 40%. Dit vereist het overwegen van verdere en structurele maatregelen en ofschoon zij niet het onderwerp van de onderhavige studie vormen, wordt in Tabel 4 een poging gedaan tot samenvatting van een aantal mogelijke maatregelen.

Tabel 4. Mogelijke verdere maatregelen voor het voorzien in en het besparen van energie (op korte termijn)

Bepaald gewenst	<ul style="list-style-type: none"> — de voorziening met binnenlands aardgas moet ver vóór 1980 haar fysieke maximum hebben bereikt; — een snellere overschakeling van olie en aardgas op steenkool en steenkoolprodukten in bepaalde industrieën (bijv. hoogovens en elektrische centrales); — maatregelen tot behoud van de concurrentiepositie van de tuinbouw; — beperking van het door personenauto's per jaar afgelegde aantal kilometers; — maatregelen ter vermindering van de huidige overschakeling van het vervoer per schip en per spoor naar vrachtautovervoer; — een beleid voor energiebesparing in alle sectoren, maar in het bijzonder in de groeisectoren (openbare elektriciteitsbedrijven en vervoer); — een programma voor voorziening met kernenergie in 1985 (5% van de totale voorziening in 1985);
Mogelijk gewenst	<ul style="list-style-type: none"> — een afremming van de groei van metallurgische industrie met een hoog energieverbruik; geen grote toename in de produktie van organisch-chemische 'bulk'-produkten of kunstmeststoffen; — aanmoediging van een complete terugwinnings-industrie voor papier, karton en bepaalde metalen (zoals aluminium); — uitbreiding van het in Tabel 3a gegeven kernenergie-programma voor 1985.

3. Mogelijke besparingen op het industriële energieverbruik

Een stijging van de prijs van primaire energiedragers zal het sein geven voor een overschakeling op processen die minder energie per eenheid produkt nodig hebben. Grote verbruikers hebben steeds hun energieverbruik nauwkeurig in het oog gehouden. Zij gebruiken de energie nu reeds zo efficiënt dat zelfs bij een viervoudige verhoging van de prijs van primaire energie de mogelijke besparingen in de bestaande eenheden beperkt blijven tot ongeveer 10%. Tengevolge daarvan zullen enkele grote verbruikers een ernstige klap ondervinden van een dergelijke prijsstijging. Op de middellange termijn, als er nieuwe fabrieken moeten worden gebouwd, zal het evenwicht tussen investering en gestegen exploitatiekosten (veroorzaakt door de hogere energieprijzen) een ander optimum opleveren. Maar als we het huidige peil van de technologie als basis nemen, zal naar verwacht wordt de vermindering van het energieverbruik per eenheid produkt niet meer dan 20% zijn.

Op de middellange en lange termijn zouden grotere besparingen mogelijk zijn, indien een weloverwogen beleid zou worden gevoerd, gericht op het verkrijgen van een optimaal nut van elke produktie-eenheid. Voorbeelden zijn onder meer de integratie van primaire industrieën (zoals raffinaderijen) en elektriciteitscentrales, het integreren van deze industrieën met een dienst voor ruimteverwarming, integratie van mestrijen en landbouwbedrijven en het beperken van overbodige kwaliteitsnormen. Zulke maatregelen zouden, indien ze consequent zouden worden toegepast, ons totale energieverbruik kunnen halveren, maar ze zijn erg kostbaar en ze verminderen de flexibiliteit van het hele stelsel. Aan de andere kant zouden stringente milieumaatregelen de vraag naar energie aanmerkelijk kunnen verhogen. Hier bevinden we ons uiteraard

buiten het gebied van de verantwoordelijkheden van de individuele producenten. Indien we iets meer willen bereiken dan de som van het individueel hoogst bereikbare inzake kapitaalrendement en continuïteit, dan zullen we eerst een administratief probleem van niet geringe omvang moeten oplossen.

Hoe moeten we op niet-bureaucratische wijze een optimum bereiken voor gehele produktieketens (en tussen deze ketens, waar de verantwoordelijkheid gedeeld is)? Dit stelt onze wetgevers voor een ontzaglijke maar absoluut noodzakelijke taak, die ons zal dwingen te denken en te plannen in termen van voorzienings-systemen en niet langer in termen van individuele produkten. Er bestaat nog een ander element dat leidt tot een symbiose tussen regering en industrie. De prijs van de primaire energie bestaat uit vijf kostenfactoren: *ontginning, produktie, distributie, royalties en belastingen*, waarvan de beide laatste het grootste gedeelte voor hun rekening nemen. In feite betaalt de energiegebruiker voor vele activiteiten die niet 'vanzelfsprekend' verband houden met de energie-aanvoer. En hoewel er tegen een zodanig maatschappelijk instrument op zich geen bezwaren kunnen worden aangevoerd, dient er een duidelijk omschreven evenwicht te bestaan tussen ons buitenlands en ons binnenlands beleid met betrekking tot de industrialisatie.

In het navolgende worden mogelijke besparingen in enkele veel verbruikende industriële sectoren in beschouwing genomen: olieraffinaderijen, ammoniakfabrieken, de ijzer- en staalindustrie, de verpakkingsmiddelenindustrie en de aluminiumproducenten. Te zamen waren zij goed voor ongeveer 60% van het totale industriële energieverbruik over 1972, hetgeen overeenkomt met 20% van het totale nationale verbruik in de percentages $7,8 + 5,1 + 4,9 + 1,6 + 0,6 = 20$. De overblijvende 40% van het industriële verbruik strekte zich uit over een wijd scala van activiteiten, waarvan de voedings- en wasmiddelenindustrie hier als voorbeelden zullen dienen. Ook de fermentatie-industrie is geanalyseerd, omdat men vermoedde dat op voldoende ruime schaal gebruikte fermentatieprocessen aanmerkelijke besparingen zouden kunnen opleveren.

De produktiekosten van de vijf energie-intensieve industriële activiteiten, die allereerst in beschouwing worden genomen, kunnen als volgt worden gespecificeerd:

— energiekosten	: 10 - 30%
— personeelskosten	: 40 - 30%
— kosten van grondstoffen en andere materialen	: 40 - 30%
— kosten van afschrijving en rente	: 10%
Totaal	100%

In feite staan deze kosten in onderling verband. Een hogere energieprijzen geeft het startsein voor een kettingreactie, die vervolgens de prijzen der eindprodukten, de kosten van levensonderhoud en dientengevolge de personeelskosten doet stijgen. Energie is ook nodig voor mijnbouw, landbouw en het vervoer van de geproduceerde goederen en als de energieprijzen stijgt, dan stijgen ook de grondstoffenprijzen. Verhoogde energieprijzen zullen tevens bij de industrie de neiging doen ontstaan

grotere investeringen te doen ten einde de stijging van de exploitatiekosten te verminderen.

Olieraffinaderijen

De Nederlandse olieraffinaderijen nemen op het ogenblik gemiddeld 8% van het binnenlands energieverbruik voor hun rekening. De helft van hun produktie wordt uitgevoerd en ongeveer een kwart van hun totale kosten zijn energiekosten. Ongeveer de helft van dit energieverbruik is bestemd voor de primaire scheiding (destillatie) van de ruwe olie (voor het huidige produktenpakket), een derde voor de eerste omzetting van de uit de primaire scheiding verkregen stromen en slechts een zesde voor de verdere bewerkingen van tussen- en eindprodukten. De fysische processen van het raffineren van olie kosten vijf maal zoveel energie als de chemische processen.

Hogere energieprijzen zullen dus het produktenpakket beïnvloeden (ofschoon het nog niet duidelijk is hoe dit zal verlopen, aangezien de prijselasticiteit onbekend is) en de vraag wijzigen. De olieraffinaderijen zullen hun produktie snel aanpassen aan een nieuwe energieprijzen en op middellange termijn hun processen herontwerpen door hun investeringen te verhogen ten einde hun energieverbruik nog meer te beperken. Deze ontwikkeling van de industrie zou zich in vier fasen kunnen voltrekken: op korte termijn, aanpassing van bestaande installaties; wijziging van de ontwerpen van nieuwe fabrieken op middellange termijn (met en zonder extra milieubescherpende maatregelen); en gecombineerde energiesystemen op middellange en lange termijn. De volgende analyse van deze fasen is gebaseerd op het huidige produktenpakket ten einde aldus het vergelijken te vergemakkelijken.

De aanpassing van bestaande installaties, op korte termijn, zou maatregelen kunnen omvatten zoals: computercontrole, betere warmteterugwinning; hoger fornuisrendement, vermeerdering van het aantal fractioneerschotels (resp. trappen) en het gebruik van warmtepompen. Computercontrole van een op volle capaciteit werkende raffinaderij kan haar verbruik van ruwe olie verminderen met 5%. Verbeterde warmteterugwinning bij een viervoud van de huidige energieprijzen betekent een nieuw economisch optimum, waarbij een bijkomende 60% aan warmtewisselingsoppervlak een besparing op energieverbruik van 7% oplevert. Aangezien er fysieke belemmeringen bestaan ten aanzien van het installeren van bijkomend warmtewisselingsoppervlak in bestaande raffinaderijen, is van deze maatregel op korte termijn slechts een vermindering van 3½% te verwachten. Maar zelfs in nieuwe raffinaderijen zal de structurele opzet verhinderen dat van deze maatregel ten volle profijt wordt getrokken en de besparing voor nieuwe installaties wordt niet verwacht hoger te zijn dan 5%.

Een hoger fornuisrendement zal leiden tot lagere rookgastemperaturen, met daaruit voortvloeiend een grotere kans op ernstige corrosie, zelfs bij zeer lage concentraties van zwavelzuur in de uitlaatgassen. Het gebruik van voorverwarmde lucht zou een realistisch compromis betekenen met besparingen van 5 en 10%, voor respectievelijk oude en nieuwe raffinaderijen. Het verminderen van de reflux dosering in de destillatiekolommen door het gebruik van langere kolommen

(namelijk meer schotels) voor hetzelfde fractionatierendement, zou een besparing opleveren van 2%, maar dan alleen in nieuwe installaties. Warmtepompen kunnen alleen maar worden gebruikt ter overbrugging van kleine temperatuurverschillen, dus er kunnen van hun toepassing in een raffinaderij praktisch geen besparingen worden verwacht. De algemene invloed van deze maatregelen op het energieverbruik in raffinaderijen is aangegeven in Tabel 5 voor bestaande en voor nieuwe installaties (de beide linkerkolommen). Op korte termijn kan een besparing worden verwacht van 16%, die op middellange termijn stijgt tot 22%, aannemende dat de specifieke normen voor het milieu dezelfde blijven als die van nu. Maar als die normen strenger zouden worden, dan zouden zij de mogelijke energiebesparingen meer dan teniet doen, zoals men zal kunnen zien in de rechterkolom van Tabel 5. Zie ook sectie 7.

Tabel 5. De procentuele verandering, op basis van het verbruik in 1985, van het eigen energieverbruik van raffinaderijen, als resultaat van besparende en milieubescherpende maatregelen

	Aanpassing van nieuwe en bestaande installaties, korte termijn (tot 1985)		Aanpassing van nieuwe installaties zonder extra milieumaatregelen	
	Bestaand (2/3)	Nieuw (1/3)	rekening houdend met extra milieumaatregelen	rekening houdend met extra milieumaatregelen
Computercontrole	-5	-5	-5	-5
Warmteterugwinning	-3,5	-5	-5	-5
Fornuisrendement	-10	-10	-10	-10
Meer schotels	0	-2	-2	-2
Warmtepompen	0	0	0	0
Ontzwaveling ¹⁾	-	-	-	+55 ³⁾
Verontreiniging ²⁾	-	-	-	+ 5 ³⁾
Totaal als percentage van het energieverbruik van de raffinaderijen	-16	-	-22	+38
Totaal als percentage van het energieverbruik in 1985	-0,8	-	-1,1	+1,9

¹⁾ Rechtstreekse ontzwaveling van de ruwe olie (+55%); bij rookgasontzwaveling daalt dit cijfer tot +10%.

²⁾ Loodarme benzine en zuivering van alle afvalwater.

³⁾ Alleen voor binnenlands gebruik; voor de totale produktie dienen deze cijfers te worden verdubbeld.

Zoals hierboven reeds werd opgemerkt zou de integratie van olieraffinage en openbare elektriciteitsbedrijven of ruimteverwarmingsdiensten verdere besparingen kunnen opleveren. Een integratie, aan de kant van de hoge temperatuur, tussen raffinaderijen en elektriciteitscentrales zou hun gezamenlijk energieverbruik verminderen met 20%, wat gelijk is aan 2% van ons nationale energieverbruik. Een integratie, aan de kant van de lagere temperatuur, tussen raffinaderijen en ruimteverwarmingsdiensten zou, bij vooronderstelling van een nuttig gebruik van 20% van het eigen verbruik van de raffinaderij, ons binnenlands energieverbruik verlagen met 1%. Uiteraard zouden eerst de volgende basisveronderstellingen moeten worden bevestigd: het huidige volume van de raffinageproduktie blijft

gehandhaafd en zal nagenoeg equivalent zijn aan de vraag naar elektriciteit. Dit volume zou dus voldoende moeten zijn voor het verschaffen van een basisbelasting voor de productie van elektriciteit (hetgeen thans mogelijk is).

Ammoniaksynthese

De synthese van ammoniak uit aardgas (methaan) voorziet in een belangrijke grondstof voor onze kunstmestindustrie. Nederlandse ammoniakfabrieken nemen ongeveer 5% van het nationale energieverbruik voor hun rekening. De energie vormt ongeveer 40% van de totale produktiekosten van ammoniak, terwijl afschrijving en rente nog eens 40% vragen. Daardoor is het een zeer energiegevoelige industrie, die belang heeft bij een evenwichtig ontwerpen van haar fabrieken. Het proces bestaat uit:

- een gedeeltelijke oxydatie van methaan door middel van lucht onder een matige druk, waardoor hoge temperaturen worden opgewekt (reformsectie);
- een verdere oxydatie van de koolstof, onder vorming van waterstof bij lagere temperatuur (conversiesectie) en verwijdering van de kooldioxyde uit het gewenste mengsel van waterstof uit het methaan en stikstof uit de verbrandingslucht (waarin zich voorts nog stoom bevindt);
- een synthese van ammoniak uit dit gasmengsel bij matige temperatuur en onder hoge druk ter verkrijging van een hoge opbrengst (5-8% van het gas moet worden afgevoerd ter voorkoming van accumulatie van verschillende onzuiverheden, zoals argon).

Het probleem is gelegen in het renderend gebruik maken van de verbrandingswarmte, die vrijkomt tussen de reform- en de conversiesectie, voor het onder druk brengen van het reactiemengsel in de synthesectie. Dit wordt gedaan door het opwekken van stoom, die naar stoomturbines wordt gevoerd voor het aandrijven van de compressoren (naast de stoom die wordt gebruikt als reagens voor de partiële verbranding in de reformsectie en de stoom die wordt gebruikt voor het verwijderen van de kooldioxyde).

In theorie is de verbrandingswarmte meer dan voldoende voor het opwekken van de hoeveelheid stoom die benodigd is voor de reformreactie. Maar in deze sectie is ook enige extra stoom nodig ten einde de opbrengst van de reactie in een gegeven volume van de reformsectie zo groot mogelijk te maken en ten einde de koolafzetting te verhinderen. Bovendien leiden de noodzakelijke wijzigingen in druk en temperatuur van het reactiemengsel gedurende het gehele proces tot niet meer terug te winnen verliezen (niet alle turbines kunnen onder tegendruk opereren; en het economisch gebruik van katalysatoren tijdens de synthese verhindert het volledig terugwinnen van warmte in deze sectie). Dientengevolge is het maximaal haalbare energetisch rendement ongeveer 89% (gebaseerd op het totaal verbruik van aardgas).

Op het ogenblik is het rendement, met het als aanvoer gebruikte aardgas, 83%. Vroeger, toen nafta werd gebruikt als koolwaterstofbron (tot 1965) was het rendement 76%, hetgeen op zichzelf een verbetering was vergeleken met het cijfer voordien van 70% voor aardolie en steenkool. Met andere woorden: er zijn al

aanzienlijke besparingen gerealiseerd. De door stoom aangedreven roterende compressor die omstreeks 1965 beschikbaar kwam (samenvallend met het begin van het gebruik van aardgas als procesvoeding) verhoogde de opbrengst aanzienlijk en leverde tevens een bijdrage aan de vergroting van de eenheden (bij een zich uitbreidende markt), hetgeen weer leidde tot verdere besparingen en tot een vermindering van de investering per ton ammoniak.

Kortom, de ruimte voor energiebesparingen in de ammoniakproductie is op korte termijn zeer beperkt. Een geringe verbetering in het totale rendement kan worden verkregen door het gebruik van gasturbines (die op zichzelf een laag rendement hebben) in plaats van stoomturbines en door het gebruik van hun uitlaatgassen ter voorverwarming van de in de reformsectie benodigde lucht. Op middellange termijn kan slechts verbetering worden bereikt als de temperatuurverschillen binnen het proces kunnen worden verminderd. Dit is in het bijzonder van belang in het geval van de synthesefase, waar het gebruik van een katalysator die reeds actief zou zijn bij een 300°C de hoeveelheid energie die thans is benodigd voor de compressoren, aanzienlijk zou verminderen. Op middellange termijn zouden stringenter milieubescherpende maatregelen voor deze fabrieken hun energieverbruik slechts in zeer geringe mate verhogen. In Tabel 6 worden de mogelijke besparingen opgesomd en daaruit blijkt dat zij in feite minimaal zijn.

Tabel 6. De procentuele wijziging in het energieverbruik voor de ammoniaksynthese (1985) welke resulteert uit besparingen en milieubescherpende maatregelen

	Korte termijn (tot 1985)	Middellange termijn (1985-2000) zonder extra rekening met extra milieubescherpende maatregelen	Middellange termijn (1985-2000) met extra milieubescherpende maatregelen
Voorverwarmde lucht voor reformer (met gebruik van gasturbines)	-5	-5	-5
Lage temperatuurkatalysator voor synthese	-	-13	-13
Beperking emissie ¹⁾ met een factor 2	-	-	+2
Totaal als percentage van het energieverbruik van ammoniakfabrieken	-5	-18	-16
Totaal als percentage van het binnenlandse energieverbruik in 1985	-0,25	-1,0	-0,8

¹⁾ Zie sectie 7.

Op middellange en lange termijn zou integratie aan de kant van de lage temperatuur in theorie extra besparingen kunnen opleveren, die soortgelijk zijn aan die in olieraffinaderijen (besparingen door integratie aan de kant van de hoge temperatuur zijn om duidelijke redenen niet mogelijk in ammoniakfabrieken). Volledige integratie van deze fabrieken met ruimteverwarming zou onder de huidige omstandigheden het binnenlands energieverbruik met ongeveer 1% verminderen.

Uit erts en cokes (of een ander reductiemiddel) wordt in de hoogovens ruwijzer geproduceerd. Het ruwe ijzer te zamen met het schroot (ongeveer 25% van de totale lading, waarvan een vijfde deel van buiten de fabriek afkomstig is) vormen de toevoer naar de eigenlijke staalfabrieken die de zuurstofovens en de walsen omvatten waar halffabrikaten zoals staalplaten enz. worden geproduceerd. Afgezien van de voor de hoogovens benodigde warmte komt het overgrote deel van het energieverbruik voor rekening van de walsen en voor het handhaven van de temperatuur van de produktstroom rond het smeltpunt. De Nederlandse hoogovens en staalfabrieken nemen ongeveer 5% van het binnenlands energieverbruik voor hun rekening.

In 1950 leverde steenkool nog altijd 85% van de behoefte aan primaire energie voor deze industrie en het aan deze steenkool onttrokken gas dekte 50% van het interne energieverbruik. Thans is het aandeel van steenkool in de aanvoer van primaire energie gedaald tot 50% en het steenkoolgas dekt niet meer dan 30% van de interne energiebehoefte. Tezelfdertijd is de energiebehoefte per ton produkt gehalveerd wegens een daling van het specifieke gebruik van cokes in de hoogovens, gedeeltelijk toe te schrijven aan nieuwe ontwikkelingen die het injecteren van olie mogelijk maakten, de overgang van het oude Siemens-Martin-proces naar het basische oxystaalproces en de vergroting van de fabrieken. Het prijsbeleid voor primaire energiedragers heeft ook het aankopen van andere brandstoffen dan steenkool gestimuleerd (hetgeen een daling van de calorische waarde van het topgas ten gevolge had).

