

## Hete hangijzers

**Citation for published version (APA):**

van Koppen, C. W. J. (1972). *Hete hangijzers*. Technische Hogeschool Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1972

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# **Hete hangijzers**

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van  
gewoon hoogleraar in de warmtetechniek aan de  
afdeling der werktuigbouwkunde van de  
Technische Hogeschool Eindhoven op 29 september 1972  
door Ir. C. W. J. van Koppen

*Dames en Heren leden van de gemeenschap van deze Technische Hogeschool,*

*Dames en Heren, die de gewaardeerde gasten van deze gemeenschap bent,*

*Zeer geachte toehoorders,*

De beheersing van het vuur is een der oudste vaardigheden van de mens. De vroegste overblijfselen van kampvuren die gevonden zijn, dateren van niet minder dan 450.000 jaar geleden.

Sindsdien heeft de beheersing van het vuur als onderdeel van de ontwikkeling van de menselijke beschaving, een enorme expansie doorgemaakt. Reeds kennen wij de fysische voorwaarden, waaronder de bron van de zonnewarmte, de kernfusie, ter beschikking van de mensheid zou kunnen komen, en er zijn goede redenen waarom wij mogen hopen dat het ooit gelukken zal deze bron technisch onder controle te brengen. Voor de verre toekomst zou daardoor, althans wat de energiedragende grondstof betreft, de voorziening in onze energiebehoefte veilig zijn gesteld. Elk ander vooruitzicht zou trouwens voor ons onaanvaardbaar zijn omdat het wegvallen van de energievoorziening een apocalyptische ineenstorting van onze beschaving tot gevolg zou hebben.

Mogen wij dus enerzijds de toekomst, wat deze materiële voorwaarde betreft, met vertrouwen tegemoet zien, anderzijds is het de laatste jaren duidelijk geworden dat onze eindige grondstofvoorraden aan de technisch-economische groei scherp bepaalde grenzen zullen gaan stellen. In het spanningsveld dat hieruit gaat voortvloeien, zal in de toekomst ook het werkterrein van de ingenieur komen te liggen. Niet in het minst van de ingenieur, werkzaam in de warmtetechniek, het gebied van mijn leeropdracht. Over de aard van de problemen waarvoor hij zich dan gesteld zal zien en enige consequenties daarvan voor het technisch-wetenschappelijk onderwijs en onderzoek wilde ik vanmiddag enkele gedachten nader voor U ontwikkelen.

Het zal daartoe nodig zijn de reeds aangeduide perspectieven – het historische –, het energie- en het grondstoffenperspectief nader te detailleren. Daarnaast zal aan de huidige stand van de warmtetechniek, althans wat de hoofdpunten betreft, de nodige aandacht moeten worden besteed. Tenslotte zal het nuttig blijken ook op langere termijn een globale visie op de warmtetechniek te wagen, om ons beeld van de ontwikkelingen in de eerstkomende decennia te verhelderen, en het subjectieve element in de prognose tot een minimum te beperken.

Richten wij onze blik eerst op de historie. Deze kan ons leren welke factoren de ontwikkelingen beheersen en – om in een beeld uit de fotografie te spreken – met welke scherptediepte wij ze moeten bezien.

In 1962 werden door Pésci in Verteszöllös in Hongarije een aantal praehistorische vondsten gedaan, waarbij naast stenen werktuigen een aantal verkoolde fragmenten van dierenbeenderen werden aangetroffen. Zij lagen geconcentreerd op twee plekken, elk ongeveer 1 m<sup>2</sup> groot, wat een onmiskenbaar bewijs ervoor vormt, dat de oermens hier op beheerste wijze van vuur gebruik heeft gemaakt. Het is zelfs niet uitgesloten dat de beenderfragmenten gebruikt werden om de sintels van een houtvuur af te dekken en in te sluiten om ze langer in gloed te houden. Dit zou reeds op een zekere verfijning in het hanteren van het vuur wijzen.

In een boeiende analyse van de dierresten die in de omringende aardlagen werden gevonden, is door Kretzoi en Vértes aangetoond [1] dat de nederzetting in Verteszöllös gedateerd moet worden in de korte onderbreking van de tweede ijstijd, die ongeveer 450.000 jaar geleden heeft plaatsgevonden.

De vondsten zijn daarmee ouder dan die van praehistorische houtskool bij Choukoutien in China, en vormen het vroegste bewijs voor het gebruik van vuur door de mens [2].

De doeleinden waarvoor de toenmalige mens, de Pithecanthropus, het vuur heeft gebruikt, moeten zeer elementair geweest zijn; voor romantiek en spel gaven de levensomstandigheden weinig gelegenheid. Licht, het roosteren van de jachtbuit en, in de ruwere klimaten, bescherming tegen strenge koude, zijn de toepassingen waaraan wij voor die tijden moeten denken. In al hun voor-de-hand-liggendheid wijzen niettemin deze doeleinden reeds op het streven van de mens minder afhankelijk van de natuur te worden. Er zijn aanwijzingen dat het wegbranden van bos, om de achtervolging tijdens de jacht te vergemakkelijken, reeds vrij vroeg geschiedde [3]. Van een toenemend overleg bij het gebruik van het vuur getuigt ook een houten jachtspeer met een in het vuur geharde punt, die in een geconserveerde mammoet is gevonden [4]. De Neanderthaler die 150.000 jaar geleden deze speer vervaardigde, zou een voorloper van de smid genoemd kunnen worden.

