

Ir. D. G. H. Latzko

De nucleaire stoomketel:  
mogelijkheden en moeilijkheden



---

UITGEVERIJ WALTMAN - HIPPOLYTUSBUURT 4 - DELFT



# De nucleaire stoomketel: mogelijkheden en moeilijkheden

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING VAN  
HET AMBT VAN BUITENGEWOON HOOGLERAAR  
IN DE AFDELING DER WERKTUIGBOUWKUNDE  
AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL TE DELFT  
OP WOENSDAG 29 NOVEMBER 1961

DOOR

Ir. D. G. H. LATZKO



---

UITGEVERIJ WALTMAN - HIPPOLYTUSBUURT 4 - DELFT



*Mijne Heren Curatoren,  
Mijne Heren Leden van de Senaat,  
Dames en Heren Lectoren en Leden van de Wetenschappelijke Staf,  
Dames en Heren Studenten,  
en voorts Gij allen die door Uw aanwezigheid van Uw belangstelling blijk geeft,*

*Zeer gewaardeerde toehoorders,*

Het onderwerp van deze rede: „De nucleaire stoomketel: mogelijkheden en moeilijkheden”, behoeft in deze formulering wellicht nadere toelichting; met name ben ik U een verklaring schuldig voor de keuze van de term „nucleaire stoomketel” in plaats van de veel meer omvattende en ook gebruikelijker benaming „kernreactoren”, temeer daar deze laatste ook in de naam van de thans aan mij toevertrouwde leerstoel voorkomt. Laat ik vooropstellen dat deze keuze niet is bepaald door de omstandigheid dat deze leerstoel binnen de Afdeling der Werktuigbouwkunde thans is geïntegreerd in de groep „Energievoorziening door middel van stoom”, hoezeer overigens deze integratie als een logische en efficiënte oplossing ook toegejuicht verdient te worden. Evenmin moet het motief gezocht worden in het feit dat mijn eigen ingenieursactiviteiten zich vrijwel uitsluitend op het gebruik van stoom voor industriële processen en voor opwekking van elektrische energie hebben geconcentreerd. De keuze van de term „nucleaire stoomketel” dringt zich a.h.w. op bij het zoeken naar een antwoord op een voor de docent in het vak „constructie van kernreactoren” uitermate klemmende vraag; de vraag nl. of, en zo ja wanneer er een gezonde, d.w.z. op de duur ongesubsidieerde industriële ontwikkeling is te verwachten, die afgestudeerde werktuigbouwkundige ingenieurs in voldoende getale de gelegenheid zal bieden in de constructie van kernreactoren een levenstaak te vinden. Bij het overwegen van deze vraag breekt immers aanstonds



het besef door dat de thans allerwegen verrijzende research-reactoren, waarbij de produktie van neutronen- en gammastraling uit kernsplijtingen doel is en de vrijkomende warmte slechts een afvalprodukt, niet duurzaam tot een dergelijke industriële ontwikkeling zullen kunnen leiden. Want hoe groot ook de drang naar kennis bij de hedendaagse mensheid is en hoe algemeen de waarde van fundamentele research als basis voor wezenlijke vooruitgang ook wordt onderkend, toch lijkt het mij nauwelijks denkbaar dat enige maatschappij een aanzienlijke fractie van haar bruto opbrengsten zou investeren in een research-apparaat dat niet vrij direct tot de verhoging van haar materiële welstand zou bijdragen.

In het geval der kernreactoren leidt dit tot de conclusie dat research-reactoren hun voornaamste bestaansrecht ontleen aan hun functionele taak bij het in exploitatie brengen van een nieuwe energiebron, de kernsplijtingsenergie, of anders gezegd bij de ontwikkeling van kernreactoren die energieproduktie tot hoofddoel hebben en daarbij dus zullen moeten concurreren tegen de reeds ingeburgerde energieproduktie-installaties. Gezien het feit dat de kernsplijtingsenergie in eerste instantie als warmte vrijkomt, betekent dit dat de kernreactor zich zal moeten meten met warmtekrachtinstallaties welke energie onttrekken aan de chemische verbranding van fossiele brandstoffen. Door de uniforme kwaliteit van het eindprodukt (kWh of pkh) zal het nucleaire produktiemiddel deze strijd slechts kunnen winnen als het dit produkt kan leveren of wel tegen lagere kostprijs, of wel onder met andere energiebronnen onbereikbare omstandigheden; zulks afgezien van de mogelijkheden van uitputting der wereldvoorraden aan fossiele brandstoffen, in welk geval het concurrentie-element uiteraard uitgeschakeld zou zijn.

