

Een elektrische centrale, gestookt met fossiele brandstof, zonder lucht- en watervervuiling

Citation for published version (APA):

Lameris, H. (1972). *Een elektrische centrale, gestookt met fossiele brandstof, zonder lucht- en watervervuiling*. 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

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

3 JULI 1972

Een Elektrische Centrale, gestookt met fossiele brandstof, zonder Lucht- en Waternvervuiling

Afscheidscollege van

Prof. ir. H. Laméris

uitgesproken op 30 juni 1972 aan de Technische Hogeschool te Eindhoven

1. Inleiding

Bij een afscheidscollege, aan het einde van een loopbaan als hoogleraar, ligt het voor de hand dat men omkijkt naar de inaugurele rede die men aan het begin van die loopbaan hield.

En toch is het niet mijn bedoeling U nu een overzicht te geven van de ontwikkeling die zich in het tijdsbestek tussen die beide toespraken heeft afgespeeld, resp. hoe toen verkondigde visies juist zijn gebleken. En dit te meer omdat mijn leeropdracht zich in de loop der jaren van toepassing van de warmte-techniek op de conventionele keteltechniek heeft uitgebreid met de behandeling van roterende stromingsmachines zoals stoom- en gasturbines, compressoren, pompen en ventilatoren, aldus omvattende het werktuigbouwkundige gedeelte van de moderne energievoorziening.

Nog minder is het mijn plan voorspellingen omtrent de toekomstige ontwikkelingen te doen. Wat ik aan dit soort rapporten heb meegemaakt bleek altijd, na betrekkelijk korte tijd reeds, niet uit te komen, wat begrijpelijk is, want tot voor kort waren ze gebaseerd op geëxtrapoleerde statistieken van gegevens uit het verleden, opgemaakt naar de intuïtie van wijze mannen, maar zonder een Jules Verne-achtige fantasie, wat eigenlijk wel nodig zou zijn geweest. Vandaag gaat men wetenschappelijker te werk. Men drukt de intuïtie uit in factoren die elk voor zich van een bepaalde invloedssfeer afhankelijk zijn. Uit de variatie van elk dezer factoren kan de invloed op het geheel worden bepaald en zo komt men tot een samenstel van regelende maatregelen die de beoogde en gewenste ontwikkeling in de hand werken.

Het moeilijkste daarbij is misschien nog wel het schatten van de toename in vondsten aan bodemschatten.

Dit systeem dat op verzoek van de Club van Rome door prof. Forrester van het M.I.T. wordt toegepast, belooft met de correcties door prof. Van der Grinten aangebracht, een betrouwbaardere voorspelling dan ik ooit zou kunnen geven. Als ik het dus hedenmiddag niet over de ontwikkeling in de voorbij gegane tijd en niet over die in een verder weg liggend tijdperk zal hebben, dan blijft alleen het huidige en zeer nabij gelegen tijdstip als *trait d'union* over. En het zal U niet verbazen als ik ook daarvan slechts een heel klein onderdeel zal beschouwen, dat echter wel belangrijk is en in ons aller leven en welzijn heel diep ingrijpt.

Wij realiseren het ons slechts zelden, maar hoe droef zou het met ons persoonlijke bestaan en met de economie van ons land gesteld zijn, wanneer er een ernstig manco kwam in de ons ten dienste staande elektrische energie. De stakingen in de steenkoolwinning in Engeland in de maanden januari en februari zijn er een duidelijk voorbeeld van.

De behoefte aan deze vorm van energie, die een maatstaf is voor het peil van onze welvaart en ons welzijn, verdubbelt zoals U bekend is sinds 1930 in 10 jaar (met één uitzondering tijdens de Tweede Wereldoorlog).

Deze verdubbelingstijd is ruwweg nog steeds geldig. Zij is er, in combinatie met de bevolkingsdichtheid, de oorzaak van dat ons land het hoogste energieverbruik per km² ter wereld heeft. (Zie fig. 1.).

Door deze grote energie-dichtheid zijn de bezwaren welke aan de energie-opwekking zijn verbonden in ons land klemmender dan waar ook ter wereld. Wij zullen er dus echt iets aan moeten doen.

2. Huidige situatie

Daarom zou ik gaarne enige aandacht willen besteden aan de voorzieningen welke getroffen moeten worden, om ook op korte termijn aan deze nog steeds toenemende energiebehoefte te voldoen en om de zich daarbij voordoende bezwaren zoveel mogelijk te vermijden.

In dit gebeuren spelen een rol:

- 1 de kerncentrale, het type kernreactor, en de daarin gebruikte splijtstof;
- 2 de verspreiding van radioactiviteit;
- 3 de conventionele centrale, gestookt met fossiele brandstof (kolen, olie of aardgas);
- 4 de luchtvervuilingsproblemen;
- 5 de koelwaterproblemen die voor de beide typen centrales bestaan en daarmee samenhangend
- 6 de warmteoverdracht aan de omgevende lucht hetzij via koeltorens, hetzij direct, waarmee
- 7 het lawaai probleem geïntroduceerd wordt.

ad 1 (kerncentrale)

Het aantal voorspellingen omtrent de snelle toename in ons land van door kernenergie opgewekte stoom, welke dan via stoomturbines en generatoren in elektrische energie wordt omgezet, is legio.

In 1959 schatte men dat in 1975 in ons land 43% van de opgewekte elektrische energie door kerncentrales zou worden geleverd. (Ik noemde dat in mijn inaugurele rede een optimistisch cijfer).

In werkelijkheid staat er in Dodewaard één centrale van 50 MW op een totaal opgesteld vermogen van 10.000 MW en komt er in 1974/75 in Borsele één bij van 470 MW, dus dan in totaal 520 MW op 12.000 MW d.w.z. 4,3%. Er zijn plannen om verder te gaan met kerncentrales en wel met een of twee van 600 MW.

Als deze in 1980 gereed zijn, staat er 1720 MW op een opgesteld vermogen van 20.000 MW, dat is 8,6%. Tot heden zijn de aanschaffingskosten nog zeer hoog en de jaarkosten alleen bij continu vollast bedrijf misschien concurrerend.