Grote ontwikkelingen werden echter eerst mogelijk, toen onder de Homo Sapiens de verhouding tussen mens en natuur zich fundamenteel begon te wijzigen. Door het gaan verbouwen van granen en het houden van huisdieren maakte deze mens zich nu ongeveer 10.000 jaar geleden, voor zijn voedselvoorziening in hoge mate van de natuur onafhankelijk [5]. Dan kunnen o.a. in het Midden-Oosten,

de sedentaire leefgemeenschappen ontstaan, die aan het gebruik van het vuur belangrijke nieuwe dimensies zullen toevoegen. Reeds vrij spoedig – omstreeks 6000 v.Chr. – worden in deze culturen het pottenbakken en het bakken van stenen uitgevonden; onder invloed van de reeds intensieve handelsbetrekkingen verspreiden deze vaardigheden zich snel over geheel Europa, Azië en Afrika. Daarop volgen, resp. rond 3500 v.Chr. en rond 800 v.Chr. de bereiding en bewerking van brons en ijzer. Hun voorlopige hoogtepunt, zowel kwantitatief als kwalitatief, vinden deze toepassingen wat Europa betreft in de Griekse-Romeinse cultuur; zij zijn dan inmiddels nog aangevuld met o.a. de bereiding en vormgeving van zilver, goud en glas.

De universele brandstof bij al deze en andere warmtetechnische activiteiten is en blijft het hout, afgezien van het gebruik op kleine schaal van oliën en vetten van dierlijke of plantaardige oorsprong voor verlichting. Deze enkelvoudige basis houdt tegelijk een kwetsbaarheid én een beperking in voor de samenlevingen die er op steunen. Een tweede beperking, die eveneens overwonnen dient te worden voordat verdere ontwikkelingen mogelijk zullen zijn, vormt het ontbreken van het inzicht in de samenhang tussen warmte en energie. Slechts de windkracht – voor zeilschepen – en de spierkracht van huisdieren zijn in de Romeinse tijd als aanvullingen op de menselijke spierkracht bekend. De wind- en watermolen worden daar in de loop van de Middeleeuwen aan toegevoegd. Eerst in 1712 echter volgt een wezenlijke doorbraak, wanneer Thomas Newcomen de eerste succesvolle balans-stoommachine construeert. De noodzaak over krachtiger pompen voor het drooghouden van de steenkoolmijnen – in die tijd vooral in Engeland – te kunnen beschikken, beheerst in niet geringe mate de verdere perfectie van deze gecombineerde warmte- en energietechnische machine. Voor de ijzerbewerking vormt de vervaardiging van deze machines een nieuwe, vruchtbare uitdaging [6].

Meer dan anderhalve eeuw, tot ongeveer 1880, beheersen ijzer, steenkolen en stoom zo de technische en, grotendeels, ook de warmtetechnische ontwikkeling. Dan zetten de nieuwe metamorfosen in, die uiteindelijk tot de warmtetechniek van onze dagen zullen voeren. De nieuwe brandstoffen aardolie, aardgas en, meer recent, de radioactieve splijtstoffen, én de ongekende schaalvergroting, die vooral de stoomketel ten behoeve van de elektriciteitsproductie doormaakt, stellen de mens in steeds sneller tempo voor nieuwe problemen. De empirie moet meer en meer plaats inruimen voor onderzoek en wetenschap om het gewenste snelle ontwikkelingstempo mogelijk te maken. De groeiende procesindustrie gaat mede zijn invloed op de warmtetechniek uitoefenen.

## *Dames en Heren,*

Uit een veel rijkere sociale en culturele ontwikkeling heb ik in het voorafgaande slechts enkele punten gelicht, die de weg markeren waarlangs de warmtetechniek tot zijn huidige stand is gekomen. Het moge duidelijk worden zijn dat, in historisch verband gezien, de fase van ontwikkeling waarin wij ons thans bevinden slechts een onderdeel is van de grote onderneming tot beheersing van de natuur waarmee de mens, in overeenstemming met zijn plaats in de evolutie, 10.000 jaar geleden een begin heeft gemaakt. Het enige wezenlijke verschil tussen de huidige periode en de voorafgaande fasen is, dat wij ons eerst thans van onze positie volledig bewust beginnen te worden. De toekomst van de aarde is van onze beslissingen afhankelijk geworden; de daaraan verbonden verantwoordelijkheid mogen wij niet meer ontwijken. Ons onderwerp van hedenmiddag confronteert ons met een klein deel van de taken die daaruit gaan voortvloeien.

Beschouwen wij nu de onderwerpen die gewoonlijk tot de warmtetechniek worden gerekend, dan blijken die vooral in de volgende drie toepassingsgebieden te liggen: de ruimteverwarming, de energie-industrie en de procesindustrie. In het eerste gebied functioneert de warmtetechniek min of meer zelfstandig, in de laatste twee gebieden vormt zij meer een specialisme binnen de ruimere energie-, resp. procestechneek.

Een globaal beeld van het relatieve belang van deze toepassingsgebieden voor de warmtetechniek kan ontleend worden aan de bestemming die aan de brandstoffen wordt gegeven, m.a.w. aan de verdeling van de primaire energie. Wij kunnen ons daarbij beperken tot de geïndustrialiseerde landen die het leeuwedeel van de energie verbruiken. (Het verbruik van olie, gas en steenkool is in de volgende cijfers omgerekend naar een elektrisch vermogen van gelijke warmtewaarde.) In deze landen wordt thans – ik beperk mij tot globale cijfers – afhankelijk van het niveau van de technische economische ontwikkeling tussen 2,5 en 10 kW primaire energie per hoofd van de bevolking verbruikt, gemiddeld over het jaar. Van deze primaire energie wordt in het algemeen 25 tot 35% gebruikt voor het verwarmen van woningen en kantoren, 40 tot 60% in de industrie, inclusief 15% in de energie-industrie [8], en 20 tot 30% voor verkeer en vervoer. Na een correctie voor het elektriciteitsverbruik in industrie en ruimteverwarming volgt uit deze cijfers dat van de primaire energiedragers 20 tot 30% voor de ruimteverwarming, ca. 25% voor de energie-industrie en 20 tot 40% voor de overige industrie bestemd worden. Daar in de industrie het

gebruik van primaire energiedragers voor een deel meer een procestechnisch dan een warmtetechnisch karakter draagt, kan geconcludeerd worden dat grosso modo aan elk van de drie toepassingsgebieden een ongeveer gelijk relatief belang voor de warmtetechniek moet worden toegekend. D.w.z. als men het belang betreft op het verbruik van primaire energiedragers.