Een van de voornaamste doelstellingen van de industrie dient te zijn het handhaven van haar flexibiliteit ten aanzien van primaire energiedragers. Daarbij zal zij zich nog meer gaan concentreren rond de grotere Europese havens dan thans het geval is.

Tevens is het onwaarschijnlijk dat er ooit een volledige integratie zal ontstaan tussen staalfabrieken en kern-energiecentrales, hoewel een zodanige integratie de vraag van deze industrie naar fossiele brandstoffen met ongeveer 30% zou doen dalen (de ideale omvang van beide eenheden zou onderling niet passen en zij hebben ongelijksoortige behoeften ten aanzien van een betrouwbare en veilige exploitatie).

Een niet-geïntegreerde samenwerking, waarbij de kernreactor alleen het reductiemiddel (waterstof) levert, zou omstreeks 1990 kunnen worden verwezenlijkt (op lange termijn) en zou een besparing op fossiele brandstoffen van rond 15% opleveren.

Er bestaan verscheidene maatregelen tot besparing die op korte termijn in overweging zouden kunnen worden genomen en die het totale energieverbruik in de staalfabrikage met 6% zouden verminderen. Maar aangezien de daarmee samenhangende investeringen pas over een gemiddelde periode van acht jaar zouden zijn afgeschreven, zou een extra prikkel nodig zijn, bijvoorbeeld in de vorm van een subsidie. Tot deze maatregelen behoort ook het beter gebruik maken van de energie die zich in de rookgassen uit de hoogovens, de oxystaalafabriek en de walsen bevindt en de invoering van een droog afkoelingsproces in de cokes-

fabriek, gecombineerd met stoomopwekking. In Tabel 7 worden de mogelijke besparingen in de staalindustrie opgesomd.

Tabel 7. De procentuele wijziging in het energieverbruik van hoogovens en staalfabrieken (1985), welke resulteert uit besparingen en milieubescherpende maatregelen

	Korte termijn ¹⁾ (tot 1985)	Middellange termijn (1985-2000) zonder extra rekening milieubescherpende maatregelen	rekening houdend met extra milieubescherpende maatregelen
Gebruik van expansie-turbines voor hoog-oventopgas	-1,1	- 1,1	- 1,1
Gebruik van rookgas-warmte in een oxy-staalfabriek	-0,9	- 0,9	- 0,9
Gebruik van rookgas-warmte in walsen	-1,3	- 1,3	- 1,3
Droge afkoeling in cokesfabriek (+ stoomopwekking)	-1,3	- 1,3	- 1,3
Andere besparingen	-1,4	- 1,4	- 1,4
Gebruik van waterstof uit kerncentrale ²⁾	—	-15	-15
Verhoogd gebruik van schroot	buiten beschouwing	buiten beschouwing	buiten beschouwing
Milieumaatregelen ³⁾ (vermindering emissie met een factor 2)	—	—	+ 2
Totaal op energieverbruik van staalfabrieken	-6	-21	-19
Totaal op binnenlands energieverbruik in 1985:	-0,3	- 1,0	- 1,0

¹⁾ Indien er een extra prikkel (subsidie) zou zijn ter compensering van een lange afschrijvingsperiode voor investering ten behoeve van deze maatregelen.

²⁾ Besparing op fossiele brandstof.

³⁾ Zie sectie 7.

Er bestaat weinig ruimte voor het integreren van het energiesysteem van een staalfabriek met bepaalde openbare diensten zoals ruimteverwarming of gasvoorziening, aangezien dit systeem op zichzelf praktisch volledig geïntegreerd kan zijn.

De rechtstreekse reductie van ijzererts tot ruwijzer is thans het onderwerp van omvangrijke onderzoeken, voornamelijk wegens de kwaliteitsverbetering die daaruit zou kunnen voortvloeien.

Indien toegepast, zou het moeten worden gecombineerd met smelten in een elektrische oven en met de diverse raffinerings- en legeringsstappen. Rechtstreekse reductie brengt het gebruik met zich van een gas dat kan voorzien in het reductiemiddel waterstof (aardgas of waterstof zelf) waardoor men het zonder steenkool kan stellen. Dit lijkt niet aantrekkelijk voor de Europese staalindustrie van de toekomst. Het specifieke gebruik van energie voor het eigenlijke proces is nagenoeg gelijk aan dat voor het huidige proces, maar het gebruik van de elektrische oven zou het specifieke gebruik van primaire energie met ongeveer 15% doen toenemen.

Verpakkingsindustrie

De verpakkingsindustrie neemt ongeveer 1,5% van het binnenlands energieverbruik voor haar rekening. De aandelen van de vier hoofdcategorieën verpakkingsmateriaal zijn als volgt:

blik	18	%
glas	15,5	%
papier, karton ¹⁾	37	%
plastic ²⁾	29,5	%
<hr/>		
totaal	100	%

¹⁾ Exclusief cellulose als energiebron.

²⁾ Waarvan 20% voor de calorische waarde van de grondstof en 9,5% voor de aangewende energie.

Wenselijke vervangingen binnen deze categorieën zijn niet alleen afhankelijk van de hoeveelheid primaire energie die nodig is voor de productie van een ton verpakkingsmateriaal, maar ook van:

- de verhouding tussen verpakkingsmateriaal per kg en produkt per kg (bijv. 1 liter melk kan worden verpakt in 25 gram polyethyleen, in 30 gram karton of in 600 gram glas);
- de mogelijkheid tot opnieuw gebruiken voor het oorspronkelijke doel (rekening houdend met de voor het inleveren en schoonmaken benodigde energie);
- de mogelijkheid tot het opnieuw in omloop brengen van de grondstof en het daaraan verbonden energieverbruik;
- de verontreiniging, veroorzaakt door de fabricage van de halffabrikaten en eindprodukten.

Deze factoren maken het bijna onmogelijk om thans normatieve doelstellingen op middellange of lange termijn te bepalen. Er zijn eenvoudigweg te veel vormen van wisselwerking dan dat ze berekend kunnen worden. Het gehele onderwerp zal worden behandeld in een afzonderlijke publikatie van de Stichting die naar verwacht wordt in 1976 zal verschijnen.

Maar toch kunnen enkele opmerkingen worden gemaakt ten aanzien van het aspect van het energieverbruik. Tabel 8 geeft het beeld van het verbruik van primaire energie per ton eindprodukt voor de vier categorieën verpakkingsmateriaal. De linker kolom toont het specifieke gebruik als zodanig; de rechter kolom geeft het feit weer dat het materiaal op zichzelf een calorische waarde kan hebben.

Tabel 8. Specifiek verbruik van primaire energie voor verpakkingsmateriaal (in 10^9 J per ton)

	als zodanig	met inbegrip van de calorische waarde van het materiaal zelf
blik	29,1	29,1
glas	16,3	16,3
papier, karton	18,8	50
plastic	31,0	96

Blikken worden alleen gebruikt wanneer de kwaliteitseisen zodanig zijn dat er geen alternatief bestaat. Hun gebruik voor het verpakken van dranken zou verminderd kunnen worden door het gebruik van glazen flessen of kartonnen pakken. Dit zou het energieverbruik in deze tak van nijverheid met minder dan 1% doen dalen.

Indien de beschikbaarheid van plastic verpakkingsmateriaal een probleem zou worden, zou het mogelijk zijn ongeveer 20% te doen vervangen door het gebruik van uit cellulose vervaardigd materiaal (indien dit in voldoende hoeveelheden beschikbaar is).

Dit zou de energiebehoefte van de verpakkingsindustrie met ongeveer 5% doen dalen. Een daling van ongeveer 10% van het gewicht dat nodig is voor de verpakking van een bepaald produktvolume zou mogelijk kunnen zijn voor alle materialen met uitzondering van blik, maar dit zou gedeeltelijk te niet worden gedaan door een toename van de energie, benodigd voor de werkzaamheden voor het in vorm persen en verpakken (stringenter normen voor mechanisatie en controle), zodat de netto-besparing slechts 8% zou zijn. Daarom zou in tijden van schaarste de energievraag van deze nijverheid met ongeveer 15% netto kunnen verminderen (hetgeen een besparing van 0,2% op het nationale energieverbruik zou betekenen). Het is nog niet bekend hoe een verhoogde mate van terugwinning dit cijfer zou beïnvloeden.

Aluminiumfabricage

Bauxiet wordt geraffineerd tot aluminiumoxyde (door middel van het Bayer-proces), en vervolgens gereduceerd tot aluminium (door middel van het Hall-Héroult elektrochemisch proces). Voor de raffinage-stap is 30×10^9 J per ton aluminium, voor de elektrochemische reductie 200×10^9 J per ton aan primaire energie nodig, terwijl de verdere verwerking tot plaat en folie 12×10^9 J per ton vereist; dit brengt het totaal op ongeveer 250×10^9 J aan primaire energie per ton aluminium. Hoewel in Nederland betrekkelijk weinig aluminium wordt geproduceerd, vergt dit toch nog 0,6% van het binnenlandse energieverbruik. Ongeveer 70% van deze energie komt beschikbaar als (praktisch niet meer terug te winnen) afvalwarmte bij de elektroden in het elektrochemische proces en als afvalwarmte bij de opwekking van elektriciteit.

Dit is inherent aan het proces en er blijft weinig ruimte voor verdere verbetering van het rendement (sinds 1950 zijn reeds besparingen van ongeveer 100×10^9 J primaire energie per ton aluminium bereikt).

Een nieuw elektrochemisch proces, het Alcoa-octrooi, wordt thans ontwikkeld en het zou het energieverbruik kunnen verminderen tot rond 180×10^9 J per ton aluminium, terwijl het bovendien nog andere voordelen biedt (geen fluor-emissie, lagere arbeidskosten, betere controle op het proces). Maar stringente milieubescherpende maatregelen zouden het energieverbruik van het huidige proces, met niet meer dan 2% verhogen, zodat het nog te bezien valt of investering in het Alcoa-proces werkelijk concurrerend zal blijken te zijn. In recente publikaties wordt melding gemaakt van een fabricageproces dat meer een chemische dan een elektrochemische weg volgt. Dit zou het mogelijk maken rechtstreeks steenkool te gebruiken als energiedrager in plaats van elektriciteit (met een specifieke energiebehoefte van 175×10^9 J per ton aluminium eindprodukt). Maar dit Toth-proces heeft nog nooit werkelijk zijn bruikbaarheid bewezen. Een van de punten die nog een nadere toelichting behoeven is het potentieel van het magnesiumzout dat als nevenprodukt wordt geproduceerd.

De meest veelbelovende benadering is evenwel het vermeerderen van het gebruik van aluminiumschroot (thans 20%). Het terugwinnen van schroot kost slechts 20×10^9 J per ton aluminium eindprodukt. Het vergroten van het aandeel van opnieuw te gebruiken schroot van 20 tot 30% zou dan ook een vermindering van 10% van het verbruik aan primaire energie opleveren. Dit, gevoegd bij een beperking van het huidige groeitempo (9% per jaar) zou voor de naaste toekomst wel eens het meest veelbelovend kunnen zijn.

Verbruiksartikelenindustrie (voedings- en reinigingsmiddelen)

De uit andere bedrijfstakken gekozen voorbeelden omvatten de fabricage van voedingsmiddelen (margarine, vetten en oliën) en die van zeep en reinigingsmiddelen. De voorbeelden tonen aan dat energie wordt gebruikt voor een zeer gevarieerde reeks doeleinden in deze sectoren en dat besparingen een aantal maatregelen met zich brengen die betrekkelijk hoge investeringen vereisen. De energiebehoefte voor de fabricage van voedingsmiddelen en aanverwante producten vormt ongeveer 3% van het totale nationale energieverbruik. Het zou mogelijk zijn over de gehele bedrijfstak een besparing van ca. 10% op dit cijfer te bereiken. Van de in het rapport gegeven voorbeelden zullen hier alleen maar de conclusies ten aanzien van de sector 'margarine, vetten en oliën' worden samengevat.

Deze bepaalde sector vraagt minder dan 0,1% van het Nederlandse nationale energieverbruik en zij biedt dus een geschikt voorbeeld voor een analyse. De energiekosten belopen rond 17% van de totale produktiekosten en enkele procenten van de prijs van het eindprodukt. Het fabricageproces bestaat uit de volgende stappen: het pletten van de zaden, het extraheren van olie uit het meel, het fractioneren van de olie, het raffineren van de olie (voornamelijk bestaande uit neutraliseren en reukloos maken), het modificeren van sommige der verkregen fracties en het emulgeren en het verpakken. Elk van deze fasen vormt een bijdrage aan het energieverbruik: reukloos maken (~30%), neutraliseren (~15%), pletten en extraheren (~10%), margarinebereiding en verpakken (~7%), fractioneren (~3%) met geringere percentages voor de overige stappen. Het gebruik van deodoriseringsmachines met meervoudige werking (hetgeen het dubbele van de huidige investering voor het reukloos maken zou betekenen!) en een verbeterd rendement voor de vacuüminstallaties, zou kunnen resulteren in een energiebesparing van iets meer dan 10%.

Maar behalve de rechtstreeks in de produktie gebruikte energie worden ook energiedragers verbruikt als hulpmiddelen bij de extractie en de destillatie (hexaan, butaan, aceton en heptaan), als brandstof voor het vervoer van de zaden of ruwe oliën uit het buitenland (brandstof voor schepen) en voor het vervoer van half-fabrikaten tussen fabrieken en van de eindprodukten naar de gebruiker. Nemen we de gehele industrietaak vanaf de plaats van de agrarische produktie tot en met de gebruiker, dan krijgen we de volgende aandelen in het geïntegreerde energieverbruik:

bunkeren ¹⁾	42%
verwerking	
—elektriciteit	5%
—gas en olie	40% (voornamelijk stoom)
—hulpmiddelen	5%
vervoer	
—tussen fabrieken	6%
—naar de gebruiker	2%
<hr/>	<hr/>
totaal	100%

Met andere woorden, er wordt ongeveer evenveel energie geïnvesteerd in het bunkeren en het vervoer als in de verwerking, het enige onderdeel dat tot nog toe in beschouwing is genomen. Een besparing van over het geheel genomen 10% zou derhalve ook besparingen kunnen inhouden op het vervoer (bijvoorbeeld door wijzigingen in de snelheid).

Fermentatie-industrie

Zoals hiervoor reeds werd gezegd, werd deze industrie voor dit rapport gekozen, niet vanwege haar eigen energiegebruik of vanwege mogelijke besparingen (die gering zijn), maar omdat men veronderstelde, dat een overgang van chemische synthese naar bio-synthese (of omgekeerd) energiebesparingen zou kunnen opleveren. Bovendien zijn enkele grondstoffen voor fermentatie-processen petrochemisch van oorsprong, zodat een belangrijke prijsstijging van de energie een diepgaande invloed zou hebben op het kosten/baten-evenwicht van deze processen. De derde reden voor het bestuderen van de fermentatie is de mogelijke toepassing van fermentatie-afval voor het produceren van bruikbare stoffen of van energie (zoals methaan uit anaerobe fermentatie). Deze drie aspecten worden hieronder afzonderlijk besproken.

Indien er twee mogelijke wegen zijn voor de fabricage van een produkt — een chemische synthese en een fermentatieproces — dan zal men de weg kiezen met de laagste kosten per eenheid produkt, *met inbegrip van de energiekosten*. Er zijn echter maar weinig produkten, waarvoor beide wegen reële mogelijkheden bieden. De traditionele fermentatieprocessen, die nog niet door syntheses zijn vervangen, vertonen zeer specifieke kenmerken, zoals bijvoorbeeld een zorgvuldig bewaard evenwicht tussen de fermentatiefasen in een gecompliceerd mengsel (produkten die 'leven'), hoge selectiviteit of hoge kwaliteit. In vele gevallen is er zelfs geen weg via synthese bekend. In het algemeen zijn er dan ook slechts drie gebieden bekend, waarop vervanging mogelijk is: voor minder gecompliceerde chemische stoffen (bijvoorbeeld zetmeelderivaten), voor zuiver farmaceutische stoffen (bij de produktie van penicilline) en, meer recent, voor enkele eiwitten (lysine, riboflavine). Er werden verschillende voorbeelden bestudeerd, uitgaande van de veronderstelling dat de energieprijzen verviervoudigd zou worden. Gebleken is, dat de fermentatieve produktie van alcohol, aceton, butanol en riboflavine nog altijd geen kans heeft tegenover de synthetische processen en dat de synthese van lysine

¹⁾ Indien alle brandstof wordt toegerekend aan de spijsoliën en niets aan de andere component (meel).

iets aantrekkelijker zou zijn dan de fermentatie. Concluderend kan worden gezegd dat energiebesparingen via alternatieve chemische wegen, met inbegrip van biosynthese, alleen in zeer specifieke gevallen mogelijk zullen zijn. Voor zulke gevallen zouden de nieuwe technieken van het binden van enzymen aan speciale dragers enig technologisch voordeel kunnen bieden.

Sommige fermentatieprocessen, zoals die voor enkelvoudige eiwitcellen en citroenzuur, maken gebruik van petrochemische stoffen (bijv. één oliefractie, methanol, azijnzuur). Het voornaamste kenmerk van deze processen is dat ze een laag rendement aan produkt opleveren, aangezien het grootste deel van de grondstof niet wordt omgezet in het gewenste produkt, maar in kooldioxyde, het rechtstreekse verbrandingsprodukt van de levende massa. Dit degradatie-element betekent dat een viervoudige verhoging van de kosten der aangevoerde grondstof deze processen vrijwel zeker minder aantrekkelijk zou maken.

De fermentatie van afval biedt slechts beperkte mogelijkheden. Afval in vaste vorm kan beter worden behandeld door middel van pyrolyse, compostering of verbranding. Maar afvalgasen als brandstof kunnen worden gemaakt uit een geconcentreerde vloeistof door middel van anaerobe fermentatie, hoewel het gas van slechte kwaliteit is. In theorie zouden we 0,2% van onze nationale energiebehoefte op deze manier kunnen dekken. In de praktijk zou dit cijfer evenwel veel lager komen te liggen, aangezien de toepassingen sterk zullen afhangen van plaatselijke omstandigheden en van andere gebruiksmogelijkheden voor het geconcentreerde afval (bijvoorbeeld veevoer).

Conclusies

De mogelijkheden voor energiebesparing in de bestaande industriële structuur zijn teleurstellend. De industrie heeft zich altijd zuinig betoond wat betreft het energieverbruik in haar processen, zelfs indien die proceskeuze niet in de allereerste plaats werd bepaald door energieoverwegingen. Een stijging van de energieprijzen zou daarom niet het startschot zijn voor een hele reeks wijzigingen in de verwerkingstechnieken, die zou resulteren in een verminderd energieverbruik per eenheid produkt, zelfs al zou de energieprijzen tot het viervoudige stijgen. Deze conclusie is gebaseerd op het feit, dat de energiekosten nog altijd niet de beslissende factor zijn, zelfs niet op het vooronderstelde hoge prijsniveau. Bij een stelsel van vrije concurrentie worden vernieuwingen geactiveerd door verminderde investeringen per eenheid produkt, minder onderhoud en betere kwaliteit. Een hoger energetisch rendement zou nog hogere inlaattemperaturen vereisen (en dus meer specifieke materialen en een ingewikkelder mechanisch ontwerp) en lagere uitlaattemperaturen (en derhalve een veel groter warmtewisselingsoppervlak). Een omschakeling in deze richting zou al gauw een verminderde investeringsopbrengst en hogere kosten voor onderhoud en exploitatie met zich brengen. Daarom maakt Tabel 9, waarin een samenvatting wordt gegeven van de mogelijke energiebesparingen op basis van het industriële gebruik in 1985 in Nederland, zo'n teleurstellende indruk: een besparing van 7,5%

op het industrieel energieverbruik op korte termijn, van 13,5% op middellange termijn als de normen voor het milieu ongewijzigd blijven en van niet meer dan 2,3% als de thans reeds als wenselijk beschouwde nieuwe milieubeschermdende maatregelen worden ingevoerd. Op lange termijn zouden de besparingen 13,5% kunnen belopen als de nieuwe milieubeschermdende maatregelen worden ingevoerd en 23% als dat niet gebeurt, mits overal waar dat mogelijk is gecombineerde energiesystemen worden gebruikt en — het allerbelangrijkste — als er integratie plaatsvindt met olieaffinaderijen. Tegen de achtergrond van een aangenomen jaarlijkse stijging van het industriële energieverbruik van 5% zou dit wel enig soelaas geven maar van een doorslaand succes valt nauwelijks te spreken.

