

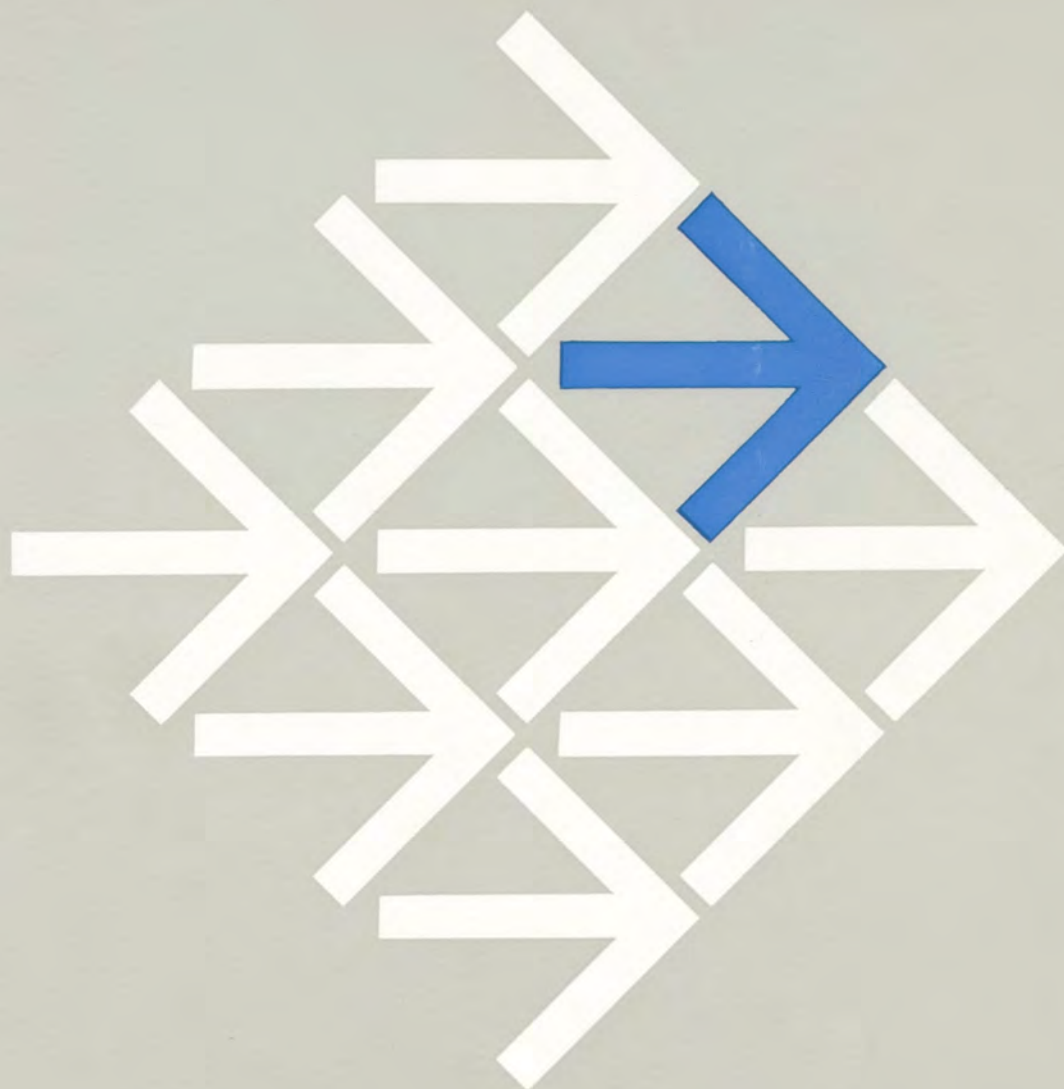
TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

publicaties t.b.v. de toekomststudies

De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland

door

DR. P. J. VAN DUIN



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 ontwikkelingen 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.

De serie publikaties zal niet alleen individuele bijdragen en resultaten van studiegroepen omvatten, maar ook elders reeds verschenen informatie — al dan niet in de vorm van samenvatting of overzicht — voor zover deze informatie van belang geacht wordt voor het op gang brengen van studies binnen of buiten het kader van de Stichting, dan wel voor het verbreden of verdiepen van zodanige studies.

Een overzicht van reeds verschenen en van binnenkort uit te geven publikaties is gegeven aan de binnenzijde van het achterblad. De publikaties kunnen rechtstreeks bij de Stichting worden besteld.

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

TOEKOMSTBEELD DER TECHNIEK

De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland

door dr. P. J. van Duin



Voorwoord

De aarde ontvangt een hoeveelheid energie van de zon die overeenkomt met $1,5 \times 10^{17}$ kcal per uur.

Rekening houdend met weerkaatsing en uitstraling, blijft daar voldoende van over om de energiebehoeften te dekken van een biljoen mensen, d.i. 300 maal de totale huidige wereldbevolking, op het niveau van de gemiddelde Amerikaan.

Het rechtstreeks gebruik maken van de zonnewarmte en van de door zonnewarmte veroorzaakte atmosferische krachten speelt in de praktijk van onze geïndustrialiseerde samenleving echter nauwelijks een rol.

Het is immers veel doelmatiger gebruik te maken van de sinds vele miljoenen jaren in de aarde verzamelde, geconcentreerde zonne-energie in de vorm van kolen, olie en gas.

Toch is de energievoorziening geen probleemloos terrein.

Integendeel. De globale verdeling en geologische, technische, maatschappelijke, economische en politieke factoren spelen een belangrijke rol bij de toekomstige ontwikkelingen in de wereld-energievoorziening.

Het ligt op de weg van de Stichting Toekomstbeeld der Techniek de mogelijke ontwikkelingen te bezien vanuit de wetenschappelijke techniek.

De nu vóór U liggende publikatie geeft het resultaat weer van een verkenning op het terrein van het elektriciteitsgebruik op grote schaal.

In het bijzonder wordt bezien wat de mogelijke technische ontwikkelingen in Nederland zouden kunnen zijn als de prijs van de elektriciteit beduidend lager lag dan momenteel het geval is.

Doelbewust heeft de Stichting daarbij vermeden adviezen of aanwijzingen te geven over de wijzen waarop deze lage prijs zou kunnen worden bereikt, aangezien de overwegingen die daarbij een rol spelen van zodanige aard zijn dat zij buiten de doelstellingen en het arbeidsterrein van de Stichting vallen.

Deze Stichtingspublikatie is de eerste van een drietal dit jaar uitkomende publikaties over onderwerpen uit het terrein van de toekomstige elektriciteitsvoorziening.

Ir. L. Schepers,
voorzitter.