Hierbij moet echter aangetekend worden, dat technisch wetenschappelijk gezien in het algemeen de grootste uitdaging van de energie-industrie uitgaat; de zeer grote omvang van de betreffende installaties is hiervan wel de belangrijkste oorzaak. Wat de toekomst betreft verdient verder vermelding, dat het aandeel van de energie-industrie vermoedelijk met ongeveer 1% per jaar zal stijgen, ten koste van de twee andere toepassingsgebieden.

De warmtetechniek richt zich in elk van de toepassingsgebieden zowel op de productie van warmte, als op het transport daarvan op zo doelmatig mogelijke wijze. De apparaten waarmee dit geschiedt zijn respectievelijk branders, ovens, vuurhaarden en kernreactoren, en warmtewisselaars in de ruimste zin van het woord. Hoewel deze apparaten, met uitzondering van de kernreactor, in veel opzichten conventioneel kunnen worden genoemd, geven zij in een aantal gevallen, overwegend in samenhang met nieuwe ontwikkelingen, aanleiding tot problemen, die slechts door een grondig specialistisch onderzoek tot een oplossing kunnen worden gebracht. Drie probleemgebieden staan daarbij naar ik meen, centraal, en die wilde ik gaarne iets meer in bijzonderheden toelichten. Dit vooral omdat uit de problemen die thans in onderzoek zijn de stand van het vak kan blijken, die wij als beginpunt voor onze voorgenoemen prognose nodig hebben.

Als eerste probleemgebied wil ik noemen het berekenen van vlammen. Het is op zijn minst een merkwaardig feit dat er tot nu toe geen betrouwbare methodes zijn ontwikkeld, waarmee de afmetingen van een vlam en de temperaturen en de chemische omzettingen die er in optreden ook maar enigszins volledig kunnen worden berekend. Wel staan er voor enkele eenvoudige configuraties een aantal experimentele gegevens ter beschikking, en zijn daaruit correlaties ten behoeve van ontwerpberoeeningen afgeleid, maar onder iets gecompliceerder omstandigheden geeft tot nu toe alleen de empirie – in de vorm van praktijkervaringen of experimenten – bij het ontwerpen van branders en vuurhaarden enig houvast. Dientengevolge is het, bijvoorbeeld, nog niet mogelijk vooraf te bepalen hoe een verbranding moet worden uitgevoerd om ongewenste componenten, zoals roet of stikstofoxyden in de verbrandingsgassen te voorkomen. Evenmin kan tevoren worden aangegeven

hoe groot een vuurhaard moet zijn, en hoe deze moet zijn gevormd, om te voorkomen dat de vlam de wanden raakt en daaraan schade veroorzaakt. Ook de warmteoverdracht van de vlam naar de wanden kan nog slechts grof worden voorspeld en nog geenszins worden geoptimaliseerd. De oorzaak van deze gebrekkige stand van zaken blijkt bij nader onderzoek vooral de onkunde omtrent de gasstromingen in de vuurhaard, de mengverschijnselen in de vlam en de optredende chemische reacties te zijn. Daarnaast vormt de integratie van deze gegevens in een praktisch bruikbaar rekenmodel een niet geringe opgave.

Een tweede centraal probleemgebied vormen de warmteoverdracht en, daaraan gekoppeld, de stromingsverschijnselen in twee-fasemengsels, vooral water-stoommengsels in verticale verdampingskanalen. In de conventionele stoomketel zijn de hoeveelheden warmte die per oppervlakte-eenheid verwarmend oppervlak aan het water worden afgegeven nog betrekkelijk klein. De goede afloop van het warmteoverdrachtsproces kan daardoor, temeer daar de ontwerper op een uitgebreide praktijkervaring kan steunen, in de meeste gevallen wel verzekerd worden. Bij de kernreactor echter treden veel hogere warmtestroomdichtheden op; zowel periodieke variaties in de doorstromende waterhoeveelheden als plaatselijke oververhitting van het warmteoverdragende oppervlak kunnen hiervan het gevolg zijn. In kernreactoren van het kokendwater type bepalen deze ongewenste verschijnselen niet zelden het maximaal toelaatbare vermogen van de reactor. Deze omstandigheid, te zamen met het toenemend belang van de twee-fasestromingen in de snel groeiende procesindustrie, hebben tot veel experimentele en theoretische onderzoeken op dit gebied aanleiding gegeven. Uit de resultaten hiervan zijn ook reeds een aantal correlaties voor ontwerpberoeeningen afgeleid. Aan het fysisch inzicht in de twee-fasestromingen ontbreekt echter nog zeer veel, zodat de correlaties slechts met de grootste voorzichtigheid mogen worden toegepast, en vooral extrapolatie geheel uit den boze is. Op dit terrein, zal in nauwe samenwerking met de fysici nog veel baanbrekend werk verricht dienen te worden.

