

ZUINIGHEID MET VLIJT

door Prof. dr. Tjeerd Jan Schaafsma



WAGENINGEN UNIVERSITEIT

afscheidsrede uitgesproken op 16 mei 2002
in de Aula van Wageningen Universiteit

ZUINIGHEID MET VLIJT.....

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

Op het eerste gezicht is de titel van dit afscheidscollege niet erg speels. Maar achter de woorden van de titel staan nog een aantal puntjes. Het gaat om een tweeregelig rijmpje, dat de meesten van U nog wel zullen kennen. De eerste regel van dit rijmpje zegt: "Zuinigheid met vlijt bouwt huizen als kastelen...", de tweede regel is minder bekend¹.

In de loop van dit afscheidscollege hoop ik duidelijk te maken, dat achter de titel meer steekt, dan een oproep tot een ascetische levensstijl.

Wij leven in een welvaartsmaatschappij, die is gebaseerd op de vlijt en inspanning van de generaties vóór ons en van onszelf. Zonder die vlijt zou onze wereld er heel wat minder comfortabel uitzien. Tegelijk zijn we ook wel een beetje ongerust, en soms wel meer dan een beetje, want we worden ons er steeds meer van bewust, dat we zuiniger zullen moeten worden op de voorraden van onvervangbare grondstoffen en natuurwaarden. Misschien gaat de wereld nog wel eens aan onze vlijt te onder.

Tussen zuinigheid en vlijt is een toenemende spanning ontstaan, die ons lijkt te dwingen tot een positiekeus voor het één of het ander.

Voordat ik met mijn verhaal begin, wil ik eerst een overzicht geven van wat ik U deze middag wil vertellen. Wat kunt U vanmiddag van mij verwachten?

Eerst geef ik U een korte terugblik op mijn wetenschappelijke loopbaan. Daarmee wordt de keuze van het onderwerp van vanmiddag hoop ik een beetje duidelijk. Vervolgens schets ik hoe wij momenteel in dit land en in de wereld omgaan met energiedragers als één van de belangrijkste natuurlijke hulpbronnen. Om inzicht te krijgen in de relatie tussen de gebruikssnelheid en het rendement wordt een natuurkundig en wiskundig model losgelaten op het gebruik van schaarse natuurlijke hulpbronnen, en in het bijzonder van energiedragers. Tot slot zal ik op grond van deze analyse enkele conclusies trekken en aangeven hoe we naar mijn mening in de toekomst verstandig met schaarse hulpbronnen zouden moeten omgaan.

Een terugblik

Mijn wetenschappelijke carrière begon in 1958 als practicum-assistent fysische chemie aan het scheikundig laboratorium van de Rijksuniversiteit te Groningen. Na een paar jaar werd ik met twee andere jonge collega's benoemd tot wetenschappelijk medewerker in een team onder leiding van professor Jan Kommandeur. In dit team stond oneerbiedige creativiteit hoog op de agenda. De gevolgen van deze training zijn mij steeds bijgebleven.

Na een post-doctorale periode aan de University of California te Los Angeles werd ik door professor Joan van der Waals naar het Kamerlingh Onnes laboratorium van de Leidse universiteit gehaald. In de werkgroep Moleculen in de Aangeslagen Toestand fungeerde ik als verbindingsman tussen het fysisch Kamerlingh Onnes laboratorium en het scheikundig Gorlaeus laboratorium, een leerzame maar geen eenvoudige uitdaging.

Na mijn benoeming in 1972 aan de Landbouwhogeschool met de leeropdracht de Molecuulfysica kostte het een paar jaar voordat ik mij thuis ging voelen in de wetenschappelijke omgeving van de Landbouwhogeschool, die toen nogal sterk werd gedomineerd door de klassieke "groene" landbouwwetenschappen. Later voelde ik mij wetenschappelijk in Wageningen als een vis in het water. Tijdens mijn aanstellingsperiode in Wageningen was ik gast-hoogleraar aan de University of Washington (Seattle, U.S.A.), het Argonne National Laboratory (Argonne, U.S.A), het Solid State Institute van het Technion te Haifa (Israel), en sinds een paar jaar aan de San Diego State University (San Diego, U.S.A).

Toen ik in Wageningen begon koos ik er voor, het onderzoek te richten op drie onderzoeklijnen:

- De moleculaire basis van de fotosynthese, het proces waarin planten zonlicht, kooldioxide en water omzetten in koolhydraten, de bron van ons voedsel. Daarna stond de bouw en werking van de natuurlijke fotosynthese machine model voor een zonnecel gebaseerd op organische verbindingen, de z.g.n. "organische zonnecel".
- Het biofysisch mechanisme van het binnendringen van plantenvirussen in de plantencel. Na duizenden jaren landbouw zijn virusziekten nog steeds een plaag, waartegen geen kruid gewassen is.
- Het ontwikkelen van methoden voor het meten van stroming en diffusie van water in planten en plantendelen, zonder de plant te beschadigen of aan te raken.

Bij elk van deze onderzoeklijnen gaat het om natuurkunde van levende systemen, ook wel biofysica genoemd, en dan toegespitst op planten. Al snel ontdekte ik, dat het landbouwkundig onderzoekgebied een ware goudmijn van interessante vragen is. Van de bovengenoemde onderwerpen vond ik het fotosynthese onderzoek het meest interessant. De zorg voor de andere twee onderzoeklijnen kon ik na een tijdje met een gerust hart aan twee ervaren hoofdmedewerkers overlaten, Marcus Hemminga en Henk van As. Zij hebben die deze taak voortvarend en met succes opgepakt.

Mijn voorkeur voor het fotosynthese onderzoek kwam voort uit mijn interesse voor de beschikbaarheid en het gebruik van energiebronnen. Ik kwam er van onder de indruk (en dat ben ik nog) dat een plant in de eerste stap van de fotosynthese met een rendement van ongeveer 50% licht-energie omzet in wat eigenlijk elektrische energie is. Zo ver heeft de zonnecel-technologie het nog niet gebracht, en er valt in dit opzicht dus van de plant nog heel wat te leren². In de jaren '80 werden in ons laboratorium dan ook verschillende EEG projecten uitgevoerd, waarmee wij probeerden het natuurlijk fotosynthese proces na te bootsen. In 1992 nam ik tenslotte het initiatief voor een nationaal onderzoekprogramma "Organische Zonne-cellen", dat tot 2001 werd gefinancierd door de onderzoekorganisatie NOVEM^{3,4}. Aan dit project namen drie Nederlandse universiteiten en het Energie Centrum Nederland deel.

De vragen rond energievoorziening - en meer in het algemeen het gebruik van schaarse hulpbronnen - blijven mij boeien. Ik ben er vast van overtuigd, dat vroeg of laat de huidige fossiele energiebronnen zo schaars zullen zijn geworden, dat zon en wind als energiebron hun plaats zul-

len moeten innemen, zolang geen afdoende en economisch transparante oplossing is gevonden voor de nucleaire optie. De grootschalige invoering van zo'n gedecentraliseerde energie-productie zal grote maatschappelijke gevolgen hebben^{5,6}.

Zuinig met hulpbronnen en energie

De wetenschappelijke vertaling van de titel van dit college is:

Hoe gaan wij zo zuinig mogelijk om met de beperkte natuurlijke hulpbronnen, die ons ter beschikking staan, zonder de maatschappelijke vlijt op te geven, waarop ons bestaan is gebaseerd.