Inhoudsopgave

Voorwoord	
door ir. L. Schepers	2
Inhoudsopgave	3
I. Inleiding	5
II. Bestek en uitgangspunten	5
III. Metallurgie	6
— ijzer- en staalbereiding	6
— bereiding overige metalen	8
IV. Elektrochemische en -thermische industrie	9
V. Geïntegreerd industrieel complex	9
VI. Elektromobiel	11
VII. Ruimteverwarming en -conditionering	13
VIII. Conclusies	13
IX. Literatuur	14

The impact of low-cost electrical energy on technological developments in the Netherlands

Summary:

It has been suggested elsewhere that the future introduction of nuclear power stations with large unit capacity (2,500–4,000 MW_e) might lead to low-cost production of electricity.

For the purpose of this study, it has been assumed that the price may fall to 0.3 ¢ per kWh at the output of the power station.

The Future Shape of Technology Foundation, The Hague, Netherlands, has studied the impact of this low price on technological developments in the Netherlands, and particularly on

- the metallurgical industry*
- the electrochemical and electrothermal industry*
- the introduction of integrated industrial nuclear complexes*
- the introduction of the electrical automobile*
- space heating and air conditioning.*

Only large effects have been considered, i.e. changes involving the electrical energy of a present day's generating unit of 400–600 MW_e.

In contrast to intuitive expectations expressed in literature, only a few industrial developments will possibly take place as a result of low-cost electrical energy. And even then, the switching over to electrical energy will only occur when supported by other factors, such as the availability and the world price of primary energy carriers and of other raw materials, and the growing concern for man's environment.

An in-depth study of the possibility and the desirability of industrial complexes is suggested.

The introduction of electrical automobiles for urban use may help in abating urban air pollution. More research and development on alternative automobile power sources is recommended.

In the petrochemical industry a change to large scale use of electrical energy can not be expected.

De invloed van goedkope elektrische energie op de technische ontwikkeling in Nederland

door dr. P. J. van Duin

I. Inleiding

In enkele, vooral uit de Verenigde Staten afkomstige, publikaties [1-6] is de verwachting uitgesproken dat de toekomstige invoering van nucleaire kweekreactoren met zeer grote eenheidsvermogens (2.500 à 4.000 MW_e) door de combinatie van zeer lage splijtstofkosten en sterke daling der specifieke bouwkosten zou kunnen leiden tot extreem lage opwekkingskosten voor elektriciteit.

Hieraan is de verwachting gekoppeld dat deze ontwikkeling zou kunnen leiden tot de vorming van complexen van energie-intensieve procesindustrieën, die rondom met dergelijke reactoren uitgeruste elektriciteitscentrales zijn gegroepeerd. Hierdoor zouden ook de transport- en distributiekosten minimaal worden.

Met name is hierbij gedacht aan de overschakeling op elektrische energie bij processen die thans nog gebruik maken van andere energiedragers.

Ook is het denkbaar dat bepaalde industrieën met produkten, waarvan de kostprijs voor een belangrijk percentage bestaat uit kosten voor elektrische energie, de neiging zullen hebben zich uit te breiden omdat goedkoper kan worden geproduceerd.

Ten slotte kan het voor nog niet bestaande industrieën aantrekkelijk zijn zich te vestigen in een gebied met lage elektriciteitsprijs.

Vestiging, c.q. uitbreiding, van grote industriële complexen heeft in velerlei opzicht een sterke invloed op de maatschappij.

Behalve op de **industriële** ontwikkeling is het ook denkbaar dat een zeer lage elektriciteitsprijs invloed heeft op ontwikkelingen van **algemene** maatschappelijke aard.

II. Bestek en uitgangspunten

Gezien haar doelstellingen, heeft de Stichting Toekomstbeeld der Techniek het initiatief geno-

men tot de vorming van een werkgroep ter bestudering van de mogelijke consequenties van extreem lage elektriciteitsprijzen.

Deze werkgroep was als volgt samengesteld:

Dr. G. J. van den Berg
Dr. P. J. van Duin
Ir. A. H. de Haas van Dorsser
Prof. ir. J. G. Hoogland
Drs. J. M. van Langen
Prof. ir. D. G. H. Latzko
Dr. ir. L. J. Revallier
Ir. A. C. Sjoerdsma
Dr. ir. J. W. M. Steeman

Deze werkgroep heeft zich niet beziggehouden met de technische, economische en politieke waarschijnlijkheid der in de eerder genoemde publikaties voorspelde elektriciteitsprijzen. In volgende studies van de Stichting Toekomstbeeld der Techniek zullen bijvoorbeeld ook factoren worden behandeld die kostprijsverhogend kunnen werken, zoals uitbreiding van het gebruik van ondergrondse kabels, meer investeringen voor milieuzorg, onorthodoxe plaatskeuze van centrales in verband met koelwatervoorziening.

Zij achtte het raadzaam in deze studie nog niet in te gaan op factoren die anders dan door lage prijs een stimulerende invloed kunnen uitoefenen op toeneming van of overschakeling op het gebruik van elektrische energie.

Een belangrijke factor in deze zin is milieuverontreiniging. Het is namelijk zeer wel denkbaar dat, zelfs al zou de elektriciteitsprijs op zichzelf niet voldoende zijn om over te gaan op (meer) elektriciteitsverbruik, de daarmee gepaard gaande vermindering van milieuverontreiniging wel eens hoger zou kunnen worden gewaardeerd dan tot nu toe.

Aan het onderwerp Elektriciteitsvoorziening en Milieuzorg heeft de Stichting een afzonderlijke publikatie gewijd.

De werkgroep zag het niet als haar taak zich normatief uit te spreken over de wenselijkheid

van bepaalde ontwikkelingen, maar heeft slechts als een eerste stap in de behandeling van het onderwerp de louter technisch-economische mogelijkheden willen beschouwen, ten einde daarmee te kunnen bijdragen aan het vormen van het energiebeleid van overheden en industrie.

Na een aantal discussies bleek het mogelijk om enige hoofdgroepen te noemen, waarvan à priori kon worden verwacht dat, naast andere factoren, een sterke verlaging der elektriciteitsprijs daarop een grote uitwerking zou hebben.

Deze hoofdgroepen, die in de volgende hoofdstukken zullen worden behandeld, zijn:

- Metallurgie;
- Elektrochemische en -thermische industrie;
- Geïntegreerd industrieel complex;
- Elektromobiel;
- Ruimteverwarming en -conditionering.

Als voorlopige richtwaarde is uitgegaan van een toekomstige elektriciteitsprijs van 1 cent per kWh aan de uitgang van de centrale; aan het proces wordt met een prijs van 1,75 cent gerekend.