Het derde centrale probleemgebied van de warmtetechniek is naar ik meen dat van de thermische spanningen. Van oudsher heeft de thermische uitzetting van het materiaal in hoge mate de uitvoeringsvorm van warmtetechnische constructies bepaald. Daarbij is aanvankelijk de meeste aandacht besteed aan de primaire uitzettingen, die bij normaal stationair bedrijf optreden. Reeds langer worden ook de secundaire warmtespanningen ten gevolge van temperatuurgradiënten in het materiaal bij het ontwerpen in de bereoeeningen betrokken. In de praktijk blijkt echter dat vooral in



de details van de constructie – zoals aansluitingen – de secundaire spanningen nog vaak worden onderschat. Dit is te meer bevreemdend daar door de tendensen tot hogere warmtestroom-dichtheden, en tot vermindering van de marges tussen feitelijke en toelaatbare spanningen, de betekenis van de secundaire thermische spanningen in de toekomst juist zal toenemen. Meer gegevens op dit terrein zijn ten behoeve van de praktijk zeer gewenst. Een ander type thermische spanningen dat vooral voor grote installaties waarschijnlijk van toenemend belang zal blijken, is dat van de overgangsspanningen die tijdens min of meer snelle variaties in de bedrijfstoestand optreden. Zowel de regelbaarheid van de installaties als de vermoeiing van het constructiemateriaal kunnen door deze spanningen wezenlijk worden beïnvloed.

### *Dames en Heren,*

Bij de aanvang van mijn voordracht is als doel gesteld enige gedachten te ontwikkelen over de taken waarvoor de ingenieur zich op het gebied van de warmtetechniek in de komende decennia gesteld zal zien. Door het formuleren van enkele centrale probleemgebieden is daarmee impliciet reeds een eerste begin gemaakt, want zeker zullen de taken in de naaste toekomst voor een belangrijk deel op deze gebieden liggen. Naast deze centrale probleemgebieden, daardoor gekenmerkt dat vorderingen op deze gebieden in een groot aantal verschillende gevallen met vrucht zullen kunnen worden toegepast, dienen echter ook de belangrijkste specifieke, d.w.z. vooral op een, of enkele, toepassingen betrekking hebbende problemen, genoemd te worden. In een viertal groepen ingedeeld zijn de belangrijkste specifieke problemen de volgende:

Allereerst de bepaling van het dynamisch gedrag van apparaten en installaties, omdat de gegevens hierover voor een optimale en veilige bedrijfsvoering in toenemende mate onmisbaar blijken. De algemene methode voor de beschrijving van het dynamisch gedrag is ontwikkeld binnen de regeltechniek, de toepassing van deze methode wordt naar het mij voorkomt echter meer en meer een taak die elke ingenieur in zijn eigen vakgebied dient te beheersen.

Een tweede groep specifieke problemen vormt de verificatie van correlaties voor het berekenen van de warmteoverdracht onder condities die buiten het oorspronkelijke meetgebied liggen. Zolang de huidige tendensen tot verhoging van temperaturen en drukken en vergroting van de schaal zich blijven voortzetten, zal deze verificatie voor concrete installaties voortdurende

aandacht blijven vragen. Ik acht het niet uitgesloten, dat zich uit deze groep de bepaling van correlaties onder niet stationaire condities als afzonderlijk gebied zal losmaken; hierover is nog bijzonder weinig bekend.

Een derde groep specifieke problemen doet zich voor bij de pogingen de warmteoverdracht van gassen aan vaste wanden te vergroten. Slechts de toepassing van koelpennen en koelvinnen heeft tot nu toe in een aantal gebieden op grotere schaal toepassing gevonden; potentieel grote economische voordelen vormen echter in een aantal andere gebieden een voortdurende aansporing om nieuwe, aan de situatie aangepaste methoden te bedenken en verder te onderzoeken.

De laatste groep specifieke problemen die ik naar voren wilde brengen is die verband houdende met de ruimteverwarming. Zoals wij gezien hebben wordt in geïndustrialiseerde landen ongeveer 30% van de primaire energiedragende grondstoffen gebruikt voor ruimteverwarming. In ons land ligt dit aandeel zelfs rond de 40%. Niettemin wordt door onderzoekingsinstituten en hogescholen slechts op relatief kleine schaal onderzoek op dit terrein verricht, en vinden omgekeerd de betreffende industrieën slechts bij uitzondering de weg naar de laboratoria, die hun inspanningen technisch wetenschappelijk zouden kunnen ondersteunen. Voor de praktisch ingestelde ingenieur zou echter op dit terrein nog veel nuttig werk te doen zijn, getuige o.a. de herhaalde mislukkingen bij de klimaatregeling van grote gebouwen. De mate waarin bouwkunde, warmtetechniek en produktietechniek – het betreft hier veelal massa-artikelen – tot een synthese gebracht kunnen worden is voor succes op dit terrein van doorslaggevend belang.

*Zeër geachte toehoorders,*

In het voorgaande heb ik getracht door het aangeven van de centrale probleemgebieden, aangevuld met de belangrijkste groepen specifieke problemen, de huidige stand van de warmtetechniek te schetsen. Daarmee zijn tegelijkertijd de voornaamste taken op dit terrein voor de naaste toekomst gegeven. Een vraag die met het oog op het gestelde doel voor de hand ligt is wat wij in dit verband onder de naaste toekomst dienen te verstaan. Een scherpe grens is hiervoor uiteraard niet te geven, maar de ervaring leert dat na verloop van tijd de voortgang op een bepaald gebied gewoonlijk trager wordt, doordat men op fundamentele, niet snel op te lossen problemen stuit. Daarom geloof ik dat de genoemde centrale en specifieke vragen niet langer dan tien tot twintig jaren