Beperken wij ons voorlopig tot de actuele fase der concurrentie tussen de verschillende energiebronnen, dan kan weliswaar worden vastgesteld dat de kernreactor zich door het buitengewoon geconcentreerde karakter van de brandstof (één gram  $U^{235}$  is immers qua energieinhoud equivalent aan 2800 kg steenkool à 7000 kcal/kg) een vaste plaats heeft veroverd op enkele speciale toepassingsgebieden waarbij de brandstoftoevoer een essentiële moeilijkheid vormt, zoals de voortstuwing van duikboten en de elektriciteitsvoorziening in afgelegen gebieden als Groenland en Antarctica; terwijl op dezelfde gronden de overheersing van

de kernreactor bij de energievoorziening en wellicht ook de voortstuwing van bemande ruimteschepen voorzien mag worden. Al deze toepassingsgebieden zijn echter te gespecialiseerd en vooral ook te veel gebonden aan militaire toepassingen dan dat zij tot een ruime markt voor kernenergiereactoren zouden kunnen leiden. De realisatie hiervan op redelijk korte termijn blijft afhankelijk van de economische concurrentiepositie der kernreactoren. Zoals ik in het hierna volgende deel van mijn rede zal trachten te verklaren is deze concurrentiepositie relatief het gunstigst voor grote of zeer grote produktie-eenheden met lange bedrijfstijden, d.w.z. op die terreinen waar de stoomketel/stoomturbine-combinatie momenteel de alleenheerschappij heeft verworven. De voor de toekomstige reactor-constructeur allesoverheersende vraag naar de kans op een vitale kernreactor-industrie is hiermee teruggebracht tot de vraag of en wanneer de kernreactor zich een vaste plaats zal verwerven in de ketelhuizen van grote thermische elektriciteitscentrales en in tweede instantie wellicht ook in de machinekamers van grote tank- en passagiersschepen. De keuze van de term: „nucleaire stoomketel” acht ik door deze vorm van probleemstelling voldoende gemotiveerd. Alvorens echter nader op de mogelijkheden en moeilijkheden ervan in te gaan, zij het mij veroorloofd U in het kort een indruk te geven van de snelle technische ontwikkeling die sinds de ontdekking van het fundamentele verschijnsel der kernsplijting in 1939 heeft plaatsgehad.

In dat jaar immers ontdekten HAHN en STRASZMANN dat kernen van het element uranium door beschieting met neutrale kerndeeltjes – de zgn. neutronen – tot splijting in twee veel kleinere kernen gebracht konden worden, bij welke reactie een gedeelte der oorspronkelijk aanwezige massa in energie werd omgezet terwijl er bovendien een aantal nieuwe neutronen vrijkwamen. De omzetting van massa in energie overeenkomstig het eerder door EINSTEIN geformuleerde beginsel  $E = mc^2$  moest op grond der massabepalingen vóór en na de splijtingen per gewichtseenheid bijna drie miljoen maal zo veel energie opleveren als de chemische verbranding van steenkool, terwijl het ontstaan van gemiddeld ongeveer twee en een halve nieuwe neutronen in principe de mogelijkheid opende tot een zichzelf onderhoudende kettingreactie.



Reeds vier jaar later, t.w. in 1942, werd deze laatste mogelijkheid door FERMI en zijn medewerkers gerealiseerd in 's werelds eerste kernreactor, de Chicago Pile - 1, kortweg CP-1. Hierbij werd tevens voor het eerst gebruik gemaakt van een remstof voor neutronen, in dit geval grafiet, waardoor de bij de splijting ontstaande zgn. snelle neutronen afgeremd worden tot veel lagere snelheden met als gevolg aanzienlijke vergroting van de kans dat zijzelf weer splijtingen teweeg brengen. Hierdoor was het mogelijk de kettingreactie in stand te houden met natuurlijk uranium als splijtstof, d.w.z. uranium dat slechts voor 0,7% uit de goed splijtbare isotoop  $U^{235}$  en voor de rest uit de nauwelijks splijtbare isotoop  $U^{238}$  bestaat. Aangezien het vermogen waarop de reactor werd bedreven, normaal 0,5 Watt bedroeg (met een korte stijging naar 200 Watt) kon voor de koeling volstaan worden met de omgevende lucht. Hoe primitief ook van uitvoering vertoonde CP-1 reeds de vier essentiële bestanddelen van de volledige kernreactor: splijtstof, remstof, koelmiddel, en regelstaven van neutronenabsorberend materiaal (i.c. Cd en B) om de reactie goed in de hand te kunnen houden.

Het zal U bekend zijn dat het belang van CP-1 spoedig werd overschaduwd door de uitvinding en toepassing van de zgn. atoombom, waarin het kernsplijtingsproces in de vorm van een sterk divergente kettingreactie wordt gerealiseerd, doordat vrijwel alle vrijkomende neutronen voor het teweegbrengen van nieuwe splijtingen worden gebruikt. Deze snelle divergentie leidt tot een enorme energieproductie in een fractie van een seconde, tegenover de constante energielevering per tijdseenheid welke in een kernreactor wordt nagestreefd.