Bij het selecteren der gegevens heeft de werkgroep zich beperkt tot grote effecten. Onder grote effecten wordt hier verstaan een verandering waarmee een elektrisch vermogen van een moderne elektriciteitsopwekkingseenheid (500—600 MW) [7] is gemoeid. Hieronder wordt begrepen de vestiging van een nieuwe industrie, uitbreiding van een bestaande industrie of overschakeling van een industrieel proces op een ander, intensief elektriciteitverbruikend, proces.

Voor deze overschakeling moet aan de volgende voorwaarden worden voldaan:

- a. de elektriciteitsprijs moet een groot deel der produktiekosten uitmaken;
- b. het verschil in overige kosten tussen het klassieke proces en het alternatieve proces moet niet te groot zijn op basis van de huidige energieprijzen;
- c. dit verschil mag echter groter zijn, indien er op langere termijn andere factoren werkzaam zijn die dit verschil zullen nivelleren. Hierbij kan worden gedacht aan structurele veranderingen op de energiemarkt of op de markt van andere bij het proces betrokken grondstoffen.

Bovendien kunnen overheidsmaatregelen van milieuhygiënische aard een bepaalde ontwikkeling mogelijk maken of versnellen. Als voorbeeld van dit laatste kan de schrootverwerking van automobielen dienen, die nog niet op grote schaal ter hand is genomen omdat dit economisch niet aantrekkelijk is. De in een later hoofdstuk te behandelen elektromobiel is eveneens een voorbeeld van een dergelijke ontwikkeling.

III. Metallurgie

Deze hoofdgroep is onderverdeeld in:

- ijzer- en staalbereiding;
- bereiding van overige metalen.

A. IJzer- en staalbereiding

1. Hoogovenproces en oxystaalproces

In Nederland werd in 1970 4 miljoen ton ruwijzer (ijzer met 4 % koolstof en 0,5 % silicium) met het hoogovenproces uit erts (ijzeroxyden met geringe percentages gesteenten) bereid.

De voordelen van het hoogovenproces boven andere processen van ijzerbereiding zijn:

- een goed thermisch rendement;
- de scheiding van ijzer en gesteenten;
- de verwijdering van zwavel.

Een nadeel van het hoogovenproces is, dat het als reductiemiddel en als brandstof voornamelijk cokes gebruikt. Er moet n.l. behalve met de **schommelingen** van de cokesprijs, in de toekomst ook met een **stijging** van de cokesprijs rekening worden gehouden, wegens de arbeidsintensieve bereiding.

Om uit ruwijzer staal (= ijzer met een zeer precieze specificatie aan bijmengselen als koolstof, mangaan, fosfor, zwavel en, soms, silicium, wolfraam, borium en niobium) te maken, moeten koolstof en silicium, en eventueel fosfor, worden geoxydeerd (de andere elementen worden toegevoegd). Dit gebeurt het meest doelmatig door verbranding met zuurstof in een oxystaalafabriek.

Door de stijging van de kosten van vaste brandstoffen enerzijds en de tendens tot verlaging, althans minder sterke stijging, van de aardgas-

Tabel 1. Energiekostenvergelijking conventioneel staalbedrijf versus directe reductie, bij een productie van 7,5 miljoen ton ruw staal per jaar.

prijsniveau:	3 ct/kWh	1,75 ct/kWh	1,75 ct/kWh
elektriciteit	f 4,50/Gcal	f 4,50/Gcal	f 4,50/Gcal
aardgas	f 100,—/ton	f 100,—/ton	f 150,—/ton
cokes			
hoogoven + oxystaalafabriek:			
elektriciteit	f 68 miljoen	f 40 miljoen	f 40 miljoen
gas	32	32	32
cokes	285	285	428
olie (f 45/t — 25 % = f 35/t)	16	16	16
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	401	373	516
af: gasopbrengst (f 4,50/Gcal)	58	58	58
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Totaal	f 343 miljoen	f 315 miljoen	f 458 miljoen
directe reductie + elektro-ovens:			
elektriciteit	165	96	96
gas	153	153	153
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Totaal	f 318 miljoen	f 249 miljoen	f 249 miljoen

olie- * - en elektriciteitsprijzen anderzijds, is het voortdurend noodzakelijk na te gaan of alternatieve wegen voor staalbereiding concurrerend worden.

Enige alternatieve methodes van staalbereiding zijn:

- Directe reductie van ijzererts
- Elektrolytische reductie van ijzererts

2. Staalbereiding door directe reductie van ijzererts

Een eerste alternatieve methode [8] — directe reductie of gasreductie genaamd — is die waarbij het erts in vaste vorm van zuurstof wordt ontdaan.

Deze reductie vindt plaats bij een temperatuur van ca. 800–900 °C door een gas, bestaande uit waterstof en koolmonoxyde, dat uit aardgas of olie wordt bereid. Het na deze reductie overblijvende zogenaamde sponsijzer bevat nog alle bijmengselen van het erts. Daardoor is dit proces slechts toepasbaar voor zeer rijke ertsen.

Om uit het sponsijzer staal te maken, moet het gesmolten en geraffineerd worden in een oven met reducerende atmosfeer: een eis waaraan alleen de elektro-oven voldoet [9-10].

Een vergelijking tussen de energiekosten van enerzijds de hoogoven gevolgd door de oxystaalafabriek en

anderzijds de directe reductie met gas of olie, gevolgd door een elektrostaaloven, is gemaakt op basis van de huidige energiekosten (elektriciteit à 3 cent per kWh en aardgas à f 4,50 per Gcal) en op basis van de mogelijk toekomstige prijs van 1,75 cent per kWh, levering proces. Zie tabel 1.

In verband met de tendens tot stijging van de cokesprijs is ook een berekening toegevoegd waarbij de cokesprijs op f 1,50 per ton is gesteld.

Het elektrische vermogen dat nodig is voor de conventionele methode, bedraagt ongeveer 280 MW. Voor de elektro-ovens van het andere proces is ongeveer 700 MW aan elektrisch vermogen nodig; dit betekent dat een grote eenheid (~ 400 MW) extra nodig is.

Men is geneigd uit de resultaten van tabel 1, de conclusie te trekken dat, bij een verlaging der elektriciteitsprijs, de directe reductie wel niet lang op zich zal laten wachten.

Maatgevend voor het al dan niet invoeren van een nieuw proces zijn echter de totale kosten, inclusief afschrijving en rente.

In het onderhavige geval zijn uitsluitend de energiekosten vergeleken en is bijvoorbeeld niet meegerekend de regelmatige vervanging van de elektroden voor de elektro-ovens. Bij een prijs van f 2,50 per kg elektrodekool en een slijtage van 6 kg elektrodekool per ton staal komt bij de totalen voor de directe reductie van tabel 1 nog f 113 mln. Dit maakt het duidelijk, dat de energievoordelen van het tweede proces wegvallen.

*) De meest recente ontwikkelingen op de oliemarkt zullen deze prijzen waarschijnlijk ongunstig beïnvloeden.