Hierbij is verondersteld dat de conventionele centrale gedurende die jaren relatief niet goedkoper zal worden. Het zal tenslotte de economie zijn die beslist in welke richting de ontwikkeling zal gaan en niet de wensdroom van de technicus, tenzij men bewuste inflatie pleegt.

ad 2 (radioactiviteit)

De kerncentrale levert geen luchtvervuiling; het is een schoon bedrijf, maar dit heeft zoals het vandaag gebouwd wordt (in de typen PWR en BWR) een slecht thermisch rendement. Dat resulteert in een koelwaterbehoefte, welke ca. 35% groter is dan bij de conventionele centrale. Pas wanneer hoge stoomdrukken en stoomtemperaturen toegepast kunnen worden, m.a.w. wanneer natriumgekoelde kernreactoren hun experimenteerstadium hebben doorstaan, zullen zij met dezelfde koelwaterhoeveelheid kunnen volstaan als de huidige stoomcentrale. Een moeilijkheid bij de kerncentrale is nog: waar laat men het afgewerkte kernsplittingsmateriaal dat zwaar radioactief is? Er zijn voorstellen om het ingepakt in caissons in verlaten zoutmijnen te begraven of om deze caissons in diepe kloven in de bodem van de oceaan te bergen. Onoplosbaar is dit probleem zeker niet.

ad 3 (conventionele centrale)

Hoe ook de ontwikkeling van de kerncentrale zal verlopen, voorlopig zal de met fossiele brandstof gestookte centrale het leeuwedeel van de energiebehoefte blijven dekken. Gelet op de verdubbeling in 10 jaar betekent dit dus een sterke absolute toename van het vermogen van dit type centrale. De keuze van de daarbij te gebruiken brandstof – kolen, olie of gas – hangt af van de beschikbaarheid, dus van economische factoren. Deze worden op meer of minder wetenschappelijke wijze door wijze mannen voorspeld en ik heb U reeds verteld hoe rotsvast mijn vertrouwen in dit soort voorspellingen is. Ik laat dat dus nu buiten beschouwing en wil liever enige aandacht geven aan de extra maatregelen die genomen zullen moeten worden als werkelijk deze met fossiele brandstof gestookte ketels geïnstalleerd worden.

ad 4 (luchtvervuiling)

Zolang deze ketels met aardgas gestookt kunnen worden, is er weinig onheil in de lucht. De schoorsteengassen bevatten geen zwaveloxyden, maar wel stikstofoxyden, NO_x -gassen, d.w.z. een mengsel van NO , NO_2 en N_2O , resp. N_2O_3 , waarvan een giftige en de slijmvliezen prikkelende werking uitgaat. Zij worden daarom via een hoge schoorsteen in de atmosfeer gelost zodat zij minder schade doen. Bovendien vervallen N_2O_3 en N_2O_5 snel tot NO_2 , N_2 en O_2 . Hiervan hebben NO_2 en NO de vervelende eigenschap met eventueel in de atmosfeer aanwezige koolwaterstoffen een smog op te leveren, die dan zeer hinderlijk kan zijn. De centrales zijn echter niet de hoofdschuldigen van deze luchtvervuiling, zoals uit een publikatie van Beek blijkt. De vervuiling zal uiteraard wel toenemen, ook al wegens het groter worden van het vermogen op

één plaats, dus door de concentratie.
In figuur 2 wordt dit toegelicht.

De maatregelen die men nu kan nemen om deze NO_x -vervuiling laag te houden zijn: houd de luchtvermaat in het stookproces klein en pas voorts een heel hoge schoorsteen toe.

Hoe lang er aardgas ter beschikking zal zijn is moeilijk te zeggen. Men spreekt van 30 jaar, maar een nieuwe vondst kan dit tijdsbestek verlengen en nieuwe leveringscontracten met het buitenland kunnen de beschikbaarheid beperken. Hoe dan ook, reeds nu is het moeilijk of onmogelijk voor de centrales, mede om economische redenen n.l. gelijkmatige belasting van het gasleidingnet, om gasleveringscontracten af te sluiten waarin niet de clausule voorkomt dat de gasunie het recht heeft de gaslevering gedurende een bepaald tijdsdeel per dag te stoppen of te verminderen. Dit wil dus zeggen dat de centrales moeten zorgen ook olie te kunnen stoken en wel speciaal in de piektijd. Voorts spelen natuurlijk ook fluctuaties in het prijsverschil tussen olie en gas een rol. Ook hier beslist de economie en niet de technische wensdroom. Uit het bovenstaande volgt dat tevens maatregelen moeten worden genomen tegen de aan het stoken van olie klevende nadelen, te weten de luchtvervuiling. De hinder door NO_x -gassen wordt dan verzwaaard met die van SO_2 en SO_3 of nog erger, bij aanwezigheid van waterdamp: de hinder door zwavelzuur. Zij werken bovendien nog op elkaar in onder vorming van NO en SO_3 zowel vóór als ná het verlaten van de schoorsteen.

ad 5 (koelwaterprobleem)

Een ander aspect dat bij de energieopwekking met stoomturbines een rol speelt, zelfs bij het toepassen van hoge stoomdruk en hoge stoomtemperatuur dus een hoog thermisch rendement, is de grote hoeveelheid warmte (55%) welke via koelwater als afvalwarmte moet worden afgevoerd. Bij stoomturbines van kerncentrales is daarvoor tot heden zelfs nog een 35% grotere hoeveelheid koelwater nodig.

In ons land koelt men door uit open water (rivier of meer) koelwater te onttrekken en de afvalwarmte van de stoomturbine daarop over te brengen. Daardoor stijgt dit onttrokken water ca. 7°C in temperatuur. Dit opgewarmde water wordt vervolgens aan de rivier of aan het meer teruggegeven en via oppervlakteverdamping draagt de rivier de opgenomen warmte weer over aan de atmosfeer.

Dit kan echter niet onbeperkt geschieden. Er is een biologische grens die de verhoging van de watertemperatuur boven 30°C verbiedt en dat is tevens een economische grens uit een oogpunt van een gunstig thermisch rendement van de turbinecyclus. Dit betekent dus dat de rivier of het meer waaraan het koelwater onttrokken wordt niet warmer dan $30 - 7 = 23^\circ \text{C}$ mag zijn. Normaliter komt zo'n temperatuur slechts gedurende een aantal weken in de zomer voor.

Aan een tweede eis, n.l. de handhaving van een bepaalde zuurstofconcentratie in het koelwater, kan op eenvoudige wijze door beluchting van het uitstromende warme water via een stuw worden voldaan.

De hoeveelheden koelwater die nodig zijn, zijn enorm, n.l. 40 m³/s per 1000 MW.

Voor het weer afkoelen van dit water via oppervlaktekoeling is 10 km² wateroppervlakte per 1000 MW nodig, d.i. 1 ha wateroppervlakte per MW.

Voorlopig bezit Nederland voldoende wateroppervlak maar na het jaar 2000 ontstaat, bij dezelfde techniek als thans, een tekort. Bovendien zullen daarbij grote waterloopkundige problemen t.a.v. de scheepvaart en t.a.v. het zandtransport in de rivieren optreden.

Er bestaat ter vermindering van biologische moeilijkheden voorts nog een neiging om de opwarming van het koelwater van 7° C naar 5° C terug te brengen. Dat betekent echter dat 7/5 = 1,4 maal zoveel koelwater nodig zal zijn, wat het probleem van het koelwatertekort reeds in 1990 aan de orde zou stellen. Bovendien zouden de condensors groter gebouwd moeten worden, omdat het beschikbare temperatuurverschil voor de condensatie kleiner wordt. Elke oplossing die aan het koelwaterprobleem op economische wijze tegemoet weet te komen is derhalve welkom.

ad 6 en 7 (koeltorens en lawaai)

Dit zelfde economische aspect sluit de toepassing van koeltorens uit, want de toepassing gaat gepaard met een lager thermisch rendement.