De atoombom en daarmee verband houdende procédés zouden in het kader van deze rede onbesproken kunnen blijven, ware het niet dat de uitvoerbaarheid ervan gebonden is aan de aanwezigheid van hooggeconcentreerde splijtstof, d.w.z. materiaal dat vrijwel geheel bestaat uit gemakkelijk splijtbare atomen. Zoals wij reeds zagen voldoet het natuurlijke uranium met zijn 0,7% goed splijtbare  $U^{235}$  atomen geenszins aan deze eis. Om het geschikt te maken voor toepassing in de atoombom stonden en staan twee principieel verschillende wegen open. De eerste, meest directe, is de afscheiding van  $U^{235}$  uit het natuurlijke uraan met fysische middelen; deze weg werd in de oorlog gekozen door de Verenigde Staten in de hiertoe gebouwde gas-

diffusie-installatie te Oak Ridge. Deze weg heeft het grote bezwaar van een formidabel verbruik aan elektrische energie: zo verbruiken de Amerikaanse diffusiefabrieken ongeveer evenveel elektrische energie als geheel Frankrijk.

Het is duidelijk dat andere landen zoals Engeland en Frankrijk, die niet over zulk een buitengewoon ruim reservoir van goedkope elektrische energie konden beschikken als de Tennessee Valley Authority (TVA), bij hun streven naar een grondstof voor atoombommen de andere weg kozen, die erop berust dat het slecht splijtbare  $U^{238}$  door neutronenvangst en daarop volgende afstoting van elektronen overgaat in het uitstekend splijtbare plutonium-239. Deze conversie van  $U^{238}$  in  $Pu^{239}$  kan plaatsvinden in een met natuurlijk uraan werkende kernreactor. Het gevormde plutonium kan na verwijdering van de splijtstof uit de reactor langs chemische weg van het uraan worden gescheiden. Zo ontstonden de eerste „plutoniumovens” van Windscale en Marcoule. Al werd hierbij de warmte nog door luchtkoeling via een schoorsteen afgevoerd, toch was hiermee de weg gewezen naar de eerste met natuurlijk uraan gestookte combinatie van plutonium- en elektriciteitsproductieinstallatie, welke in november 1956 te Calder Hall in Engeland in bedrijf werd gesteld. Het technische succes van deze en een zevental gelijke reactoren te Calder Hall en Chapel Cross alsmede het door de Suezcrisis aangewakkerde streven naar maximale autarkie in de energievoorziening hebben sindsdien in Groot-Britannië geleid tot de bouw en projectering van een achttal grote elektrische centrales volgens dit principe met een totaal vermogen van ca. 3600 MW<sub>e</sub>; hierbij is het accent verschoven van plutonium- naar elektriciteitsproductie. In Frankrijk heeft een soortgelijke ontwikkeling op bescheidener schaal plaats. Al deze reactoren werken met metallisch natuurlijk uraan als splijtstof, grafiet als remstof en CO<sub>2</sub>-gas als koelmiddel; als gevolg van de lage concentratie aan splijtbaar materiaal in het natuurlijke uraan en de relatief zwakke neutronen-afremming in grafiet zijn al deze reactoren gekenmerkt door hun enorme afmetingen.

In de Verenigde Staten had zich inmiddels op basis van het uit de diffusiefabrieken verkregen sterk aan splijtbaar  $U^{235}$  verrijkte uraan een geheel andere ontwikkeling op reactorgebied voltrokken, nl. die naar zeer compacte reactoren voor de voortstuwing van onderzeeboten, welke culmineerde in de succes-



volle proeftocht van de eerste atoomduikboot, de NAUTILUS, in januari 1955. Dit succes was o.a. in de hand gewerkt door de keuze van licht water ( $H_2O$ ) als remstof; licht water heeft nl. veruit de sterkste remwerking voor neutronen, waardoor zeer compacte bouw van de reactor mogelijk wordt, terwijl bovendien toepassing van een afzonderlijk koelmiddel overbodig wordt omdat het water ook deze functie uitstekend vervult. Door de sterke neutronen-absorptie van licht water vereist deze remstof- en koelmiddelkeuze echter ten enenmale de toepassing van verrijkt uraan. Sinds haar succesvolle proeftochten is de NAUTILUS gevolgd door ruim veertig in de vaart of in aanbouw zijnde duikboten met vrijwel gelijke voortstuwingsreactoren. Tevens zijn echter in de Verenigde Staten op basis van deze verrijkt uraan-licht water technologie een aantal grote elektriciteitscentrales tot stand gekomen, waarvan de eerste met een oorspronkelijk vermogen van 60 MW<sub>e</sub> in december 1957 te Shippingport (Pennsylvania) in bedrijf is genomen en sindsdien met succes is bedreven.