Uit tabel 1 blijkt ook duidelijk, dat een overschakeling in niet geringe mate zou worden beïnvloed door de onzekerheid omtrent de cokesprijs.

Het schijnt niet mogelijk te zijn cokes geheel te vervangen door petroleumcokes, hoewel in Japan reeds 6-10 % van deze stof aan cokes wordt toegevoegd. De maximale hoeveelheid petroleumcokes die zou kunnen worden geproduceerd uit aardolie, bedraagt ongeveer 20 %. Voor Nederland betekent dit 10 miljoen ton per jaar; dit is in de orde van grootte van de volgens tabel 1 gebruikte hoeveelheid cokes (2,85 miljoen ton). De prijs van petroleumcokes is echter in sterke mate afhankelijk van de eventueel voor cokesbereiding beschikbare overschotten aan zware olie.

3. Staalbereiding door elektrolytische reductie van ijzererts

Elektrolytische reductie van ijzererts kan op twee wijzen worden uitgevoerd, n.l.:

- Elektrolyse in natronloog;
- Elektrolyse in smelt.

a. Elektrolyse in natronloog

Bij deze tweede alternatieve methode wordt ijzererts in suspensie in natronloog elektrolytisch gereduceerd. Hoewel nog geen ervaring op technische schaal is opgedaan, kan op grond van de aard van dit proces worden verwacht dat de kwaliteit van het elektrolytisch ijzer zeer goed zal zijn: het is vrij van koolstof, zwavel en fosfor en derhalve zeer geschikt voor de bereiding van gelegeerde stalen. Een technisch-economische analyse kan nog niet worden gegeven; daarvoor zou onderzoek naar de technische uitvoerbaarheid nodig zijn.

b. Elektrolyse in smelt

Bij de derde alternatieve methode vindt de elektrolyse bij hoge temperatuur plaats in een smelt,

zoals bij de bereiding van aluminium. Van dit proces, dat voor zover bekend ook alleen op laboratoriumschaal bestaat, is eveneens geen kostenanalyse te geven *).

B. Bereiding van overige metalen

Van de overige, technisch belangrijke metalen: aluminium, koper, magnesium, titaan, natrium, zink en nikkel, wordt verreweg het grootste deel langs elektrochemische weg vervaardigd. Alleen aluminium wordt op relatief grote schaal in Nederland gefabriceerd (47.200 ton, 1968). Voor de elektrochemische zinkbereiding zijn plannen gemaakt.

Om een inzicht te krijgen in het aandeel van de energie in de kostprijs van deze metalen is in tabel 2 een overzicht van de relevante bijzonderheden gegeven.

De specifieke energieconsumptie bij de bereiding van aluminium is weliswaar hoog, maar het kostenaandeel der elektrische energie daalt sterk bij afnemende elektriciteitsprijs. De aluminiumproductie in Nederland is trouwens al gebaseerd op een lage kWh-prijs, uitgaande van aardgas.

De werkgroep is dan ook van mening, dat een verlaging van de kWh-prijs hoogstens een geringe verhoging van de groeitrend tot gevolg zal hebben.

De vestigingsfactoren in Nederland lijken momenteel niet zodanig dat bereiding der overige metalen is te verwachten op zulk een schaal dat daarmee vermogens van meer dan 100 MW zullen zijn gemoeid.

*) Uitgaande van een geraamd elektriciteitsverbruik van 10 kWh/kg en een elektriciteitsprijs van 1,75 ct/kWh, bedragen bij een staalproductie van 7,5 miljoen ton per jaar de energiekosten f 1.300 miljoen. Dat is dus 5 x zoveel als bij de eerste alternatieve methode. Dit proces lijkt op eerste gezicht dus pas in aanmerking te komen als cokes, olie of gas niet meer beschikbaar zijn.

Tabel 2. Bereiding van enige metalen (1968) [11-14]

	Al	Cu	Mg	Ti	Na	Zn	Ni
specifiek energieverbruik (kWh/kg)	17—20	1,8	17—20	20	10	3,5	3
wereldproductie *) (miljoen ton)	8,47	5,4	0,19	0,01—0,02	0,14	4,72	0,50
hiervan elektrochemisch (%)	100	30	90	0	100	60	80
toeneming van de productie (% jaar)	6,8	6,8	2	—	—	9,8	16,3
produktiekosten (f/kg)	2	3	2,8	5	2	0,8	7
energiekosten (% der produktiekosten)							
bij 3,0 cent per kWh	27—31	5	21	13	17	12	1,4
bij 1,75 cent per kWh	17	3	13	9	10	7	0,7

*) Primaire productie. Hier is de productie door opwerking van reeds gebruikt metaal niet bij inbegrepen.

IV. Elektrochemische en -thermische industrie

Bij het nagaan van de invloed die een dalende kWh-prijs zal hebben, is men geneigd het eerst te denken aan intensief elektriciteitsverbruikende takken van industrie, zoals de elektrochemische en de elektrothermische industrie.

De Nederlandse elektroprocesindustrie (chlooralkali-elektrolyse, elektrofosforbereiding, bereiding van poverbindingen en dergelijke), is over het gehele land verspreid en verbruikte in 1970 in totaal een vermogen van circa 200 MW *). Het verbruik voor 1975 wordt op 550 MW geschat [15]. Dit laatste getal komt dan ongeveer overeen met een productie-eenheid in een elektrische centrale.

Geen der genoemde industrieën afzonderlijk neemt een vermogen af, dat in de orde van grootte van een productie-eenheid ligt [14, 16] en daarom zal een daling van de kWh-prijs in de toekomst geen „grote effecten” sorteren.

Naast de bovengenoemde industrietakken die noodzakelijk veel elektriciteit verbruiken, moet worden onderzocht of andere chemische processen bij dalende kWh-prijs zullen worden vervangen door elektroprocessen; hierbij wordt in het bijzonder gedacht aan waterstofbereiding door elektrolyse van water.

Aangezien in de petrochemische industrie de bereiding van waterstof het voornaamste proces is dat eventueel in aanmerking komt voor overschakeling op een elektrolytische methode, werd de elektrolytische bereiding van waterstof vergeleken met de conventionele methode [17, 18]. In tabel 3 is nagegaan hoever de elektriciteitsprijs zou moeten dalen om voor beide processen op dezelfde prijs uit te komen.

Hierbij is uitgegaan van een dagproductie van 480 ton waterstof van 160 ata en 98 % zuiverheid. Aangenomen is verder, dat de bij de elektrolyse vrijkomende zuurstof voor f 15,—/ton kan worden afgezet.