Natuurlijke hulpbronnen zijn die reservoirs van materiële en niet-materiele middelen, zonder welke geen menselijk leven van voldoende kwaliteit op aarde mogelijk is. Voorbeelden van dergelijke hulpbronnen zijn: landbouwgrond, drinkwater, schone lucht, natuurgebieden, grondstoffen, en energiedragers zoals olie, steenkool en aardgas. Ik beperk mij in deze voordracht tot energiedragers en het efficiënt gebruik er van, maar ik verwacht dat mijn conclusies zijn te generaliseren tot andere schaarser wordende hulpbronnen.

Als we kijken naar energiedragers leven wij in een uitzonderlijke periode van de wereldgeschiedenis (Fig 1).

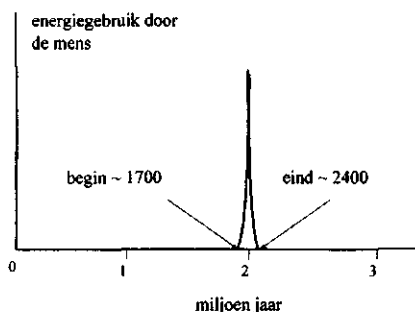


Fig. 1. Het tijdperk van het gebruik van fossiele energie in de geschiedenis van de mens op aarde⁷

Gedurende zijn veronderstelde verblijftijd op deze planeet maakt de mens pas sinds een paar eeuwen gebruik van fossiele energiedragers, zoals kolen, aardgas, en olie. Deze brandstoffen met een veel hogere verbrandingswarmte per kilogram dan die van hout hebben het aanzien van de aarde compleet veranderd. Zonder deze fossiele brandstoffen was er b.v. geen industriële revolutie geweest. Maar de medaille heeft ook een keerzijde: volgens recente en betrouwbare schattingen moeten we er serieus rekening mee houden, dat binnen 50 jaar olie en gas schaars zullen zijn geworden, omdat ze technisch en economisch niet meer winbaar zullen zijn. Dat zal over 30 jaar voor olie het geval zijn als het wereldverbruik jaarlijks met 2% blijft stijgen, zoals nu het geval is^{8,9} Voor gas duurt het wat langer, maar minder dan 100 jaar. Als per jaar 2% minder zou worden gebruikt, wordt de periode dat we nog olie hebben verlengd tot 80 jaar. Kolen zijn pas over uiterlijk een paar honderd jaar uitgeput, maar hebben grote nadelen voor het milieu.

Tot nu toe neemt het totale wereld energiegebruik alleen maar toe, en er wordt verwacht dat dit in de komende 20 jaar zelfs nog met 60% zal groeien⁸ als gevolg van het sterk toenemend energiegebruik van de ontwikkelingslanden.

De volgende generatie – dat zijn de kinderen en jonge volwassenen van nu - zal waarschijnlijk met olieschaarste geconfronteerd worden met alle gevolgen van dien. De beste optie om deze schaarste het hoofd te bieden is te investeren in de ontwikkeling en toepassing van zonne- en wind-energie, ook al is de energiedichtheid daarvan een behoorlijk stuk kleiner dan van fossiele brandstoffen. De realisatie van economisch haalbare en grootschalige energiewinning uit zon en wind is wel een zaak van lange adem.

Het is een Nederlandse gewoonte bij energie-discussies nogal snel met een beschuldigende vinger naar de Verenigde Staten te wijzen. Inderdaad heeft dit land het hoogste energie-verbruik per hoofd van de bevolking (Tabel 1) en de hoogste bijdrage aan de wereldwijde CO₂ uitstoot (Tabel 2).

Tabel 1 Energieverbruik per hoofd van de bevolking (1996); willekeurige eenheden; USA = 100.

USA	Nederland	China	Indonesië	India
100	63	8	5	3

Alleen, ons land is beslist niet het braafste jongetje van de klas, want binnen de EU had Nederland een hoger energiegebruik per inwoner dan elk ander EU land.

CO2 uitstoot

Voor de periode 1990-2000 zijn gedetailleerde gegevens bekend over de CO₂ uitstoot van industrielanden, en landen met een overgangseconomie, waartoe ook ontwikkelingslanden worden gerekend (Tabel 2). Wereldwijd is in die 10 jaar de totale CO₂ uitstoot met ongeveer 1% gedaald als gevolg van het instorten van de economieën van de Oostbloklanden.

Tabel 2. Ontwikkeling van de CO₂ emissie per hoofd van de bevolking in de periode 1990-2000 van landen met een overgangseconomie (A) en industrielanden (B).

Land	Categorie	% totaal ^a		kg CO ₂ /inwoner/jaar		Verandering ^b
		1990	2000	1990	2000	
China	A	11	11	2150	2020	- 6 %
Indonesië	A	0.7	1.1	770	1110	+31 %
Wit-Rusland	A	0.5	0.2	10510	4790	-54 %
USA	B	24	26	21320	22020	+3 %
Zweden	B	0.3	0.2	6960	6230	-10 %
Nederland	B	1.0	1.0	14180	14660	+3 %
Australië	B	1.2	1.4	16670	17670	+6 %

Gegevens: W.Zittel, M.Treber, Joint Working Paper Analysis of BP Statistical Review of World Energy with respect to CO₂ emissions, 2nd edition, Ludwig-Bölkow Systemtechnik, Ottobrunn, Juli 2001; Population Reference Bureau, International Data Base (U.S. Census Bureau), 2002.

^a Percentage t.o.v. wereldd totaal; ^b relatieve verandering in % van aantal kg CO₂/inwoner/jaar t.o.v. 1990

De uitstoot per inwoner in deze Tabel kan worden opgevat als een maat voor de efficiëntie, waarmee dat land energie produceert. Er zijn interessante conclusies uit de Tabel te halen:

- Ondanks de grote bijdrage van 11% van China aan de CO₂ uitstoot is de energie productie efficiënter geworden door modernisering van elektrische centrales.
- Voor de voormalige republieken van de Sovjet Unie heeft het instorten van de economie veelal

tot een dramatische daling van de uitstoot per inwoner geleid.

- Nederland heeft weinig reden zich op de borst te kloppen, want in de periode 1990-2000 daalde onze efficiëntie met 3 %, terwijl die van Zweden juist met 10 % steeg.
- Indonesië vertoont als gevolg van de overgang naar een geïndustrialiseerde maatschappij een sterke stijging van de totale CO₂ uitstoot en die per inwoner.

Op de keper beschouwd is het verband tussen de CO₂ uitstoot als gevolg van menselijke activiteit en de stijging van het CO₂ gehalte van de atmosfeer niet zo simpel, als het op het eerste gezicht lijkt.

Wat is er aan de hand?