Wat moet er dan gebeuren, als de *beschikbaarheid* van de energie geen probleem vormt op de middellange termijn en als de prijselasticiteit zodanig blijkt te zijn dat zelfs een viervoudige prijsverhoging geen besparingen van meer dan ongeveer 20% oplevert? Hier moeten wij ons zetten aan een analyse van de industrie zoals zij thans reilt en zeilt. Zij wordt soms onderworpen aan extreem hoge kwaliteitsnormen ten einde te kunnen concurreren op de vrije markt (bijvoorbeeld uitermate zuivere kristallen of zeer gladde staalplaten voor auto's die meer specifieke energie vereisen dan hun meer normale alternatieven) en zij is sterk gemechaniseerd en geautomatiseerd. In een welvaartsstaat is de totale levensduur van een produkt niet zozeer een zaak van kwaliteit als van gemak en visuele aantrekkelijkheid. Indien dit gaat ten koste van de feitelijke levensduur en van een excessief gebruik van energie en grondstoffen, dan ontbreekt het aan een stabiliserende terugkoppeling. Een van de manieren tot herstel van het evenwicht is het vaststellen van wettelijke grenzen voor de minimum levensduur en de maximum behoefte aan energie per eenheid produkt. Dit zou een toenemend onderhoud van eindprodukten vereisen en dit zou meer werkgelegenheid op dit terrein betekenen. Uit een oogpunt van economische groei zou dit dus niet noodzakelijkerwijs een duurder manier zijn om de materiële behoeften van de bevolking te bevredigen.

Dit brengt ons tot ons tweede punt, namelijk dat de arbeid zichzelf uit de markt heeft geprijsd. Welvaart en kwaliteitsnormen die niet vragen naar lange levensduur maar naar onafgebroken vervanging (en dus een hoge omzet), gecombineerd met inflatie (die althans ten dele een binnenlands karakter draagt wegens een toenemend aantal sociale diensten) hebben geleid tot verhogingen van het werkelijke loon, die niet worden bijgehouden door produktieverhoging. In feite zouden we toch een recessie hebben gekregen, oliecrisis of geen oliecrisis. Ten gevolge hiervan heeft de industrie, die met dit moeilijke binnenlandse probleem worstelt, terwijl zij tezelfdertijd wordt geconfronteerd met prijscontrole en stijgende grondstoffenkosten, een fundamentele mogelijkheid om te kunnen overleven: verlaging van de produktiekosten door de invoering van meer mechanisatie en automatisering. We hebben thans bijna de grenzen van deze ontwikkeling bereikt, niet alleen uit maatschappelijke overwegingen en factoren als aanpassingsvermogen, flexibiliteit en veiligheid, maar ook om redenen van energieverbruik — zoals men in Tabel 10 kan zien.

Tabel 9. De procentuele wijziging in het energieverbruik in de industrie, resulterend uit besparingen en milieubescherpende maatregelen; een samenvatting van Hoofdstuk 3 (in procenten van het nationale energieverbruik in 1985)

	Korte termijn (tot 1985)	Middellange termijn (1985-2000) zonder extra milieu- beschermende maatregelen	Middellange termijn (1985-2000) met extra milieu- beschermende maatregelen	Lange termijn (na 2000), als te voren, maar met totale energie-systemen
Olieraffinaderijen (Tabel 5)	- 0,8	- 1,1	+ 1,9	- 1,1
Ammoniaksynthese (Tabel 6)	- 0,25	- 1,0	- 0,8	- 1,6
Hoogovens en staalfabrieken ¹⁾ (Tabel 7)	- 0,3	- 1,0	- 1,0	- 0,9
Verpakkingsindustrie	- 0,25 ²⁾	buiten beschouwing	buiten beschouwing	buiten beschouwing
Aluminiumfabrikage	- 0,3 ³⁾	- 0,5 ⁴⁾	- 0,5	-
Alle andere industrieën ⁵⁾	- 0,2	- 0,2	- 0,2	- 0,2
Totaal als percentage van het nationale energieverbruik	- 2,1	- 3,8	- 0,6	- 3,8
Totaal als percentage van het totale industriële energieverbruik in 1985	- 7,5	- 13,5	- 2,3	- 13,5 ⁶⁾

¹⁾ Exclusief wijzigingen wegens een verhoogd gebruik van schroot.

²⁾ Met maatregelen wegens schaarste.

³⁾ Indien het gebruik van aluminiumschroot tweemaal zo groot wordt als thans.

⁴⁾ Aannemende dat het Alcoa-proces wordt ingevoerd, plus ³⁾.

⁵⁾ Extrapolatie van de voorbeelden in de industriële sectoren met een laag energieverbruik.

⁶⁾ Speculatief en kostbaar.

Tabel 10. Manuren en energieverbruik per ton produkt voor drie gemeenschappen met verschillende percentages aan werkgelegenheid in de primaire, secundaire en tertiaire sector

	90	15	5
primair (%)	90	15	5
secundair (%)	10	40	35
tertiair (%)	-	45	60
manuren per ton produkt	200	2	1,5
10 ⁶ J per ton (primaire energie)	18	3.500	7.000

De overgang van een maatschappij van boeren en handwerkslieden (linkerkolom) naar onze huidige industriële samenleving (middenkolom) dreef de vraag naar specifieke energie voor de produktie van goederen op met 5.000 Watt voor iedere door een machine vervangen arbeider. Behalve 50 Watt aan spierenergie bestond de bijdrage van de arbeider uit vakmanschap, vaardigheid en het vermogen zich aan te passen aan veranderende omstandigheden (bijvoorbeeld produktiestoringen). Dit kan een machine niet. Zij is niet in staat buiten de smalle tolerantieomgeving onregelmatigheden te aanvaarden en de boete voor deze onhandigheid en deze intolerantie is een energiebehoefte die 100 maal zo groot is als die van de door haar vervangen mens. Onze hoogontwikkelde technologie is nog altijd maar een armzalig werktuig als het om leren en aanpassingsvermogen gaat. Het resultaat van deze voortgaande vervanging van de mens door de machine kan worden afgelezen uit de tweede en derde kolom van Tabel 10: een massale verdere stijging van het energieverbruik. Dit is een van de redenen waarom het percentage werkers in de tertiaire sector niet zou mogen toenemen tot de maxima in de rechterkolom. Het is een illusie te geloven dat een nadruk, gelegd op de tertiaire sector oftewel de dienstverlening, gezien onze huidige levensstandaard, besparingen op energie en grondstoffen zal opleveren. In feite is het precies omgekeerd. We zouden in feite meer werkgelegenheid moeten scheppen in de eindproduktenfabrikage (een sector die tot nog toe weinig aandacht heeft gekregen) en in het onderhoud van verbruiksgoederen. Kortom, we zouden voorrang moeten toekennen aan die industriële activiteiten die we sinds het begin van de zestiger jaren hebben verwaarloosd.

4. Besparingsmogelijkheden in de elektriciteitsopwekking

Op het ogenblik komt ongeveer 20% van het Nederlandse verbruik aan primaire energie voor rekening van de openbare elektriciteitsbedrijven. Dit is evenwel een in relatief belang toenemend gebied en men verwacht dat het percentage in 1985 zal zijn gestegen tot 29% (zie Tabel 3a en b). Voor de energiebesparing is het dus even belangrijk als de industriële sector. Maar aangezien het systeem van de elektriciteitsvoorziening tamelijk ingewikkeld is, hebben op zichzelf staande bezuinigingsmaatregelen hier minder kans op succes dan in enige andere sector. De optimale aanpassing van het systeem zal tientallen jaren vergen. De voornaamste reden voor het toenemend gebruik van elektriciteit is dat het zo gemakkelijk hanteerbaar is. Het kan gemakkelijk worden omgezet in andere vormen van energie, gemakkelijk over grote afstanden van de centrales naar de gebruiker worden getransporteerd en het is schoon. De voornaamste nadelen zijn het grote energieverlies in de elektriciteitscentrale, transmissieverliezen en de onmogelijkheid het gemakkelijk op te slaan.

Het vraagstuk kan op drie wijzen worden aangepakt:

- verbetering van het rendement waarmee primaire energie wordt omgezet in elektriciteit;
- gebruikmaking van het concept van gecombineerd gebruik van kracht en warmte, dat ook in overweging kan worden genomen door andere grote gebruikers van energie (Hoofdstuk 3);
- het onttrekken van primaire energie, niet aan voorraden (steenkool, olie, gas, uranium), maar aan stromen (zon, wind, enz.).

In deze sectie worden deze drie benaderingen onderzocht.

Verbetering van het rendement

Als brandstof wordt verbrand ten einde elektriciteit op te wekken, wordt het theoretisch rendement beheerst

door de verhouding tussen de laagste en de hoogste (absolute) temperatuur van het proces. Deze verhouding bepaalt het percentage van de beschikbare hitte aan de bron, die in een omkeerbaar proces kan worden omgezet in bruikbare energie. Het theoretische optimum in deze 'Carnot'-cyclus is echter in een begrensd systeem onbereikbaar. Er zijn drie temperatuurfactoren die het praktisch rendement bepalen: de hoogste temperatuur van het proces (aan de bron), zijn laagste temperatuur (bij de afvoer) en het gemiddelde temperatuurverschil binnen het systeem voor de warmtewisseling.

Een vrijwel omkeerbaar proces kan worden benaderd in de brandstofcel, waarin waterstof onder scherp gecontroleerde omstandigheden wordt verbrand. Lage temperatuurcellen kunnen voor 1985 in de handel worden gebracht. Hun toepassing is beperkt (zo zijn ze niet geschikt voor de elektrische auto), aangezien ze een lage vermogensdichtheid, kleine afmetingen (zodat er zeer vele voor een bepaald doel moeten worden gebruikt) en een laag voltage hebben. Ze hebben zeer zuivere brandstof nodig en geven slechts een matig rendement van 36-39% (hoewel dit bij een wisselende belasting redelijk constant blijft). Hoge temperatuurcellen, die een rendement kunnen bereiken van 50% met een nog bruikbare vermogensdichtheid, zouden uiteindelijk de dieselmotoren in vrachtauto's kunnen vervangen, hoewel dit niet voor het einde van de eeuw wordt verwacht. Zij gebruiken tamelijk kostbare materialen (zoals platina), die maar beperkt voorradig zijn. Het is daarom waarschijnlijk dat deze cellen alleen maar zullen worden gebruikt voor bepaalde doelen, zoals zwaar vervoer.

Het thans meest gebruikelijke omzettingssysteem bestaat uit een stoomketel, een turbine en een generator. Het nadeel is dat de hoge temperatuur aan de bron (de stoomketel) tevens een hoge druk met zich brengt en dit stelt een praktische beperking aan het proces. Het beste totale rendement, dat met dit proces ooit is bereikt, was 43,5% (bij 350 bar en 650°C), met gebruikmaking van speciale materialen en een brandstof van hoge kwaliteit. Maar bij maximale belasting bleek de eenheid onvoldoende flexibel, terwijl er bovendien veiligheidsproblemen optraden. Op het ogenblik ligt het normale maximale rendement in de orde van grootte van 42% (bij 180 bar en 550°C). In beginsel bestaan er twee manieren om de druktemperatuurbepalingen van de stoomcyclus te omzeilen. Beide manieren houden in dat aan de hoge temperatuurkant een extra stap moet worden ingevoegd, ten einde het mogelijk te maken dat warmte wordt omgezet in arbeid bij betrekkelijk lage druk.

De magneto-hydrodynamische generator zou wel eens het gezochte toe te voegen element kunnen blijken te zijn. Deze doet zijn voordeel met het feit, dat bij zeer hoge temperaturen gasmoleculen uiteenvallen (dissociëren) in elektrisch geladen deeltjes. Een dergelijk bij hoge temperatuur geïoniseerd gas wordt plasma genoemd. Er kan een magnetische kracht worden gebruikt voor het afleiden (kanaliseren) van de elektronenstroom, waardoor een elektrische stroom wordt opgewekt. Op deze manier wordt warmte rechtstreeks omgezet in elektrische energie. Nadat het

verbrandingsgas de MHD-generator, waarin het ongeveer de helft van zijn energie verliest, is gepasseerd, wordt het gedeeltelijk gebruikt voor de voorverwarming van de lucht naar de verbrandingskamer (ter bereiking van de voor de dissociatie van het gas benodigde hoge temperatuur) en voor een ander gedeelte ter oververhitting van stoom in een standaard stoomcyclus, die vervolgens kan werken bij een hoge begintemperatuur, maar bij matige druk. Dit proces, dat al het stadium van de proeffabriek heeft bereikt, wordt voor 1985 nog niet operationeel. De keuze van de constructiematerialen, de erosie en de invloed van as in de MHD-generator (als steenkool wordt gebruikt als brandstof) vormen problemen die niet snel zullen worden opgelost. Bovendien is op het ogenblik het rendement van het hele proces niet meer dan 30%, hetgeen belangrijk lager is dan dat van de stoomcyclus op zichzelf. Maar theoretische berekeningen tonen aan dat een rendement van meer dan 50% tot de mogelijkheden behoort.

De gasturbine is de andere mogelijke eerste stap. Lucht wordt onder een matige druk gebracht voor ze naar een verbrandingskamer wordt gevoerd: de verbrandingsgassen drijven een turbine aan, waarin de energie in het zich uitzettende gas op twee manieren wordt gebruikt: voor het comprimeren van de naar de verbrandingskamer te voeren lucht en voor het aandrijven van een elektrische generator. Het zwakke punt in dit proces is dat het grootste deel van de energie in het verbrandingsgas gebruikt moet worden voor compressie, zodat kleine verliezen in de cyclus een onevenredig effect hebben op de voor de elektrische energie-opwekking overgebleven energie. En omdat bovendien het gas de turbine verlaat bij een betrekkelijk hoge temperatuur, is het rendement van het proces in hoge mate afhankelijk van de buitentemperatuur. Bij de thans bereikbare inlaattemperaturen (ongeveer 900 °C), is het rendement niet meer dan 29%. Als er nieuwe ontwerpen en materialen tot ontwikkeling worden gebracht, waardoor de inlaattemperatuur zou mogen stijgen tot ongeveer 1300°C, zou het proces een rendement opleveren van 42%. Na uitzetting in de gasturbine kan het gas, dat nog steeds warm is, worden gebruikt voor de verwarming van de daaropvolgende stoomcyclus, waarvan de ketel dan optreedt als warmtewisselaar tussen de uitlaatgassen van de turbine en de 'koude' stoomcyclus. Het is zelfs mogelijk het rookgas uit de turbine (dat nog altijd zuurstof bevat) te gebruiken als verbrandingslucht voor de ketel. Zelfs bij de huidige, betrekkelijk lage inlaattemperaturen van de turbine zou het totale rendement van dit systeem op 44% komen. Het voornaamste voordeel van het systeem is zijn bijzonder grote flexibiliteit, terwijl het bovendien in staat is zonder enig rendementsverlies te reageren op schommelingen in de vraag, hetgeen een onmiddellijke besparing van ongeveer 10% oplevert. Het systeem kan nog verder worden ontwikkeld. Als de temperatuur bij de turbine-inlaat tot 1200°C zou kunnen worden verhoogd, zou het totale rendement zelfs op 51% komen voor het laatstgenoemde systeem. Een kernreactor zou ook in het traditionele systeem de verbrandingsketel kunnen vervangen. Hierbij dient onderscheid te worden gemaakt tussen reactoren die worden gevoed met verrijkt uranium en waarmee we al

aanzienlijke ervaring hebben opgedaan, en kweekreactoren, die natuurlijk uranium gebruiken (waarvan een deel in de reactor in nieuwe brandstof wordt omgezet) en waarmee onze operationele ervaring nog beperkt is. De hoge druk-reactoren en heetwaterreactoren, die verrijkt uranium gebruiken, kunnen veilig worden gebruikt en zij openen ons de weg naar de benutting van kernenergie. Een fundamenteel probleem is dat de huls van de brandstofelementen slechts matige temperaturen kan verdragen, wat het rendement beperkt (32%). Dit kan worden verbeterd in de HTG (Hoge Temperatuur Gasgekoelde) reactor, waarin grafiet kan worden gebruikt als mantel voor de brandstof. Het resultaat is een hogere temperatuur aan de bron (510°C) en een hoger rendement (39% voor de HTG-reactor, gecombineerd met een traditionele stoomcyclus). De volgende stap is uiteraard het elimineren van de beide afzonderlijke warmtecycli: helium aan de kant van de reactor en stoom/water aan de andere kant. Een gesloten systeem, waarin helium wordt gebruikt voor het aandrijven van een gasturbine, lijkt uitvoerbaar (hoewel een verdere bestudering van de veiligheidsaspecten nodig is) en zou het rendement doen stijgen tot 42%. Deze configuratie heeft ook het voordeel flexibel te zijn en zich gemakkelijk aan te passen aan verandering van belasting zonder enig rendementsverlies. Indien de kerntemperaturen in deze reactor zouden kunnen worden verhoogd tot 900 c.q. 1000°C, zou het rendement nog verder stijgen tot ongeveer 46 c.q. 49%.

Concepten voor gecombineerd gebruik van kracht en warmte

In sectie 3, bij de bespreking van de mogelijke energiebesparingen in de industrie, werd reeds melding gemaakt van de mogelijkheden, geboden door het optimaliseren van het gezamenlijk energiegebruik van grote verbruikers: de industrie (voornamelijk raffinaderijen) aan de ene kant en openbare elektriciteitsbedrijven en ruimteverwarmingsdiensten aan de andere kant. Er zouden ook besparingen kunnen worden verkregen door de beide laatstgenoemde diensten te integreren of door het combineren van elektriciteitsbedrijven en drinkwatertoevoer (zoet water uit zeewater). Hoewel deze besparingen betrekkelijk hoog zijn in vergelijking met andere besparingsmaatregelen, zijn ze in absolute zin nog steeds gering (ten hoogste 20-30% van het gezamenlijk energieverbruik van de betrokken eenheden). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de vraag naar elektriciteit en de vraag naar warmte zelden gedurende een gegeven periode in onderling evenwicht zijn en dat verliezen onvermijdelijk zijn (vooral als kracht en warmte moeten worden geleverd naar verschillende plaatsen, waardoor de transportverliezen hoger worden). Dit probleem zal nog ernstiger worden als het rendement van de beide operaties zal toenemen, wat in de toekomst wordt verwacht. De mogelijke besparingen uit een geïntegreerd energiesysteem zouden dan kunnen dalen tot 10 à 15% en ze zouden geheel en al wegvallen indien het geïntegreerde systeem (met zijn beperkt aanpassingsvermogen aan de veranderende vraag aan beide zijden) niet zorgvuldig en evenwichtig wordt gebruikt of indien het toepassen van kleinere eenheden (ter omzeiling van

het probleem van de lange aanvoerlijnen) een daling van het rendement met zich zou brengen van 10-20% vergeleken met de grotere eenheden die thans elektriciteit aan het openbare net leveren. Als men dan nog rekening houdt met de hoge investeringen voor dergelijke systemen en het probleem van het voor 40 jaar vooruit plannen (namelijk voor de levensduur van zo'n systeem), dan wordt het duidelijk dat concepten voor gecombineerde opwekking alleen maar aantrekkelijk worden als ze op grote schaal worden ingevoerd. Dit betekent dat er weinig toekomst is voor toepassingen als bijvoorbeeld warmtevoorziening binnen een geïntegreerd systeem voor tuinbouwkassen en dat kleine 'total energy'-installaties (zoals bijvoorbeeld in ziekenhuizen worden gebruikt) in vele gevallen geen besparingen opleveren (ze worden om andere redenen gebruikt: onafhankelijkheid en veiligheid).