Men ziet dat de elektrolytische bereiding op grote schaal van waterstof pas concurrerend wordt met het huidige proces bij een kWh-prijs van omstreeks 0,6 cent en dat die, indien het alleen aan de elektriciteitsprijs zou liggen, nog wel lang op zich zal laten wachten. De werkgroep meent dan

*) Het elektrische vermogen dat de aluminium-industrie verbruikt is hierbij inbegrepen. Dat bedraagt op basis van een jaarproductie van 47.200 ton (1968) ongeveer 100 MW.

Tabel 3. Produktiekosten van waterstof volgens twee processen, in gld. per ton waterstof van 160 ata, 98 % zuiverheid.

	elektrolyse	vergassing
annuïteit op investering (15 %)	f 121,50	f 132,—
overige vaste kosten *)	77,—	94,50
variabele kosten **)		
excl. elektriciteit resp. brandstof	5,50	18,50
	f 204,—	f 245,—
af: zuurstof 20 ata, 99 % à f 15,—/ton	120,—	0
	f 84,—	f 245,—
elektriciteit (break-even prijs 0,632 cent/kWh)	356,—	24,—
brandstof, zware olie à f 40,—/ton	0	171,—
totaal	f 440,—	f 440,—

*) Onderhoud (3 %), verzekering (3 %), arbeid (f 18.000/man-jaar), overhead (100 % van onderhoud en arbeid).

**) Chemicaliën, proces- en koelwater (f 0,15/ton), katalysator.

ook, dat de effecten voor de petrochemische industrie marginaal zullen zijn.

Met uitzondering van de elektrolytische bereiding van waterstof is het „energetisch” nauwelijks merkbaar wanneer één of enkele van de eerder genoemde processen zouden worden gerealiseerd.

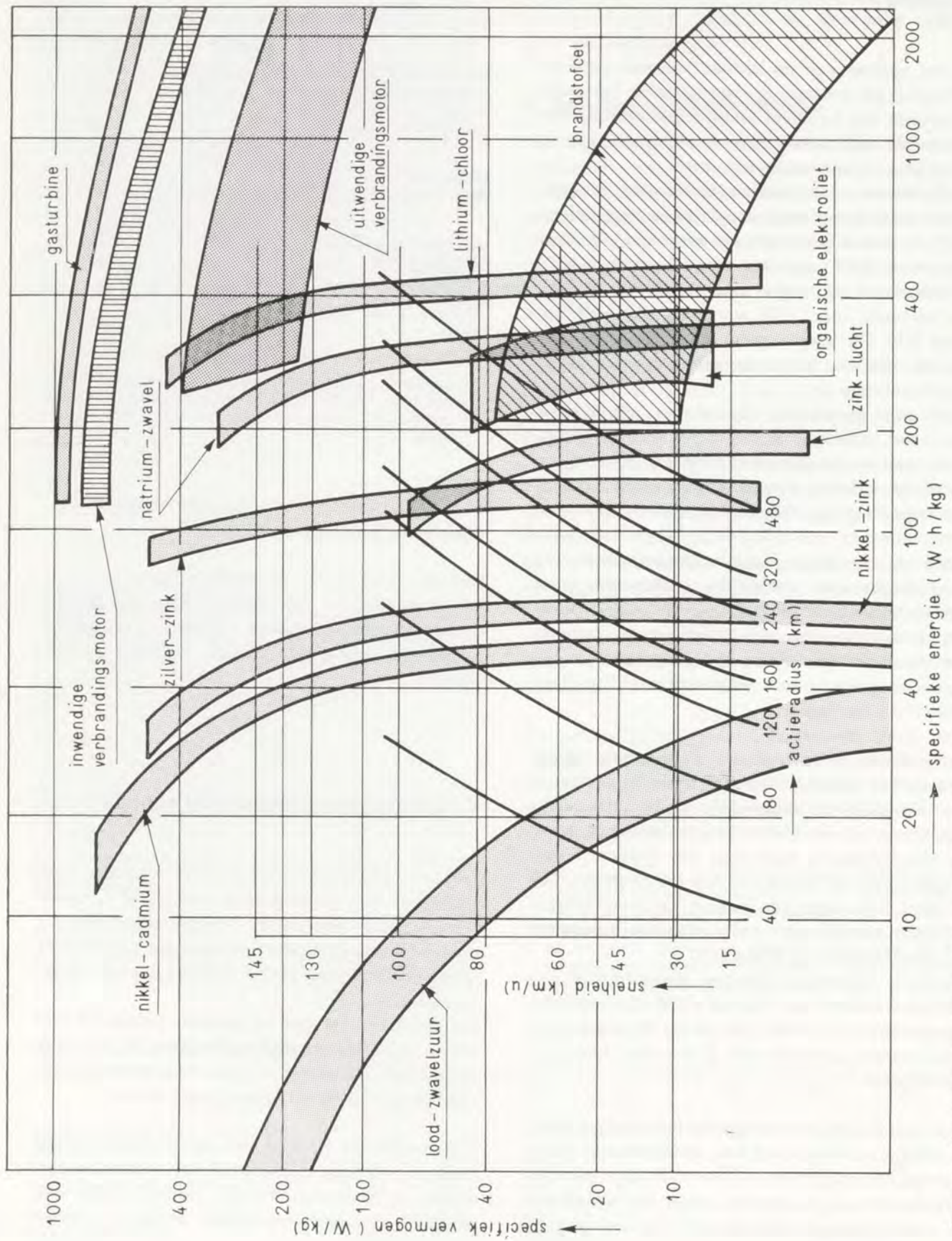
V. Geïntegreerd industrieel complex

Geheel anders wordt de situatie wanneer men denkt aan een geïntegreerd industrieel complex [19-22], waar een aantal energie-intensieve industrieën is gegroepeerd rondom een grote kernenergiecentrale en gecoördineerd energie daarvan afnemen.

De aldus te vestigen industrieën behoeven niet alleen grote **elektriciteitsverbruikers** te zijn. Ook industrieën die **stoom** in grote hoeveelheden nodig hebben, zullen daar een plaats vinden.

Industrieën die nu nog zijn aangewezen op gebieden met lage elektriciteitsprijs door waterkracht of bruinkool, kunnen mogelijk door een dergelijk nucleair industrieel complex worden aangetrokken.

Voorts kan worden gedacht aan elektroprocessen als elektrochemische ontsluiting van fosfaat-



Figuur 1. Vergelijking van diverse elektrochemische systemen met verbrandingsmotoren.

meststoffen, stikstofbinding in de vlamboog, sodabereiding door elektrolyse, waterontzouting door elektrodialyse en adiponitrilbereiding (grondstof voor nylon 6.6) door elektrodimerisatie van acrylonitril. Vooral reeds bestaande trends naar elektrochemische en elektrothermische processen zullen worden versterkt.

In het algemeen kan worden gesteld dat een nucleair industrieel complex recht van bestaan heeft door een daar heersende lage energieprijs. Dit wordt in het bijzonder mogelijk door een stijgende prijs van aardolie en aardgas.