Bij de z.g. natte koeltoren wordt de afvalwarmte van de turbine overgedragen aan het koelwater dat nu in een *open* circuit rondloopt en daarbij zijn opgenomen warmte, via een direct contact met de door de koeltoren gezogen lucht, aan de atmosfeer overdraagt. Deze lucht kan via natuurlijke trek of via een ventilator door de koeltoren worden gezogen. Bij de warmteoverdracht ontstaat een hinderlijke stoompluim, die in combinatie met SO₂-vervuiling uit de schoorsteen van de ketel zeer ongewenst is. Bovendien kan de voorziening van het suppletiewater (ter vervanging van het met de stoompluim verloren gegane water alsmede ter vervanging van het gespuide koelwater) ter plaatse moeilijk zijn, want er is ca. 0.8 m³/s voor nodig bij een centrale van 1000 MW.

Veelal is dit bronwater.

De hinder van de stoompluim en grotendeels ook de moeilijkheid met het verschaffen van suppletiewater kan men voorkomen door het toepassen van een z.g. droge koeltoren. Hierbij laat men het koelwater dat in de condensor de afvalwarmte van de turbine heeft opgenomen in een *gesloten* circuit door luchtkoelers rondlopen. Deze koelers worden gekoeld door een geforceerde luchtstroom. De opgewarmde lucht vloeit vrij af naar de atmosfeer. Als nieuw nadeel krijgt men nu de volumineuze uitvoering en de geluidshinder van de eventueel in de buitenlucht opgestelde ventilatoren en luchtkoelers daarvoor in de plaats. Het economische bezwaar van een koeltoren blijft ook hier, bij toepassing van een oppervlaktecondensor, onverminderd bestaan.

3 Oplossing van de moeilijkheden

Na deze opsomming van de moeilijkheden waarmee de huidige centrale-techniek geconfronteerd wordt, zou ik U nu willen wijzen op de mogelijkheden welke zich in de naaste toekomst beginnen af te tekenen om deze bezwaren niet alleen te ondervangen, maar deze gelijktijdig met economisch gunstiger perspectieven op te lossen.

In het begin van dit college heb ik U al gewezen op de bescheiden ontwikkeling van de kernenergie in ons land en het feit dat de verdere energievoorziening nog tientallen jaren met fossiele brandstof zal plaats vinden, echter in steeds groter wordende eenheden, dus in geconcentreerder opgestelde energiebronnen. Deze grotere eenheden zijn een economische noodzakelijkheid. Was in 1950 de standaardgrootte 50 MW en 125 MW in 1960, in 1970 is dit al uitgegroeid tot 300 à 400 MW en voor 1980 zal dat zeker 600-800 MW zijn, immers blokken van 500-600 MW zijn nu reeds in ons land in bestelling.

Bij zulke grote blokken zal de luchtvervuiling door de uitwerp van NO_x en SO_2 resp. SO_3 dus een grote rol gaan spelen. Men is daarom bezig naar wegen te zoeken waarbij dit euvel gereduceerd of opgeheven wordt. En hier heeft, het kan nauwelijks verbazen, de chemische procesindustrie de leiding genomen. Immers zij is de vuilmaker, laat ze nu ook de schoonmaker zijn. De weg die men is ingeslagen is te meer interessant omdat die gepaard gaat met een belangrijke reductie aan koelwaterbehoefte zodat de grote temperatuursverhoging en de zuurstofverarming van het koelwater voor een groot aantal jaren (ver na 2000), zal worden teruggedrongen en het probleem van de biologische vervuiling zijn acute karakter verliest, voor zover dit de elektrische centrales betreft.

Bovendien gaat de bedoelde oplossing gepaard met een verbetering van het thermische rendement, dus een lagere brandstofbehoefte en tenslotte lijkt een verlaging van de investeringskosten zeer voor de hand liggend (15 à 20% besparing).

Al deze voordelen maken het de nucleaire centrale dan wel moeilijker nog te concurreren. Dat is jammer, want als ons een storing in de toevoer van fossiele brandstof zou overkomen zoals Engeland die in januari/februari bij de staking in de kolenmijnen heeft beleefd, dan zit onze energievoorziening aan de grond. Het is natuurlijk een feit dat dit ons tot heden steeds heeft bedreigd.

Als uitgangspunt neem ik voor brandstof een zware olie; het zouden eventueel ook kolen kunnen zijn.

Voor de oplossing welke ik bedoel zijn 3 hoofdmaatregelen nodig:

1 Teneinde de luchtvervuiling uit te schakelen moet de brandstof op economische wijze ontzwaveld worden en moeten de NO_x -gassen aan een katalysator gebonden worden. Ook de vanadium uit de olie wordt door de katalysator opgenomen. Voorts behoren roet en as uit het gas verwijderd te worden.

2 Teneinde de koelwaterbehoefte drastisch te beperken moet het elektrische vermogen voor slechts het 0,33 à 0,40 deel met behulp van condenserende stoomturbines worden opgewekt. Het resterende 0,67 tot 0,60 deel moet met gasturbines, die schone gassen toegevoerd krijgen, worden opgewekt. Gasturbines hebben geen koelwater nodig en hun schone uitlaatgassen, die nog een hoge temperatuur hebben moeten vervolgens benut worden voor het opwekken van de stoom voor de eerder genoemde stoomturbine.

3 Deze combinatie van stoom- en gasturbines levert bij vollast een hoger rendement op dan met een conventionele stoomturbinecentrale te bereiken is. Om echter ook bij deellast een hoog rendement te bereiken is het essentieel dat er twee gasturbines aanwezig zijn op één stoomturbine en één stoomketel-eenheid.

In figuur 5 is een beeld gegeven van het verloop van het thermische rendement. Indien er drie gasturbines per stoomturbine zijn is een fijnere regeling mogelijk, maar ik vermoed dat dit wegens de grotere investeringskosten tot hogere jaarlasten zal leiden.

Het luchtvervuilingsprobleem

Een procédé voor het ontzwavelen van ruwe olie is bekend en kost ca. f 800,- per ton gewonnen zwavel, d.w.z. 0,54 cent/kwh bij 3% S in de ruwe olie. Dit is te duur. Bovendien wordt hiermede geen oplossing bereikt voor de binding van NO_x -gassen. Verbrandt men daarentegen ruwe olie in een reactor met een ondermaat aan lucht en wel 25 à 30% van de theoretisch benodigde luchthoeveelheid, en doet men dat bij een druk welke kan variëren tussen 15 en 40 bar, dan ontstaat een partiële vergassing en een eindgas dat nog een belangrijk deel CO , H_2 en $\text{H}_2\text{S} + \text{COS}$ bevat. Dit gas heeft dan een temperatuur van 1200 tot 1500° C en een druk gelijk aan die in de reactor. De geringe hoeveelheid verbrandingslucht eist ondanks de hoge druk een relatief klein compressorvermogen. De reactor bestaat uit een simpel cilindrisch vat waarin bovenin een luchttoevoer en oliebranders zijn aangebracht. Het heeft een diameter van ca. 5 m; de hoogte kan variëren van 13 tot 20 m. Het vat is inwendig bekleed met een katalysator (nikkelverbinding), die de bij de verbranding ontstane NO_x voor ca. 75% aan zich bindt. Voor een installatie van 1000 MW worden 4 van dergelijke reactoren parallelgeschakeld.