Twee reële mogelijkheden blijven dan over:

- een integratie van de openbare elektriciteitsvoorziening en de ruimteverwarming van aangrenzende woonwijken;
- een integratie van de openbare elektriciteitsvoorziening en de industrieën met een hoog energieverbruik.

Als het eerste plan op voldoende grote schaal zou worden uitgevoerd, zou dit een besparing opleveren van 20% van het gezamenlijk verbruik aan primaire energie voor elektriciteitsopwekking en gemeentelijke verwarming. Maar hiervoor is een uitgebreide toekomstplanning nodig. Er zou een voldoende aantal huizen reeds aangesloten moeten zijn op een centraal verwarmingssysteem om met de integratie te kunnen beginnen en het nutsbedrijf zou een integrerend deel moeten uitmaken van het nationale energienet. Dit is zonder meer een optie voor de middellange en lange termijn en met deze integratie zou rekening moeten worden gehouden in de planning voor de toekomst. Zij heeft het bijkomend voordeel een gedeeltelijke oplossing te bieden voor de problemen van het koelwatersysteem van de openbare elektriciteitscentrales. De tweede mogelijkheid, een integratie van de openbare elektriciteitsvoorziening en de opwekking van warmte en kracht in de industrie, werd reeds besproken in sectie 3. In de jaren twintig gebruikten industrieën met een grote behoefte aan stoom van lage kwaliteit (de aardappelmeel-, suikerbieten-, karton- en papierindustrie) het concept van combinatie van kracht en warmte voor de opwekking van een elektriciteitsoverschot, dat aan afnemers in de omgeving werd geleverd. Maar tegenwoordig steunt de industrie, als gevolg van ons prijs- en inkomensbeleid, op de openbare nutsbedrijven (zelfs voor het opwekken van warmte) omdat de energieprijzen in de afgelopen 20 jaar is gedaald met een factor 4 ten opzichte van de kosten van een manuur. Zoals te verwachten viel, veroorzaakte dit geen algemene besparing op primaire energie. Daarom behoort het wezenlijke doel de ontwikkeling van een geïntegreerde aanpak te zijn.

Energie uit stroomprocessen

In Hoofdstuk 4 is ook een onderzoek gedaan naar de mogelijkheid van het gebruik van stroomprocessen: zonne-energie, wind, getijdenenergie, geothermische

processen en de hydrologische cyclus (regen en rivieren). Daarbij is gebleken dat de zonne-energie de enige kandidaat is voor de middellange en lange termijn en dan alleen nog voor specifieke doeleinden, en als de problemen van energieopslag en lage producties per oppervlakte-eenheid kunnen worden opgelost. Op lange termijn zouden energie uit wind en geothermische energie (voor de verwarming van goed geïsoleerde huizen en voor de warmwatervoorziening van woningen) wellicht nuttig kunnen blijken. Energie uit stroomprocessen zal in de eerste tientallen jaren geen oplossing bieden voor onze problemen. Dit leidt ons derhalve tot dezelfde conclusie als waartoe wij in Hoofdstuk 1 kwamen: ons eerste doel dient te zijn te bezuinigen op en beperkingen te stellen aan activiteiten met een hoog energieverbruik. Niet langer moeten wij een beleid voeren gericht op een minimum prijs per kWh; in plaats daarvan moeten wij ons richten op het minimaliseren van de verliezen. Dit vereist het opstellen van een prijsbeleid en de invoering van voorschriften.

Conclusies

In de periode tot 1985 (korte termijn) zou de verovering van de markt door gecombineerde cycli van gas- en stoomturbines een steun kunnen betekenen voor de verbetering van het algemene rendement van de omzetting van primaire brandstof in elektriciteit, maar de invoering van de met verrijkt uranium gevoede lichtwater-kernreactor (zelfs bij de verwachte geringe penetratie) zal deze verbetering van het algemene rendement gedeeltelijk teniet doen, hoewel het nog altijd betekent dat men het schaarser wordende aardgas en de dito olie gedeeltelijk de rug toekeert. Verwacht wordt dat een besparing van 2% op het nationale energieverbruik kan worden bereikt door bijkomende algemene rendementsverbeteringen. Indien op middellange termijn de gecombineerde cycli en (misschien) de MHD-generator meer van de huidige eenheden gaan vervangen, zou een vrij omvangrijke verbetering kunnen optreden, mits de kernreactor (die op middellange termijn steeds meer zal worden ingevoerd) het huidige rendement voor de opwekking van elektriciteit zal kunnen bereiken. Alle ontwikkeling, gericht op rendementsverbetering door verhoging van de temperaturen binnen het proces en door verbetering van de warmteoverbrenging, spelen zich af in de marge van onze omvangrijke kennis van de huidige systemen. De verminderende resultaten van dit ontwikkelingswerk zullen wellicht niet meer uitrichten dan het compenseren van de verliezen, veroorzaakt door de verslechtering van de grondstoffenmarkt voor de primaire energiedragers (grondstoffen van mindere kwaliteit, kernbrandstoffen) en stringenter milieubescherpende maatregelen. Op middellange en lange termijn zouden enkele bijkomende besparingen, ter grootte van ongeveer 1,5% van het nationale energieverbruik, mogelijk zijn als er thans plannen worden vastgesteld voor geïntegreerde energiesystemen (die, omdat ze tamelijk ingewikkeld en kostbaar zijn, niet gemakkelijk kunnen worden aangepast). Gezien het feit dat het verbruik van elektriciteit momenteel iedere acht jaar verdubbelt, biedt dit geen veelbelovend perspectief.

5. Mogelijke besparingen in woningen en andere gebouwen

In 1972 namen de Nederlandse huishoudens 21% van het binnenlandse energieverbruik voor hun rekening (verwarming 17%, koken en warmwatervoorziening 4%). Bovendien kwam hun elektriciteitsverbruik op ongeveer 5% van het nationale verbruik aan energie. Deze totale energiebehoefte voor gebruik in de woning is derhalve groot genoeg om een bestudering in het kader van dit rapport te rechtvaardigen. Hetzelfde geldt voor de bouwsector (winkels, kantoren, ziekenhuizen, scholen, enz.). Voor 1972 kwam het olie- en gasverbruik in deze sector op 8% van de nationale behoefte en het elektriciteitsverbruik beliep ongeveer 4% van het totale verbruik van primaire energie.

Dit gedeelte van de studie bestaat uit vijf delen:

- besparingen op verwarming van woningen;
- besparingen door verbetering van gasapparaten;
- besparingen door verbetering van elektrische apparaten;
- besparing verkregen door een systematischer benadering van de energieverbruikende functies in niet voor bewoning bestemde gebouwen;
- vooruitzichten voor niet-traditionele methoden, in het bijzonder het gebruik van zonne-energie voor verwarming van woonhuizen.

Deze studie houdt zich niet bezig met sociale factoren, maar wijst wel een aantal malen op mogelijke wijzigingen in de attitudes van de mensen. De rol die voorlichting, begeleiding en onderwijs zouden kunnen spelen bij het teweegbrengen van een veranderde opvatting over energiebesparing dient afzonderlijk te worden onderzocht. De bestuurlijke en wetgevende aspecten, zoals standaardisatie en overheidsgoedkeuring van toestellen en installaties, hebben in deze bespreking geen plaats gekregen.

Besparingen op de verwarming van woonhuizen

Ongeveer 35% van de 4×10^6 huizen in Nederland was in 1972 centraal verwarmd. In 1985 zal dit percentage zijn gestegen tot 85% van bijna 5×10^6 huizen. Een centraal verwarmde woning gebruikt thans een gemiddelde van ongeveer 140×10^9 J per jaar, terwijl voor een niet centraal verwarmd huis ongeveer de helft van deze hoeveelheid nodig is.

Naast het toenemen van het aantal centrale verwarming- en waren de volgende factoren verantwoordelijk voor een stijging van het energieverbruik voor het verwarmen van woonhuizen:

- hogere kamertemperaturen (dunnere kleding);
- minder bewoners per woning;
- meer ruimte per bewoner;
- grotere raamoppervlakken;
- een veelvuldiger gebruik van de verwarming gedurende koude perioden in voor- en najaar.

De verwarmingsverliezen van een gebouw worden bepaald door drie factoren: geleiding via muren, vloeren en dak, ventilatie en uitstraling. De geleidings-

verliezen zijn ruw genomen evenredig aan het totale buitenoppervlak van het gebouw en aan het verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur. De proportionaliteitsconstante is afhankelijk van vele factoren, zoals de windsnelheid, en de ligging van de woning, ook ten opzichte van andere naburige gebouwen, alsook de goede sluiting van ramen en deuren.

Als een architect een huis ontwerpt, bepaalt hij een groot deel van het warmteverlies: de omvang en de plaatsing van de ramen, de keuze van bouwmaterialen, het ontwerp van de verschillende kamers, de verhouding tussen volume en buitenoppervlak, enz. Zo is bijvoorbeeld de verhouding tussen de oppervlakken van de buitenmuren voor vrijstaande woningen, half vrijstaande woningen en appartementen, ruw geschat; 3:2:1.

De hier aan een beschouwing onderworpen maatregelen zullen alleen maar werkelijk nut afwerpen als de architect in zijn ontwerp het juiste evenwicht weet te vinden. Zij houden het volgende in:

- betere isolering van muren, vloeren en dak;
- gebruik van thermostaten;
- lagere binnentemperaturen, mogelijk gemaakt door verbeterde isolering;
- meting van individueel verbruik, vooral in flatblokken.

Verbeterde isolatie leidt tot een sterke vermindering van de warmteverliezen. In Zweden, waar de temperatuur in de winter tot -18°C kan dalen, is een verlies van 5 kW per standaardwoning normaal, terwijl dit in experimentele huizen is teruggebracht tot 2 kW (en dat al in 1953!). In Nederland verliest een gemiddeld huis 12 kW bij een temperatuur van -10°C . De verhouding tussen de verliezen via ramen, spleten, muren, vloeren en dak zijn 2:1:1:1:1. Op al deze oorzaken van verlies moet worden gelet, vooral op de ramen (dubbele beglazing). Uit de studie blijkt dat door geleiding en ventilatie veroorzaakte verliezen voor nieuwe huizen kunnen worden gehalveerd en die voor bestaande tot op twee-derde teruggebracht.

Bij verbeterde isolatie stijgen de temperaturen van de binnenmuren (bij constante warmtetoevoer) en lagere kamertemperaturen worden behaaglijker als gevolg van betere stralingsverhoudingen. Dit zou de mogelijkheid openen te streven naar een vermindering met 2°C van de gemiddelde binnentemperatuur, hetgeen een besparing zou opleveren van 5% van het huishoudelijk brandstofverbruik voor verwarmingsdoeleinden. Het gebruik van een thermostaat, geprogrammeerd voor nachtelijke temperatuurverlaging, zou nog eens 5% opleveren.

Het rendement van de warmteterugwinning door middel van een mechanische ventilatie hangt in hoge mate af van de doeltreffendheid van de isolatie.

In slecht geïsoleerde huizen zou een vermindering van 5% en in goed geïsoleerde huizen van 10% van het brandstofverbruik bereikt kunnen worden. Warmteterugwinningssystemen kunnen uiteraard alleen maar in nieuwbouw worden geïnstalleerd.

Afzonderlijke meting van het energieverbruik in huizenblokken en kostenomslag naar verhouding zou in daartoe geschikte gevallen nog eens een besparing van 10% opleveren.

De huizenvoorraad, zoals deze er in 1985 vermoedelijk zal uitzien, kan in drie groepen worden verdeeld:

- woningen zonder centrale verwarming, gebouwd

in of voor 1973, waarvoor geen maatregelen zullen worden genomen;

- reeds gebouwde of tussen 1974 en 1976 nog te bouwen woningen, waarin tegen 1985 een centrale verwarming is geïnstalleerd, voor welke het gebruik van een thermostaat verplicht is en voor welke een aantal isolatiemaatregelen zullen worden genomen,
- nieuwe centraal verwarmde woningen, te bouwen tussen 1976 en 1985, voor welke de volgende bijkomende maatregelen van toepassing zijn: een verlaging van de binnentemperatuur van 2°C , afzonderlijke meting van het verbruik in 20% van de huizenblokken en de installatie van een warmteterugwinningssysteem in 10% van deze woningen.

Uit de studie blijkt dat op energie voor woningverwarming in 1985 een besparing van 33% kan worden bereikt. Dit komt overeen met een besparing van 5,7% van het nationale energieverbruik in 1985.

De kosten van een op grote schaal aangebrachte isolatie zouden worden gecompenseerd door de financiële besparingen, die voortvloeien uit de installatie van kleinere verwarmingseenheden en uit het lagere brandstofverbruik (berekend op basis van de prijzen in begin 1974). Zelfs de extra kosten van het vullen van spouwmuur in bestaande woningen met kunststofschuim ter vermindering van geleidingsverliezen worden in het algemeen goedge maakt door de daaruit resulterende brandstofbesparingen.

In de studie wordt derhalve aanbevolen:

- het verzwaren van de isolatienormen voor nieuwe gebouwen;
- het aanbrengen van een zekere verbetering in de isolatie van alle bestaande huizen die in 1985 van centrale verwarming zullen zijn voorzien;
- het voorschrijven van het gebruik van geprogrammeerde thermostaten die de temperatuur 's nachts verlagen en die de kamertemperatuur in goed geïsoleerde huizen met 2°C zouden kunnen helpen verlagen;
- het aanmoedigen van het gebruik van energiebesparende methoden thuis, zoals warmteterugwinningssystemen en individuele rekeningen voor brandstofverbruik;
- het normaliseren van de afmetingen van bouw-elementen zoals dubbele ramen;
- het intensiveren van het onderzoek naar de functie van 'koudebruggen' (bepaalde punten in de structuur van het gebouw waardoor een groot deel van de warmte naar buiten stroomt).

Besparing door verbetering van de gasverwarmings-apparaten

De niet-elektrische bronnen van energie die ten behoeve van huizen warmte en warm water verschaffen, werden gekozen als het volgende terrein voor het treffen van besparingsmaatregelen. Aangezien in Nederland de meeste van de apparaten op gas en niet op olie werken, concentreert de studie zich op alle typen gasverwarmers, voor warm water in keukens of badkamer, voor koken en voor centrale verwarming. Ter vermindering van dubbeltelling is er bij de berekening van de invloed van uitvoerbare maatregelen van uitgegaan, dat alle in de voorgaande paragraaf aan-

bevolen maatregelen in 1985 zullen zijn tenuitvoer-gelegd. Bovendien is, om in de vergelijking rekening te kunnen houden met verzadigingseffecten, een schatting gegeven van de groei van het aantal der verschillende in gebruik zijnde typen apparaten en van de toeneming van het aantal gasaansluitingen. Deze, te zamen met de fundamentele vooronderstellingen ten aanzien van het specifieke gebruik per apparaat, leverde de basis voor de raming van de door deze apparaten in 1985 te verbruiken energie.

Dit verbruik kan worden teruggebracht door:

- het verminderen van verliezen via de schoorsteen;
- het verminderen van de geleidingsverliezen (in het bijzonder de stilstandsverliezen) aan de onmiddellijke omgeving, zowel van het apparaat zelf als van de daaraan verbonden leidingen;
- het verminderen van door de waakvlam veroorzaakte verliezen.

Voor deze maatregelen zijn voorschriften nodig betreffende het gebruik van een verbrandingsgasklep in de schoorsteenpijp (die daar thans gewoonlijk niet in is aangebracht), het gebruik van een elektrische vonkaansteker in plaats van een waakvlam, technische verbeteringen aan de branders, een beter ontwerp van het oppervlak voor warmtewisseling, verbeterde isolatie en het gebruik van mengtoestellen voor warm en koud water (in het bijzonder voor centrale verwarmingsketels).

Het probleem van deze apparaten is dat, ofschoon de overbrenging van warmte van de verbrandingskamer naar de inhoud van de apparaten een betrekkelijk goed rendement heeft ($78 \pm 5\%$, de hoogste limiet uit veiligheidsoverwegingen) de warmte-opslagverliezen bij stilstand hoog zijn (vooral voor gasboilers en centrale verwarmingseenheden).

Men zou tot wettelijk vastgestelde ontwerpnormen moeten komen ten einde deze opslagverliezen tot een minimum terug te brengen. Enkele van die verliezen helpen het huis verwarmen tijdens koud weer, maar in het algemeen genomen komen ze niet terecht waar ze het meest nodig zijn.

Indien de in de studie voorgestelde maatregelen in 1985 ten uitvoer zullen zijn gelegd, zullen zij een besparing opleveren van 1,5% van het nationale energieverbruik van dat jaar. Indien ze zouden zijn uitgevoerd zonder het treffen van de in de vorige paragraaf aanbevolen isolatiemaatregelen zouden zij het totale energieverbruik in 1985 met 3% kunnen verminderen. Dit komt omdat het verbruik van de hier besproken apparaten dan ook tweemaal zo groot zouden zijn, daar zij in relatief slecht geïsoleerde ruimten zouden functioneren. De kosten van de maatregelen zijn laag met betrekking tot de besparingen. De voornaamste vraagstukken zijn normalisering en voorlichting van het publiek.

Besparing bij het gebruik van elektrische apparaten

Hier wordt dezelfde benadering gekozen als in de voorgaande sectie. De toeneming in aantal van alle in woningen gebruikte elektrische apparaten is bestudeerd en geëxtrapoleerd naar 1985. Dit is gedaan voor vrieskasten, koelkasten, wasmachines, afwasmachines, droogtrommels, elektrische fornuizen, stofzuigers, verlichting, centrale-verwarmingspompen en nog wat

andere apparatuur. Deze gegevens inzake toenemend verbruik, tezamen met het verbruik per eenheid, verschaften de basis voor de berekening van het huishoudelijk verbruik van elektriciteit in 1985. Daarbij is aangenomen dat het niet zal gaan in de richting van volkomen nieuwe systemen. Waar zulks van toepassing was, zijn wel trends naar grotere apparaten of hogere intensiteit in aanmerking genomen.

Het aantal aan te brengen geringe verbeteringen is groot, maar te zamen komen zij op een besparing van 1,8% van het nationale energieverbruik in 1985. Elk van deze verbeteringen wordt in de studie vergezeld door een grensprijs voor elektriciteit. Ruw geschat zou de helft van de voorgestelde maatregelen ook thans lonend zijn en voor vele andere zal het evenwicht tussen kosten en baten in de naaste toekomst worden bereikt.

De voornaamste conclusies zijn:

- elektriciteit wordt niet aanbevolen voor verwarming, koken of warmwatervoorziening. Het mogelijke gebruik van gas voor verwarmingsdoeleinden in wasmachines en afwasmachines dient te worden bestudeerd. Als in plaats van elektriciteit gas zou worden gebruikt, zou men voor elke toepassing 50% aan primaire energie kunnen besparen;
- de isolatie van vrieskasten en koelkasten dient te worden verbeterd (normalisering van ontwerpen); het 'no-frost'-principe in koelkasten moet niet worden ingevoerd en het rendement van de warmtepomp van de koelkast dient te worden verbeterd;
- er dient te worden gedacht aan het voorverwarmen van de drogingslucht door het rookgas (als er gas wordt gebruikt in het geval van droogtrommels);
- het rendement van verlichting en van stofzuigers moet worden verbeterd: het gebruik van fluorescerende lampen geeft een besparing van 30% op dat van gloeilampen; stofzuigers zouden efficiënter moeten worden geconstrueerd, zodat zij geen groter vermogen hebben dan 200 W;
- centrale-verwarmingspompen dienen niet altijd op volle kracht te werken en zouden in de zomer zuiniger moeten worden gesteld (aan kopers wordt vaak aangeraden de pomp gedurende de zomerte gebruiken ten einde verstopping te voorkomen);
- in het Nederlandse klimaat bestaat aan klimaatregeling (air-conditioning) in het geheel geen behoefte;
- de isolatie van wasmachines en afwasmachines zou kunnen worden verbeterd; warmtewisselaars zouden kunnen worden gebruikt voor het terugwinnen van warmte uit afvalwater en de werkings-temperaturen zouden kunnen worden verlaagd, vooral voor wasmachines (door het gebruik van verbeterd waspoeder).