een meer geconcentreerde technische-wetenschappelijke aandacht zullen krijgen. Daarna is een verschuiving te verwachten, enerzijds naar de meer fundamentele vragen, anderzijds naar nieuwe vragen, die onder de druk van de economische eisen vanuit de praktijk naar voren komen. De eerstgenoemde categorie wil ik verder buiten beschouwing laten, omdat de verschuivingen hierbij langzaam gaan en omdat deze problematiek bovendien vaak meer een zuiver-, dan een technisch-wetenschappelijk karakter draagt. De tweede categorie, de vragen uit de praktijk, lijkt mij echter voor het technisch-wetenschappelijk onderwijs en onderzoek van te groot direct belang, dan dat wij er aan voorbij mogen gaan. Wij pogen immers de jonge ingenieur inzichten mee te geven die zo lang mogelijk, en liefst gedurende zijn gehele carrière van waarde blijven. Aan dit streven moet naar het mij voorkomt tenminste een poging ten grondslag liggen, de aard van de problematiek waarmee hij geconfronteerd zal worden globaal vast te stellen. Bij de keuze van onderzoekprojecten op langere termijn zal men zich eveneens een zo duidelijk mogelijk beeld moeten vormen van de toekomstige situatie. Een prognose over laat ons zeggen veertig tot vijftig jaar, vraagt echter veel voorzichtigheid. Wij moeten ons realiseren dat wij voor onze analyse slechts over enkele algemene gegevens beschikken, en dat ook de conclusies slechts van algemene aard kunnen zijn. Verder is een persoonlijk, subjectief element welhaast onvermijdelijk, vooral bij het schatten van het tempo waarin de veranderingen zich zullen voordoen. Wij mogen deze restricties bij hetgeen nu volgt niet uit het oog verliezen.

Beschouwen wij thans eerst de te volgen methode. De drie hoofdvariabelen van de warmtetechniek zijn: de primaire energiedragers, de beschikbare constructiematerialen en de stand van de kennis. Met als drijfkracht de behoeften van de mens en als selectiemethode de economie, kunnen de ontwikkelingen uit het verleden op veranderingen in een of meer van deze hoofdvariabelen worden herleid. Omgekeerd is er een redelijke zekerheid dat de toekomstige ontwikkelingen uit de voorspelbare veranderingen in deze hoofddimensies kunnen worden afgeleid, indien tenminste mag worden aangenomen dat de drijfkracht in stand blijft. Over dit laatste behoeft weinig twijfel te bestaan. In 1970 lag het primaire energieverbruik in de ontwikkelingslanden in het algemeen beneden 0,5 kW per hoofd, en in de geïndustrialiseerde landen, zoals wij reeds zagen tussen 2,5 en 10 kW, beide gemiddeld over het jaar. Voor de gehele wereld bedroeg het verbruik ruim 2 kW. Rond het jaar 2000 zal de wereldbevolking

het dubbele van de huidige bedragen en de 7 miljard overschrijden. In het midden van de komende eeuw kan, bij een doeltreffende bevolkingsregeling, een stabilisatie rond de 10 miljard worden bereikt. Het streven van de ontwikkelingslanden naar een redelijke welvaart kan alleen door middel van industrialisatie gerealiseerd worden. De vraag naar energie van deze landen zal daarbij, gezien de politieke doelen die zij zich stellen, met grote waarschijnlijkheid tot tenminste het huidige West-Europese niveau van ruwweg 5 kW per hoofd stijgen. Behalve met de thans reeds optredende stijging boven deze waarde van het verbruik in de rijke landen moet rekening gehouden worden met een toenemende vraag ten behoeve van het benutten van laagwaardige ertsen en het recirculeren van grondstoffen. Daarom lijkt het vermoeden gerechtvaardigd dat rond het midden van de komende eeuw het wereldgemiddelde van de vraag de 10 kW per hoofd dicht zal naderen. De totale wereldvraag zou dan tegen die tijd het 15-voud van de huidige bedragen, d.w.z. ruwweg  $6 \cdot 10^{14}$  kWh per jaar. In een dergelijke expansie, voor een groot deel betrekking hebbende op de ontwikkelingslanden, ligt voor vele decennia een overvloed aan drijfkracht besloten.

Wat de primaire energiedragers betreft zullen tegen het midden van de komende eeuw grote veranderingen zijn opgetreden. De eerste daarvan, de uitputting van aardgas en die van aardolie, maken zich reeds thans kenbaar en zullen over enkele tientallen jaren in volle omvang gaan doorzetten [9]. Vanwege deze uitputting zal binnen 15 jaar de aardgas-productie in de meeste landen terug moeten gaan lopen. Voor de wereldolieproductie moet ditzelfde over ongeveer 30 jaar worden verwacht. Van de fossiele brandstoffen zal daarna alleen van steenkool nog een zo grote voorraad aanwezig zijn, dat er op grote schaal voor de energievoorziening, gebruik van kan worden gemaakt; eerst omstreeks het jaar 2100 zal ook de steenkool op beginnen te raken. Denkbaar is dat de chemische omzetting van steenkool in vloeibare brandstof, als substituut voor de schaarser wordende aardolie, dit uitputtingsproces zal verhaasten. Het economisch gevolg van de schaarste aan aardolie en aardgas zal uiteraard een prijsstijging zijn, die deze brandstoffen voor minder edele toepassingen uitschakelt. Voor aardolie ligt daarom alleen het gebruik als grondstof voor de petrochemische industrie op de langere duur nog in de lijn der verwachting. Voor ruimteverwarming, elektriciteitsproductie en transport zal meer en meer op andere energiedragers moeten worden overgeschakeld. Zoals bekend bieden kernspijlstoffen hier gelukkig een alternatief. Onder voorwaarde dat kweekreactoren

worden toegepast, kunnen deze onze toekomst, wat de primaire energie betreft, voor meerdere duizenden jaren veilig stellen. Wij moeten daarbij wel bedenken dat de kernenergie – voor zover wij het kunnen zien – zich vrijwel uitsluitend leent voor de productie van elektriciteit in grote centrales. Dit houdt in dat energie nodig voor transport en voor ruimteverwarming op den duur overwegend via elektriciteit verkregen zal moeten worden. Principieel kennen wij voor de aan deze situatie verbonden moeilijkheden reeds thans een aantal mogelijke oplossingen. Als voorbeeld kan genoemd worden de elektrolyse van water, waarmee elektrische energie, die moeilijk opgeslagen kan worden, in chemische energie kan worden omgezet. Een ander voorbeeld is de elektrische auto. Voor de praktische realisering van dit soort ideeën zal ongetwijfeld nog veel werk verzet worden, maar uitzichtloos is de situatie met betrekking tot de primaire energiedragers zeker niet.