Het ecosysteem van de aarde kan ongeveer 2100 ton CO₂ per km² per jaar omzetten in koolhydraten. Dat is 9-10 keer zoveel als de hoeveelheid, die de mens gemiddeld door verbranding van fossiele brandstoffen de lucht inblaast. Van de geabsorbeerde hoeveelheid CO₂ komt bijna alles weer terug in de atmosfeer door rotting en spijsvertering in de voedselketen. Deze delicate balans wordt door allerlei factoren beïnvloed, zodat de netto uitkomst niet al te nauwkeurig voorspeld kan worden. Het enige dat we zeker weten, is de stijging van het CO₂ gehalte van de atmosfeer van 250 ppm bij het begin van de industriële revolutie tot 400 ppm op dit moment. Dat deze toename voor een belangrijk deel te wijten is aan de verbranding van fossiele energiedragers, is wel zeker, maar het is niet zo duidelijk voor welk deel. Er kunnen bijvoorbeeld moeilijk in te schatten bijdragen zijn van vulkanische uitbarstingen en gewijzigde patronen van zeestromingen. De stijging van het

atmosferisch CO₂ gehalte kan de kleine maar duidelijke gemiddelde temperatuurstijging van de aarde verklaren. Het moet ons aan het denken zetten, dat tegelijkertijd het aantal tornado's, overstromingen en vergelijkbare natuurverschijnselen in de laatste jaren in een aantal gebieden (China, Zuid- en Centraal Amerika) een record hoogte heeft bereikt.

Eenheden

Voor een zinnige discussie over energie en energiegebruik moeten we een idee hebben over enkele begrippen en de daarbij horende eenheden¹⁰.

Energie is overal nodig waar arbeid wordt verricht. Die arbeid kan bijvoorbeeld bestaan uit het ontwikkelen van warmte of licht, het optillen van een blok hout, of cello spelen. Bij lichamelijke inspanning wordt een deel van de energie in arbeid en een deel in warmte omgezet

Vermogen is de hoeveelheid energie per tijdseenheid. Met Uw electriciteitsrekening betaalt U voor energie, uitgedrukt in kilowatt-uur (kWh), ofwel het vermogen (in kilowatt) \times de periode (in uren), dat U dat vermogen hebt gebruikt.

Gebruiksrendement, gebruiksduur en duurzaamheid

Om zo lang mogelijk gebruik te kunnen maken van onze natuurlijke hulpbronnen, m.a.w. het bereiken van een maximale *gebruiksduur*, is het *gebruiksrendement* natuurlijk belangrijk: hoe hoger dat rendement is, hoe langer de bron kan worden gebruikt. Om verwarring te voorkomen, moet gebruiksduur worden onderscheiden van duurzaamheid. Bij recycling bijvoorbeeld kan de gebruiksduur van een product kort zijn, terwijl er toch sprake is van een duurzaam

procédé, omdat het niveau wordt gehandhaafd, waarop het product in de toekomst beschikbaar blijft. Voor *duurzaamheid* zijn verschillende definities in omloop, waarvan de bekendste van de Brundtland commissie dateert uit 1987:

*"Duurzame ontwikkeling wordt gezien als een ontwikkeling die voorziet in de behoeften van de huidige generatie zonder daarbij de mogelijkheden van toekomstige generaties in gevaar te brengen om ook in hun behoeften te voorzien"*¹¹.

De eerste keer, dat mijn aandacht werd getrokken door de relatie tussen rendement en snelheid of vermogen, is al lang geleden. Midden jaren '70 las ik tot mijn verbazing dat het energetisch rendement van de landbouw in India hoger was dan in de Verenigde Staten, terwijl het laatstgenoemde land een veel hogere landbouwkundige productie had dan India¹². Ik vond dat intrigerend omdat dit verband me deed denken aan een vergelijkbare eigenschap van andere levende en niet-levende systemen, die energie van een bepaalde vorm omzetten in een andere. Hoe sneller die systemen werken, hoe lager het rendement van de omzetting is. Ik heb daarom voor drie van dergelijke systemen eens nagegaan of daarvoor gelijksoortige rendement-snelheid relaties gelden, en koos daarvoor de volgende drie voorbeelden:

- De auto
- Het menselijk lichaam
- De landbouwkundige productie

De auto

Elke autobezitter weet, dat het aantal kilometers per liter motorbrandstof bij hoge snelheid daalt, m.a.w: het rendement van de omzetting van de brandstof in bewegings-energie neemt af naarmate de omzettingssnelheid of het door de auto gespenderde vermogen toeneemt (fig. 2). Bij een stilstaande auto wordt aangenomen dat de motor stationnair draait. Het energie-rendement is in dat geval nul.

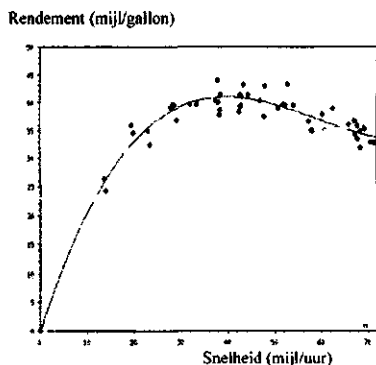


Fig. 2. Snelheidsfhankelijkheid van het rendement van autorijden¹³

Het menselijk lichaam

Net als bij de auto, verdwijnt een deel van de energie uit de stofwisseling van het menselijk lichaam in "stationair draaien", de z.g.n. basisstofwisseling, bij warmbloedige dieren en de mens ongeveer ongeveer 1.0 kcal/kg/uur. Dit betekent voor iemand van 70 kg 1680 kcal per etmaal en het grootste deel daarvan wordt gebruikt voor handhaving van de lichaamstemperatuur. Met inbegrip van lichamelijke

activiteit heeft iemand van 70 kg een totaal van ongeveer 2500 kcal per etmaal nodig.

Net als bij de auto, is na te gaan wat het energetisch rendement is van wandelen als je de snelheid varieert. Dat rendement is hier de verhouding van de verrichte spierarbeid en de verbruikte stofwisselingsenergie. Bij wandelen doet zich een probleem voor, want technisch gezien wordt er bij lopen geen arbeid verricht, en kun je dus ook niet op deze manier het energierendement berekenen. In plaats daarvan is in fig. 3 de afstand, die per verbruikte kcal kan worden afgelegd, uitgezet tegen de relatieve loopsnelheid t.o.v. de maximum snelheid van ca. 8 km/uur. Het gemiddelde rendement komt uit bij ongeveer 20% en daalt sterk bij snelheden boven 5 km/uur. De figuur laat zien dat ondanks de totaal verschillende constructie de biomechanische machine van de mens niet wezenlijk anders met energie omgaat dan een automotor¹⁴.

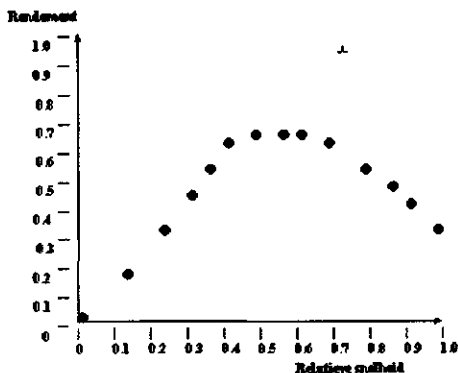


Fig. 3. Energie-rendement van lopen met wandelsnelheid tot max. 8 km/uur¹⁴

De landbouwproductie

Nog steeds werkt 50% van de wereldbevolking in de landbouw, maar er zijn grote verschillen (Tabel 3)⁷.