Het zal tijd kosten de bestaande typen uitrusting te vervangen door de verbeterde, maar zonder aanmoediging en advies van overheidswege zal het nog langer duren. In dit opzicht zijn technische verbeteringen minstens zo belangrijk als het veranderen van het gedragspatroon van de consument. Als we blijven voortgaan langs de bestaande weg zal een normaal huishouden zijn elektriciteitsverbruik tegen het jaar 2000 hebben verdubbeld. Als dat huishouden zou overstappen op elektriciteit voor alles behoudens centrale verwarming, zou dat gebruik verdrievoudigen. Als het ook nog elektriciteit zou gebruiken voor centrale verwarming en klimaatregeling, zou het

gebruik verveelvoudigen. Een spaarzame huishouding daarentegen, die de aanbevolen maatregelen opvolgde, zou heel comfortabel kunnen leven zonder in 2000 meer elektriciteit te gebruiken dan een gemiddeld gezin nu. De betekenis van deze bevinding spreekt voor zichzelf.

Conclusie inzake besparingen op energiegebruik in woningen

De resultaten van de drie voorgaande afdelingen inzake energiebesparingen in woningen zijn samengevat in Tabel 11. Zij laten zien dat in 1985 een totale besparing op het nationaal energieverbruik zou kunnen worden bereikt van 9%.

Besparingen in de sector van niet voor bewoning bestemde gebouwen

In deze sector worden olie, gas en elektriciteit voornamelijk gebruikt voor centrale verwarming, klimaatregeling, koeling, ventilatie en verlichting. Klimaatregeling, centrale verwarming en verlichting zullen hier worden beschouwd als een geïntegreerd systeem. Besparingsmaatregelen zijn gericht op hetzij de bouwkundige, hetzij de technische en operationele aspecten. Vanuit bouwkundig oogpunt gezien ontmoet men zelden de ideale verhouding tussen het vrije muuropervlak en het volume, terwijl de isolatie, vooral in kantoren met klimaatregeling, gebrekkig is.

Als we spreken over de energetisch ideale vorm van een gebouw, dan moeten we bedenken dat, als dit resulteert in een verhoogd niveau van verlichting, de daarvoor gebruikte energie wel eens de besparingen op de verwarming teniet zou kunnen doen.

Voor nieuwe gebouwen zou men moeten denken aan:

- minder glazen gevels;
- verbeterde isolatie;
- een selectievere keuze van de voornaamste verhoudingen en van de vorm, waarbij tevens rekening moet worden gehouden met de zonnestraling.

Wat betreft de installaties zouden een aantal verbeteringen kunnen worden aangebracht aan apparaten en systemen, hoewel enkele daarvan kostbaar zijn:

- warmteterugwinning uit ventilatielucht;
- het afzuigen van warmte uit verlichtingsarmaturen;
- minder algemeen gespreid licht en meer gericht licht (besparingen tot 30% op elektrische energie);
- lagere temperaturen 's nachts en tijdens weekeinden (vermindering met 4°C) als de (opwarmings-) capaciteit van de verwarmingseenheid dit toelaat;
- het gebruik van warmtepompsystemen voor warmteterugwinning;
- het (plaatselijk) gebruik van geïntegreerde energieconcepten (zoals dit uit veiligheidsoverwegingen reeds gebeurt in ziekenhuizen en computercentra).

De beide laatste verbeteringen zijn tot nu toe te duur om te gelden als uitvoerbare mogelijkheden.

In de studie wordt aangeraden het bouw- en woningtoezicht in deze sector meer rekening te doen houden met deze mogelijkheden dan tot dusver het geval is. Eventueel zijn hiertoe nieuwe wettelijke bepalingen vereist. De maatregelen die in 1985 ten uitvoer kunnen

Tabel 11. De procentuele wijziging in het verbruik van energie voor woonhuizen en andere gebouwen, die het resultaat is van besparingen (in % van het nationaal energieverbruik in 1985)

	Tot 1985	1985-2000	2000, inclusief niet-conventionele methoden
<i>Woonhuizen</i>			
centrale verwarming	- 5,7	- 8 ¹⁾	- 8
gasapparatuur	- 1,5	- 2,5 ²⁾	- 2,5
elektrische apparaten	- 1,8	- 2,3 ³⁾	- 2,3
zonne-energie	-	-	- 1,0 (op fossiele brandstof)
'total energy'-systemen ⁴⁾	-	-	-
<i>Andere gebouwen</i>			
oude gebouwen	- 0,3	- 2,2 ¹⁾	- 2,7
nieuwe gebouwen	- 0,7	-	-
'total energy'-systemen ⁴⁾	-	-	-
totaal	-10,0	-15,0	-16,5

¹⁾ Alle vervanging van woningen of andere gebouwen volgens nieuwe (isolatie)-normen.

²⁾ Toenemende invoering van energiebesparende typen apparaten.

³⁾ Aannemende dat eerder het 'spaarzame' dan het 'alles elektrisch'-gezin een blijvende verschijning is geworden (als reactie op overheidsmaatregelen).

⁴⁾ Reeds begrepen in voorgaande tabellen, bijvoorbeeld Tabel 9.

zijn gelegd in de oude en nieuwe gebouwen in deze sector, zouden een besparing kunnen opleveren van 1% van het nationale energieverbruik in dat jaar (zie Tabel 11).

Vooruitzichten voor niet-traditionele methoden

Het hoofdstuk wordt besloten met een analyse van het gebruik van niet-traditionele methoden voor de opwekking van energie op lange termijn. Aan energie uit kernreactoren en geïntegreerde energieconcepten wordt geen uitvoerige aandacht besteed, aangezien ze reeds zijn besproken in voorgaande hoofdstukken.

Volgens verscheidene publikaties zou energie die is onttrokken aan een aardoppervlak van 200 m² voldoende energie verschaffen om een goed geïsoleerde woning op een behaaglijke temperatuur te houden, maar de ontwikkeling van zo'n systeem en zijn experimentele toepassing wordt niet verwacht voor het einde van de eeuw.

Zonne-energie voor huisverwarming en voor warmwatervoorziening biedt enige armslag voor de toekomst. Een stralingsopvangster van 50 m² per goed geïsoleerde woning zou kunnen voorzien in de helft van de energiebehoefte van dat huis, zelfs op Nederlands 52ste breedtegraad. Indien van nu af de research en de ontwikkeling op dit gebied zouden worden gestimuleerd, dan zou deze bron tegen het jaar 2000 een geringe toepassing kunnen vinden (zie Tabel 11). Zodanige systemen hebben tijd nodig om tot rijping te komen. Ze zullen de architectuur en de vorm van gebouwen beïnvloeden (de stralingsopvangster zou in het bouwwerk moeten worden opgenomen). De research zal zich moeten richten op een hoger rendement van de opvangsters en op de opslag van de energie. Gezien de prijsontwikkelingen van andere dragers van primaire energie, geeft de waarschijnlijke ontwikkeling van de kostprijs van deze systemen geen reden tot pessimisme.

6. Mogelijke besparingen in de verkeers- en vervoerssector

In 1972 namen het verkeer en het vervoer ongeveer 10% van ons nationaal energieverbruik voor hun rekening. Maatregelen voor besparing worden dikwijls voorgesteld, maar ze bevatten allemaal een speculatief element omdat het menselijk gedragspatroon binnen het systeem allesbehalve voorspelbaar is. De oproep tot vrijwillige snelheidsbeperking in december 1973 had succes, maar het experiment heeft te kort geduurd om daaruit nadere conclusies te trekken. De huidige proef met verplichte lagere snelheden zal worden voortgezet totdat stellige gegevens over de gevolgen van snelheidsbeperkingen beschikbaar worden. Maar de gevoelens van het publiek over dit onderwerp hebben zich gewijzigd en dat is te betreuren.

De auto bezit het bijzonder wezenlijke voordeel dat ze te allen tijde bij de voordeur beschikbaar is. Dit stelt alle middelen van openbaar vervoer in het nadeel, hoe dicht het net en hoe hoog de frequentie van de diensten ook mag zijn. Bovendien zijn de variabele kosten van een auto-kilometer vrijwel vergelijkbaar met de prijs per kilometer vervoer voor de gebruiker van openbaar vervoer. De vaste kosten van de personenauto hebben geen werkelijke invloed op het besluit van de eigenaar zijn wagen al dan niet te gebruiken. Voorts is de relatieve waarde van deze vaste kosten voortdurend dalende. Het totale aantal auto's in Nederland is aan het stijgen, waarbij eigenaars van eerstehands auto's hun wagens dikwijls aan tweedehands kopers aanbieden tegen elke prijs die de koper bereid is te betalen, lang voordat de economische en technische levensduur van de auto is afgelopen.

De voortdurende beschikbaarheid van vervoer van deur tot deur brengt, als het om goederenvervoer gaat, ook de vrachtwagen in een voordelige positie ten opzichte van de trein en de binnenvaart. Tijdelijke opslag en overlading zijn te duur geworden wegens de sterke stijging van de reële waarde van de arbeidskosten. Deze overvloedige beschikbaarheid en de lage kosten voor bijkomende kilometers zijn geen aanmoediging tot zuinigheid; veel reizen en tochten worden gemaakt met een lage graad van bezetting of lading.

Onder deze omstandigheden lijken indirecte sociale maatregelen meer kans te bieden op besparingen dan rechtstreekse (technische of economische) maatregelen. Er zijn heel wat pogingen gedaan om een sociaal model uit te werken van het vervoerssysteem bestaande uit: de gebruikers, hun doelen en middelen, de infrastructuur (wegen, enz.) en het controlesysteem (verkeerstekens, wetten, voorschriften, enz.). De doelen en middelen bestrijken een wijd gebied en zijn daarom onderverdeeld naar de volgende aspecten:

- organisatie (d.w.z. particulier of openbaar vervoer);
- wijze (bijv. personenauto, motorfiets, fiets);
- tijd (bijv. spitsuur);
- plaats (bijv. stad);
- type activiteit (bijv. werk, winkelen, recreatie, sociale contacten);
- soort (d.w.z. personen of goederen).

Er worden maatregelen ontworpen, verdeeld over de volgende categorieën:

- het verminderen van de verkeersbehoefte of het verschuiven ervan naar andere tijden en plaatsen;
- het verschuiven naar meer rendabele wijzen van vervoer, het nemen van stappen ter verhoging van de bezettings- of beladingsgraad of het zorgen voor een betere verkeersregeling;
- suggesties voor de verbetering van de bouw en het ontwerp van voertuig en motor en mogelijkheden voor een gelijkmatiger wijze van gebruik. Er worden ook suggesties gedaan met betrekking tot vervoerssystemen die gebruik maken van nieuwe technologieën.

Vermindering van de noodzaak tot verplaatsen

Het aanleggen en uitgroeien van voorsteden schiep een behoefte aan meer vervoer. Het is een feit dat een verhoging van de huizendichtheid van 15 tot 30 woningen per hectare de vraag naar plaatselijk vervoer met 25% zou doen afnemen zonder dat het ongemak toeneemt. Maar de groei van voorsteden hoort nu eenmaal in onze samenleving thuis. Wonen, werken, winkelen en recreatie zullen in de afzienbare toekomst niet weer te zamen gebracht kunnen worden. En hetzelfde geldt voor onderling verbonden industriële activiteiten, zoals de invoer van grondstoffen, de productie van halffabrikaten, de fabricage van eindproducten en de aan deze activiteiten verbonden dienstverleningen. Twee derde van alle vervoer is verbonden met de productie en distributie van goederen en diensten en slechts een derde dient voor particulier of openbaar vervoer. Derhalve bieden pogingen om de behoefte aan vervoer ruimtelijk te verschuiven slechts beperkte mogelijkheden, althans op korte termijn. Maar voor gecontroleerde experimenten bestaat nog wel wat ruimte.

Spreiding van het vervoer in de tijd (bijv. door verschuiving van werktijden) schijnt evenwel beter uitvoerbaar. Dit waarborgt een beter gebruik van het bestaande wegennet en van de capaciteit van het openbaar vervoer. Maar de energiebesparingen zijn beperkt. Verliezen door opstoppingen tijdens spitsuren worden verminderd, maar er zou een stijging van het energieverbruik in kantoren (voor verwarming en verlichting) kunnen optreden. Het zou ook de mogelijkheden voor auto-pools kunnen verkleinen. Derhalve moeten we eenvoudigweg het feit aanvaarden dat het zich verplaatsen zal toenemen (meer personen, een voortgaande penetratie van de auto). Nieuwe middelen van telecommunicatie (zoals de conferentie via televisie) zijn weliswaar op zichzelf veelbelovend, maar zij zullen weinig invloed hebben op de fundamentele situatie en zouden zelfs een stimulans kunnen zijn voor meer vervoer.

Verschuiving naar meer rendabele wijzen van vervoer

Verschuiving naar wijzen van vervoer die zijn gericht op energiebesparing dienen te zijn gebaseerd op het specifieke gebruik van energie van het voertuig per eenheid prestatie. Dit betekent dat een vergelijking dient te worden gemaakt tussen verschillende voertuigen wat betreft de energie die gebruikt wordt voor het vervoer van één reiziger over één kilometer of van één ton vracht over één kilometer. Hierbij moet met

twee factoren rekening worden gehouden. In de eerste plaats brengt het doen voortbewegen van een voertuig niet alleen een rechtstreeks gebruik van energie (brandstof) met zich, maar ook een indirect gebruik: voor de fabricage en de verkoop van auto's, voor de bouw van wegen en voor service, onderhoud en reparatie. Dit hoofdstuk houdt zich enkel bezig met het directe energiegebruik, uitgedrukt in termen van primaire energie.

In de tweede plaats dient rekening te worden gehouden met de bezettingsgraad. Voor personenauto's is de gemiddelde bezettingsgraad 40%, voor het openbaar vervoer 20%, met uitzondering van de trein (38%). De gemiddelde beladingsgraad voor vrachtovervoer wordt op rond 60% geschat. Afhankelijk van de omstandigheden dienen vergelijkingen te worden gebaseerd hetzij op de volledige, hetzij op de feitelijke bezetting.

Het specifieke rechtstreekse gebruik van energie van verscheidene voertuigen bij volledige bezetting ligt binnen de volgende grenzen (uitgedrukt in 10^6 J per reizigers-km of per ton-km):

personenauto	0,7 – 1,2
openbaar vervoer	0,1 – 0,3
vrachtovervoer, grote vrachtauto's	0,8
vrachtovervoer, bestelauto's	5
vrachtovervoer per trein (lange afstand)	0,2
vrachtovervoer per trein (korte afstand)	0,6
binnenvaart; pijpleiding	0,2

Met andere woorden, verschuivingen van particulier naar openbaar vervoer en van vervoer per vrachtauto naar vervoer per schip of trein zouden energie besparen (bij volledige benutting van het systeem). Maar in de periode 1955-1970 wijzigde de verhouding tussen particulier en openbaar vervoer zich van 50:50 naar 83:17. De verhoudingen tussen vrachtauto, trein en schip voor vrachtovervoer in de periode 1960-1970 wijzigden zich van 40:25:35 naar 54:7:39. Tabel 12 geeft zes voorbeelden van de wijze waarop besparingen kunnen worden bereikt door verschuiving naar meer rendabele wijzen van vervoer. Uit deze tabel blijkt dat beperkingen van het gebruik van de personenauto binnen het stedelijk gebied en de bevordering van een meer rationeel personen- en vrachtovervoer binnen een systeem op groter schaal, een aanmerkelijke bijdrage zou kunnen leveren aan een besparingsprogramma. De tabel laat ook zien dat een verhoging van de huidige bezettingsgraad van personenauto's en het invoeren van snelheidsbeperkingen aanzienlijk besparend werken.

Het is moeilijk aanbevelingen te doen voor de best passende middelen ter bereiking van deze doelen. Elke denkbare maatregel zal neveneffecten vertonen, waarvan enkele positief (bijv. veiligheid) en andere negatief (extra tijdverlies). De meest uitvoerbaar lijkende maatregelen moeten worden getoetst op hun rendement in experimenten op grote schaal (zoals die welke thans worden uitgevoerd met snelheidsbeperkingen). Kortom, de benadering moet er eerder een zijn van onophoudelijk preken tot de onbekeerden, dan het opleggen van dwang.

In de studie wordt een aantal uitvoerbare maatregelen nogal gedetailleerd besproken.

Voor plaatselijk verkeer. Een plan voor afzonderlijke

en beschermde rijwielpaden. De fiets heeft dezelfde voordelen als de auto wat betreft de beschikbaarheid dag en nacht aan de voordeur.

Tabel 12. Illustratie van mogelijke besparingen op vervoersenergie door verschuivingen naar beter renderende wijzen van vervoer, verhoogde bezettingsgraad of de invoering van lagere maximumsnelheden (in % van het nationale energieverbruik in 1972)

<i>Verschuiving naar meer rendabele wijzen van vervoer</i>	
1. Verschuiving in de wijzen van plaatselijk passagiersvervoer: auto's -50%, brommers, fietsen en wandelen +40% en openbaar vervoer +10%	1,2
2. Verschuiving in de wijzen van interlokaal passagiersvervoer: auto's -25%, openbaar vervoer +17,5% en (brom)fietsen +7,5%	0,4
3. Verschuiving in de wijzen van interlokaal vrachtovervoer (>100 km): vrachtwagens -50%, trein +25% en binnenvaart +25%	0,2
4. Verschuiving in de wijzen van interlokaal passagiersvervoer: luchtvervoer (<600 km) -100% en snelle treinen +100%	0,1
5. Verschuiving van grote naar middelgrote en kleine auto's (100%)	0,1
6. Verschuiving van bestelwagens (-50%) naar vrachtauto's (+50%)	1,0
<i>Verhoogde bezettings- of beladingsgraad</i>	
7. Verdubbeling van de huidige bezettingsgraad van personenauto's	0,5
8. Verhoging van de huidige beladingsgraad van vrachtauto's met 30%	0,1
<i>Beperking maximumsnelheid</i>	
9. Personenauto's: 120/100 km, vrachtwagen 80/60 km (interlokaal)	0,5
Totaal (in % van nationaal energieverbruik 1972)	4,1

Bovendien kunnen de meeste plaatselijke ritten die nu per auto worden afgelegd, binnen een half uur met de fiets worden overbrugd.

Er wordt ook aandacht geschonken aan een plan voor afzonderlijke rijstroken voor openbaar vervoer, taxi's, huurauto's, enz.

Voor interlokaal verkeer. Betere overstapvoorzieningen tussen verschillende wijzen van vervoer (bijv. trein plus parkeerkaartjes of een parkeren/rijden-dienst; voor de rail: goederenvervoer per laadkist en een net van distributiecentra aan de periferie van de bebouwde kom). Bovendien zou het afzien van passagiersvluchten over kortere afstand (<600 km) de behoefte aan verhoogde luchthavencapaciteit doen afnemen.

Autopools en liftsystemen worden besproken vanuit het standpunt van verbeterde bezettingsgraad van personenauto's. Liftsystemen bieden waarschijnlijk geen wezenlijke voordelen. Autopools zouden een zekere hulp kunnen bieden, ook door vermindering van de noodzaak van een tweede auto. Maar ze zouden niet wel passen in het kader van maatregelen ter spreiding van de werktijden.

Als een algemene maatregel wordt in de studie een toekomstige belasting op het motorvermogen voorgesteld. Ook zou kunnen worden overwogen de variabele kosten per personenauto-kilometer te verhogen door in deze kosten het merendeel van de vaste kosten (auto- en wegenbelasting, verzekering, enz.) op te nemen. Er worden geen werkelijke besparingen verwacht van maatregelen gericht op het afvlakken van verkeersstromen, zoals groene golven, wegkruisingen op verschillend niveau, verbreding van smalle weggedeelten en een

scheiding tussen de verschillende typen particuliere auto's.

Bouw en ontwerp van voertuigen

Gezien ons huidige verkeerssysteem kunnen in het algemeen geen aanmerkelijke besparingen worden verwacht van een verdere technische verfijning in bouw en ontwerp van voertuigen. Het specifieke energiegebruik van auto's en vrachtauto's wordt deels beheerst door de volgende weerstanden:

- rolweerstand;
- luchtweerstand;
- versnellingsweerstand;
- hellingweerstand;
- zwaartekrachtweerstand (zweefsystemen).