Uit het voorgaande uit de aard der zaak uitermate summiere historische overzicht is het aan de meesten Uwer trouwens welbekende feit naar voren gekomen, dat men er binnen 20 jaar na de ontdekking van het grondprincipe der kernsplijting in is geslaagd hierop berustende voortstuwingsinstallaties en elektriciteitscentrales op volle schaal niet alleen te bouwen, maar ook gedurende enige jaren met opmerkelijk succes te bedrijven. Het is evident dat geen enkele techniek een dergelijk stormachtig ontwikkelingstempo kan volhouden, temeer niet waar de geschiedenis bewijst dat vrijwel iedere nieuwe technologie een zekere wachttijd heeft doorgemaakt tussen het tijdstip waarop haar technische uitvoerbaarheid was aangetoond en het tijdstip waarop zij volledig in het economisch leven was geïntegreerd. Als een uit vele voorbeelden van dit verschijnsel zij hier de stoomturbine genoemd, wier uitvinder Sir CHARLES PARSONS zes jaar na de eerste succesvolle loop van dit machinetype genoodzaakt was zelf een met stoomturbines uitgeruste elektrische centrale te bouwen en gedurende ca. 10 jaar te bedrijven, alvorens het scepticisme der toenmalige elektriciteitsproducenten enigszins was overwonnen. Een wachttijd van ca. 15 jaar die rond 1890 een teleurstelling betekende voor een handjevol in

hun ontwerp gelovende technici, zou echter rond 1960 weinig minder dan een ramp betekenen voor de vele met regerings-subsidies opgerichte ontwikkelingslaboratoria en op gelijke wijze op toeren gebrachte industrieën in tal van landen. Vandaar het urgente karakter van de hierboven gestelde vraag naar de industriële ontplooiing van de nucleaire stoomketel.

Het feit dat deze industriële ontwikkeling momenteel op losse schroeven staat, omdat de nucleaire stoomketel qua economie nog ten achter staat bij de ca. 40 jaar oudere met fossiele brandstof gestookte waterpijpketel is de laatste jaren zodanig gepubliceerd, geadverteerd en gecommentarieerd dat ik het zonder verder commentaar als uitgangspunt voor mijn verdere betoog meen te mogen gebruiken. Deze economische achterstand kan als volgt nader worden omschreven: de aanzienlijke stijging der kapitaalkosten wordt onvoldoende gecompenseerd door de tot nu bereikbaar gebleken verlaging der brandstofkosten.

Aan de aanzienlijk hogere kapitaalkosten zijn een aantal technische factoren debet, zoals de enorme afmetingen en gewichten bij de grafietgemodereerde reactoren, de noodzaak tot vèrgaande toepassing van austenietisch roestvrij staal en andere speciale constructiematerialen bij de waterreactoren, de door gebrek aan bedrijfservaring noodzakelijk geachte verdubbeling en verdrievoudiging van beveiligingssystemen en zulks meer. Daarbij komen nog de aanzienlijk hogere civiele bouwkosten door de meters dikke betonnen afscherming tegen radio-actieve straling uit de reactor, alsmede het feit dat de installaties voor de verwerking van radio-actieve afval uit de reactor vooral bij de watergemodereerde types te wegvallen van het conventionele brandstoffen- en atransport meer dan te niet doen. Tenslotte zijn er dan nog de hoge ontwikkelingskosten die de reactorfabrikant zich moet getroosten voor nieuwe berekenings- en fabricage-methoden, uitzonderlijk strenge kwaliteitscontrole en speciale scholing van personeel, en die hij door de geringe omzet en snelle technische ontwikkeling veelal op een of twee opdrachten moet laten drukken.

Minder evident is op het eerste gezicht wellicht de geringe daling der brandstofkosten bij toepassing van nucleaire stoomgeneratoren, vooral wanneer men denkt aan de hierboven genoemde equivalentie van 1 gram  $U^{235}$  met 2800 kg steenkolen. Ook hiervoor zijn echter een aantal voorname redenen aan te



voeren. In de eerste plaats moet het uraan, alvorens in de besproken reactortypes te kunnen worden „verstoekt”, worden verwerkt tot aan nauwkeurige toleranties onderworpen en met kostbare metaallegeringen beklede staaf- of plaatvormige elementen, hetgeen gepaard gaat met aanzienlijke fabricagekosten. In de tweede plaats zal de nucleaire stoomketel om „überhaupt” te kunnen werken, een bepaalde hoeveelheid splijtstof moeten bevatten, de zgn. kritische massa welke dus een om technische redenen onmisbare aanzienlijke ijzeren voorraad vormt. Als derde reden komt de onvolledige „verbranding” van de aan de reactor toegevoerde splijtstof naar voren: reeds lang voordat alle splijtbare atomen zijn opgebruikt moet de splijtstof wegens reactiviteitsverlies en/of stralingsschade weer uit de reactor worden verwijderd. De restwaarde aan onverbrand  $U^{235}$  en in de reactor gevormd plutonium is dan nog zo hoog dat de afgewerkte splijtstof, na een zgn. „afkoelingsperiode” van enkele maanden ter vermindering van de radioactiviteit, naar een heropwerkingsbedrijf (reprocessing plant) getransporteerd moeten worden, waar deze waardevolle bestanddelen moeten worden afgescheiden. Deze heropwerkingskosten, uiteraard vrij aanzienlijk omdat de scheidingsprocessen in zwaar afgeschermden ruimten met afstandsbediening moeten plaatsvinden, komen eveneens ten laste van de brandstofkosten der nucleaire stoomgeneratoren, evenals de opslag- en transportkosten van de buiten de reactor omlopende splijtstofmassa's. Tenslotte ondervinden deze brandstofkosten nog nadelige invloed van de bij de besproken reactortypes geldende temperatuur-limiteringen, waardoor het thermisch rendement der gehele centrale ondanks het ontbreken der schoorsteenverliezen ten hoogste ca. 85% van dat ener moderne kolen- of oliegestookte centrale zal bedragen.