De keuze van de vestigingsplaats van een industrieel complex zal worden beïnvloed door de beschikbaarheid van koelwater, grondstoffen, transportfaciliteiten, loonstandaard en milieueisen. Deze factoren zullen in belangrijke mate bepalen of de vestiging van zulk een complex in Nederland al dan niet aantrekkelijk is.

Indien bestudering van deze vraag zou leiden tot de conclusie dat vestiging van een dergelijk complex in Nederland aanbevelenswaardig is, lijkt het gewenst deze vestiging in een vroeg stadium te stimuleren door energie tegen lage prijs ter beschikking te stellen.

VI. Elektromobiel

De reeds toenemende overlast die de luchtverontreiniging [23, 24] en de geluidsproductie door automobielen ons vooral in de steden bezorgen, kan als drijvende kracht worden beschouwd voor de vervanging van de benzinemotor door een ander systeem.

De relatief hoge bijdrage van de transport- en distributiekosten [25] van elektriciteit maken weliswaar dat de elektriciteitsprijs voor de kleinverbruiker procentueel niet sterk zal dalen, maar desondanks wordt een afnemende elektriciteitsprijs in samenhang met te verwachten overheidsmaatregelen op het gebied der milieuzorg als een stimulans gezien voor de ontwikkeling van elektromobielen. Een beschouwing daarover past daarom in het kader van deze studie.

In tabel 4 is een overzicht gegeven van eigenschappen van diverse krachtbronnen [26].

Van de in onderzoek zijnde systemen, zoals turbomotor [26], stirlingmotor [27, 28], een nieuwe versie der stoommachine [29] en diverse soorten nieuwe elektrochemische energie-omzetters [30-34], zijn de laatste vanuit het standpunt der milieuzorg als ideaal te beschouwen. Het is echter nog niet gelukt, ondanks jarenlange research, een brandstofcel [35-37] of een accumulator te ontwikkelen die aan de technische en economische eisen van een elektromobiel kan voldoen.

Uit tabel 4 blijkt duidelijk, dat de tot nu toe ontwikkelde systemen zwaar en duur zijn, vergeleken met de motor met inwendige verbranding.

Van de technische eisen krijgt men een idee aan de hand van figuur 1, waar het specifieke vermogen en de specifieke energie van diverse systemen met elkaar worden vergeleken [29, 38].

Op de X-as is uitgezet de energie die kan worden geleverd per kg gewicht van het systeem inclusief motor, brandstoftank en brandstof. Bij constant vermogen zijn de getallen langs deze as een maat voor de bedrijfstijd en dus voor de actieradius.

Tabel 4. Vergelijking van enkele automobielmotoren. *)

	emissies g/km (California driving cycle)			emissie index	lawaai index	brandstof verbruik kg/kWh	relatief gewicht	relatieve kosten
	H _x C _y	CO	NO _x					
benzinemotor 1960	6,6	50	2,5	hoog	matig	0,272	1	1
benzinemotor 1970	1,4	14	2,5	laag	matig	0,30	1—1,5	1—1,5
dieselmotor	2,2	3,1	2,5	matig	hoog	0,24	2,5	2—2,5
regeneratieve gasturbine	0,14	1,5	0,6	laag	matig	0,24	1,25	2,5—3,0
stirlingmotor	0,06	0,6	1,6	laag	laag	0,21—0,24	2,5	3
stoommotor	0,39	1,7	0,6	laag	laag	0,43+	3,0	3
elektromotor + accubatterij	—	—	—	laag	laag	—	4	6
elektromotor + brandstofcel	—	—	—	laag	laag	—	30,0	100

*) a. tabel gebaseerd op schattingen van General Motors (behalve gasturbine);

b. 1970 US Federal Standards: koolwaterstoffen 1,4 g/km, koolmonoxide 14,3 g/km

Bij soortelijk zware „brandstoffen” (zoals in de loodaccu) kan per kg totaalgewicht minder worden meegenomen en wordt de actieradius kleiner. Het specifieke vermogen, dat op de Y-as is uitgezet, wordt eveneens uitgedrukt per kg van het systeem inclusief brandstof.

Wil men zeer veel energie aan het systeem onttrekken, dan moet veel brandstof worden meegenomen en neemt het vermogen per kg systeem, inclusief brandstof, af.

De specifieke vermogens van gasturbines en ook van motoren met inwendige verbranding (benzine- en dieselmotoren) zijn hoog, direct gevolgd door die van motoren met uitwendige verbranding (stirlingmotor en stoommachine).

De lithium-chloor en de natrium-zwavel batterijen komen hierna. De technologie van deze systemen, die bij hoge temperatuur werken, is echter uitermate moeilijk, zodat slechts zeer langzaam voortgang wordt gemaakt.

Aan een stadselektromobiel behoeven minder zware eisen te worden gesteld. Uit Amerikaanse literatuur blijkt, dat hiervoor kan worden gesteld: [34]

actieradius:

160 km

kruissnelheid:

65 km/h

energieverbruik bij kruissnelheid:

150 Wh/km

energie-inhoud van de batterij:

24 kWh bij 3-urige ontlading

energiedichtheid van de batterij:

48 Wh/kg bij 3-urige ontlading

vermogen van de batterij:

9,6 kW bij 3-urige ontlading

aanvaardbaar gewicht van de batterij:

500 kg

Vergelijking van deze gegevens met figuur 1 leert dat accu's van het type nikkel-cadmium en nikkel-zink hieraan kunnen voldoen.

Wegens de geringe wereldvoorraad aan cadmium komt alleen de nikkel-zink accu in aanmerking, hoewel ook van zink de voorraad betrekkelijk beperkt is. De zink-lucht batterij heeft voor een goede werking van de luchtelektrode geringe hoeveelheden edele metalen nodig en is daarvoor relatief duur.

Een belangrijke technische eis is nog dat de levensduur van de batterij 4-6 jaar moet zijn.

In dit bestek zal niet worden ingegaan op allerlei hybride systemen, waarbij van specifieke voor-

delen van één type energie-omzetter in combinatie met die van een ander gebruik wordt gemaakt. Als voorbeeld wordt genoemd de gasturbine-accu combinatie [39].

De uit figuur 1 af te leiden nodige vermogensdichtheid lijkt in de eerste plaats slechts met een oplaadbaar systeem te verwezenlijken. De energieën en vermogens die gemeoid zijn met op grote schaal ingevoerde elektromobielen van het stadstype, zijn niet onaanzienlijk. Aangenomen dat er een miljoen elektromobielen met een energie-inhoud van 24 kWh in bedrijf zijn, waarvan de helft in acht nachturen moet worden geladen, dan vraagt dat een energie van 12.000 MWh. Hiervoor is een elektriciteitsopwekkend vermogen nodig van 1.500 MW; dit komt overeen met twee of drie productie-eenheden.