De rolweerstand is grotendeels afhankelijk van de spanning en de staat van de banden. Beter onderhoud en goede controle zouden hier enige verbetering kunnen brengen. Versnellingsweerstand is een belangrijke factor in het stadsverkeer. Een vermindering van het auto-gewicht (indien verenigbaar met veiligheid) zou in overweging moeten worden genomen met het oog op een verlaging van deze weerstand, te zamen met een vermindering van het geïnstalleerde vermogen (naar een veilige minimumgrens).

Het gebruik van een automatisch stop-start-systeem voor motoren (zoals dat in Japan wordt ontwikkeld) zou een onderdeel van een besparingsprogramma kunnen uitmaken.

Bij het railvervoer verminderen de uit het strikte rij-tijdschema voortvloeiende beperkende omstandigheden de mogelijke optimalisering van het specifieke energiegebruik. Pogingen ter verbetering van de dienstverlening in het railverkeer zullen uiteindelijk leiden tot een overschakeling van rolsystemen naar zweefsystemen (>350 km per uur).

Er zijn een aantal nieuwe systemen besproken, voornamelijk ten dienste van passagiersvervoer op korte en middellange afstand: de oproep- of telefoon-bus, de witkar, verscheidene railsystemen voor afzonderlijke taxi's (waaronder een 'individueel snelvervoer'-systeem) en tweevormige systemen (een combinatie van vrij en geleid verkeer voor zeer korte dan wel middellange of lange trajecten). Bijna al deze denkbeelden zijn inderdaad niet meer dan denkbeelden, hoewel met enkele al op kleine schaal wordt geëxperimenteerd. Maar het valt nog altijd te bezien of deze systemen rendabeler blijken te zijn qua energiegebruik. De conclusie luidt dat werkelijke energiebesparingen niet kunnen worden verkregen door verbetering van bouw en ontwerp van de door ons gebruikte voertuigen en dat nieuwe systemen niet alleen zeer veel tijd vergen om tot volle wasdom te komen, maar dat ze bovendien hun doeltreffendheid nog moeten bewijzen. De voornaamste aanbevelingen zijn heel eenvoudig: beter onderhoud en gelijkmatiger bediening.

Bouw en ontwerp van de motor

Laten we nu eens kijken naar de bouw en het ontwerp van de motoren der voertuigen. Een viertakt-motor zou voor de brommer meer economisch zijn dan de

huidige tweetakt. Als de werking van de huidige carburateurs zou kunnen worden verbeterd, dan zou dat een besparing van 40% op het specifieke energiegebruik opleveren, hetgeen overeenkomt met 0,1% van het nationale energiegebruik in 1972. Een dergelijke brommer zou ook kunnen voldoen aan nieuwe voorschriften voor de vermindering van lawaai en luchtvervuiling. Deze overwegingen houden in dat de technische normen voor brommers die op de markt worden toegelaten, dienen te worden herzien. Ook dienen de mogelijkheden van de elektrische brommer te worden nagegaan.

Conventionele inwendige verbrandingsmotoren in personenauto's hebben een laag rendement (25%). Een aantal technische verbeteringen, met inbegrip van een betere werking van de carburateur, zou dit rendement enigszins kunnen verhogen, maar stringenter milieubescherpende maatregelen zouden deze verhoging weer teniet doen. De op LPG of op aardgas lopende inwendige verbrandingsmotor is wel schoner dan die met het conventionele proces, maar het rendement is even laag. Een mogelijke verbetering van deze motoren is de toepassing van een gelaagde vulling, die dicht bij het ontstekingspunt in een rijker mengsel voorziet. Dit zou het rendement kunnen opvoeren tot 30%. Een volledige overschakeling van de benzinemotor naar deze motor met een gelaagde vulling zou een besparing met zich brengen van ongeveer 1% van het nationale energiegebruik.

De dieselmotor die voornamelijk wordt gebruikt voor bussen en vrachtauto's (met inbegrip van lichte bestelauto's) heeft een betrekkelijk hoog rendement (35-38%) dat naar verwachting wordt slechts weinig zal dalen (naar 33-35%) als gevolg van stringenter normen voor uitlaatgassen. Een volledige overschakeling van de benzinemotor naar de dieselmotor zou (in 1972) hebben geresulteerd in een nationale besparing van ongeveer 2%. De studie beveelt derhalve aan te werken aan de ontwikkeling van lichtere dieselmotoren, die goedkoper zijn en minder lawaai maken. Men is van mening dat een redelijk en economisch nieuw evenwicht kan worden bereikt als de olieraffinaderijen deze omschakeling in hun produktenpakket moeten volgen. Van de overblijvende mogelijkheden worden de vooruitzichten voor de Wankelmotor en de stoommachine tamelijk beperkt geacht (laag rendement en technische nadelen); de Stirlingmotor, die enkele goede eigenschappen heeft (rendement van niet minder dan 35%, laag niveau van geluidshinder en luchtvervuiling, en een vermogen op verschillende brandstoffen te rijden) wordt niet geacht voor 1985 op aanmerkelijke schaal te worden ingevoerd wegens moeilijkheden met de brandstofdosering.

Kleine gasturbines (theoretisch rendement 35%) zullen maar een kleine kans hebben als motoren van de toekomst, omdat ze dat rendement alleen maar kunnen bereiken bij constante hoge snelheden, en omdat ze moeilijk te fabriceren zijn.

Hoewel de elektrisch aangedreven auto uit andere overwegingen wordt ontwikkeld (schoon, geen lawaai) is ze ook niet ongewenst uit een oogpunt van energiegebruik. Hybride auto's (een kleine conventionele motor aangevuld met een kleine elektrische motor op batterijen) zullen waarschijnlijk te veel ontwikkeling vereisen om spoedig aan bod te komen.

Voor railvervoer zijn de begrenzingen van het conven-

tionele twee-railsysteem (volledige elektrificatie of diesel-elektrisch) nog niet bereikt. Snelheden tot 300 km per uur lijken met deze systemen mogelijk zonder een aanmerkelijke daling van het rendement (thans over het geheel genomen 27%). Voor snelheden van 350 km/uur en hoger dienen we eerst nog meer te weten over luchtweerstand en aerodynamische stabiliteit.

Het gebruik van gasturbines voor railvervoer met hun voordelen van gering gewicht en klein volume, zal slechts in geringe mate aan bod komen, aangezien hun rendement niet hoger is dan 20%.

De invoering van de lineaire inductiemotor, die zeer hoge snelheden mogelijk zou maken, hangt in hoge mate af van het succes van verdere ontwikkelingen. Op het ogenblik is het totale gemiddelde rendement laag (40-60%) vergeleken met dat van de conventionele elektrische motor en vóór 1985 worden geen sensationele ontwikkelingen verwacht.

Concluderende: de voor passagiersvoertuigen (en brommers) voorgestelde maatregelen — in de eerste plaats de invoering van het 'gelaagde vulling-systeem' en/of een overschakeling op dieselmotoren — zouden het nationale energieverbruik — volgens de cijfers voor 1972 — verminderen met 2%. Deze hoge potentiële besparing is vooral toe te schrijven aan de betrekkelijk eenvoudige mogelijkheid van een volledige overschakeling op auto's met dieselmotoren, een maatregel die minder sociale en economische problemen met zich brengt dan welke andere maatregel met goede besparingsmogelijkheden in de vervoerssector ook.

7. Energie voor het milieu

Dit hoofdstuk houdt zich bezig met de maatregelen die genomen moeten worden ter handhaving van de kwaliteit van het milieu op een redelijk niveau.

Het fundamentele probleem is dat nog niet is vastgesteld waaraan de kwaliteit van het milieu zal moeten voldoen. Het huidige kwaliteitsniveau wordt onaanvaardbaar geacht en daarom werden de volgende normen ad hoc geformuleerd:

- luchtverontreiniging: norm 10%
- waterverontreiniging: norm 10%
- warmteverontreiniging in oppervlaktewateren: temperatuurverhoging minder dan 1°C.

Het streven naar de '10% norm' betekent een vervuilingniveau van 10% van het niveau dat in 1985

zou zijn bereikt als er geen milieubescherpende maatregelen zouden zijn genomen. Indien naar een '1% norm' zou zijn gestreefd, dan zouden de daartoe benodigde maatregelen tweemaal zoveel energie hebben gekost en tienmaal zo duur zijn geweest. De reeds genomen milieubescherpende maatregelen maken enkele procenten van het huidige nationale energieverbruik uit.

Het hoofdstuk is als volgt opgesteld. Er werden ruwe schattingen gemaakt van hetgeen industrie, openbare elektriciteitsbedrijven, woningen en andere gebouwen, landbouw (met inbegrip van kassen en veehouderijen) en vervoer bijdragen aan de verontreiniging van lucht, water en bodem en aan warmteverontreiniging en geluidshinder. Deze schattingen, benevens de aanvaarde normen, stellen ons in staat een indicatieve raming te maken van de daarmee gemoeid zijnde 'schoonmaak'-operatie en de daaraan verbonden kosten. De hoeveelheid voor de vermindering van de bodemverontreiniging, de geluidshinder en de waterverontreiniging benodigde energie blijkt zeer gering te zijn. Warmteverontreiniging van de atmosfeer kan slechts worden verminderd door minder energie te gebruiken. De vermindering van de bodemverontreiniging vereist niet meer dan de bijkomende afvoer en verwerking (storten, composteren en verbranden). Geluidshinder in industrie, huishoudens (met inbegrip van radio en televisie) en vervoer kan worden verminderd door het wijzigen van ontwerpen, het invoeren van geluidsisolatie en afscherming, groene zones en snelheidsbeperkingen. De enige maatregelen tegen geluidshinder die energie kosten, zijn die voor het verminderen van het vliegtuiglawaai. De vermindering van de waterverontreiniging kost ook slechts weinig energie, voornamelijk voor het inbrengen van lucht in huishoudelijk en industrieel afvalwater, met inbegrip van hetgeen afkomstig is van industrieën in de voormalige veenkolonieën (aardappelmeel- en kartonfabrieken).

De voornaamste energieverbruikende onderdelen van de anti-vervuilingsmaatregelen zijn de vermindering van luchtvervuiling en warmteverontreiniging. In Tabel 13 wordt een samenvatting gegeven van de bevindingen in Hoofdstuk 7.

De hoeveelheden energie die nodig zijn voor vermindering van de luchtverontreiniging zijn gegeven in de vorm van een lage en een hoge raming. Dit is toe te schrijven aan de verschillende processen die daarbij gebruikt zouden kunnen worden en die elk voor zich hun bepaalde voordelen hebben. Dit geldt in het bijzonder voor de vermindering van zwavelemissies uit openbare elektrici-

Tabel 13. Extra energiebehoefte voor milieubescherpende maatregelen (in % van het nationaal energieverbruik in 1985)

	Lucht		Water	Geluid	Bodem	Thermisch	
	laag	hoog				laag	hoog
Opwekking van elektriciteit en warmte (elektrische centrales en industrie ¹)	0,2	2,4	0,1	<<0,1	—	0,3	3,3
Proces-emissie (industrie ¹)	1,1	1,1	0,1	<<0,1	<0,1	—	—
Vervoer ²)	0,5	1,2	—	<<0,1	—	—	—
Alle andere sectoren	0,1	0,1	0,2	<<0,1	<0,1	—	—
Totaal (2,7—8,5%)	1,9	4,8	0,4	<0,1	0,1	0,3	3,3

¹) Ook in overweging genomen in Hoofdstuk 3 (zie Tabel 9, waar de raming voor de industrie alléén 3,8-0,6 = 3,2% bleek te zijn).

²) Ook in overweging genomen in Hoofdstuk 6, maar daar gelijk genomen aan de mogelijke energiebesparingen door verbetering van de conventionele verbrandingsmotor.

teitsbedrijven en uit industriële warmte-opwekking. Er kan een keuze worden gemaakt tussen rechtstreekse verwijdering van de zwavel uit de brandstof, hetgeen enkele malen zoveel energie kost als de afscheiding van zwaveldioxyde uit het rookgas volgens het natte proces (het droge proces is uit een oogpunt van energie-verbruik nog gunstiger, zie ook Hoofdstuk 3). Wat betreft de door het vervoer veroorzaakte luchtvervuiling is gebleken dat het verminderen van de emissies van koolmonoxyde en koolwaterstoffen niet noodzakelijkerwijs moet worden geboet met een verhoogd energieverbruik, hoewel dat wel het geval is bij de vermindering van stikstofoxydenemissie. Deze beide voornaamste bronnen van energieverbruik voor de bestrijding van de luchtvervuiling die wordt veroorzaakt door elektriciteits- en warmte-opwekking en vervoer, zijn ook behandeld in de Hoofdstukken 3 en 6. De werkgroep die Hoofdstuk 3 heeft samengesteld, kwam tot een eindcijfer dat nogal afweek van het in dit hoofdstuk gegeven cijfer. In feite komt men in dit hoofdstuk en Hoofdstuk 3 langs verschillende wegen tot de genoemde cijfers. Niettegenstaande het feit dat in beide gevallen de orden van grootte goed met elkaar overeenstemmen, zijn beide resultaten vermeld ten einde een denkbeeld te geven van de mate van onzekerheid die bij dit soort studies een rol speelt. De werkgroep die Hoofdstuk 6 samenstelde, gaf een extra energieverbruik aan voor het terugdringen van vervuiling, dat in de orde van grootte lag als in dit hoofdstuk is gegeven, maar zij woog deze extra's af tegen mogelijke rendementsverbeteringen in conventionele motoren. Het cijfer van de ter bestrijding van door de industrie veroorzaakte vervuiling en stank benodigde energie werd verkregen door de toepassing van vuistregels, aangezien het grote aantal en de ingewikkeldheid van de problemen een volledige analyse uitsluiten (zo vereist bijvoorbeeld de terugwinning van oplosmiddelen in de verfindustrie een grote hoeveelheid energie; een

verschuiving naar in water oplosbare verf zou een antwoord op het probleem zijn).

Het laatste belangrijke onderdeel dat in dit hoofdstuk is behandeld, is de hoeveelheid energie die nodig is voor het verminderen van de thermische vervuiling van oppervlaktewateren. De lage en hoge ramingen van het energieverbruik zijn ook hier toe te schrijven aan het feit dat er twee processen mogelijk zijn. Het gebruik van zeewater als koelwater in elektriciteitscentrales brengt het gebruik met zich van lange leidingen voor de transmissie van elektriciteit en dit geeft aanleiding tot extra energieverliezen. Droge of natte koeltorens daarentegen verbruiken zelfs nog meer energie. De voorkeur gaat uit naar de natte koeltoren, niettegenstaande de daaraan verbonden vervuiling (of hinder door mistvorming). Het hierin opgenomen cijfer voor de industrie (0,2-0,3%) is wederom het resultaat van het toepassen van een vuistregel.

Wanneer men Tabel 13 beziet, blijkt duidelijk dat de voor milieubeschermende maatregelen benodigde hoeveelheid extra energie zo gering is, dat dit in de meeste gevallen niet kan worden gebruikt als argument om niet onmiddellijk tot de uitvoering van dergelijke maatregelen over te gaan. Maar op de volgende gebieden is een nadere studie noodzakelijk:

- de vermindering van de luchtvervuiling door elektriciteitscentrales; aanbevolen wordt dat dit geschiedt door het verwijderen van de zwaveldioxyde uit de rookgassen door middel van het natte proces;
- de vermindering van de luchtvervuiling door het verkeer; katalytische naverbranding en loodarme benzine moeten niet al te gemakkelijk worden aanvaard;
- de vermindering van de thermische vervuiling door elektriciteitscentrales (een kostbare zaak), waarbij het een kwestie is van het toewijzen van prioriteiten.

Tabel 14. Het totaal generaal van alle procentuele wijzigingen in het energieverbruik in alle sectoren, resulterende uit besparingsmaatregelen; een samenvatting van de Hoofdstukken 3 - 7 (in % van het nationaal energieverbruik in 1985)

	Korte termijn (tot 1985)	Middellange termijn (1985-2000)	Lange termijn (2000) inclusief niet- conventionele methoden ¹⁾	Hoofdstuk	Tabel
a) Industrie	- 2,1	- 3,8	- 4,3	3	9
b) Elektriciteitsopwekking	- 1,0 ²⁾	- 2,0 ²⁾	- 3,5 ²⁾	4	-
c) Woningen	- 9,0	- 12,8	- 13,8 ³⁾	5	11
d) Andere gebouwen	- 1,0	- 2,2	- 2,7 ³⁾	5	11
e) Vervoer					
- overschakeling naar meer renderende wijzen	- 0,7 ⁴⁾	- 3,0 ⁴⁾	- 3,0	6	12
- verhoogde bezettings- en beladingsgraad	- 0,2	- 0,6	- 0,6		
- snelheidsbeperkingen	- 0,4	- 0,5	- 0,5		
- technische verbeteringen ⁵⁾	- 0,6	- 2,0	- 2,0		
f) Milieubeschermende maatregelen ⁶⁾	+ 1,0	+ 2,7/+ 8,5	+ 2,7/+ 8,5	3; 7	9; 13
Totaal	-14,0	-24,2/-18,4	-27,7/-21,9		

¹⁾ Met inbegrip van geïntegreerde energiesystemen en gebruik van zonne-energie.

²⁾ Tot 1985 enkele extra rendementsverbeteringen (en een beperkte overschakeling op andere brandstoffen dan olie en gas). Op de middellange termijn een wat meer geprononceerde verbetering in algemeen rendement, plus, op lange termijn, het gebruik van geïntegreerde energieconcepten.

³⁾ Exclusief besparingen uit 'total energy' (reeds begrepen in a) en b)); rechtstreekse extrapolatie van gegevens uit Hoofdstuk 5.

⁴⁾ Normatieve, te bereiken streefcijfers, gebaseerd op de analyse in Hoofdstuk 6.

⁵⁾ Voornamelijk de overschakeling op dieselmotoren voor auto's.

⁶⁾ Minima en maxima zijn gebaseerd op twee verschillende benaderingen. Op korte termijn wordt begonnen met minder energie-intensieve maatregelen.

Alvorens over te gaan tot een samenvatting van het slothoofdstuk, waarin de sociaal-economische aspecten van energiebesparing aan een beschouwing worden onderworpen, vatten we de bevindingen samen van de vijf hoofdstukken van deze studie, die een meer technisch karakter dragen.

Tabel 14 geeft een opsomming van de procentuele veranderingen in het energieverbruik in 1985 (raming van Hoofdstuk 2) die zouden resulteren uit de tenuitvoerlegging van de maatregelen die tot dusverre voor alle sectoren zijn besproken.

Te zamen genomen zouden deze maatregelen besparingen opleveren van ongeveer 15% (korte termijn) en 25% (lange termijn) gemeten naar het energieverbruik in 1985. Indien er slechts ondergeschikte milieubeschermdende maatregelen ten uitvoer zouden worden gelegd, zou de besparing op lange termijn oplopen tot 30%. Indien in 1985 de besparing van 15% werkelijk wordt verwezenlijkt, zal het energieverbruik teruggebracht zijn van 182% (zie Hoofdstuk 2) tot 155% van het niveau van 1972. De voornaamste bijdragen aan een besparingsprogramma zullen moeten komen van de sector woningen en andere gebouwen (10-15%). De industrie (2-4%), de elektriciteitsopwekking (1-3%) en het vervoer (1-5%) zouden ruw genomen elk een gelijke, zij het bescheidener, bijdrage kunnen leveren. De gedragingen van een groot aantal enkelingen zijn betrokken bij de sectoren woningen, andere gebouwen en vervoer. Hoewel de technische middelen tot onze beschikking staan, zal de aanpassing van de produkten in een vrije markt slechts langzaam voortgang hebben. Het zal niet voldoende blijken te zijn te vertrouwen op de wijsheid en het begrip van het publiek. Er zullen wettelijke voorschriften, verbonden met een educatieve propagandacampagne nodig zijn. Economische en financiële programma's zouden evenwel enige uitwerking hebben en hetzelfde geldt voor sociale maatregelen. Deze vormen het onderwerp van het laatste hoofdstuk van deze studie.