Tabel 3 Percentage van de werkende beroepsbevolking werkzaam in de landbouw (1990)

N.Amerika/Canada	West-Europa	Oost-Europa/Rusland	Z.Amerika	Azië	Afrika
4	7	15	24	61	64

In de geïndustrialiseerde landen is het percentage van de bevolking, dat in de landbouw werkt laag door de groot-schalige inzet van fossiele energie in tractoren, landbouwmachines, kunstmest en pesticiden.

Hoe zit dat voor Nederland? In tegenstelling tot wat veel mensen geloven, heeft de Nederlandse landbouw een laag energie-rendement al is de productiviteit hoog.

Terwijl de productiviteit wordt uitgedrukt in de opbrengst in euro's per hectare per jaar, is het energie-rendement de verhouding tussen de hoeveelheid arbeid of energie, die het productiesysteem oplevert en de hoeveelheid arbeid of energie, die er in gestopt wordt. In de 20^e eeuw is de hoeveelheid fossiele energie in de landbouw in de geïndustrialiseerde landen 10- tot 40-voudig toegenomen, zonder dat dit heeft geleid tot een even grote toename van de productiviteit. Daarmee is het energie-rendement van de landbouw in de loop der tijd in feite fors gedaald, en is de afhankelijkheid van fossiele energiedragers dramatisch toegenomen.

Het is interessant hoe de output/input verhouding van energie voor de landbouwproductie verandert als de productiviteit (ofwel de productiviteit) wordt gevarieerd. Er zijn gegevens bekend⁷, waaruit te berekenen valt hoe de energie

output/input verhouding waarmee het energie-rendement evenredig is, voor een aantal landen afhangt van het.

Efficiency (kg/Watt)

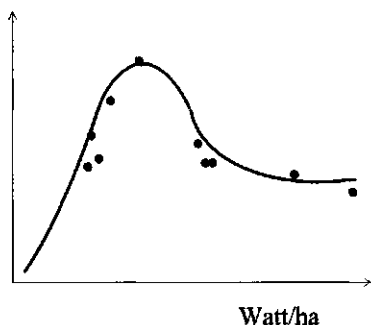


Fig. 4 Efficiëntie van de landbouwproductie uitgezet tegen het geïnvesteerde vermogen van tractoren

aantal paardekrachten per hectare. Met de omrekeningsfactor van 1 pk = 736 Watt komt dit overeen met het vermogen in kiloWatt per hectare, ofwel het totale vermogen uit menselijke arbeid en het gebruik van fossiele energiebronnen, zoals tractoren. Globaal ziet die relatie er uit zoals in fig.4 is weergegeven. Een dergelijk verband als in fig. 4 is een voorbeeld van een van de oudste economische concepten, n.l. de wet van de afnemende meeropbrengsten en gaat ook op de landbouwproductie¹⁵. In feite is deze wet zelfs afkomstig uit de landbouw, toen men nog dacht dat landbouw de enige bron van rijkdom was. Anne Robert Jacques Turgot (1727-1781)¹⁶ vergeleek de vruchtbaarheid van de aarde met een veer, waarop steeds zwaardere gewichten worden gezet. Kleine gewichten hebben nauwelijks effect, grotere drukken de veer steeds verder in, totdat de tegenkracht zo groot wordt, dat toevoegen van meer

gewichten bijna geen effect meer heeft. Na hem hebben o.a. Malthus (1766-1834) en Ricardo (1772-1823) deze gedachte op verschillende terreinen verder uitgewerkt.

Eenvoudig gezegd, luidt de wet:

Het toevoegen van één input, terwijl tenminste één andere een vaste waarde heeft laat de output minder snel toenemen, waardoor de efficiëntie van de toegevoegde input afneemt.

Voor de landbouw is het zonlicht een constante bron van energie voor de groei van gewassen. Het toevoegen van steeds meer fossiele energie aan de landbouwkundige productie, in wat voor vorm ook, levert weliswaar een verdere toename van de productiesnelheid op, maar wel in steeds mindere mate, zodat als gevolg daarvan de energetische efficiëntie van de landbouw daalt. In Engeland was de energetische output/input verhouding van de landbouw in 1826 40.3, en in 1971 2.1¹⁷. Dit geldt ook voor andere componenten van de landbouwproductie, zoals de toename van de graanopbrengst per toegevoegde hoeveelheid kunstmest⁷.

De landen met het laagste energie-rendement van de landbouw zijn niet toevallig ook de rijkste landen van de wereld. Het is duidelijk dat de planeet aarde niet kan voorzien in het hoge en inefficiënte energie-verbruik van deze landen, dat in geen enkele verhouding meer staat tot het deel van de wereldbevolking, dat daarvan profiteert. Naar mijn mening is het behoorlijk onethisch te pleiten voor vermindering van de wereldbevolking, zonder de eerste prioriteit te leggen bij de noodzakelijke vermindering van het boven-

matig gebruik van de natuurlijke hulpbronnen door de rijke landen. Pimentel heeft al lang gepleit voor een afname van de Amerikaanse bevolking tot ongeveer 100 miljoen, in plaats van de huidige 270 miljoen¹⁸. Hij is van mening, dat alleen dan op lange termijn een niveau van welvaart is te handhaven volgens wat hij noemt de Europese standaard, maar hij definieert die standaard nauwelijks. Ik heb dan ook het vermoeden, dat bij zijn standpunt de Amerikaanse luxe leefgewoonten meespelen.

Een electrisch model voor spaarzame vlijt

Het lijkt er op, dat de praktijk ons laat zien, dat heel uiteenlopende systemen, die verschillende vormen van energie in elkaar omzetten, zich niettemin gelijksoortig gedragen. Hoe is dat te verklaren? Een zinnige manier om dit soort vragen te beantwoorden, is de methode van de *systeem-analyse*.

Voor deze analyse maak ik drie aannames:

1. De omzettingen zijn in wezen en op voldoende grote schaal¹⁹ onomkeerbaar. Zulke omzettingen worden beschreven door de irreversibele thermodynamica²⁰.
2. De energie is voor een deel in arbeid (of de z.g.n. vrije energie) om te zetten²¹.
3. Voor de beschrijving van de onomkeerbare energetische processen waar het hier over gaat mogen we lineaire relaties gebruiken²².

Er zijn treffende overeenkomsten tussen de eigenschappen van een systeem, dat energie onomkeerbaar omzet en een weerstandsnetwerk, waarin een electrische stroom loopt.

- In een dergelijk circuit blijft er stroom door alle weerstanden lopen tot de batterij leeg is en gaat het dus ook om een onomkeerbaar proces.
- Een deel van de elektrische energie wordt in arbeid omgezet, het overige deel in warmte.
- Een lineair verband zoals tussen een energie-stroom en een drijvende kracht bestaat ook tussen de stroomsterkte en de spanning in de bekende wet van Ohm.

Het idee is nu, dat energie-stromen en de bijbehorende drijvende krachten behandeld kunnen worden als elektrische stromen en spanningen in een elektrisch circuit. De conclusies, die we uit de eigenschappen van een dergelijk systeem kunnen trekken, zouden dan ook moeten gelden voor verschillende typen energie-omzettingen.