Wellicht verwacht U van mij na deze – overigens geenszins op volledigheid aanspraak makende – opsomming van kwalitatieve gegevens nu enige concrete cijfers omtrent de relatieve economie van de nucleaire en conventionele stoomgeneratoren. Ik meen hiervan echter te moeten afzien wegens de zeer betrekkelijke waarde van dergelijke cijfers, die immers van type, grootte, plaatselijke omstandigheden en vooral ook van de commerciële politiek der aanbiedende firma afhangen. De enige cijfers die mij hier wel van belang lijken zijn de aandelen van

kapitaalkosten en brandstofkosten in de totale kWh-prijs; deze zijn nl. globaal gesproken, d.w.z. middelend over de verschillende groottes en types, respectievelijk ca. 60% en 30%, d.w.z. ongeveer het omgekeerde van wat momenteel in conventionele thermische centrales gebruikelijk is. Hieruit volgt direct dat een verbetering in de concurrentiepositie der kernenergiecentrales allereerst gezocht moet worden in verlaging der kapitaalslasten.

Een directe weg hiertoe, die meer op bedrijfseconomisch dan op technisch gebied ligt, is verhoging van eenheids grootte en belastingsfactor. Zowel in de V.S. als in Groot-Brittannië zijn momenteel eenheden in bestelling van 250 tot 325  $MW_e$ , terwijl Amerikaanse firma's zelfs offerte willen maken voor eenheden van 500  $MW_e$ . Bij deze en kleinere nucleaire eenheden wordt gerekend op belastingsfactoren van 75 tot 90%. Het is duidelijk dat dergelijke eenheids groottes alleen toegepast kunnen worden in voorzieningsgebieden met een aanzienlijk geïnstalleerd vermogen, verbonden door een krachtig, d.w.z. op het transport van grote hoeveelheden elektrische energie berekend koppelnet. De genoemde hoge belastingsfactoren voor de nucleaire eenheden zijn zelfs in dergelijke grote netten met voldoende grondlast in feite niet meer dan een lapmiddel; immers door toewijzing van steeds meer grondlast aan de kernenergie gaat men de bedrijfsomstandigheden der moderne conventionele eenheden steeds ongunstiger beïnvloeden.

Uiteindelijk dient de nagestreefde verlaging der kapitaalkosten dus toch verkregen te worden door technische vervolmaking der nucleaire stoomgeneratoren, waarvoor in het bijzonder gedacht moet worden aan opvoering van het specifieke vermogen, verhoging der temperaturen ter verbetering van het rendement dat door de fysisch gegeven grootte van de nucleaire vuurhaard zowel kapitaal- als brandstofkosten beïnvloedt, vereenvoudiging der constructie en toepassing van goedkoper materiaal soorten. Een der vele interessante pogingen tot verwezenlijking van met name de twee eerstgenoemde verbeteringen is de ontwikkeling van nucleaire oververhitters als integraal bestanddeel der tegenwoordige kokend-waterreactoren. Ik noem uit de veelheid der lopende ontwikkelingen deze ene met name, omdat hier sprake is van voortbouwen op een reeds beproefde technologie, waardoor de ervaringen verkregen bij bouw en bedrijf der voor-



gaande generatie waterreactoren direct tenutte gemaakt zullen kunnen worden.

Deze laatste overweging verdient trouwens in een breder perspectief geplaatst te worden door in het algemeen te stellen, dat de bedrijfsresultaten verkregen met de eerste generatie installaties op industriële schaal bepalend zullen zijn voor de mogelijkheden der nucleaire stoomketels tot overwinning der gesignaleerde economische moeilijkheden. Deze stelling is op zich zo evident dat uitspreken ervan op deze plaats een banaliteit moet lijken. Temeer omdat een ieder die met de geschiedenis der werktuigkundige techniek op de hoogte is, weet hoe het hierboven geciteerde voorbeeld der stoomturbine er slechts een van velen is die allen tonen hoe nieuwe concepties zich slechts door een moeizame serie uit bedrijfservaringen gepuurde constructieve verbeteringen een plaats in de zon van het economische succes hebben veroverd. A fortiori moet dit gelden voor nucleaire installaties, waarvan twee ook voor de economie essentiële aspecten, nl. de beveiligingen en het onderhoud, volledig bepaald zijn door overwegingen van radioactiviteit, d.w.z. berusten op volkomen nieuwe gedachtengangen en technieken, wier juistheid of onjuistheid bepalend kan zijn voor succes of falen van een reactortype en slechts door praktijkervaring kan worden aangetoond.