Op zichzelf is dit feit niet te beschouwen als een groot effect in de zin van deze studie, aangezien het extra verbruik over het gehele land is verspreid. Omdat redelijkerwijs kan worden verwacht dat oplading van de batterijen van elektromobielen in hoofdzaak 's nachts zal plaats vinden, zou het wel enige invloed hebben op het belastingspatroon (dag en nacht) van de elektriciteitscentrales.

Zoals reeds uit het voorgaande blijkt, is de technische realisering van de elektromobiel in de eerste plaats afhankelijk van de ontwikkeling van een goede oplaadbare batterij, die

1. een voldoende hoog specifiek vermogen (kW/kg) en een voldoende hoge specifieke energie (kWh/kg) bezit;
2. een lange levensduur heeft en
3. niet te duur is.

Gelijktijdig moet dan een elektrisch regelsysteem worden ontwikkeld om het energieverbruik te optimaliseren (bijvoorbeeld regeneratief remmen), evenals een vehikel dat is aangepast aan de geheel andere methode van aandrijving.

De mogelijkheden van de elektromobiel dienen uiteraard te worden bestudeerd in relatie tot andere ontwikkelingen, zoals de stirlingmotor [27, 28] en de stoommachine [29].

Samenwerking tussen belanghebbende industrieën en instituten voor wetenschappelijk en technisch onderzoek is hiertoe dringend noodzakelijk.

Zonder daar in het kader van deze beschouwin-

gen nader op in te gaan, kan worden gesteld, dat een dergelijke ontwikkeling sterk zou worden gestimuleerd door hierop gerichte fiscale maatregelen.

Als voorbeeld van dit laatste kan het melkdistributiesysteem dienen.

In Londen is de overschakeling op elektrische tractie een succes geworden. In het Roergebied echter is dit succes uitgebleven, omdat daar wegenbelasting werd geheven op grond van het totale gewicht der voertuigen, inclusief de relatief zware batterijen, terwijl in Londen deze laatste niet werden meegerekend bij het bepalen der belastingnorm.

VII. Ruimteverwarming en -conditionering

Aangezien in Nederland steeds meer op centrale verwarming met aardgas zal worden overgegaan, is het minder waarschijnlijk dat in de toekomst (tot 2000) zeer grote vermogens aan elektrische energie zullen worden gebruikt voor ruimteverwarming [40]. Zelfs een daling van de opwekingsprijs tot 1 cent/kWh zal hierop weinig invloed hebben door de hoge distributiekosten van elektriciteit, vergeleken met die van aardgas.

Conditionering van leef- en werkruimten in woningen zal waarschijnlijk weliswaar in toenemende mate worden toegepast, doch het is niet te verwachten dat dit zal leiden tot een zeer grote toename van het elektriciteitsverbruik. De voor dit doel gebruikte apparaten zullen, gezien het Nederlandse klimaat, slechts beperkt in bedrijf zijn en dan nog voornamelijk gedurende de zomermaanden.

Bij nieuwe gebouwen, vooral grote kantoorgebouwen en warenhuizen, zal luchtbehandeling hoogstwaarschijnlijk in toenemende mate worden toegepast. Het is echter moeilijk aan te nemen, dat de stijging van het elektriciteitsverbruik daardoor sterker zal zijn dan de nu reeds als algemene tendens geziene stijging.

Uit een oogpunt van het meest economische gebruik van de energie van brandstoffen, is het ongewenst de chemische energie achtereenvolgens in warmte, in mechanische energie (rendement $\sim 40\%$) en in elektrische energie, en deze vervolgens op een andere plaats weer in warmte om

te zetten. Een directe omzetting van chemische energie in warmte, zoals bij ruimteverwarming wordt toegepast, is dan ook te verkiezen zolang geschikte brandstoffen in voldoende mate en tegen redelijke prijs beschikbaar zijn.

Bij industrieën kan, met het beschikbaar komen van aardgas als goedkope en schone brandstof, in toenemende mate het „total-energy“-concept worden overwogen. [41-43] Hierbij wordt dan gedacht aan een gecombineerde dekking van elektriciteits- en warmtebehoefte.

Een „total-energy“-installatie leent zich goed voor het bedrijven van luchtbehandelingsinstallaties, waarin naar behoefte de lucht kan worden verwarmd, dan wel gekoeld.

VIII. Conclusies

Uit het voorgaande kan de conclusie worden getrokken, dat, in tegenstelling tot intuïtieve verwachtingen, in Nederland slechts enkele ontwikkelingen in de industrie van de toekomst zijn aan te wijzen, waarop een verlaging van de elektriciteitsprijs een grote invloed zal kunnen hebben. Omschakeling op elektriciteit zal dan bovendien nog afhankelijk zijn van andere factoren, zoals de beschikbaarheid en de wereldprijs van energiedragers en andere grondstoffen en de toenemende zorg voor het milieu.

Dit geldt met name voor het klassieke hoogovenproces dat, bij voldoende sterke daling van de elektriciteitsprijs en een stijging van de cokesprijs, bij nieuwbouw waarschijnlijk zal worden vervangen door het proces der directe gasreductie.

Het is natuurlijk niet zo, dat deze bedrijfstak de enige zal zijn die op een alternatieve methode van produktie zal overschakelen: ook andere industrieën zullen wellicht één of meer processen langs een meer elektriciteitverbruikende weg leiden. De maatschappelijke consequenties hiervan zijn echter evenredig met de omvang daarvan en daarom is alleen bij zeer grote bedrijven of industriële complexen een effect op de gehele samenleving merkbaar. Het verrichten van een studie naar de mogelijkheid en de wenselijkheid van een industrieel complex in Nederland wordt in overweging gegeven.

Bij de petrochemische industrie, die haar ener-

giebehoefden hoofdzakelijk ontleent aan aardolie, is het onwaarschijnlijk dat zich grote veranderingen zullen voordoen als gevolg van een dalende elektriciteitsprijs.

In algemeen maatschappelijk opzicht vormt de mogelijke invoering van elektromobielen ter gedeeltelijke vervanging van automobielen met verbrandingsmotor een uitzondering en wel als gevolg van de milieuzorg. Dit laatstgenoemde aspect speelt uiteraard ook een rol bij andere substitutieeffecten, zoals dat van de gasreductie voor het hoogovenproces, doch een veel verder gaande studie door anders samengestelde werkgroepen zou zijn vereist om het belang hiervan te kwantificeren.