Er bestaan diverse processen, waarvan ik er 2 zal noemen:

1 Het eerste is van de Shell afkomstig (zie fig. 3.). Hierbij wordt het onder een hoge druk van ca. 31 bar staande gas dat met een temperatuur van ca. 1500° C uit de reactor treedt, door een afgassenketel geleid, waarin verzadigde stoom van 190 bar wordt gemaakt. Deze ketel heeft een heel speciale constructie, waarmede de Shell reeds ongeveer 15 jaar ervaring heeft. De gassen koelen in deze ketel tot 160° C af.

Met de gassen zijn uit de reactor ook nog roet-en asbestanddelen, alsmede Va-Ni-verbindingen meegekomen. Dankzij de speciale constructie van de afgassenketel zetten die zich niet in de ketel af. Zij worden na de ketel in een wasproces uitgescheiden en daarna tezamen met de Va-Ni-verbindingen gepelletiseerd en teruggestookt in de reactor. Daar wordt de resterende as in vloeibare toestand uit de reactor verwijderd. De hoeveelheid is uiteraard gering. Uit de wasserij komt dus een brandbaar, roet- en asvrij gas van ca. 40° C, onder een druk van 30 bar, dat naar de ontzwaveling gaat, waar met een amine (di-ethanol-amine) de H₂S en COS omgezet wordt in zwavel, welke vervolgens wordt afgevoerd.

Het S-gehalte in het gas is nu teruggebracht tot 2 à 7% van het oorspronkelijk in de olie aanwezige percentage.

De op deze wijze gewonnen S heeft minder gekost dan die welke direct uit de ruwe olie zou zijn afgescheiden en zij heeft een verkoopwaarde van ca. f 90,- per ton gewonnen S. Uitgaande van een olie met 3% S is de verkoopwaarde 0,06 cent per kWh.

Van het in de reactor gevormde NO_x is nog slechts 25% aanwezig. De bovenste verbrandingswaarde van dit gas bedraagt 1500 kcal/m³n. Dit goede gas is beschikbaar voor de beide gasturbines.

2 De tweede mogelijkheid is het procédé van Lurgi (zie fig. 4). Het uit de reactor komende gas, dat hier een druk van 16 bar en een temperatuur van 1200° C heeft wordt over een luchtverhitter van het pebble-bed type geleid, waarin de verbrandingslucht voor de reactor wordt voorgewarmd tot ca. 1040° C. Het gas koelt in deze luchtverhitter af tot 315° C, waarna het in de wasserij van roet en as wordt ontdaan. Dit wordt gepelletiseerd en teruggestookt in de reactor. De uiteindelijk resterende as kan vloeibaar worden afgevoerd. Het gas doorstroomt vervolgens een kleine afgassenketel waarin het verder afkoelt tot 110° C. In deze ketel wordt verzadigde stoom gemaakt voor het ontzwavelingsproces, waarbij met behulp van potas (K₂CO₃) de H₂S + COS wordt omgezet in zwavel welke wordt afgevoerd. Het in het gas resterende S-gehalte bedraagt 2% van de oorspronkelijk in de olie aanwezige percentage.

Afgeleverd wordt dus een brandbaar gas van 110° C onder een druk van 13 bar en met een laag NO_x-gehalte. De bovenste verbrandingswaarde bedraagt 1550 kcal/m³n. Dit schone gas is beschikbaar voor de beide gasturbines.

Het wordt in de verbrandingskamer volledig of partieel verbrand en expandeert daarna in de gasturbines.

De drie behandelde aspecten – luchtvervuiling, koelwatertekort, ook wel thermische vervuiling genoemd en lage deellaastrendementen – leiden tot verschillende concepten voor de totale arrangementen.

Een mogelijk schema is weergegeven in fig. 6.

1 Het beschikbare schone gas wordt in een verbrandingskamer *volledig* verbrand met een zó lage luchtvermaat dat een verbrandingsgas met een zo hoog mogelijke temperatuur voor de gasturbine ter beschikking komt. Aangezien het gas schoon is kunnen hoge turbine-inlaattemperaturen worden toegelaten, d.w.z. nu 950° C en in 1980 vermoedelijk 1200° C. Ook de uitlaatgassen van de gasturbine hebben dan, afhankelijk van de expansieverhouding, een hoge temperatuur. Het eenvoudigste arrangement verkrijgt men door met deze gassen in een simpele afgassenketel stoom van hoge druk en hoge temperatuur op te wekken.

The National Air Polluting Control Administration heeft verleden jaar een 5 cm dik rapport uitgebracht aan het US-Department of Health, Education and Welfare over de Technological and economic feasibility of advanced power cycles and methods of producing non-polluting fuels for utility-power-stations.

Zij vond bij haar studie als gunstigste oplossing het schema van figuur 6. Zij achtte dat in 1980 reeds gasturbine-inlaattemperaturen van 1530° C mogelijk zouden zijn.

Het is duidelijk dat hoe hoger deze temperatuur kan zijn, hoe hoger het rendement van de gecombineerde gas-stoom-turbinecyclus wordt. Bovengenoemd rapport spreekt dan ook van een totaal thermisch rendement van 54% bij 1530° C gasinlaattemperatuur, in plaats van 42% voor de huidige stoomcyclus, beide betrokken op de opgewekte kWh. Bij 1200° C daalt dit tot 47% en bij 950° C tot 45%. Ook dit is nog steeds hoger dan het huidige bereikbare met de stoomcyclus alleen.

Voorts becijfert deze commissie dat de investeringskosten en de jaarlijkse lasten van de hele installatie minder bedragen dan die van een conventionele centrale voor 170 bar stoomdruk en 535/535° C stoomtemperatuur. Dit komt door de relatief goedkope gasturbines en de veel goedkopere afgassenketel. De studie is gemaakt voor een totaal opgewekt vermogen van 1000 MW.

Het zou kunnen zijn dat de afgassen onder bepaalde omstandigheden te weinig stoom zouden produceren om voldoende totaal vermogen op te wekken met behoud van een redelijk rendement.

Het is dan mogelijk de afgassenketel in te richten voor het bijstoken met vers schoon gas, uiteraard ten koste van een hogere schoorsteentemperatuur. Hierdoor kan de stoomturbine een groter vermogen ontwikkelen (mits ook de

generator groter is). Hoewel toegepast in verscheidene industriële ondernemingen lijkt mij deze toevoeging voor een elektriciteitsbedrijf niet aan te bevelen, omdat zowel ketel als stoomturbine met glijdende druk moeten kunnen werken.

Een andere oplossing voor deze situatie is dat de uitlaatgassen van de gasturbines als verbrandingslucht worden gebruikt in een normale stoomketel, die met vers schoon gas wordt gestookt.

Het is dan mogelijk in de gasturbines bij gelijke intreetemperatuur een grotere expansieverhouding, dus een hogere inlaatdruk toe te passen. Dit resulteert in lagere uitlaattemperaturen. Het gasturbinevermogen zal daardoor toenemen, en uiteraard ook het stoomturbinevermogen. Toch biedt deze oplossing economisch, wegens hogere investeringskosten, dus hogere jaarlijkse lasten, weinig voordeel en zal daarom verder niet worden behandeld.