De beschikbare constructiematerialen daarentegen stellen ons voor veel grotere problemen die naar mijn mening veel moeilijker oplosbaar zullen zijn. Ik zal er daarom iets uitvoeriger op ingaan en wil ter illustratie eerst enkele getallen noemen. De belangrijkste metalen toegepast in warmtetechnische installaties zijn ijzer, chroom en nikkel; beide laatste zijn met name van belang als de beheersing van hoge temperaturen in het geding is. Als de groei in het wereldverbruik van metalen zich op de huidige voet voortzet, zullen de ertsvoorraden van ijzer, chroom en nikkel over respectievelijk honderd, honderd en vijfendertig jaar zijn uitgeput [10]. Voor nikkel werpt deze uitputting zijn schaduw thans reeds vooruit, in de vorm van een relatief sterke prijsstijging. Voor een drietal andere voor de energievoorziening belangrijke metalen valt eveneens een uitputtingstijd van slechts enkele decennia te voorzien. Het betreft hier koper, aluminium en molybdeen. De eerste twee metalen zijn voor het transport van elektriciteit van essentieel belang en nauwelijks vervangbaar; molybdeen is een veel gebruikt legeringselement dat eveneens node gemist zal kunnen worden. Wel is vervanging hiervan eerder denkbaar. Voor vele andere metalen gelden gelijksoortige getallen als voor de zes bovengenoemde; de opsomming daarvan is echter minder belangrijk dan de conclusie die uit deze gegevens volgt, namelijk dat wij met grote snelheid een periode ingaan, waarin een selectiever en soberder gebruik van metalen een onontkoombare eis wordt. Vergelijken wij de uitputtingstijden van de ertsvoorraden met die van de kernspijlstoffen en de steenkool, dan is het tevens evident, dat de beschikbare constructiematerialen de meest ingrijpende en fundamentele beperking bij de energievoorziening zullen gaan vormen. Hoe stringent deze beperking wordt kan met vele

voorbeelden worden geïllustreerd. Een tweetal daarvan, beide betrekking hebbende op ons belangrijkste constructiemateriaal, ijzer, wil ik U ter verscherping van het beeld hier geven: De totale hoeveelheid ijzer die, op niet al te moeizame wijze, nog uit erts kan worden gewonnen, wordt thans geraamd op 100 miljard ton. Zoëven heb ik reeds opgemerkt dat bij een redelijke stabilisatie van het bevolkingsaantal en het energieverbruik, in het midden van de komende eeuw mogelijk 10 miljard mensen elk zouden willen beschikken over gemiddeld 10 kW energie. Om aan deze wens te kunnen voldoen, zou in elektrische centrales tegen die tijd een vermogen van ongeveer 150 miljoen MW(e) geïnstalleerd dienen te zijn (ongeveer 15.000 maal het huidige vermogen in Nederland). Per geïnstalleerde kW vraagt een elektrische centrale bij de huidige bouwwijze echter, globaal, 50 kg ijzer, zodat als de bouwwijze niet veranderd wordt, in totaal 7,5 miljard ton ijzer in deze centrales vastgelegd zouden zijn. Dit is niet minder dan 7,5% van onze thans nog voorhanden ijzervoorraad, en voor alleen dit doel bijzonder veel. Het huidige aandeel van de elektrische centrales in het ijzerverbruik ligt voor de geïndustrialiseerde landen bij 4 à 5%. Opgemerkt kan natuurlijk worden dat nog wel nieuwe ijzerertsvoorraden gevonden zullen worden en dat het mogelijk zal blijken de centrales lichter te construeren. Daarentegen is het evident dat niet al het ijzer over, zeg, 100 jaar nog in bruikbare vorm beschikbaar zal zijn. Aan de genoemde 7,5% kan op grond van deze en andere overwegingen geen exacte betekenis worden toegekend; wel blijkt er echter uit dat het sterk betwijfeld moet worden of er voor de bouw van de gewenste elektrische centrales voldoende ijzer zal zijn.

Ook een tweede getallenvoorbeeld voert tot deze conclusie. In nog niet sterk geïndustrialiseerde landen – als voorbeelden kunnen Polen en Italië genoemd worden – ligt het staalverbruik thans rond 400 kg per inwoner per jaar. Nemen wij, zoals voorheen, weer aan dat de wereldeconomie zich gemiddeld op een matig geïndustrialiseerde situatie, en daarbij op het genoemde staalverbruik zal stabiliseren, dan leert een eenvoudige berekening dat de veronderstelde 10 miljard bewoners de totale thans bekende ijzervoorraad in 25 jaar zullen verbruiken. Praktisch is dit uiteraard onmogelijk en zal een lager staalverbruik noodzakelijk zijn.

Daar de uitputting de meerderheid van de metalen betreft, zal de gedeeltelijke onderlinge vervangbaarheid van de metalen waarschijnlijk geen belangrijke verlichting in de problematiek geven. Om over de hele lijn een vermindering in het metaalverbruik te bereiken zullen bij het construeren een zuiniger materiaalverbruik en een langere levensduur van de installaties meer en meer

uitgangspunt moeten worden. Daarnaast zal een intensief recirculeren van grondstoffen noodzakelijk zijn. Wat hun prioriteit betreft volgen deze materiaalbesparende maatregelen direct op het tot stand komen van de kweekreactor; zij zijn in het algemeen urgenter dan de maatregelen ter besparing op het energieverbruik. Ten aanzien van de beschikbare constructiematerialen is tenslotte de vraag nog van belang, op welke termijn de uitputting zich praktisch, d.w.z. door het oplopen van de prijzen zal gaan manifesteren. Te oordelen naar de gang van zaken bij grondstoffen die reeds dicht bij hun uitputting zijn, treden de eerste effecten daarvan gewoonlijk op dertig tot vijftig jaar voordat bij een onveranderd verbruikspatroon de voorraden uitgeput zouden zijn. Met veel reserve, want elk geval ligt verschillend en veel factoren – waaronder politieke – spelen een rol, kunnen wij verwachten dat voor het belangrijkste materiaal, ijzer, de eerste tekenen van schaarste in het eerste kwart van de komende eeuw te verwachten zijn. Voor een aantal legeringselementen zijn deze effecten, zoals wij zagen, reeds aan de orde, dan wel spoedig te verwachten.