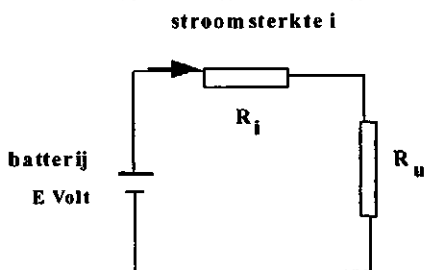


Fig. 5 Simulatiemodel voor onomkeerbare energie-omzettingen

Het allereenvoudigst elektrisch circuit bestaat uit een batterij (E) als spanningsbron, waarop een apparaat is aangesloten, waarmee we arbeid willen verrichten, zoals een electromotor. We stellen die motor voor door een uitwendige weerstand R_u . De batterij zelf heeft een inwendige weerstand R_i . (Fig. 5)

Als we nu een stroom i laten lopen, hangt het elektrisch vermogen P_u , dat aan de motor wordt geleverd af van R_i en R_u . Het resultaat van een simpele berekening is, dat de motor het maximale vermogen krijgt als $R_i = R_u$. Om het energierendement te berekenen willen we weten welk deel van de elektrische energie terecht komt in de motor en welk deel verloren gaat als warmte in de interne weerstand van de batterij. Dat rendement (η) blijkt gegeven te worden door

$$\eta = \frac{1}{2} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{P_u}{P_u^{\max}} \right)} \right]$$

waarbij $\frac{P_u}{P_u^{\max}}$ het *relatieve* vermogen is, dat in de uitwendige weerstand wordt gependend. Fig. 6 brengt de formule in beeld.

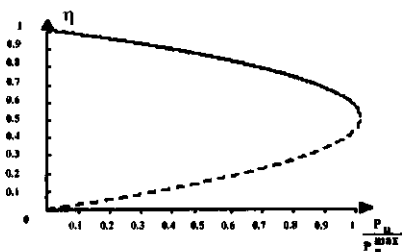


Fig. 6. Rendement η tegen relatieve vermogen.

In fig. 6 correspondeert de getrokken lijn met het + teken in de vergelijking en geeft de relatie weer tussen het rendement en het relatieve vermogen dat aan de uitwendige weerstand (de motor) wordt afgegeven. De gestippelde lijn correspondeert met het - teken en is het vermogen, dat als warmte in de inwendige weerstand verloren gaat. De onderste curve volgt precies de bovenste, maar dan in spiegelbeeld. Dit betekent, dat dezelfde hoeveelheid energie als in de vorm van arbeid ook als afvalwarmte wordt geproduceerd. Het ontstaan van deze afvalwarmte als een vorm van

wanorde is een fundamentele eigenschap van ieder onomkeerbaar proces. Wetenschappelijk is voor de mate van deze wanorde de term **entropie** bedacht. In een gesloten systeem, dat geen energie en materie met de omgeving uitwisselt, neemt de totale entropie bij elk onomkeerbaar proces toe. Hieraan kan ook worden voldaan als op één plaats binnen een dergelijk systeem de entropie toeneemt en gelijktijdig elders afneemt, zij het niet evenveel. Het systeem aardse biosfeer, zon, en heelal kan als zo'n gesloten systeem worden beschreven^{20,23}.

De formule geldt even goed voor een electromotor, als voor een straalkachelkje of een koelkast. Als onze aanpak juist is, zou de bovenstaande relatie ook voor veel complexere systemen moeten gelden.

Het model moet ook rekening houden met het vermogen dat nodig is voor het onderhoud van de motor en stationair draaien, die beide ook een deel van de beschikbare energie uit de batterij opnemen. Deze energiestromen kunnen in het model worden voorgesteld door een parallelweerstand R_p waardoor een deel van de stroom loopt. Hierdoor ziet het circuit er anders uit (fig. 7) en wordt de rendement-snelheids relatie ingewikkelder²⁴.

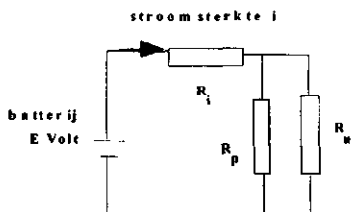


Fig.7. Simulatiemodel voor onomkeerbare omzettingen; parallel-weerstand: onderhoud en stationair draaien

Door deze aanpassing van het model is het energie-rendement van de motor bij stationair draaien nul. Door variatie van de waarden van R_i , R_w , en R_p , ontstaan voor verschillende situaties plaatjes, zoals in fig. 8A en B is gebeurd.

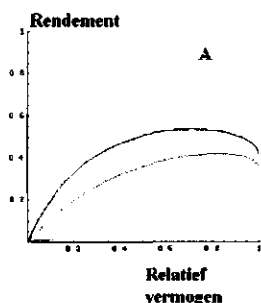


Fig. 8A. Rendement-snelheid relatie m.b.v. model fig.7; bovenste curve: $R_p/R_i = 5$; onderste curve: $R_p/R_i = 1$

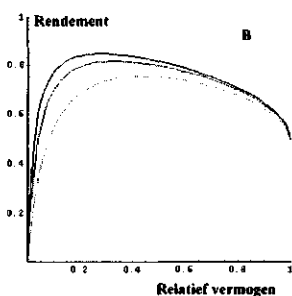


Fig. 8B. Rendement-snelheid relatie m.b.v. model fig. 7; bovenste curve: $R_p/R_i = 150$; middelste curve: $R_p/R_i = 100$; onderste curve: $R_p/R_i = 50$

Op deze manier kunnen we simuleren hoe het energie-rendement zich onder verschillende omstandigheden en bij verschillend relatief vermogen (of relatieve snelheid) gedraagt.

De belangrijkste conclusies, die voor de relaties tussen rendement en vermogen of snelheid uit deze simulaties kunnen worden getrokken zijn:

- Het rendement hangt sterk af van de relatieve snelheid.
- Alle curves gaan door nul en hebben een maximum bij een relatieve snelheid < 1
- Bij verlaging van de inwendige weerstand (ofwel verlaging van vermogens-verliezen) en/of verhoging van de parallel weerstand (ofwel verlaging van het vermogen benodigd voor onderhoud) neemt de maximum waarde van het rendement toe.
- Bij toenemende parallel verliezen (ofwel afnemende parallel weerstand) bereikt de curve tenslotte niet meer de maximum waarde van 0.5 bij de maximale relatieve snelheid.
- Het maximum rendement verschuift naar lagere waarden van de relatieve snelheid bij verlaging van de inwendige weerstand en/of verhoging van de parallel weerstand.

In principe is het model van een elektrisch circuit ook te gebruiken voor het landbouw-productie systeem, maar dan wel met de nodige verfijningen. Net als bij de auto en spierarbeid vertoont de curve van rendement tegen productiviteit ook een maximum, al verschilt de vorm van deze curve van wat de praktijk laat zien (fig.4).

Ook al hebben we een elektrisch model voor de beschrijving van onomkeerbare processen gebruikt, wat tot nu toe is geconcludeerd uit onze vingeroefeningen blijft geldig, ook al is onze energiebron niet meer een batterij, maar van

een heel andere soort, bijvoorbeeld de omzetting van de energie uit de stofwisseling van mens of dier, of de productie van voedsel uit (o.a.) fossiele en zonneenergie in een landbouwsysteem.