2 In een ander schema wordt het uitlaatgas van de gasturbines in een aan gaszijde onder druk staande ketel verbrand. In dit schema (zie figuur 7) wordt geen verbrandingskamer toegepast, maar een watergekoelde vuurhaard die aan gaszijde onder druk van ca. 9 bar staat. De verbranding geschiedt *volledig* met een zó kleine luchtvermaat dat de uitlaatgassen van deze vuurhaard een voor de gasturbine zo hoog mogelijke inlaattemperatuur hebben. In deze ketel wordt stoom gevormd en overhit, welke vervolgens aan de stoomturbine wordt toegevoerd.

De uitlaatgassen van deze vuurhaard resp. ketel hebben een hoge temperatuur (ca. 900° C) en een druk van ca. 9 bar. Zij gaan naar de gasturbines waarin zij tot ca. 1 bar expanderen en vervolgens onder deze nagenoeg atmosferische druk een afgassenketel doorlopen. Daarin wordt de stoom van het stoomturbine-circuit herverhit en wordt het voedingwater voorgewarmd. Deze schakeling is 12 jaar geleden door Seippel (BBC) bepleit en verleden jaar door Aquet (Sulzer) opnieuw naar voren gebracht. Het grote voordeel is dat de onder druk gestookte vuurhaard door zijn hoge warmteoverdracht ongeveer een derde van het volume van een conventionele ketel inneemt. Er bestaan hiervoor zeer aannemelijke resp. beproefde constructies van Sulzer en van Foster Wheeler.

Omdat met schoon gas gewerkt wordt, is het mogelijk onder druk gestookte ketels toe te passen. Er is een projekt voor 180 MW in uitvoering, echter zonder ontzwaveling en NO_x-vermindering.

3 Ik wil U nog een derde schema laten zien. Het is door de Shell opgezet voor een 200 MW-installatie in samenwerking met Sulzer. In dit schema (zie figuur 8) gaat het beschikbare schone gas met een druk van 30 bar evenals in het eerst getoonde schema naar een verbrandingskamer, maar nu wordt ondermaat aan lucht toegevoerd, zodat een *partiële* verbranding ontstaat, waarbij de gastemperatuur niet hoger komt dan als inlaattemperatuur voor de gasturbines

acceptabel is (ca. 900° C).

Het gas expandeert tot ongeveer 8 bar en een temperatuur van 565° C. Het wordt vervolgens in een ketel volledig verbrand. Deze ketel staat dus aan gaszijde onder een druk van 8 bar. In de ketel zijn de oververhitter en de herverhitter voor het stoomturbine-circuit ondergebracht. De oververhitter krijgt zijn verzadigde stoom toegevoerd uit de afgassenketel welke achter de reactor zit. De uitlaatgassen van deze ketel, welke nog een druk van 6,5 bar hebben, expanderen tenslotte in een expansiegasturbine om vervolgens via een warmte-wisselaar naar de schoorsteen te ontwijken.

Bij dit schema wordt de olie in drie etappen verbrand. In de beide eerste etappen (reactor en verbrandingskamer) is de verbranding partieel. De beide tot de stoomketel behorende ruimten (AK, en DG.OVO) staan aan gaszijde onder overdruk en zullen derhalve kleine volumina beslaan, m.a.w. het minste materiaal verwerken en vermoedelijk een relatief lage investering vereisen.

4 Slotbeschouwing

Ik hoop U hiermede te hebben laten zien hoe in de nabije toekomst elektrische centrales werkende met fossiele brandstof geen oorzaak meer behoeven te zijn van luchtvervuiling en van thermische resp. biologische overlast, omdat zij een relatief geringe hoeveelheid koelwater verbruiken. Het aantal bedenkbare schakelingen van gasturbines, stoomturbines en ketels is nog gemakkelijk met andere uit te breiden. Daarom zal het nuttig zijn nauwkeurig na te gaan welke schakeling de gunstigste is. Dat betekent een enorme studie. Het zou gewenst zijn dat hiertoe een werkgroep werd samengesteld die:

- 1 het gunstigste schema opstelt in afhankelijkheid van de toelaatbare inlaattemperatuur van de gasturbine en de toe te passen expansieverhouding;
- 2 de kostprijscalculaties opstelt in overleg met de Industrie;
- 3 een computerprogramma samenstelt waarin de belangrijkste parameters ingebracht worden om tot een uiteindelijk gunstigst schema met laagste exploitatiekosten te geraken.

De meest geschikte instantie welke dit onderzoek zou kunnen uitvoeren, omdat ze over de beste informatie beschikt resp. deze zal kunnen verkrijgen, lijkt mij een werkgroep samengesteld uit mensen van de KEMA, resp. van de centrales en uit de industrie en wel uit de proces- en de machine-industrie. Het geheel onder leiding van een KEMA-projectgroep, eventueel aangevuld met leden van de TH's.

Ik zou mij levendig kunnen voorstellen dat ook het Ministerie voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne in het werk van deze groep geïnteresseerd is en bereid zou zijn de financiële lasten van deze werkgroep voor zijn rekening te nemen.

Zeer geachte toehoorderessen en toehoorders,

In deze tijd waarin men steeds sombere geluiden en pessimistische verwachtingen over ons toekomstige leefklimaat verneemt, hoop ik U een positievere en optimistischer kijk op de ontwikkeling van onze meest vitale industrie, die van de elektriciteitsproductie, te hebben gegeven.

Ik dank U voor Uw aandacht.

Een Elektrische Centrale, gestookt met fossiele brandstof, zonder Lucht- en Watervervuiling

Na in zijn inleiding erop gewezen te hebben dat Nederland de hoogste energiedichtheid/km² ter wereld heeft, schetste spreker de huidige situatie bij de elektrische energievoorziening.

De opwekking via nucleaire stoomketels is in Nederland verwaarloosbaar klein en zal in 1980 maximaal 8% bedragen; de rest moet met fossiele brandstof worden opgewekt, hoofdzakelijk door zware olie omdat aardgas minder ter beschikking staat.

Hieraan kleven de bezwaren van luchtvervuiling door SO₂ en NO_x en voorts het thermische en biologische koelwaterbederf, dat niet via koeltorens is op te lossen omdat deze uit rendements- en economische overwegingen niet in aanmerking komen.

Als oplossing uit deze moeilijkheden schetste spreker de mogelijkheid van partiële vergassing van de zware olie, resp. de kolen, waarbij de brandstof op economische wijze wordt ontzwaveld en de gevormde NO_x-gassen grotendeels gebonden worden, terwijl roet- en asdelen vloeibaar worden afgevoerd. Met het aldus verkregen schone gas kunnen bij hoge temperatuur gasturbines worden bedreven, terwijl met de afgewerkte gassen in al of niet aan gaszijde onder druk staande ketels, stoom gemaakt wordt voor het bedrijven van een stoomturbine. Bij een verdeling van het totale op te wekken vermogen in een verhouding van 2 op 1 over twee gas- en één stoomturbine zijn ook de dreigende koelwatertekorten en het daarmee samenhangend thermische en biologische bederf opgelost. Bovendien eist de voorgestelde oplossing lagere investeringskosten bij een hoger totaal rendement.