IX. Literatuur

1. J. A. Lane, Rationale for low-cost nuclear heat and electricity. Oak Ridge National Laboratory, August 1968.
2. R. T. Hammond, Low cost energy, a new dimension, Science Journal, January 1969.
3. W. Grigorieff, Abundant nuclear energy, Proceedings of the Gatlinburg Conference, August 1968.
4. Nuclear energy centers; industrial and agro-industrial complexes, Oak Ridge National Laboratory, ORNL - 4290, November 1968.
5. 3-mill power where you want it by year 2000, Chemical Week, March 15, 1969.
6. Energieproductie in het jaar 2000, Chemisch Weekblad, 2 mei 1969.
7. T. Bogerd, Vormt de huidige en toekomstige elektrische energievoorziening in ons land een stimulerende of een remmende factor in de groei van de Nederlandse procesindustrie, De Ingenieur, 20 februari 1970.
8. J. B. Auld, E. G. Masdin, One step steel, New Scientist, 8 May 1969.
9. E. Schwarz-Bergkamp, Methoden der elektrischen Beheizung von Hochöfen, Chemie-Ing.-Techn. **41** (4) 196 (1969).
10. F. W. Möllenkamp, Zukünftige Perspektiven der Elektrothermie, Chemie-Ing. Techn. **41** (4) 218 (1969).
11. Metallstatistik, 1959-1968, Metallgesellschaft A.G., Frankfurt a.M., 1969.
12. W. Schmidt-Hatting, Entwicklung der Aluminium-Elektrolyse, Chemie-Ing.-Techn. **41** (4) 163 (1969).
13. K. D. Beccu, Gewinnung von Titan durch Schmelzflusselektrolyse und der Einfluss des Energiepreises auf die Herstellungskosten, Chemie-Ing.-Techn. **41** (4) 174 (1969).
14. H. Walde, Der Energieaufwand bei elektrochemischen und elektrothermischen Verfahren, Chemie-Ing.-Techn. **41** (4) 185 (1969).
15. J. A. A. Ketelaar, De ontwikkeling van de elektrochemische industrie in Nederland, Elektrotechniek **45** (20) 454 (1967).
16. A. Schmidt, Einfluss des Strompreises auf die Herstellungskosten bei der Elektrolyse, Chemie-Ing.-Techn. **41** (4) 215 (1969).
17. L. W. ter Haar, Waterstof in de petroleum en chemische industrie: toepassing en fabricage, De Ingenieur, 25 april 1969.
18. Costa, Grimes, Chem. Eng. Progress Symposium Series, Vol. 63 (71) 45-58 (1967).
19. R. P. Hammond, Low cost energy: a new dimension, Science Journal, January 1969.
20. G. T. Seaborg, Energy and the future, Joint Conference of the Chemical Institute of Canada and the American Chemical Society, Toronto, 25 May 1970.
21. L. Green, Energy for an inland agro-industrial community, ASME Publication 68-W.A./Ener-12.
22. T. Bogerd, Elektriciteitscentrale en chemische industrie, Chemisch Weekblad, 30 oktober 1970.
23. J. H. Vis, De toekomst van de Amerikaanse uitlaatgassen, Chemisch Weekblad, 22 mei 1970.
24. P. S. Myers, Automobile emissions — a study in environmental benefits versus technological costs, Automotive Engineering Congress, Detroit, 12-16 January 1970.
25. J. W. M. van Rooy, De stijging van het elektriciteitsverbruik en enkele daarmee samenhangende problemen, Elektrotechniek, **48** (22) 1137 (1970).
26. N. Penny, Gas Turbines for land transport, Science Journal, April 1970.
27. R. J. Meijer, De mogelijkheden van de stirling-tractiemotor in onze toekomstige samenleving, Philips Technisch Tijdschrift, **31** (5/6) 175 (1970).
28. De Philips stirlingmotor, Chemisch Weekblad, 30 oktober 1970.
29. S. W. Gouse, Steam cars, Science Journal, January 1970.
30. D. A. J. Swinkels, Electrochemical vehicle power plants, IEEE Spectrum, May 1968.
31. M. Pöhler, Hat das Elektromobil eine Zukunft? Elektrizitätswirtschaft, **67** (22) 664 (1968).

32. E. H. Rietbrink, S. B. Tricklebank, Electric storage batteries for vehicle propulsion, ASME Publication, 70-WA/Ener-7.
33. F. E. Ammerman, Questions to ask about batteries proposed for electric cars, Automotive Engineering Congress, Detroit, 12-16 January 1970.
34. F. A. Scheider, N.I.V.E.E. Congres, Delfzijl, 23 oktober 1969.
35. Fuel cell research faces sharp cutbacks, Chemical Engineering News, 21 July 1969, p. 42.
36. K. V. Kordesch, Fuel cells and their future prospects, IEEE Winter Power Meeting, New York, 25-30 January, 1970.
37. G. H. J. Broers, De problematiek van de galvanische brandstofcel, Chemisch Weekblad, 30 oktober 1970.
38. G. G. Leeth, Energy conversion devices for ground transportation, TEMPO, General Electric Company, Santa Barbara, 69 TMP-25.
39. G. A. Hoffman, Future electric automobiles, Technological Forecasting, **1** (2) 173 (1969).
40. K. Wassenaar (Mededeling KEMA, 29 april 1970).
41. W. Short, Rise of the total energy concept, New Scientist, 13 November 1969.
42. L. G. Wansink, Ontwikkeling energievoorziening op middellange en lange termijn, Openingsrede Enprodex Vakbeurs, Utrecht, 2 april 1970.
43. G. M. Reistadt, R. A. Gaggioli, E. F. Obert, Available energy and economic analyses of total energy systems, Proceedings of the American Power Conference, **32** 603 (1970).

**Overzicht van reeds verschenen en binnenkort
uit te geven Stichtingspublicaties.**

1. Toekomstbeeld der Techniek,
ir. J. Smit, 1968 uitverkocht
2. Techniek en Toekomstbeeld,
Telecommunicatie in telescopisch beeld,
prof. dr. ir. R. M. M. Oberman, 1968
uitverkocht
3. Verkeersmiddelen,
prof. ir. J. L. A. Cuperus en anderen,
1968 f 8,—
4. Hoe komt een beleidsvisie tot stand?
ir. P. H. Bosboom, 1969 2,—
5. De overgangprocedure in het verkeer,
diverse auteurs, 1969 10,—
6. De invloed van goedkope elektrische
energie op de technische ontwikkeling
in Nederland,
dr. P. J. van Duin, 1971 3,—
7. Electrical energy needs and
environmental problems, now and
in the future,
diverse auteurs, 1971 10,—

Voorts nog in 1971 uit te geven:

8. Mens en milieu: prioriteiten en keuze,
diverse auteurs
9. Het voeden van Nederland, nu en in
de toekomst,
diverse auteurs
10. Toekomstige transportsystemen voor
elektrische energie in Nederland,
diverse auteurs

T
T