8. Economische en sociale facetten van energiebesparing

Economisch

De groei verloopt niet langer in een versneld tempo. We krijgen te maken met begrenzingen aan de voorziening van bepaalde grondstoffen, beschikbaar kapitaal, vrije ruimte en de druk waaraan het milieu kan worden onderworpen. Er bestaat een overschot aan hooggeschoolde arbeidskrachten in sommige sectoren en een tekort in andere. Het aanbod van ongeschoolde arbeidskrachten houdt niet over. Sterk stijgende produktiekosten scheppen kasgeldproblemen en beïnvloeden de investeringen. Vrije goederen, zoals schone lucht en schoon water, worden schaars. Onder deze omstandigheden is het stellen van prioriteiten geboden. De noodzaak van een planning op

middellange en lange termijn in kringen van overheid en industrie is dringender geworden dan ooit tevoren. De opdracht luidt: een goed evenwicht te vinden tussen denken op lange termijn en de democratische wijze van werken die vaak door denken op korte termijn wordt gekenmerkt.

Indien het schaarser worden van energiedragers en grondstoffen geleidelijk plaatsvindt, zullen we voldoende tijd hebben om onze produktie- en onze consumptiestructuur aan te passen. Maar de monopoliepositie van enkele landen ten aanzien van verscheidene grondstoffen en de grote mate waarin vele geïndustrialiseerde landen afhankelijk zijn van de invoer van deze grondstoffen, zouden een aanwijzing kunnen zijn dat deze ontwikkeling allesbehalve glad en geleidelijk zal verlopen (zoals we reeds zagen in december 1973 met de verstoringen in produktie en distributie). Aan de andere kant is het evenwicht tussen de wederzijdse belangen zodanig, dat soortgelijke schokken in de toekomst waarschijnlijk tot een minimum beperkt kunnen blijven.

Als er tijd voor is, zullen de volgende processen zich gaan afspelen. Een toenemende vraag naar grondstoffen zal hun prijs doen stijgen. Dit zal niet alleen resulteren in bezuinigingen en vervangingen, maar ook in een hogere produktie van grondstoffen uit voorkomens die voordien als marginaal werden beschouwd. Dit zal hun toevoer doen toenemen en er zal een nieuw evenwicht worden bereikt.

Ruwe olie bijvoorbeeld wordt gebruikt als brandstof en als basisgrondstof voor de petrochemische industrie. Als brandstof kan zij worden vervangen door een aantal andere primaire energiedragers (steenkool, kernenergie of zonne-energie), die concurrerend worden bij een prijs voor ruwe olie van twee- à driemaal het peil van midden 1972.

Steenkool wordt ook een mogelijk vervangingsmiddel voor de petrochemische grondstof als de olieprijs stijgt met een factor 3 boven dat peil. Dit zal invloed hebben op de handelsbalans van de geïndustrialiseerde landen: de nationale besparingen en de ruimte voor investeringen zullen verminderen. Nieuwe valutastromen zullen andere valuta's onstabiel maken en er zal een tendens optreden naar autarkie. Aan de andere kant zal de internationale samenwerking worden gestimuleerd en de vorm aannemen van gezamenlijke ontwikkelingsprogramma's (waarbij mogelijk West-Duitsland en Nederland betrokken zullen raken bij een project voor het maken van vloeibare brandstof uit steenkool en de EEG en de Verenigde Staten bij een programma inzake het gebruik van zonne-energie).

Maar in een wereld met een onderontwikkeld internationaal politiek systeem zullen de landen zich in eerste instantie concentreren op nationale doelen. We moeten daarom een antwoord geven op de volgende vragen.

Hoe zullen de ontwikkelingen van de energieprijzen de prijs beïnvloeden van de verschillende grondstoffen, halfabrikaten en eindprodukten, van vervoer, distributie en dienstverlening in onze samenleving?

Wat zal het daaruit voortvloeiende gevolg zijn voor vraag en aanbod en diens gevolg voor de industriële structuur van Nederland? Welke zullen de energiebesparende gedragingen van consumenten en producenten zijn?

In het bijzonder zou men kunnen vragen:
 Zullen er geografische verschuivingen optreden van enkele industriële sectoren, in en buiten de EEG?
 Zullen terugwinning en het opnieuw gebruiken van afval nieuwe mogelijkheden openen?
 Zou een overheidsprijsbeleid voor primaire energie de gewenste herverdeling van (de groei van) ons nationaal inkomen tot stand kunnen brengen?

In deze studie wordt een eerste poging gedaan tot het vinden van antwoorden op deze vragen. De analyse, die macro-economisch van aard is, bevat de volgende elementen:

- 1) Een berekening van het rechtstreeks gebruik van energie per industriële sector.
- 2) Een raming van het indirecte gebruik per sector, rekening houdend met de energie-inhoud van bijproducten en in deze sector gebruikte diensten, met het vervoer, de distributie en andere door de sector geboden diensten, maar geen rekening houdend met de energie die is geïnvesteerd in de import van grondstoffen en in kapitaalgoederen en infrastructuur (fabrieken, wegen, gebouwen, enz.).
- 3) De som van het directe en indirecte gebruik (welke beide aanmerkelijk kunnen verschillen in hun relatieve bijdrage per sector) geven ons een maatstaf voor het meten van het geaccumuleerde energiegebruik per sector en de verhoudingen tussen de sectoren ten aanzien van ingebrachte en geproduceerde energie.
- 4) De analyse van de verhouding inbreng-productie wordt vervolgens gebruikt voor de berekening van het relatieve effect van een wijziging van de prijs van primaire energie op de consumentenpreizen van goederen en diensten.

De gebreken van een dergelijke analyse (nog afgezien van de moeilijkheid van het verzamelen van de desbetreffende gegevens) zijn, dat een beeld wordt gegeven van de situatie op één enkel moment in de tijd (en daarom zouden deze studies tot het takenpakket moeten behoren van bijv. het Centraal Bureau voor de Statistiek), dat hierdoor het totale energieverbruik van een sector wordt gespreid over een grote reeks produkten, waarvan de energie-inhoud aanzienlijk kan variëren (hoewel thans een verdere uitsplitsing praktisch onmogelijk zou zijn) en dat het vermogen de ene energiedrager te vervangen door een andere van sector tot sector varieert.

Nog een complicatie vormt het feit dat gebruik is gemaakt van verschillende prijzen voor primaire energie, afhankelijk van het type en de schaal waarop ze wordt geproduceerd en van het type en de bijzondere toepassing van verschillende brandstoffen. Niettemin is het mogelijk gebleken (met gebruikmaking van gegevens over 1972) een eerste benaderende raming te maken van het kostenaandeel van geaccumuleerde (directe + indirecte) energie in de produktiekostprijzen in de volgende sectoren:

energiebedrijven (elektriciteit, steenkool)	22-33% ¹⁾
metaalindustrie en chemische industrie	12-17%
vervoer, communicatie	8-11%
landbouw, mesterijen, papierfabrikage, handel	4%

¹⁾ Olieraffinage 5%, gasproductie < 1%.

alle andere productie, goederen en diensten 2-3%

Dit toont aan dat, indien er een stijging van 100% van de prijs van geïmporteerde primaire energiedragers in 1972 zou zijn opgetreden, de kostprijs van de op deze import gebaseerde produkten, voor zover zij bijvoorbeeld zouden zijn gefabriceerd door de metaalindustrie en de chemische industrie, zou zijn gestegen met 12-17%. De volledige analyse laat tevens de afzonderlijke bijdrage aan deze cijfers zien van de prijs van steenkool, olie en aardgas. Hieruit komt naar voren dat de produktiekosten in de primaire metaalindustrie en de chemische industrie zeer gevoelig zijn voor energiepreizen, maar in het eerste geval is die gevoeligheid voor de prijs van steenkool en elektriciteit, en in het tweede geval voor de prijs van olie en gas. De gehele vervoersector (scheepvaart, vrachtvervoer, auto's, luchtvaart) is uiterst gevoelig voor veranderingen in de prijs van stook- en dieselolie, benzine en straalmotorbrandstof. De energieprijzen heeft slechts een matige invloed op alle andere sectoren die zich bezighouden met productie, goederen of diensten.

De volgende cijfers laten zien hoe deze veranderingen in de produktiekostprijs de consumentenpreizen beïnvloeden van de goederen of de verleende diensten (met inbegrip van het energieverbruik als zodanig).

export van goederen, consumptie van de openbare sector	12-14%
export van diensten, consumptie van gezinnen	6-8%
alle investeringen en voorraden	2-3%
gewogen gemiddelde	9%

Met andere woorden, een verdubbeling van de prijs van primaire energie in 1972 zou een verhoging van 9% van de kosten van levensonderhoud ten gevolge hebben gehad. Het relatief hoge cijfer voor de export van goederen vloeit voort uit de rol van Nederland als doorvoerland van primaire energiedragers (olie en aardgas). Het relatief hoge cijfer voor de export van diensten is toe te schrijven aan het aandeel van het land in lucht- en zeevervoer.

De huidige stand van de industriële ontwikkeling in Nederland is zodanig dat de invloed van de steenkoolprijs te verwaarlozen is (behalve in de primaire metaalindustrieën); de gasprijs heeft een bescheiden invloed (prijsbeleid voor grote verbruikers) en de olieprijs heeft een beslissende invloed (ondanks het feit dat de meeste sectoren van de industrie meer gas dan olie verbruiken). De conclusie luidt dat de kosten van primaire energie voor de productie van en de voorziening in goederen en diensten slechts een geringe tot matige invloed heeft in vrijwel alle sectoren. De voornaamste uitzonderingen zijn vervoer, primaire metaalindustrie en de chemische industrie, de elektriciteitsopwekking, overheidsconsumptie en export van goederen (in het bijzonder olie en gas). Dit betekent dat de industriële structuur van Nederland, die juist op deze activiteiten is gebaseerd, bijzonder gevoelig is voor veranderingen in de prijs van primaire energie. Hieruit kan de conclusie worden getrokken dat de Nederlandse regering haar energiebeleid nog veel meer kan gebruiken om onze maatschappij in een bepaalde gekozen richting te sturen (en zulks te meer omdat zij nog altijd het aan-

deel bezit in de Nederlandse aardgasreserves, waarop geen contractuele verplichtingen rusten). In beginsel heeft de regering heel wat instrumenten tot haar beschikking: heffingen (invoerrechten, BTW), directe en indirecte belastingen, toezicht op het netto-loon (met of zonder maatregelen tot inkomensnivellering) en op prijzen en subsidies (bijv. primaire energie). Het enige wat zij niet in de hand heeft, is de prijs van de geïmporteerde energie. Hoe deze instrumenten het beste kunnen worden gehanteerd is nog steeds een open vraag. Er is meer research nodig ten einde analyses zoals in dit hoofdstuk worden gegeven, te brengen op een niveau waar ze kunnen dienen als basis voor het nemen van beslissingen. Er dient een nieuw industrialisatieplan te worden opgesteld, waarin de in de komende twintig jaar na te streven doelen worden vastgesteld.

In het algemeen hebben heffingen het grootste effect als de energie-inhoud van het desbetreffende produkt, de elasticiteit van de vraag en de absolute energieprijzen allemaal hoog zijn.

Subsidies zouden in overweging moeten worden genomen voor primaire goederen of diensten met een geringe vraag-elasticiteit en voor industriële activiteiten van vitaal belang voor de nationale economie (bijv. exporten). Er zal geen natuurlijke evolutie optreden, waarbij processen met een lage behoefte aan energie de energie-intensieve processen vervangen. Het is duidelijk dat de industrie in de allereerste plaats zal streven naar een verhoogd investeringsrendement en naar voordelen op het gebied van onderhoud en kwaliteit en pas daarna naar energiebesparingen (zie ook Hoofdstuk 3). Indien een verhoogd investeringsrendement uitblijft, zou de industrie zich kunnen wenden tot vervangende produkten met betere winstmarges of zich gaan vestigen in goedkopere landen.

Zij zal nimmer trachten de produktie te handhaven door het zoeken naar processen die energie-economisch zijn. Dientengevolge zijn de kernvraagstukken voor onze nieuwe industrialisatiestrategie zowel de prijsverhouding voor primaire energiedragers tussen Nederland en andere landen, als de nieuwe vervoersprijzen voor het bedienen van de markt in de grote stadsregio's.

Sociaal

De kleinere crises van het recente verleden (midden vijftiger, midden zestiger en begin zeventiger jaren) hebben ons een belangrijke les geleerd. De mensen zijn in staat vrijwillig hun gedrag aan te passen, indien zij voor gevaren of schaarste komen te staan. Maar als de crisis eenmaal voorbij is, dan steken de oude gewoonten — van overheid, burgers, producenten en consumenten — weer de kop op.

In elk geval is echter het bewijs geleverd dat in situaties waarbij gemeenschappelijke belangen een rol spelen (gemeenschappelijke angsten of idealen), de samenleving flexibel genoeg is om nieuwe richtingen te kiezen.

De nieuwe gemeenschappelijke belangen zijn eerst onlangs ontdekt en het proces is nog steeds in beweging. Ons gehele culturele erfdeel heeft in het teken gestaan van groei, ontginning van de aarde en expansie — van de mens als maker. Dit is de heirbaan geweest van de geschiedenis van het Westen. Bewegingen tot behoud

en beter beheer, zoals die zich in de Verenigde Staten hebben afgespeeld (1930; bescherming van het land na de stuifzandrampen) zijn tot nu toe altijd minderheidsbewegingen geweest.

Zelfs gedurende de grote crises van de wereldoorlogen en de crisis van de jaren dertig was de overheersende gedachte nooit die van onherroepelijke terugkeer tot een armoediger verleden. Dergelijke crises werden beschouwd als betreurenswaardige maar uiteindelijk te corrigeren inzinkingen op een weg die steeds hoger voerde. Wij leefden in dat geloof en feitelijk doen we dat nog altijd. De huidige verschijnselen behoren echter wellicht tot een crisis van de 'laatste fase'; de groei kan niet eeuwig duren en samenlevingen zoeken naar nieuwe gedragspatronen die tot een nieuw evenwicht zullen leiden.

Dit zoeken gaat vergezeld van een wantrouwen in de zegeningen van de technologie, die ons heeft gebracht tot het punt van verzadiging van wat in stoffelijk opzicht noodzakelijk is. Voorbij dit punt biedt zij slechts een steeds verminderende maatschappelijke winst. Maar degenen die zo voelen en denken, laten ook zien dat zij ons erfdeel als iets vanzelfsprekends aanvaarden: de zon moet ons maar van energie voorzien, terwijl voedsel en drinkwater ons worden geleverd via 'een gat in de muur', praktisch voor niets. Indien men deze zienswijze blijft aanhangen, dan zal er in onze wereld heel wat te bekritisieren vallen — en vele sociologen bevinden zich reeds in de voorste linie van de critici. Deze kritische houding is nuttig, want er behoort heel wat meer tot een cultuur dan alleen de produktie van essentiële goederen en diensten. Maar wat voor zin heeft het wanneer verschillende takken van wetenschap er zo zeer uiteenlopende maatschappelijke zienswijzen op na houden? Treden we een tijdperk binnen waarin niet alleen het medium, maar ook de academische opleiding de boodschap is? Zou dat niet het einde betekenen van de wetenschap als instrument voor het begrijpen van verschillende visies? En welke andere manier is er om een zekere overeenstemming inzake onze prioriteiten te bereiken? De sociologie moet op de een of andere wijze een bijdrage leveren aan de oplossing van de in deze studie geanalyseerde problemen. Indien de stand van de wetenschap zodanig is, dat de sociologie deze taak niet kan vervullen, dan zullen we bereid moeten zijn meer werk op dit terrein te verzetten. Het zou best kunnen zijn dat de nadruk in het wetenschappelijk onderzoek teveel is afgegleden naar de natuurwetenschappen. Wat zijn ten slotte de werkelijke problemen? Misschien niet zozeer de technische en economische aspecten die in deze studie zijn behandeld, maar veeleer factoren als de opvattingen en gedragspatronen van verschillende groepen, sociale normen en waarden (ook zoals zij van toepassing zijn in relatie tot technologie en economie) voorlichting, onderwijs en het gebruik van de vrijheid.

In de studie wordt voorgesteld een groot aantal maatregelen te nemen die elk op beperkte wijze bijdragen tot besparing van energie in talrijke sub-sectoren. In vele gevallen zullen deze maatregelen alleen maar binnen redelijke tijd resultaten opleveren als enkelingen en groepen hun gedragingen wijzigen. Het syndroom van 'niet ik, maar hij' dat betrekking heeft op verschillen in welstand en status, zal een wezenlijk struikelblok blijken te zijn op de weg naar vooruitgang

in de gewenste richting. Wij zullen de volgende vraag moeten stellen en haar beantwoorden: 'Waar liggen de grenzen van onze vrijheid tot produceren en consumeren?' Rantsoeneren, produktie per toewijzing en investeringscontrole door regeringen zijn maatregelen die we mogelijk in de naaste toekomst in overweging zullen moeten nemen. De termijnen waarbinnen de voorgestelde maatregelen moeten worden genomen, lopen niet alleen onderling uiteen, maar ook wat hun aanvaarding door het publiek betreft. Verschillende groepen houden er verschillende zienswijzen op na (zoals in het geval van de 'generatiekloof') en hun aanvaarding of afkeuring van de ideeën, die door de technocraat (binnen de overheid of elders) worden uitgedacht en die hij tracht op te leggen, is van het allergrootste belang voor de samenhang van een democratische samenleving. Het bij de burger en de consument groeiende gevoel dat hij steeds minder invloed kan uitoefenen op de gebeurtenissen zou ons ongerust moeten maken. Wat gebeurt er als we zeggen dat hij moet kiezen voor een goed geïsoleerd huis en er is voor hem geen zodanige keuzemogelijkheid op de vrije markt? Wat gebeurt er als we het huren van duurzame goederen aanbevelen in plaats van ze te kopen en hij krijgt niet de voorlichting of heeft niet het

vertrouwen om dit te doen? Afzettechnieken zouden een dergelijke omschakeling mogelijk kunnen maken, maar niet als de consument het gevoel heeft dat zij tot dusverre alleen maar zijn gebruikt om hem te verblinden met de wezenlijke of imaginaire voordelen. Is het bijvoorbeeld niet waar, dat de door de openbare energiebedrijven (elektriciteit en gas) verstrekte voorlichting weinig meer is geweest dan propaganda voor een verhoogd verbruik (hoewel dit onder de omstandigheden volkomen begrijpelijk is)? Wat behoeft nog meer te worden gezegd om duidelijk te maken dat een technische en economische benadering van ons probleem slechts een deel van het verhaal is? Gedragsonderzoek en begeleiding, zo goed als inzicht in de werkelijke motieven voor de dagelijkse handelingen van enkelingen en groepen zijn even belangrijk. Uiteindelijk is het het grote publiek dat de procedures van de besluitvorming en de werkelijke gevolgen van voorschriften bepaalt. Als deze voorschriften zijn gebaseerd op grondwaarden met betrekking tot veiligheid, gezondheid, vrijheid en billijkheid, die niet worden gedeeld door grote groepen mensen, dan kunnen ze beter ongeschreven blijven. Dit zijn de taken waarvoor de socioloog zich thans gesteld ziet.

Eenheden en omzettingsfactoren

1. SI-eenheden

In deze hele studie is gebruik gemaakt van de eenheden van het Internationale Eenheidsstelsel (SI). SI-eenheden zijn verdeeld in drie categorieën:

- grondeenheden;
- afgeleide eenheden;
- aanvullende eenheden.

Grondeenheden

De grondeenheden worden algemeen beschouwd als dimensionaal onafhankelijk. Zij worden opgesomd in Tabel 1.

Tabel 1. SI-grondeenheden

Grootheid	Naam	Symbool
lengte	meter	m
massa	kilogram	kg
tijd	seconde	s
elektrische stroomsterkte	ampère	A
thermodynamische temperatuur ¹⁾	kelvin	K
hoeveelheid substantie	mol ²⁾	mol
lichtsterkte	candela	cd

¹⁾ De Celsius-temperatuur wordt uitgedrukt in graden Celsius (symbool °C).