Als derde hoofdvariabele voor de ontwikkeling van de warmte-techniek dient tenslotte de te verwachten vooruitgang in kennis nog te worden geanalyseerd. Aan voorspelling van werkelijk-fundamentele nieuwe ontdekkingen kunnen wij ons niet wagen. Verder behoeft het weinig betoog dat een verdergaande verfijning in de ontwerpmethoden, en een grotere nauwkeurigheid van de ontwerp-gegevens zowel wenselijk zijn, als verwacht mogen worden. De algemene tendens tot materiaalbesparing zal er wat dit betreft onder andere toe leiden dat de geavanceerde werkwijzen van de lucht- en ruimtevaart in vele andere vakgebieden zullen worden overgenomen.

Nieuwe methoden zullen echter tot ontwikkeling moeten worden gebracht voor het ontwerpen op lange levensduur, zodat de ruwe, kwalitatieve schattingen die op dit gebied thans nog domineren, door wetenschappelijke berekeningen kunnen worden vervangen. Het begrip levensduur zal trouwens zelf, onder andere in verband met steeds sneller stijgende materiaalprijzen, opnieuw en scherper gedefinieerd moeten worden. Wij raken bij dit laatste aan de herformulering van begrippen en doelstellingen, die ook bij vele andere wetenschappelijke disciplines noodzakelijk zal worden. Tenslotte kan op de warmtetechniek een grote invloed uitgaan van eventuele ontwikkelingen in onze kennis op het terrein van de klimatologie. Recente onderzoeken laten vermoeden dat door het toenemen van het aantal stofdeeltjes in de atmosfeer de temperatuur op aarde sterk zal kunnen dalen [11]. Als nieuwe onderzoeken dit vermoeden bevestigen, zal het verminderen van de stofuitwerp van

warmtetechnische en andere installaties een sterk toenemende aandacht krijgen. De groei van het inzicht op klimatologisch terrein moet daarom nauwkeurig worden gevolgd.

*Dames en Heren,*

Voor de drie hoofdvariabelen van de warmtetechniek: de primaire energiedragers, de beschikbare constructiematerialen en de stand van de kennis, hebben wij de veranderingen op wat langere termijn die thans voorzien kunnen worden geanalyseerd. Ons doel was langs die weg ons een beeld te vormen van de taken waarvoor de ingenieur, werkzaam in de warmtetechniek, zich over enkele tientallen jaren veel sterker dan thans gesteld zal zien.

In drie punten samengevat blijken deze de volgende te zijn.

Ten eerste: het besparen op de hoeveelheid constructiemateriaal die in de installaties – van allerlei aard – wordt vastgelegd, en wel in het begin op de hoogwaardige en in een latere fase ook op de eenvoudige metalen. De middelen die hem hiertoe ter beschikking staan zullen in het algemeen nauwkeuriger berekeningsmethoden en nauwkeuriger gegevens over de belastingen op de constructie zijn.

Ten tweede: het verlengen van de levensduur van de installaties, waarvoor onder andere op grote schaal en langs wetenschappelijke weg gegevens verzameld zullen moeten worden over de vele factoren die de levensduur bepalen.

Ten derde: het omschakelen bij de ruimteverwarming van primaire energiedragers op elektriciteit. De isolatietechniek en de warmtepomp zullen daardoor, onder andere, aan betekenis gaan winnen. De verbranding van vloeibare en gasvormige brandstoffen in het algemeen zal over enkele tientallen jaren relatief minder belangrijk worden. Aan de kwaliteit van de verbranding zullen echter vanwege de relatief hoge prijs van de brandstoffen en omwille van het milieu hoge eisen worden gesteld.

Als deze taken met een zekere waarschijnlijkheid op langere termijn te verwachten zijn, mag niet voorbijgegaan worden aan de vraag welke consequenties daaruit voor het technisch wetenschappelijk onderzoek en onderwijs in de warmtetechniek voortvloeien.

Allereerst mag dan geconstateerd worden dat veel van het werk dat thans verricht wordt – ik herinner aan de genoemde centrale probleemgebieden en specifieke problemen – op deze taken goed voorbereid en inspeelt, dan wel met slechts kleine koerswijzigingen aan de uitvoering ervan kan bijdragen. Met name denk ik hierbij aan de zorg, die voortdurend aan het verkrijgen van nauwkeuriger ontwerpgegevens besteed wordt, en die mogelijk op sommigen



wel eens een 'onpraktische' indruk maakt. Mits goed geleid, vormt deze inspanning echter de garantie dat de problemen van morgen optimaal zullen kunnen worden opgelost.

Een tweede punt is, dat het rekening houden met meer verwijderde problemen, niet inhoudt dat de problemen van vandaag verwaarloosd mogen of behoeven te worden. Deze vormen integendeel de meest solide basis voor het technisch-wetenschappelijk onderzoek. Bovendien heeft de gemeenschap er recht op dat wij ze mede helpen oplossen.