Wat is nu de fysische betekenis van de resultaten, die het elektrisch model heeft opgeleverd? Verlaging van de inwendige weerstand betekent verlaging van de verliezen t.o.v. de nuttige arbeid. Dit betekent dat de *efficiëntie* van het omzettingsproces daarmee wordt verbeterd. Men zou ook kunnen zeggen, dat hiermee de effecten van *energie-besparing* als gevolg van procesverbetering in beeld zijn gebracht. De parallelverliezen worden veroorzaakt door noodzakelijk onderhoud en de niet in arbeid omgezette energie (stationaire verliezen). Hoe minder onderhoudsenergie het systeem vraagt hoe duurzamer het systeem werkt. Beperking van de parallelverliezen levert daarmee een bijdrage aan de *duurzaamheid* van de hulpbronnen, die door het systeem worden omgezet. Zowel energiebesparing als verlaging van de onderhouds-energie dragen beide bij tot verhoging van het rendement.

De gebruikperiode (T) gedurende welke de bron kan leveren, totdat deze is uitgeput, wordt gegeven door $T = E \cdot \eta / P$ waarbij E de beschikbare hoeveelheid van de bron is, η het gebruiksrendement, en P de snelheid, waarmee de bron wordt benut. Voor energie is E b.v. de in een batterij opgeslagen elektrische energie, en P het door de batterij geleverde elektrisch vermogen. De uitdrukking kan vereenvoudigd worden door de relatieve grootheden $T^* = T/T_{\min}$, $P^* = P/P_{\max}$ en $\eta^* = \eta/\eta_{\min}$ in te voeren, waardoor E wordt geëlimineerd. Het resultaat is $T^* = \eta^*/P^*$, een eenvoudige

vergelijking, die voorspelt wat we ook verwachten: hoe hoger het gebruiksrendement en hoe lager de snelheid waarmee de bron wordt aangesproken, hoe langer we er plezier van hebben. Deze eenvoud is echter schijn, want het relatieve rendement η^* is voor onomkeerbare omzettingen, afhankelijk van het relatieve vermogen P^* .

Fig. 9 brengt de gebruiksduur T^* in beeld voor verschillende waarden van R_p/R_i en de relatieve (gebruiks)snelheid. Er zijn enkele interessante conclusies te trekken:

- Bij maximale gebruikssnelheid is T^* ten hoogste 1, maar deze waarde stijgt snel bij lagere waarden van de gebruikssnelheid.
- Bij toenemende verhouding R_p/R_i naderen de curves elkaar steeds meer bij de maximale gebruikssnelheid
- Bij toenemende verhouding R_p/R_i gaan de curves bij lage snelheid steeds steiler lopen. Beperking van de parallel verliezen heeft een groot effect op de gebruiksduur bij lage tot matige snelheden.

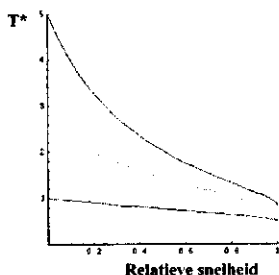


Fig. 9. De relatie tussen de gebruiksduur en de verhouding R_p/R_i voor variabele gebruikssnelheid; curves van boven naar beneden: $R_p/R_i = 10, 5, 2$

Samenvatting en conclusies

Uit deze systeemanalyse van onomkeerbare energie-omzettingen is het volgende te concluderen:

1. Energiestromen van onomkeerbare energie-omzettingen kunnen worden nagebootst door elektrische stromen in weerstandsnetwerken. Entropische verliezen kunnen worden voorgesteld door de warmte onwikkeling in de inwendige serieweerstand van het netwerk, de onderhoudsenergie door de elektrische stroom door een parallel weerstand, en de verrichte arbeid door het vermogen, dat wordt afgegeven aan een uitwendige weerstand in serie met de inwendige weerstand.
2. Het rendement van de energie-omzetting kan worden verhoogd door verlaging van de inwendige verliezen (verlaging van de inwendige weerstand) en/of de onderhoudsenergie (verhoging van de parallel weerstand).
3. Het electrisch model is toepasbaar op systemen met sterk uiteenlopende complexiteit, en kan zowel materiële als niet-materiële hulpbronnen omvatten.
4. De periode waarvoor niet vernieuwbare natuurlijke hulpbronnen, waaronder fossiele energiedragers, beschikbaar zijn, kan sterk worden verlengd door deze met minder dan de maximale snelheid te gebruiken.
5. Een duurzaam gebruik van natuurlijke hulpbronnen vereist een fiscaal en economisch stimuleringsbeleid van de overheid, dat rekening houdt met de huidige en toekomstige schaarste van die hulpbronnen.

6. De eindige omvang van natuurlijke hulpbronnen legt niet alleen beperkingen op aan de omvang van de wereldbevolking¹⁸, maar nog meer aan de consumptie-snelheid van deze hulpbronnen door de rijke landen.

Een vooruitblik

Een werkelijk duurzaam gebruik van onze natuurlijke hulpbronnen vereist het in stand houden van een stabiele beschikbaarheid van deze hulpbronnen voor de komende generaties. Dat houdt dat in, dat de positieve entropiestroom als gevolg van de gebruiks-intensiteit van de vervangbare hulpbronnen niet groter zou mogen zijn dan de negatieve entropiestroom van de zon. Niet alles op aarde is vervangbaar, er zijn nu eenmaal materialen, zoals mineralen, die niet door de zon gemaakt kunnen worden en toch voor het leven op aarde nodig zijn. Voor dergelijke materialen is het niet te verwachten, dat consumenten en producenten zich vrijwillig beperkingen zullen opleggen.

Een overheidsbeleid dat op echte duurzaamheid is gericht zou een aantal maatregelen in de fiscale en economische sfeer kunnen overwegen:

- progressief accijns op de electriciteitstarieven,
- het vrijmaken van een deel van de inkomsten uit "het kwartje van Kok", en
- het progressief belasten en eventueel zelfs rantsoeneren van gebruiksgoederen, waarvan met zekerheid voorspeld kan worden dat ze binnen de huidige generatie schaars zullen worden.

De hierdoor vrijkomende middelen zouden moeten worden gebruikt voor het initiëren en versterken van groot-

schalige investeringen in m.n. de fotonvoltaïsche electriciteits-productie, besparingen van materialen en energie in de procesindustrie, en de ontwikkeling van de grootschalige productie van motorbrandstoffen op biologische basis. De reeds gestarte initiatieven in het kader van het programma Duurzame Technologische Ontwikkeling zouden door deze investeringen aanzienlijk versterkt moeten worden.

Niet minder belangrijk dan het bovenstaande is het aanbrengen van een koppeling tussen de sociale en technische wetenschappen als het gaat om het verantwoord beheer van natuurlijke hulpbronnen. In Nederland noch in Wageningen is dat goed van de grond gekomen, en is de belangstelling van studenten daarvoor minimaal. Hier openbaren zich vermoedelijk de gevolgen van de begrip- en taalkloof tussen de sociale en technische wetenschappen.

Sinds enkele jaren ben ik tevens verbonden aan de San Diego State University, en betrokken bij de uitvoering van een groot project, gericht op het Amerikaans-Mexicaanse grensgebied. In dit project werken ca. 50 wetenschappers met heel verschillende achtergrond, zoals economen, hydrologen, geografen, planologen en natuurkundigen succesvol samen. Het geheim van het succes is het gebruik van één en hetzelfde interactieve software programma, STELLA, dat alle deelnemers dwingt dezelfde wetenschappelijke taal te spreken.