Literatuurreferenties

- 1 *F. C. Robson and A. J. Giramonti.*
'Economic methods of fuel gasification as a means of reducing SO₂ emissions'.
Seminar on the desulpharization of fuels and combustion gases. Genova,
16-20 Nov. 1970.
- 2 *F. C. Robson and A. J. Giramonti.*
'The use of combined cycle power systems in non-polluting central stations'.
Seminar on the desulpharization of fuels and combustion gases. Genova,
16-20 Nov. 1970.
- 3 *F. C. Robson, A. J. Giramonti, G. P. Lewis, G. Gruber.*
'Final report of technological and economic feasibility of advanced power cycles and
methods of producing non-polluting fuels for utility power stations'.
Final report prepared for national air pollution control administration U.S.
dept. of H.E.W. Durham North Carolina 27701. Contract 22-69-114.
- 4 *E. Aquet.*
'Technische und Wirtschaftliche Vorteile kombinierter Gasturbinen/Dampfkraftwerke'.
V.G.B. Jg. 51 - 1971, Heft 5.
- 5 *K. Bund, K. A. Henney and K. H. Krieb.*
'Kombiniertes Gas/Dampfturbinen Kraftwerk mit Steinkohlen-Druckvergasungsanlage
im Kraftwerk Kellerman in Lünen'.
BWK Jg. 23 - 1971 - nr. 6 (Juni), blz. 258/262.
- 6 *G. J. van den Berg, P. J. J. van Doorn und W. A. Haeberli.*
'Kraftwerke mit Schwefelfreiem Abgas'.
Verfahrenstechnik Jg. 5 (1971), nr. 10.
- 7 *E. Wahnschaffe.*
'Ein Beitrag zur Umwandlung von SO₂ zu SO₃'.
V.G.B. Jg. 51-1971, Heft 5.
- 8 *F. A. W. H. van Melick.*
'De elektriciteitsvoorziening in onze samenleving en haar wisselwerking met het milieu'.
De Ing. Jg. 84, 1972, 7 Jan. blz. A3.
- 9 *C. F. A. van Kampen.*
'Elektriciteitsopwekking in de toekomst'.
De Ing. Jg. 83, 1971, 27 aug., blz. A.584.
- 10 *J. Ribesse.*
'Cycle de turbine à gaz comportant un réacteur d'oxydation partielle catalytique de gaz
naturel; son application dans des systèmes énergie-chaleur'.
Gas Wärme International, Bd. 20-1971-7/8 Juli/Aug.
- 11 *K. J. Keller.*
'De toekomstige koelwatervoorziening van de elektrische centrales in Nederland'.
Electrotechniek, Jg. 48 (1970) nr. 5, blz. 215.
- 12 *F. B. J. Elshout, J. van der Kooy.*
'De emissie van stikstofoxyden'.
Electrotechniek, Jg. 49 (1971), nr. 23.

<i>Nederland</i>	<i>0,95</i>	<i>GWh/km²</i>	<i>1 GWh = 10⁹ Wh = 10⁶ KWh</i>
<i>België</i>	<i>0,81</i>	<i>..</i>	
<i>United Kingdom</i>	<i>0,74</i>	<i>..</i>	
<i>Duitsland</i>	<i>0,69</i>	<i>..</i>	
<i>Italië</i>	<i>0,18</i>	<i>..</i>	
<i>Frankrijk</i>	<i>0,12</i>	<i>..</i>	
<i>U.S.A</i>	<i>0,13</i>	<i>..</i>	

FIG. 1

<i>Productie NOx in 10³ ton/jaar</i>	<i>1970</i>	<i>1975</i>
<i>Huisverwarming</i>	<i>6</i>	<i>12</i>
<i>Verkeer</i>	<i>280</i>	<i>380</i>
<i>Electrische centrales</i>	<i>80</i>	<i>130</i>
<i>Industrie</i>	<i>85</i>	<i>110</i>