Wanneer ik desondanks gemeend heb deze stelling te moeten poneren dan is het uit verontrusting over het gemak waarmee zelfs in vakkringen soms deze logische weg der vervolmaking terzijde geschoven wordt ten gunste van op papier aantrekkelijker, radicaal nieuwe concepties. Alsof het mogelijk geweest zou zijn nu in 7 uur en straks wellicht in  $2\frac{1}{2}$  uur over de Atlantische Oceaan te vliegen zonder het thans in retrospectie zo primitieve geknutsel der gebroeders WRIGHT. Deze aarzeling om de ontwikkeling der thans bouwrijpe reactortypes af te wachten lijkt mij te meer misplaatst omdat de resultaten – positief of negatief – zo betrekkelijk nabij zijn. Momenteel zijn immers reeds ruim twintig stationnaire eenheden met een totaal vermogen van ca. 1400 MW<sub>e</sub> in bedrijf; ruim vijftig van dergelijke eenheden met een totaal vermogen van meer dan 6000 MW<sub>e</sub> zullen dit voorbeeld binnen de komende 5 jaar volgen en hierbij al gedeeltelijk de resultaten der voorafgegane bedrijfservaringen incorporeren. Is het derhalve niet logisch, binnen de door de

nationale economie van ieder land bepaalde grenzen letterlijk en figuurlijk zo constructief mogelijk aan deze ontwikkeling mee te werken, en de vorming van een bezonken oordeel over mogelijkheden versus moeilijkheden der nucleaire stoomketels tot de tweede helft van deze decade op te schorten?

Het beeld der mogelijkheden van de nucleaire stoomopwekking zou niet volledig zijn zonder hierbij ook de in de aanhef reeds genoemde fase te betrekken, waarbij optimale gebruikmaking van de dan nog beschikbare wereldenergievoorraden primair en de energieprijzen relatief secundair zal zijn.

Elke voorspelling omtrent het tijdstip van aanbreken dezer tweede fase moet enerzijds berusten op verwachtingen omtrent de toekomstige omvang der wereldbevolking en van haar hoofdelijk energieverbruik, anderzijds op aan periodieke correcties onderhevige ramingen der geologische voorraden aan fossiele en nucleaire brandstoffen. Tenslotte komt de momenteel nog volledig open vraag omtrent de toekomstige bijdrage van beheerste kernfusie tot de energiehuishouding de onzekerheid nog aanzienlijk vergroten. Het lijkt dus niet verantwoord verder te gaan dan vermelding van een grootte-orde in die zin, dat er op basis van de thans bekende geologische brandstofvoorraden en de thans gebruikelijke toepassingsmethoden hiervan nog voor tenminste enkele eeuwen aan de te verwachten vraag naar energie voldaan zal kunnen worden.

Het is nochtans duidelijk dat indien men op grond van succesvolle overwinning der hierboven geschetste economische moeilijkheden een gestage groei van het uit kernsplijting verkregen aandeel in de energievoorziening verwacht, het noodzakelijk wordt binnen afzienbare tijd nucleaire stoomgeneratoren te ontwikkelen met een veel doelmatiger gebruik van de toegevoerde splijtstof dan in de thans beproefde types bereikbaar is. Hiermee bedoel ik reactoren met een hoge conversie van het van nature niet splijtbare U<sup>238</sup> in plutonium of van het evenmin splijtbare natuurlijke element thorium in de goed splijtbare uranium-isotoop U<sup>233</sup>. Momenteel zijn hiervoor reeds een aantal concepties in ontwikkeling, zoals de homogene waterige oplossings- en suspensie-reactoren, de gesmolten fluoriden-reactor en de met natrium gekoelde snelle kweekreactor. Al deze en soortgelijke types zijn echter nog in het laboratorium-



of hoogstens in het prototypestadium van hun ontwikkeling. Daardoor is het, mede gelet op de hierboven genoemde overheersing der kapitaal- boven de brandstofkosten, m.i. niet verantwoord aan de gunstiger brandstofeconomie dezer concepties à priori de conclusie van een lage kWh-prijs te verbinden en ze op grond hiervan reeds tot doelstelling voor de op economische concurrentie gerichte eerste fase te kiezen.

Tenslotte zou ik omtrent deze reactoren der tweede, brandstofeconomisch bepaalde fase nog willen opmerken, dat een hoog temperatuurniveau ter verkrijging van een hoog thermisch rendement mij meer dan ooit van belang lijkt, omdat men er dan zeker met alle middelen naar zal moeten streven zo min mogelijk warmte ongebruikt met het condensor-koelwater weg te spoelen.