De input gegevens zijn voor een belangrijk deel afkomstig van de belanghebbenden. De output bestaat uit een meerjaren scenario, waarin de mogelijke maatregelen zijn verwerkt, die de levensomstandigheden van de grensbewoners optimaliseren. Deze output is openbaar, en monden uit in concrete aanbevelingen, zodat de betrokken bestuurders en

politici daarop kunnen worden afgerekend.

Er zijn hoopgevendende tekenen, dat de informatie-technologie de natuur en haar onvervangbare bronnen te hulp komt. Het komt geen moment te vroeg.

Woorden van dank

Aan het eind van dit college wil ik mijn dank uitspreken jegens de velen, met wie ik kortere of langere tijd te maken heb gehad. Zij zijn op allerlei manieren mijn metgezel geweest, en zonder hen zou mijn leven er heel anders hebben uitgezien. Van hen neem ik ongaarne afscheid. Een aantal van hen wil ik met name noemen en hen in het bijzonder bedanken.

Hooggeachte Kommandeur, beste Jan, als mijn eerste leermeester heb je mij in de tuinen der wetenschap binnengeleid met een verbazingwekkende lenigheid van geest. Aan jouw wetenschappelijke opvoeding heb ik veel te danken, en vooral het stellen van oneerbiedige vragen, ook al werden ze niet altijd gewaardeerd.

Hooggeachte van der Waals, beste Joan, het was een voorrecht, onder jouw leiding te werken. Scherpzinnig en kritisch legde je altijd de essentie van de wetenschappelijke vragen geduldig en helder uit. Je nadruk op het belang van een programmatische opzet van het onderzoek hebben mij naderhand behoed voor al te dolle sprongen.

Hooggeachte Veeger, beste Cees, op voor jou karakteristieke wijze heb je ooit de stoot gegeven tot het instellen

van de leerstoel Molecuulfysica. Deze actie betekende voor sommige leden van de Faculteit een ruw ontwaken, anderen – waaronder ik zelf – hebben je krachtige ondersteuning van de destijds pas opgerichte studierichting Moleculaire Wetenschappen sterk gewaardeerd.

Dear Professor Sweedler, dear Al, I want to express my appreciation for your continuing support as Director of the Center for Energy Studies at the San Diego State University. I sincerely hope that our contacts and cooperation will continue to be fruitful.

Beste medewerk(st)ers en oud-medewerk(st)ers van de leerstoelgroep Biofysica en de voormalige vakgroep Moleculaire Fysica, zonder jullie toewijding en geduldig onderzoek zou ik vleugellam zijn geweest.

Beste oud-promovendi, afgestudeerden, studenten, en allen, die te maken hebben gehad met mijn soms ongebreidelde fantasie en wetenschappelijke dromen, mijn eigenwijze commentaren op jullie geesteskinderen, en waarmee ik jullie nog meer heb dwarsgezet, dat alles spijt me absoluut niet, want het was zeer de moeite waard.

Voor de financiële ondersteuning van het onderzoek, ook in moeilijke tijden, ben ik het College van Bestuur van Wageningen Universiteit zeer erkentelijk. Zonder de additionele steun van een aantal organisaties zouden een aantal grotere onderzoekprojecten evenwel nooit van de grond zijn gekomen. Ik dank met name de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), en de daarin ondergebrachte Stichtingen Scheikundig Onderzoek Nederland (SON), de Stichting voor Biofysica (SvB), en de Stichting Technische Wetenschappen (STW)

en last but not least de Nederlandse Organisatie voor Energie en Milieu (NOVEM) voor hun financiële steun. Daarbij wil ik met name de (mede)financiering vermelden van de Plant NMR Imager door NWO, en de Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. Met deze faciliteit heeft Wageningen Universiteit zich een frontpositie verworven in het biofysisch en fysiologisch onderzoek van planten en gewassen. Ik vertrouw, dat deze faciliteit zijn wetenschappelijke nut ten volle zal bewijzen.

Beste studenten, ik denk dat jullie niet beseffen hoeveel ik aan jullie te danken heb. Ik ben steeds weer gefascineerd door jullie nieuwsgierigheid en de laconieke manier waarop jullie je moeilijke begrippen eigen kunt maken. Blijf alsjeblieft nieuwsgierig, want daaruit en daardoor bestaat de wetenschap.

Mijn ouders hebben deze dag niet meer mogen meemaken. Hen geldt mijn grote dank en diep respect, dat zij mijn wetenschappelijke belangstelling en aanleg steeds hebben gestimuleerd en voor mij mogelijk hebben gemaakt, waartoe zij zelf wel de talenten hadden, toen zij jong waren, maar niet de middelen.

Van Riky, mijn lieve echtgenote, heb ik veel geleerd, en met name dat er grenzen zijn van wat de exacte wetenschappen heten. De menselijke geest bevat ingewikkelde geheimen, waarbij die van de fysica en de chemie verbleken, voorzover we die nu kennen. De verfrissende commentaren van mijn beide dochters hebben mij erg geholpen om niet te verstoffen.

Tenslotte

Mijn grootste dank breng ik aan God, in wie ik geloof. Door dat geloof herken ik wat Blaise Pascal heeft gezegd²⁵: "De natuur heeft volmaaktheden om te laten zien, dat zij het beeld van God is, maar ook gebreken om te laten zien, dat zij alleen het beeld van God is".

Ik heb gezegd.

REFERENTIES

1. Het vervolg luidt: "maar luiheid mettertijd geeft luizen als kamelen" (Met dank aan mw. P. Folman voor deze informatie)
2. T.J.Schaafsma, Energie en fotosynthese; het natuurlijk proces van de fotosynthese is een leerzaam model voor efficiënte methoden van energieopwekking. Ned. Tijdschr. voor Natk. 2 Nov. 1974, pp. 230-235
3. T.J. Schaafsma, Organic solar cells using porphyrin assemblies on semiconductor substrates. Sol.En.Mat. and Solar Cells 38, 349-351 (1995)
4. T.J. Schaafsma, T.J. Savenije, R.B.M. Koehorst, F.J. Vergeldt, J. Wienke, Luminescent properties and photogeneration of charge carriers in porphyrin dimers and molecular photodiodes. J. of Lum. 72-74, 81-82 (1997)
5. T.J.Schaafsma, Energie in onze maatschappij. Radix, Gereformeerd Weten-sch.Tijdschrift jrg. 2, nr.2, 120-

135 (1975).

- 6 T.J. Schaafsma, Rendementsaspecten van enige methoden van energiewinning – een visie op de toekomst. Polytechnisch Tijdschrift-Procestechniek 35, 1-10 (1980)
- 7 David en Marcia Pimentel, Food, Energy and Society. Edward Arnold, Londen, 1979, en verwijzingen daarin.
- 8 Voor een grondige en recente analyse, zie: J.Laherrere, Estimates of Oil Reserves, Proc. IIASA International Energy Workshop, Laxenburg, 19 Juni 2001; Internet site: <http://www.oilcrisis.com/laherrere>
- 9 U.S. Dept. of Energy/Energy International Administration, Rapport nr. 0484, 26 Maart 2002
- 10 De eenheid van energie is de kilocalorie (= 1000 calorieën), dat is de hoeveelheid energie in de vorm van warmte, die nodig is voor het opwarmen van 1 kilogram water van 14,5 °C tot 15,5 °C.
In feite is deze eenheid wetenschappelijk niet de meest gebruikelijke eenheid voor energie, maar in het dagelijks leven wel de bekendste.
De eenheid van vermogen is de Watt = 0,2388 calorie per seconde.
- 11 World Commission on Environment and Development (1987). Our Common Future. Oxford University Press, UK.