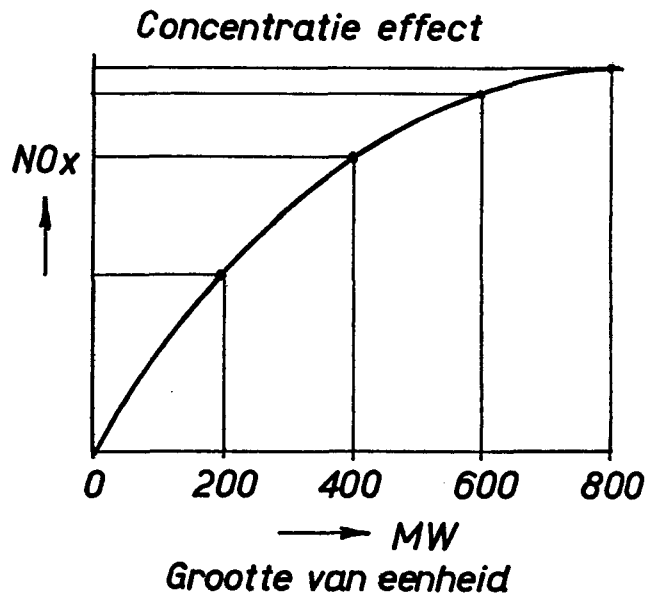


FIG. 2

FIG. 3

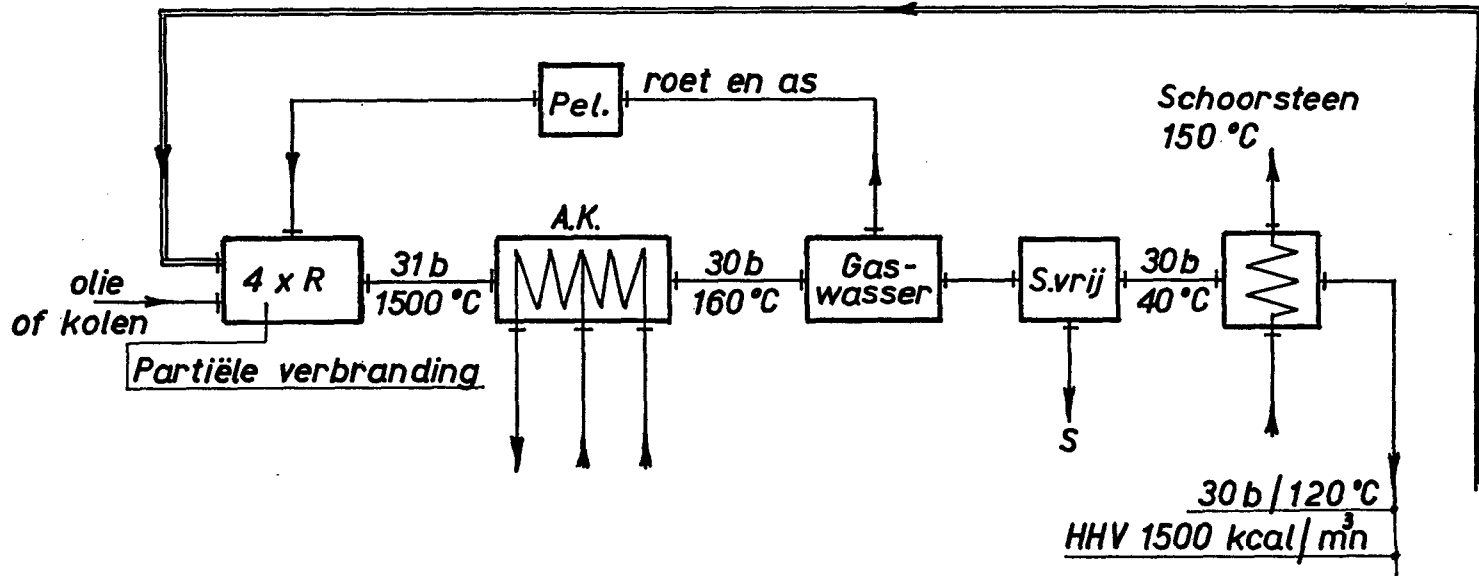
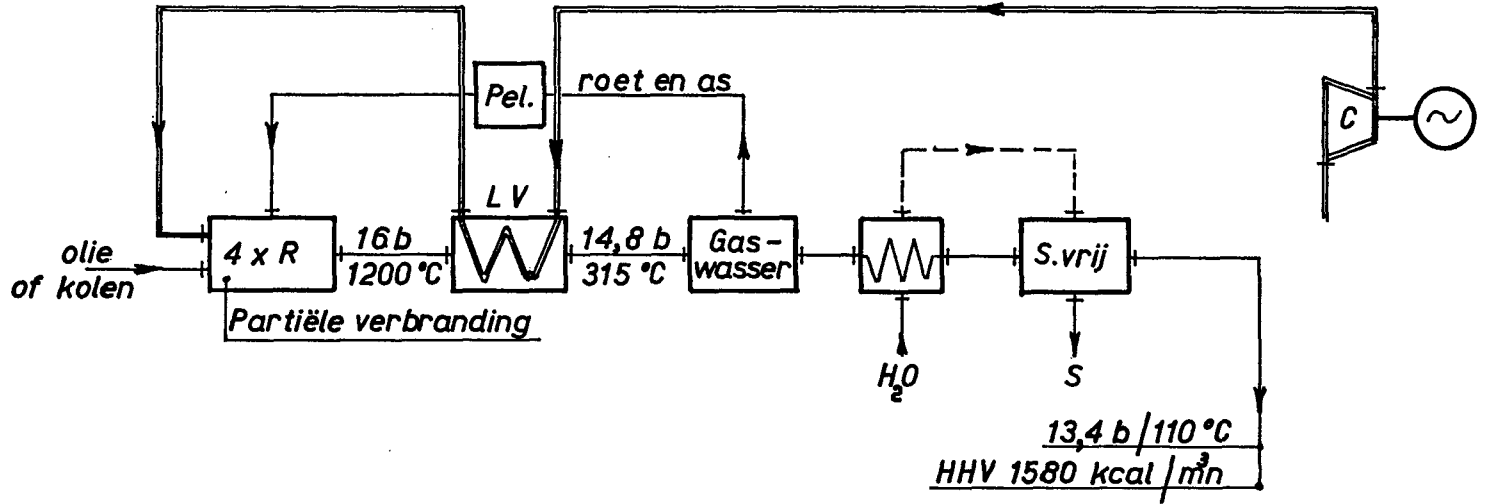