Reeds meermalen heb ik in het voorgaande de problematiek der mogelijkheden en moeilijkheden van de nucleaire stoomketel gecorreleerd met die van de werktuigkundige ingenieur die op dit terrein een levenstaak hoopt te vinden. Aan de hand van de hierboven geschetste indeling in twee naar doelstelling verschillende ontwikkelingsfasen zou ik ook de taakstelling van de werktuigkundige ingenieur willen onderverdelen.

In de eerste fase, waarin het er op aan zal komen nucleaire stoomgeneratoren van beproefd principe economisch concurrerend te maken, verwacht ik voor de werktuigkundige een leidende taak. Zoals reeds uiteengezet zal het hier in de eerste plaats noodzakelijk zijn de kapitaalkosten te verlagen door opvoering van het specifieke vermogen en vereenvoudiging der toegepaste constructies, c.q. verbetering der fabricage-procédé's. Het eerste impliceert maximale warmte-extractie en vereist derhalve vèrgaande verbreding en verdieping van de kennis op het terrein der toegepaste warmteoverdracht en stromingsleer. Het tweede vormt een fascinerend werkterrein voor de constructeur „pur sang”, die hiertoe over meer dan gemiddeld inzicht in de sterkteleer en gedeeltelijk ook in het gebruik van elektromechanische componenten zal dienen te beschikken, en voor de fabricage-specialist, waarbij speciaal te denken valt aan de lasdeskundige. Hand in hand met deze bouwers van de nucleaire stoomketel zal de m.i. bij voorkeur eveneens werktuigkundige „systems engineer” er voor moeten zorgen, dat deze stoomketel met de overige componenten der centrale- of

scheepsvoortstuwingsinstallatie tot een bedrijfstechnisch en economisch optimale eenheid wordt geïntegreerd. Zij allen zullen hun taak echter slechts met succes kunnen verrichten in nauwe samenwerking, dikwijls zelfs in een tijdelijke symbiose met bekwame, progressief en tevens nuchter-kritisch denkende bedrijfs- en rederij-ingenieurs, die evenals bij de thans gebruikelijke conventionele installaties overwegend van werktuigkundigen huize zullen zijn.

Bij de ontwikkeling der thans nog in het experimentele stadium verkerende reactoren voor het tweede, „spleijstofconserverende” stadium zal de taak van de werktuigkundige ingenieur daarentegen voorlopig nog veelal een dienende zijn. Hij zal, op soortgelijke wijze als zijn vakgenoot in de research-laboratoria der grote chemische concerns, de fysicus en chemicus moeten helpen diens ideeën te concretiseren en vervolgens te toetsen in staal en plastic. Hij zal zich daartoe een zo grondig mogelijke kennis van de fysische en chemische grondslagen van het te bestuderen proces eigen moeten maken, maar bovenal de denk- en werkwijze van de onderzoeker dienen te leren begrijpen en waarderen, een werkwijze die de uit het produktiebedrijf afkomstige werktuigbouwer vaak zo zeer vreemd is dat hij er in eerste instantie en volkomen ten onrechte niets meer dan een breiwerk van PENELOPE in meent te ontdekken!

In beide rollen, leidend of dienend, ligt er naar mijn gevoel voor de werktuigbouwer bij de ontwikkeling van nucleaire stoomketels een grote hoeveelheid waarlijke en diepe bevrediging in het werk opgesloten. En is deze bevrediging in en door het werk niet het mooiste vooruitzicht dat een opleiding kan bieden?

*Zeër gewaardeerde toehoorders,*

Bij de aanvaarding van mijn ambt als buitengewoon hoogleraar aan de Technische Hogeschool te Delft moge ik Hare Majesteit de Koningin mijn eerbiedige dank betuigen voor deze benoeming.

*Mijne Heren Curatoren,*

Voor Uw voordracht die geleid heeft tot mijn benoeming ben ik U zeer erkentelijk. Ik hoop het hieruit gebleken vertrouwen niet te beschamen.



*Mijne Heren Leden van de Senaat,*

In Uw kring opgenomen te worden, beschouw ik als een grote eer.

*Mijne Heren Hoogleraren van de Afdeling der Werktuigbouwkunde,*

Ik ben U dankbaar voor de collegiale wijze waarop U mij sinds mijn benoeming bent tegemoet getreden. Van mijn kant zal ik er naar vermogen en binnen de beperkte tijd die mij hier toe ter beschikking staat naar streven een nuttig lid van Uw Afdeling te worden.

Speciaal U, Hooggeleerde VAHL, wil ik hartelijk danken voor het geduld en de helderheid, waarmede U meermalen mijn vragen hebt beantwoord.

*Hooggeleerde Broeze, Hooggeleerde Van Lier,*

Zoals ik reeds in de aanvang opmerkte, acht ik de integratie van mijn vak in de groep „energievoorziening door middel van stoom” een logische en vruchtbare beslissing. In de korte tijd van mijn werk in Delft is er mijnerzijds naast deze objectieve instemming grote persoonlijke waardering gegroeid voor het samenspel in deze groep. Mijn wens: „Ich sei, gewährt mir die Bitte, in Eurem Bunde der Dritte”, is inmiddels bezig werkelijkheid te worden. Of eigenlijk zou ik moeten zeggen „der Vierte”, want met U, waarde VINKE, zal de band der samenwerking naar ik verwacht zo mogelijk nog nauwer zijn.