²⁾ Een mol is de hoeveelheid substantie van een stelsel, die evenveel elementaire eenheden bevat als er atomen zijn in 0,012 kilogram koolstof 12. Er zij op gewezen dat massa en hoeveelheid substantie geheel verschillende grootheden zijn.

Afgeleide eenheden

Afgeleide eenheden worden uitgedrukt in grondeenheden. Verscheidene afgeleide eenheden hebben een speciale naam en symbool gekregen, die zelf weer kan worden

gebruikt om andere afgeleide eenheden eenvoudiger uit te drukken dan in grondeenheden.

Afgeleide eenheden kunnen daarom onder drie hoofden worden gerangschikt:

- afgeleide eenheden uitgedrukt in grondeenheden;
- afgeleide eenheden met een speciale naam;
- afgeleide eenheden uitgedrukt met behulp van speciale namen.

Voorbeelden van elke categorie worden gegeven in de Tabellen 2, 3 en 4.

Tabel 2. Voorbeelden van van het SI afgeleide eenheden, uitgedrukt in grondeenheden

Grootheid	Naam	SI-eenheid	Symbool
oppervlakte	vierkante meter		m ²
volume	kubieke meter		m ³
snellheid	meter per seconde		m/s
versnelling	meter/seconde in het kwadraat		m/s ²
dichtheid, massadichtheid	kilogram per kubieke meter		kg/m ³
stroomdichtheid	ampère per vierkante meter		A/m ²
magnetische veldsterkte	ampère per meter		A/m
soortelijk volume	kubieke meter per kilogram		m ³ /kg

Aanvullende eenheden

Als aanvullende SI-eenheden komen er tot nu toe slechts twee, zuiver meetkundige, eenheden voor, de eenheden van een vlakke hoek (radiaal), en van een ruimtehoek (steradiaal).

Tabel 3. Voorbeelden van afgeleide SI-eenheden met een speciale naam

Grootheid	SI-eenheid			
	Naam	Symbool	Weergave in andere eenheden	Weergave in grondeenheden
frequentie	hertz	Hz	—	s ⁻¹
kracht	newton	N	—	m.kg.s ⁻²
druk, spanning	pascal	Pa	N/m ²	m ⁻¹ .kg.s ⁻²
energie, arbeid, hoeveelheid warmte	joule	J	N.m	m ² .kg.s ⁻²
vermogen, stralingsvermogen	watt	W	J/s	m ² .kg.s ⁻³
elektrisch potentiaalverschil, elektromotorische kracht	volt	V	W/A	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻¹
elektrische weerstand	ohm	Ω	V/A	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻²
magnetische flux	weber	Wb	V.s	m ² .kg.s ⁻² .A ⁻¹
magnetische inductie	tesla	T	Wb/m ²	kg.s ⁻² .A ⁻¹
hoeveelheid elektriciteit, elektrische lading	coulomb	C	—	s.A

Tabel 4. Voorbeelden van afgeleide SI-eenheden, weergegeven met behulp van speciale namen

Grootheid	Naam	SI-eenheid	Symbool	Weergave in basiseenheden
oppervlaktetenspanning	newton per meter		N/m	kg.s ⁻²
dichtheid van de warmte-overdracht, stralingsdichtheid	watt per vierkante meter		W/m ²	kg.s ⁻³
entropie, warmtecapaciteit	joule per kelvin		J/K	m ² .kg.s ⁻² .K ⁻¹
soortelijke energie	joule per kilogram		J/kg	m ² .s ⁻²
warmtegeleiding	watt per meter kelvin		W/(m.K)	m.kg.s ⁻³ .K ⁻¹
energiedichtheid	joule per kubieke meter		J/m ³	m ⁻¹ .kg.s ⁻²
elektrische veldsterkte	volt per meter		V/m	m.kg.s ⁻³ .A ⁻¹
molaire energie	joule per mol		J/mol	m ² .kg.s ⁻² .mol ⁻¹

2. Voorvoegsels bij het SI

In Tabel 5 worden de namen en symbolen opgesomd van voorvoegsels waarmee decimale veelvoud en factoren van SI-eenheden kunnen worden gevormd, zoals aangenomen door de Algemene Conferentie inzake Maten en Gewichten (CGPM).

Tabel 5. SI-voorvoegsels

Factor	Voorvoegsel	Symbool	Factor	Voorvoegsel	Symbool
10^{12}	tera	T	10^{-1}	deci	d
10^9	giga	G	10^{-2}	centi	c
10^6	mega	M	10^{-3}	milli	m
10^3	kilo	k	10^{-6}	micro	μ
10^2	hecto	h	10^{-9}	nano	n
10^1	deca	da	10^{-12}	pico	p
			10^{-15}	femto	f
			10^{-18}	atto	a

3. Eenheden die worden gebruikt met het Internationale Stelsel

Eenheden die niet tot het Internationale Stelsel behoren, maar die toch belangrijk zijn en algemeen worden gebruikt, worden gegeven in Tabel 6. De combinatie van deze eenheden met SI-eenheden dient echter slechts te worden toegestaan in een beperkt aantal gevallen; met name de aanduiding kilowattuur (kWh) (thans slechts in gebruik als eenheid van elektrische energie) dient uiteindelijk te worden afgeschaft.

Tabel 6. Eenheden die worden gebruikt met het Internationale Stelsel

Naam	Symbool	Waarde in SI-eenheden
minuut	min	1 min = 60 s
uur	h	1 h = 60 min = 3.600 s
dag	d	1 d = 24 h = 86.400 s
liter	l	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
ton	t	1 t = 10 ³ kg
graad	°	1° = ($\pi/180$) rad
minuut	'	1' = (1/60)° = ($\pi/10.800$) rad
seconde	"	1" = (1/60)' = ($\pi/648.000$) rad

Er bestaan enkele andere eenheden, buiten het SI, die op gespecialiseerde gebieden hun nut hebben, maar waarvan de in SI-eenheden uitgedrukte waarden door proeven moeten worden verkregen en derhalve niet exact bekend zijn (Tabel 7).

Tabel 7. Eenheden die worden gebruikt met het Internationale Stelsel en waarvan de waarden in SI-eenheden door proeven zijn verkregen

Naam	Symbool	Benaderde waarde in SI-eenheden
electronvolt	eV	1 eV = 1,60219 x 10 ⁻¹⁹ J
geünificeerde atomaire massa-eenheid	u	1 u = 1,66053 x 10 ⁻²⁷ kg
astronomische eenheid	AU	1 AU = 149.600 x 10 ⁶ m
parsec	pc	1 pc = 206.265 AU = 30.857 x 10 ¹³ m

Gezien de bestaande praktijk, worden de in Tabel 8 opgesomde eenheden tijdelijk aanvaard voor gebruik bij de eenheden van het Internationale Stelsel.

Tabel 8. Eenheden die nog beperkte tijd mogen worden gebruikt naast het Internationale Stelsel

Naam	Symbool	Waarde in SI-eenheden
zeemijl	—	1 zeemijl = 1.852 m
knoop	—	1 knoop per uur = (1.852/3.600) m/s
ångström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
are	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
hectare	ha	1 ha = 0,01 km ² = 10 ⁴ m ²
barn	b	1 b = 100 fm ² = 10 ⁻²⁸ m ²
bar	bar	1 bar = 0,1 MPa = 10 ⁵ Pa
standaardatmosfeer	atm	1 atm = 101.325 Pa
gal	Gal	1 Gal = 1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²
curie	Ci	1 Ci = 3,7 x 10 ¹⁰ s ⁻¹
röntgen	R	1 R = 2,58 x 10 ⁻⁴ C/kg
rad	rad	1 rad = 10 ⁻² J/kg

Alle andere eenheden buiten het Internationale Stelsel dienen te worden vermeden en in plaats daarvan moeten de passende SI-eenheden worden gebruikt. Ten behoeve van de lezer geeft Tabel 9 een aantal van dergelijke eenheden met de corresponderende waarden in SI-eenheden en omgekeerd.

4. Energie-inhoud van brandstoffen

Bij besprekingen over brandstoffen worden vaak eenheden gebruikt die — in beperkte mate — nuttig kunnen zijn voor onderlinge vergelijking; daarbij wordt dan een hoeveelheid ruwe olie uitgedrukt in tonnen steenkoolequivalent of een hoeveelheid aardgas in vaten ruwe olie. Maar helaas wordt het vergelijken en verwijzen vaak bemoeilijkt door het feit dat door verschillende bronnen en schrijvers soms uiteenlopende waarden voor de energie-inhoud van een brandstof zijn aangenomen.

In deze publikatie zijn twee stel waarden gebruikt, onderscheidenlijk voor internationale en nationale doeleinden, opdat gemakkelijk kan worden verwezen naar de oorspronkelijke literatuur en andere bronnen. Een stel waarden (Tabel 10), dat wordt gebruikt door M. King Hubbert, verwijst uitsluitend naar mondiale hulpbronnen en het wereldenergieverbruik, terwijl het andere het stelsel is dat wordt gebruikt door het Nederlandse Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) en dat geldt voor de situatie in Nederland (Tabel 11).

Tabel 10. Energiegehalte van brandstoffen volgens M. King Hubbert (uitsluitend toegepast in Hoofdstuk 1)

1 ton steenkool	≈	7.350 kWh = 26,5 x 10 ⁹ J
1 vat ruwe olie	~	1.625 kWh = 5,85 x 10 ⁹ J
1 ton ruwe olie	~	11.860 kWh = 42,7 x 10 ⁹ J
1 m ³ aardgas	≈	10,4 kWh = 37,5 x 10 ⁶ J

Tabel 11. Energiegehalte van brandstoffen volgens het Nederlandse CBS (toegepast voor Nederlandse gegevens)

1 kg steenkool	≈	7.000 kcal = 8,14 kWh = 29,3 x 10 ⁶ J
1 kg ruwe olie	~	10.000 kcal = 11,63 kWh = 41,9 x 10 ⁶ J
1 m ³ aardgas	≈	8.400 kcal = 9,77 kWh = 35,2 x 10 ⁶ J

Uit ruwe olie worden verscheidene brandstoffen voor speciale doeleinden vervaardigd, waarvan de calorische waarde wordt vermeld in Tabel 12. Deze tabel is speciaal van toepassing op de situatie in Nederland.

Tabel 9. Een aantal eenheden dat niet meer dient te worden gebruikt en hun waarde, uitgedrukt in SI-eenheden en omgekeerd

SI-eenheid A	Naam van eenheid B	1A = ↓ .B	1B = ↓ .A
<i>Lengte</i>			
meter m	ångström (Å)	10^{10}	10^{-10}
	micron (μ)	10^6	10^{-6}
	míl	$39,37 \times 10^3$	$2,54 \times 10^{-5}$
	inch	39,37	$2,54 \times 10^{-2}$
	voet	3,28	0,3048
	yard	1,094	0,9144
	zeemijl (zee, luchtstroming)	$0,5396 \times 10^{-3}$	1,853
	Engelse mijl (land)	$0,6215 \times 10^{-3}$	1,609
<i>Oppervlakte</i>			
vierkante meter m ²	vierkante inch	$1,55 \times 10^3$	$6,452 \times 10^{-4}$
	vierkante voet	10,764	0,0929
	vierkante yard	1,196	0,8361
	acre	$0,2471 \times 10^{-3}$	$4,05 \times 10^3$
	hectare	10^{-4}	10^4
	vierkante mijl (land)	$0,3861 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^6$
<i>Inhoud</i>			
kubieke meter m ³	kubieke inch	$61,02 \times 10^3$	$16,39 \times 10^{-6}$
	liter	10^3	10^{-3}
	Am. gallon	264,2	$3,785 \times 10^{-3}$
	imperial gallon	220	$4,546 \times 10^{-3}$
	kubieke voet	35	$28,32 \times 10^{-3}$
	barrel	6,289	0,159
	kubieke yard	1,308	0,7646
	<i>Massa</i>		
kilogram kg	ounce	35,27	$28,35 \times 10^{-3}$
	pound	2,21	$453,59 \times 10^{-3}$
	Amerikaanse (short) ton	$1,102 \times 10^{-3}$	$0,9072 \times 10^3$
	metrieke ton	10^{-3}	10^3
	Engelse (long) ton	$0,984 \times 10^{-3}$	$1,016 \times 10^3$
<i>Kracht</i>			
newton N (m.kg.s ⁻²)	dyne	10^5	10^{-5}
	poundal	7,232	0,1383
	poundweight (lb)	0,2248	4,4483
	kilogramkracht (kgf)	0,102	9,8067
<i>Druk, spanning</i>			
pascal Pa (N/m ²) (m.kg.s ⁻²)	mm H ₂ O	0,102	9,8067
	pond per vierkante voet	0,0209	47,88
	torr	$7,5 \times 10^{-3}$	133,3224
	pond per vierkante inch	$0,145 \times 10^{-3}$	$6,8941 \times 10^3$
	standaardatmosfeer	$0,9869 \times 10^{-5}$	$1,01325 \times 10^5$
<i>Energie, arbeid, hoeveelheid warmte</i>			
joule J (N.m) (m ² .kg.s ⁻²)	erg	10^7	10^{-7}
	voetpond	739	$13,54 \times 10^{-4}$
	calorie	0,2388	4,1868
	kilogram (kracht)meter (mkgf)	0,102	9,8067
	BTU	$0,9478 \times 10^{-3}$	$1,055 \times 10^3$
	kilowattuur	$0,278 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^6$
<i>Vermogen, stralingsvermogen</i>			
watt W (J/s) (m ² .kg.s ⁻³)	erg per seconde	10^7	10^{-7}
	calorie per seconde	0,2388	4,1868
	paardekracht (pk,cv,PS)	$1,36 \times 10^{-3}$	736
	Engelse paardekracht	$1,34 \times 10^{-3}$	746
	BTU per seconde	$0,9478 \times 10^{-3}$	1,055
<i>Temperatuur</i>			
Naast de thermodynamische temperatuur (symbool T), die wordt uitgedrukt in graden kelvin, wordt tevens gebruik gemaakt van de temperatuur in graden Celsius (symbool t), omschreven door de vergelijking $t = T - T_0$, waarin T_0 wordt gedefinieerd als 273,15 K. De Celsius-temperatuur wordt uitgedrukt in graden Celsius (symbool °C). De eenheid 'graad Celsius' is gelijk aan de eenheid 'kelvin'.			
Temperatuur in graden Celsius °C	} $T^{\circ}\text{C} = 5/9 (t^{\circ}\text{F} - 32)$ en $t^{\circ}\text{F} = 1,8t^{\circ}\text{C} + 32$		
Temperatuur in graden Fahrenheit °F			

De rechterkolom toont de in de Hoofdstukken 2 (sectie III.4.4), 6 en 7 (sectie II.1) en in enkele andere gevallen gebruikte waarden.

Tabel 12. Calorische waarden van vloeibare brandstoffen

Brandstof	10 ⁶ J per kilo hoog (bruto)	10 ⁶ J per kilo laag ¹) (netto)	10 ⁶ J per kilo zoals gebruikt in deze studie
LPG	48,7 - 49,7	45,5 - 46,4	45,9
benzine	47,1 - 49,2	44,0 - 46,0	48,0
kerosine (vliegtuig-brandstof)	46,0 - 46,7	43,0 - 43,7	45,9
gasolie (licht)	45,5 - 46,6	42,5 - 43,5	44,5
gasolie (zwaar)	44,9 - 45,8	42,0 - 42,8	44,5
stookolie	43,3 - 44,6	40,5 - 41,7	44,4

¹) Exclusief de verdampingswarmte van het water dat tijdens de verbranding vrijkomt.

Op sommige punten in deze publikatie kan het nuttig zijn de massa-dichtheid van vloeibare en gasvormige koolwaterstof-brandstoffen te kennen. Deze staan vermeld in Tabel 13.

Tabel 13. Massadichtheid (kg/m³) van bepaalde vloeibare en gasvormige brandstoffen

ruwe olie	850 - 950
benzine	730 - 760
kerosine (vliegtuigbrandstof)	790 - 830
gasolie (licht)	810 - 850
gasolie (zwaar)	840 - 870
stookolie	900 - 1.000
aardgas (veld in Groningen)	0,79

5. Omzetting van brandstoffen in elektriciteit

Waar geen melding wordt gemaakt van een bijzonder omzettingsrendement, wordt stilzwijgend aangenomen dat de waarde hiervan 1/3 bedraagt. Dit verhoudingsgetal is gekozen ten einde de berekeningen te vereenvoudigen, aangezien het een goede benadering is van het huidige gemiddelde omzettingsrendement¹) in Nederland, waar vrijwel alle elektriciteit wordt opgewekt op basis van fossiele brandstoffen en waar geen waterkrachtstations en getijdecentrales zijn.

¹) In 1972 bedroeg dit rendement 33,7% (CBS).

Overzicht van reeds verschenen Stichtingspublicaties

- | | | | |
|---|-------------|--|------|
| 1. Toekomstbeeld der Techniek,
ir. J. Smit, 1968 | uitverkocht | 15. Technologisch verkennen: methoden en
mogelijkheden,
ir. A. van der Lee, drs. Th.M.A. Bemelmans
en dr. ir. W.J. Beek, 1973 | 24,— |
| 2. Techniek en Toekomstbeeld,
Telecommunicatie in telescopisch beeld,
prof. dr. ir. R.M.M. Oberman, 1968 | uitverkocht | 16. Mens en milieu: beheerste groei,
diverse auteurs, 1973 | 20,— |
| 3. Verkeersmiddelen,
prof. ir. J.L.A. Cuperus en anderen,
1968 | f 10,— | 17. Mens en milieu: zorg voor zuivere lucht,
diverse auteurs, 1973 | 20,— |
| 4. Hoe komt een beleidsvisie tot stand?
ir. P.H. Bosboom, 1969 | 4,— | 18. Mens en milieu: kringloop van materie,
diverse auteurs, 1973 | 20,— |
| 5. De overgangprocedure in het verkeer,
diverse auteurs, 1969 | 12,— | 19. Energy Conservation: Ways and Means,
edited by J.A. Over and A.C. Sjoerdsma,
1974 | 34,— |
| 6. De invloed van goedkope elektrische
energie op de technische ontwikkeling in
Nederland,
dr. P.J. van Duin, 1971 | 5,— | | |
| 7. Electrical energy needs and environmental
problems, now and in the future,
diverse auteurs, 1971 | 12,— | | |
| 8. Mens en milieu: prioriteiten en keuze,
diverse auteurs, 1971 | 17,— | | |
| 9. Het voeden van Nederland,
diverse auteurs, 1971 | 12,— | | |
| 10. Barge Carriers: some technical, economic
and legal aspects,
drs. W. Cordia, mr. G.J.W. de Vries en
ir. N. Wijnołst, 1972 | 20,— | | |
| 11. Transmissiesystemen voor elektrische
energie in Nederland,
prof. dr. J.J. Went, ir. A. Govers,
drs. M.C. Lelie en prof. ir. H. Wiggerts,
1972 | 12,— | | |
| 12. Elektriciteit in onze toekomstige energie-
voorziening: mogelijkheden en
consequenties,
dr. ir. H. Hoog, ir. P.J. Wemelsfelder,
prof. ir. D.G.H. Latzko, dr. D.J. Kroon
en prof. ir. J.J. Broeze, 1972 | 15,— | | |
| 13. Communicatiestad 1985: elektronische
communicatie met huis en bedrijf,
prof. dr. ir. J.L. Bordewijk e.a.,
ir. D. van den Berg, dr. W. Horn, 1973 | 16,— | | |
| 14. Techniek en preventief gezondheids-
onderzoek,
dr. M.J. Hartgerink, dr. H.H.W. Hogerzeil,
prof. dr. ir. P. Eykhoff, prof. dr. J.C.M. Hattinga
Verschure, prof. dr. H.J.J. Leenen,
dr. P. Gootjes, prof. dr. A.H. Wiebenga,
ir. D.H. Bekkering, 1973 | 18,— | | |

De publicaties kunnen worden besteld door overmaking van het aangegeven bedrag op postgironummer 1609900 van de Stichting te 's-Gravenhage, onder vermelding van het nummer van de gewenste publicatie.

Deze vertaling is verzorgd door:
Afd. Vertalingen, Bureau Nederlands van het Ministerie van Buitenlandse Zaken

Deze uitgave is gedrukt door:
Staatsdrukkerij, 's-Gravenhage