FIG 4



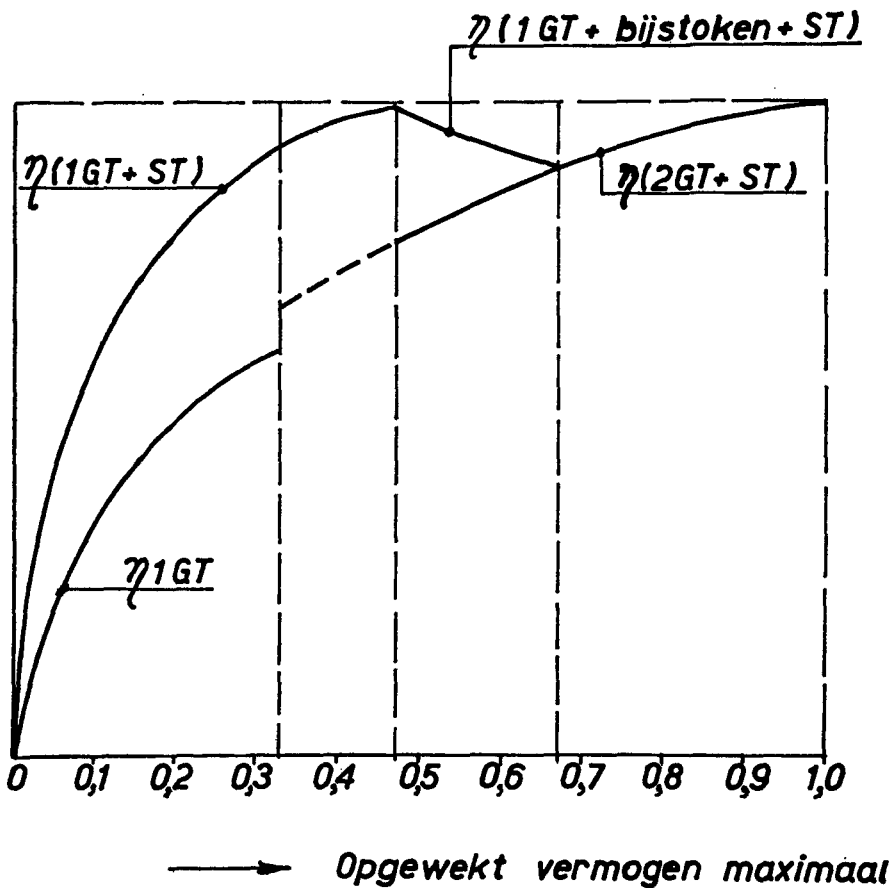


FIG. 5

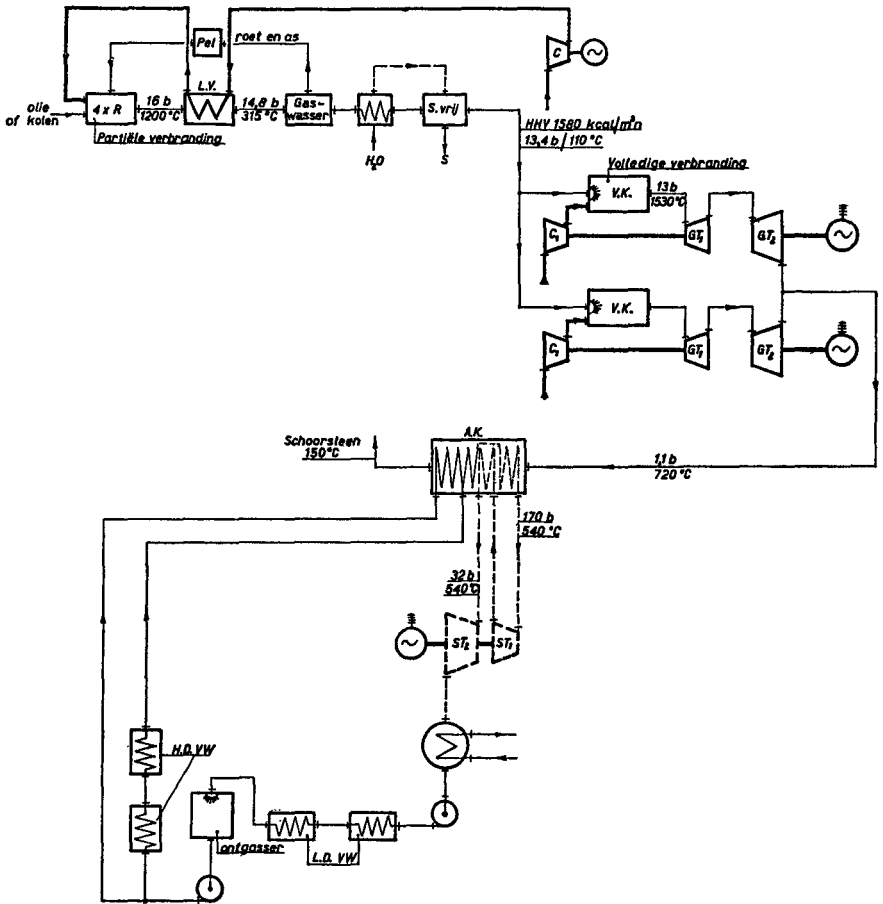


FIG. 6

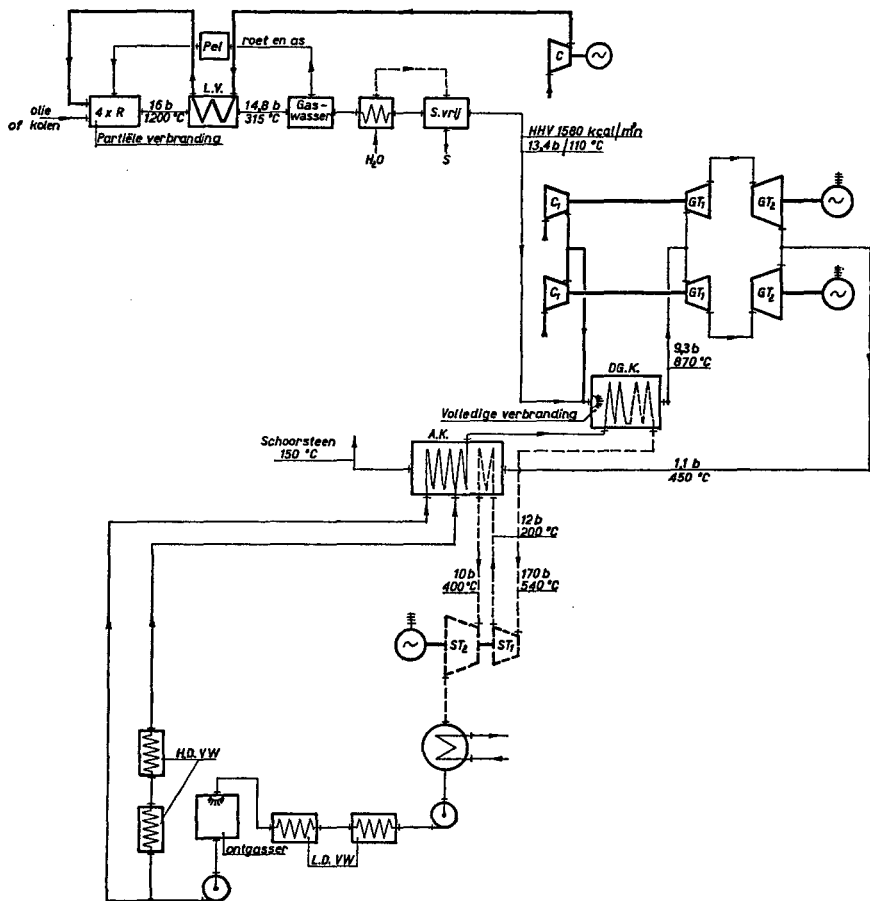


FIG. 7

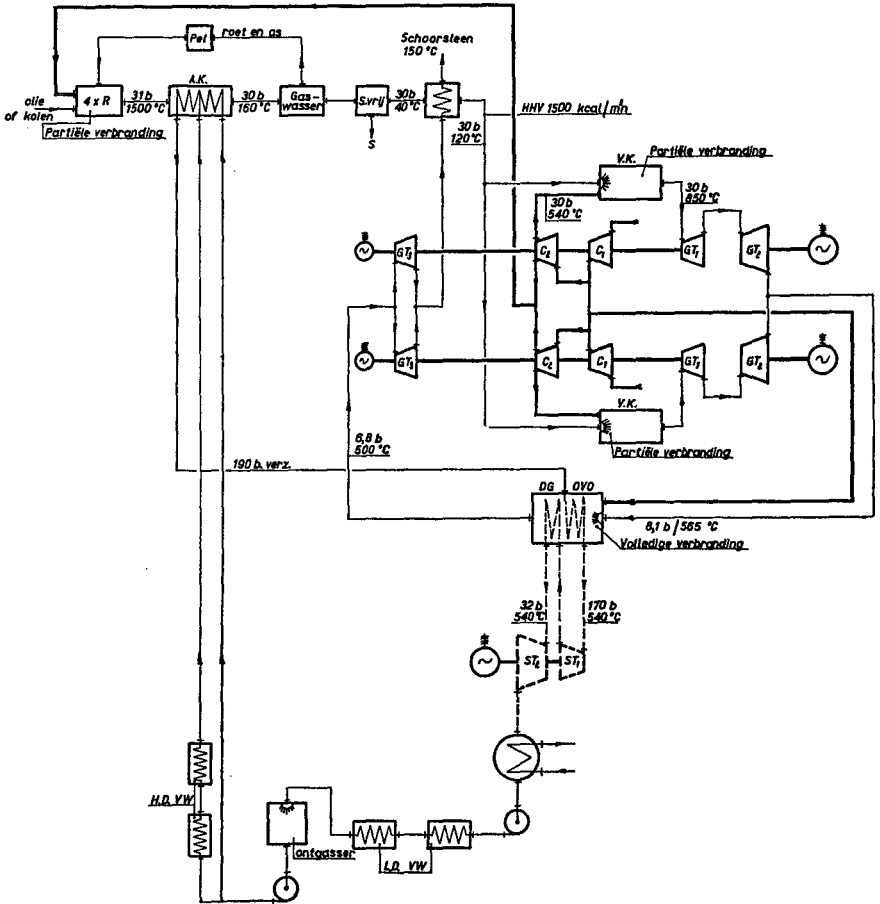


FIG. 6