*Hooggeleerde Went,*

Bij de jarenlange en diepgaande studies omtrent de bouw van een eventuele eerste Nederlandse kernenergiecentrale heb ik Uw scherpe inzicht in de „kernvraagstukken der kernreactoren” leren kennen en hoogachten. Ik hoop bij het nieuwe contact in T.H.-verband, voortvloeiend uit de veelvuldige aanrakingspunten tussen ons beider vakken, nog dikwijls een beroep te kunnen doen op dit inzicht.

*Hooggeachte Directie en Bestuur van het P.E.N.,*

De toestemming die U mij hebt verleend om naast mijn taak bij het P.E.N. dit buitengewoon hoogleraarschap te mogen vervullen, stemt mij tot grote dankbaarheid. In het bijzonder wil ik U, hooggeachte Heer DEN BOESTERD, persoonlijk danken voor de positieve hartelijkheid waarmede U op mijn benoeming hebt gereageerd, ongeacht het feit dat mijn beschikbaarheidsgraad voor het P.E.N. er met ca. 30% door wordt verminderd. Ik hoop te kunnen bewijzen dat door opvoering van het vermogen mijn produktie voor het bedrijf niet of nauwelijks zal behoeven te dalen.

*Collega's van het P.E.N.,*

Ook U wil ik gaarne danken voor het enthousiasme waarmede U mijn benoeming hebt ontvangen. Deze dank geldt in het bijzonder de bedrijfsleiding der Centrale Velsen, omdat mijn geregelde afwezigheid aldaar meer reden tot kritiek dan tot waardering zou kunnen geven. Dat dit niet het geval is bewijst opnieuw de goede ploeggeest, die ik van mijn kant hoop te honoreren door een extra inspanning in de tijd dat ik er wèl ben.

*Voormalige chefs, collega's en medewerkers uit vorige werkkringen,*

U allen wil ik bij deze gelegenheid dank zeggen voor Uw bijdragen tot mijn vorming. In het bijzonder prijs ik mij gelukkig om de constructieve scholing op stoom- en warmtetechnisch gebied die ik bij de N.V. Werkspoor heb ontvangen. Het verheugt mij daarom speciaal met U, hooggeleerde LAMERIS, destijds mijn chef, thans bij de opleiding van ingenieurs-constructeur op dit vakgebied te zullen mogen samenwerken.

*Dames en Heren Studenten,*

De traditie getrouw richt ik mij het laatst tot U, doch ik hoop dat U uit mijn voordracht reeds hebt kunnen beluisteren dat dit „last, but certainly not least” is. Medewerking te verlenen aan de opleiding van enkelen Uwer is voor mij dan ook minder de eerste plicht verbonden aan mijn ambt, dan wel het eerste motief



tot aanvaarding ervan. Des te meer betreur ik het de vraag naar de praktische ontplooiingsmogelijkheden voor eventuele afgestudeerden in dit specialisme niet te hebben kunnen beantwoorden. Wellicht hebben enkelen Uwer mij bij de behandeling ervan zelfs nog van ongegrond optimisme beticht, omdat ik de mondiale in plaats van de nationale kernenergie-situatie tot uitgangspunt van mijn beschouwingen heb genomen. Dit mogelijke verwijt meen ik echter te kunnen weerleggen niet zozeer door verwijzing naar de komende Europese gemeenschappelijke markt, — want dit zouden de sceptici onder U idealistische praat kunnen noemen — maar door verwijzing naar de opdrachten die de Nederlandse industrie in de laatste jaren tegen uitermate scherpe concurrentie op dit terrein heeft weten te verwerven. Zij is hiermede op weg het veelvuldig geciteerde voorbeeld der Zwitserse machine-industrie te volgen, die voor vele harer produkten een Europese reputatie had opgebouwd lang voordat er sprake was van een binnenlandse markt. Of onze nationale industrie op het terrein der nucleaire stoomgeneratoren inderdaad zo ver zal kunnen komen hangt van vele factoren af; zeker is echter dat zij het alleen zal kunnen blijven *proberen* als zij de beschikking krijgt over een groeiende staf van bekwame, toegewijde ingenieurs-constructeur en „systems engineers”. Juist in de komende periode van strijd en overgang tussen fossiele en nucleaire stoomopwekking zullen deze ingenieurs geen beperkte „kernenergie-specialisten” mogen zijn, doch lieden die tenminste het gehele terrein der energievoorziening door middel van stoom als hun specialisme beschouwen. Dergelijke ingenieurs voor de praktijk te mogen opleiden acht ik een taak waarvoor ik mij graag ten volle zal inzetten.

Ik dank U voor Uw aandacht.