Gegeven deze twee uitgangspunten, wijzen de thans beschikbare gegevens er echter op dat geleidelijk een toenemende aandacht aan het besparen op materiaal en het verlengen van de levensduur van de installaties zal moeten worden gegeven. De wegen die daarbij bewandeld zullen moeten worden zijn in het voorgaande reeds aangeduid, ik behoef ze hier niet te herhalen. Wel kan het van nut zijn te vermelden, dat vanwege het schaarser worden van bepaalde legeringselementen ook wijzigingen in de fabricage-techniek mede in beschouwing zullen moeten worden genomen.

Mijn tweede conclusie betreft de selectie van onderzoeksprojecten, waarvan de praktische toepassing op grotere schaal eerst over meerdere tientallen jaren kan worden verwacht. Te vaak worden de juist genoemde materiaalaspecten daarbij niet of nauwelijks in de economische evaluatie betrokken. Een concreet voorbeeld hiervan vormt een onlangs voorgestelde zonnecentrale [12].

Een eenvoudige berekening leert dat hierin alleen al voor de pijpen die de zonnestraling moeten absorberen ca. 30 kg hoogwaardig staal per kW elektrisch vermogen nodig zijn. Een minstens even grote hoeveelheid materiaal zal vermoedelijk in de overige onderdelen van de installatie moeten worden vastgelegd. Deze hoge specifieke materiaalinvestering blijft in het voorstel buiten beschouwing, maar zal vermoedelijk op den duur een van de belangrijkste bezwaren tegen toepassing op grote schaal blijken te zijn.

*Dames en Heren,*

In het voorgaande heb ik getracht in vogelvlucht een beeld te schetsen van het verleden, het heden en de waarschijnlijke toekomst van de warmtetechniek, en daaruit enkele conclusies getrokken die voor het onderwijs en onderzoek in dit vakgebied van belang kunnen zijn. De vragen naar de toekomst zijn de hete hangijzers van onze tijd en het is riskant ze aan te vatten. Ik heb het niettemin gewaagd en de tijd zal leren in hoeverre ik daarbij blaren heb opgelopen.

Bij deze officiële aanvaarding van mijn ambt spreek ik mijn dank uit voor het vertrouwen dat mij door mijn benoeming is geschonken. Meer speciaal gaat mijn erkentelijkheid uit naar diegenen, die meer direct bij mijn benoeming betrokken zijn geweest. Gaarne aanvaard ik de uitdaging dit vertrouwen waar te maken.

Voor de wijze waarop U, leden van de hogeschoolgemeenschap, mij in Uw midden hebt opgenomen, ben ik U zeer veel dank verschuldigd. Een geest van openheid en samenwerking is in deze tijd van verandering meer dan ooit onmisbaar. Ik mocht deze aantreffen in een mate die mijn niet geringe verwachtingen ruim heeft overtroffen. Mijn dank hiervoor gaat speciaal uit naar de medewerkers van de afdeling der werktuigbouwkunde en daarvan in het bijzonder die van de vakgroep warmte-, stromings- en proces-techniek.

Hoezeer zowel mijn opleiding in de vliegtuigbouwkunde, als datgene wat ik in mijn opeenvolgende werkkringen bij het Laboratorium voor Aero- en Hydrodynamica te Delft, bij Werkspoor/VMF en bij Staatsmijnen/DSM geleerd heb, van onvervangbare betekenis zijn voor het goed vervullen van mijn ambt, is voor mij sinds enige tijd een dagelijkse ervaring. Ik heb het geluk gehad vrijwel steeds te mogen werken in een sfeer, waarin de voor het ingenieursvak essentiële synthese tussen theorie en praktijk hoog stond aangeschreven. Als ik geleerd heb hoe deze gerealiseerd kan worden, past mij daarvoor op de eerste plaats dank aan mijn leermeesters en medewerkers van de afgelopen jaren. Niet zonder enige weemoed om wat voorbij is, spreek ik deze dank bij deze gelegenheid gaarne in het openbaar uit.

Een wetenschappelijke studie is meer een groei- dan een leerproces. De afloop van een groeiproces wordt, in onderlinge wisselwerking, bepaald door de factoren aanleg en milieu. Passen wij dit in analogie toe op de studie aan deze technische hogeschool, dan vertegenwoordigt U, dames en heren studenten, vooral de factor aanleg. Zelf zal ik in de toekomst een van de componenten van het milieu voor U mogen gaan vormen. Van onze onderlinge wisselwerking stel ik mij bijzonder veel voor.

Ik dank U voor Uw aandacht.

#### Literatuurverwijzingen:

- 1 M. KRETZOI and L. VERTES, *Current Anthropology*, 6 (1965), p. 74-87.
- 2 W. VAN ZEIST, nog te publiceren in: Bericht über das internationale Symposium in Rinteln 1971, Junk, Den Haag.
- 3 O.C. STEWART, in *Man's Role in Changing the Face of the Earth* (Ed. W.L. Thomas), Un. Chic. Press, 1956, p. 115-133.
- 4 Literatuurplaats niet meer bekend.
- 5 Zie bijv. V.G. CHILDE, *Man Makes Himself*, Mentor Books, N. York, 1951.
- 6 A.C.H. VAN DER WOLF, Inaugurele rede, T.H. Eindhoven, 1971.
- 7 Elektriciteit in onze toekomstige energievoorziening; mogelijkheden en consequenties, Publikatie nr. 12 van de Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag.
- 8 Afvalwarmte die bij de elektriciteitsproductie verloren gaat.
- 9 H. HOOG, *De Ingenieur*, 84 (1972), p. A 453-456.
- 10 D.L. MEADOWS, *The Limits to Growth*, Ned. vert. Aula-boeken 500, 1972.
- 11 F.H. SCHMIDT, *De Ingenieur*, 84 (1972), p. A 457-459.
- 12 A.B. MEINEL and M.P. MEINEL, *Physics Today*, 1972, p. 44-50.