- 12 D. Pimentel, L.E.Hurd, A.C.Bellotti, M.J.Forster, I.N.Oka, O.D.Scholes, en R.J. Whitman, *Science* 182, 443 (1973)
- 13 Ontleend aan <http://www.ghg.net/stuart/318ti/economy.html>.
- 14 W.D. McArdle, F.L.Katch, V.L. Katch, *Exercise Physiology, Energy, Nutrition and Human Performance*, 5th ed., Ch. 10. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2001
- 15 M. Slessor, in *Living systems as energy converters*, Elsevier, Amsterdam, 1976
- 16 Anne Robert Jacques Turgot, *Observation sur un Memoire de M. de Saint-Peravy (1767)*, ed. Gustave Schelle, *Oeuvres de Turgot et Documents le Concernant*, vol. 2 (Paris: Librairie Felix Alcan, 1914), p. 644.
- 17 T.P. Bayliss-Smith, *The Ecology of Agricultural Systems*, Cambridge Topics in Geography, 2nd series, 1982
- 18 De grote verdedigers van een negatieve bevolkingsgroei zijn David en Marcia Pimentel, die van mening zijn dat de wereldbevolking moet worden teruggebracht van de huidige 6.5 miljard naar 2 miljard. Voor deze vermindering zou ca. 100 jaar nodig zijn en een gemiddeld aantal van 1.5 kinderen per ouderpaar.

Zie b.v. D. Pimentel en R. Harman, *Natural Resources and Optimum Human Population*. *Population and Environment* 15, 347-369 (1994); D. en M. Pimentel, *Land, Energy and Water: The Constraints Governing Ideal U.S. Population Size*. NPG Forum Series, Jan. 1995.

- 19 Op moleculaire schaal kunnen processen omkeerbaar zijn, terwijl zij op grotere schaal dat niet zijn.
- 20 De wetenschappelijke beschrijving van wat er bij energie-omzettingen gebeurt behoort tot het vakgebied van de thermodynamica, dat aan deze universiteit wordt behartigd door de leerstoelgroep Fysische Chemie. Mijn collega Hans Lyklema heeft in 1995 bij zijn afscheid een analyse gegeven van de gevolgen die de thermodynamische natuurwetten hebben en moeten hebben voor ons dagelijks functioneren. Zie: J. Lyklema, *Econatuurkunde* oftewel de entropie van het gazon. Voordracht gehouden op 29 November 1995 bij zijn afscheid als hoogleraar in de Fysische en Kolloïd-chemie aan de Landbouwniversiteit te Wageningen.
- 21 Deze aanname is niet vanzelfsprekend, omdat het deel van de energie uit een energiebron dat in arbeid kan worden omgezet, bepaald wordt door $1 - T_2/T_1$ met T_1 de temperatuur van de energiebron en T_2 de temperatuur van de plaats waar de energie wordt gebruikt. T_1 en T_2 zijn uitgedrukt in graden Kelvin ($^{\circ}\text{K}$), waarvoor geldt: $T(^{\circ}\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$.
Van zonlicht, afkomstig van een bron met $T_1 \sim 5800$ $^{\circ}\text{K}$, dat wordt benut op het aardoppervlak met een

temperatuur van ca. 300 °K, kan op grond hiervan ongeveer 80% in arbeid worden omgezet.

- 22 Dat betekent dat de omzettingssnelheid (J, in aantal energie-eenheden per seconde) recht evenredig is met de drijvende kracht X. Een dergelijk verband geldt voor systemen, die niet al te ver uit evenwicht zijn.
- 23 W.Norde, Energy and entropy: a thermodynamic approach to sustainability. *The Environmentalist* 17, 57-62 (1997).

$$24 \quad \eta = \frac{1}{4} \left(\frac{R_p}{R_i} \right) \left(\frac{P_u}{P_u^{\max}} \right) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_p}{R_i} \right) \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{P_u}{P_u^{\max}} \right)} \right\} \right]^{-1}$$

- 25 Blaise Pascal, *Gedachten over de godsdienst*, bewerkt door S. van der Land, J.H.Kok, Kampen, 1989.

Curriculum vitae

Tjeerd Jan Schaafsma werd 19 Mei 1937 te Drachten geboren. Na zijn middelbare school opleiding (Gymnasium β) studeerde hij vanaf 1955 scheikunde met bijvak natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Groningen en behaalde in 1962 het doctoraal diploma. In dat zelfde jaar begon hij een promotie-onderzoek naar gasvormige paramagnetische atomen en moleculen onder leiding van Prof. dr. J. Kommandeur, dat hij in 1966 met lof afrondde met een proefschrift getiteld: "ESR of NO_2 ". Inmiddels was hij bij het Laboratorium voor Fysische Chemie aangesteld als wetenschappelijk medewerker, een functie die hij spoedig na zijn promotie verwisselde voor die van postdoctorale

onderzoeker in de groep van Prof. dr. D. Kivelson aan het Chemistry Department van de University of California at Los Angeles. Twee jaar daarna werd hij als wetenschappelijk hoofdambtenaar benoemd aan de afdeling Experimentele Natuurkunde onder leiding van Prof. dr. J.H. van der Waals, van het Kamerling Onnes Laboratorium van de Rijksuniversiteit Leiden. Hij vervulde daar een verbindingsfunctie tussen dit laboratorium en de afdeling scheikunde in het kader van de werkgroep Moleculen in de Aangeslagen Toestand. In 1972 werd hij benoemd tot gewoon hoogleraar aan de Landbouwhogeschool met als leeropdracht de Molecuulfysica. Tijdens zijn wetenschappelijke loopbaan vervulde hij diverse bestuurlijke en adviseerende functies. Binnen Wageningen Universiteit was hij voorzitter van (o.a.) de Hogeschoolraadscommissie Overeenkomsten met Derden, gedurende de periode 1993-1998 voorzitter van de Vaste Commissie voor de Wetenschapsbeoefening en in die functie adviseur van het College van Bestuur, en voorzitter van de Ethische Commissie (1997-1999). Buiten Wageningen diende hij NWO als lid van het Gebiedsbestuur Biologie, Oceanografie en Aardwetenschappen (1987-1992), en als voorzitter en vice-voorzitter van de Stichting voor Biofysica (1994-1996). In Europees verband fungeerde hij in de afgelopen drie jaar als voorzitter van de European Society for Quantum Solar Energy Conversion.

In de loop van zijn aanstelling in Wageningen was hij gasthoogleraar aan de University of Washington te Seattle, het Argonne National Laboratory (U.S.A.), en het Technion te Haifa (Israel). Sinds November 2000 is hij als buitengewoon hoogleraar verbonden aan het Department of Physics van de San Diego State University, en aan het Center for Energy Studies van die Universiteit.