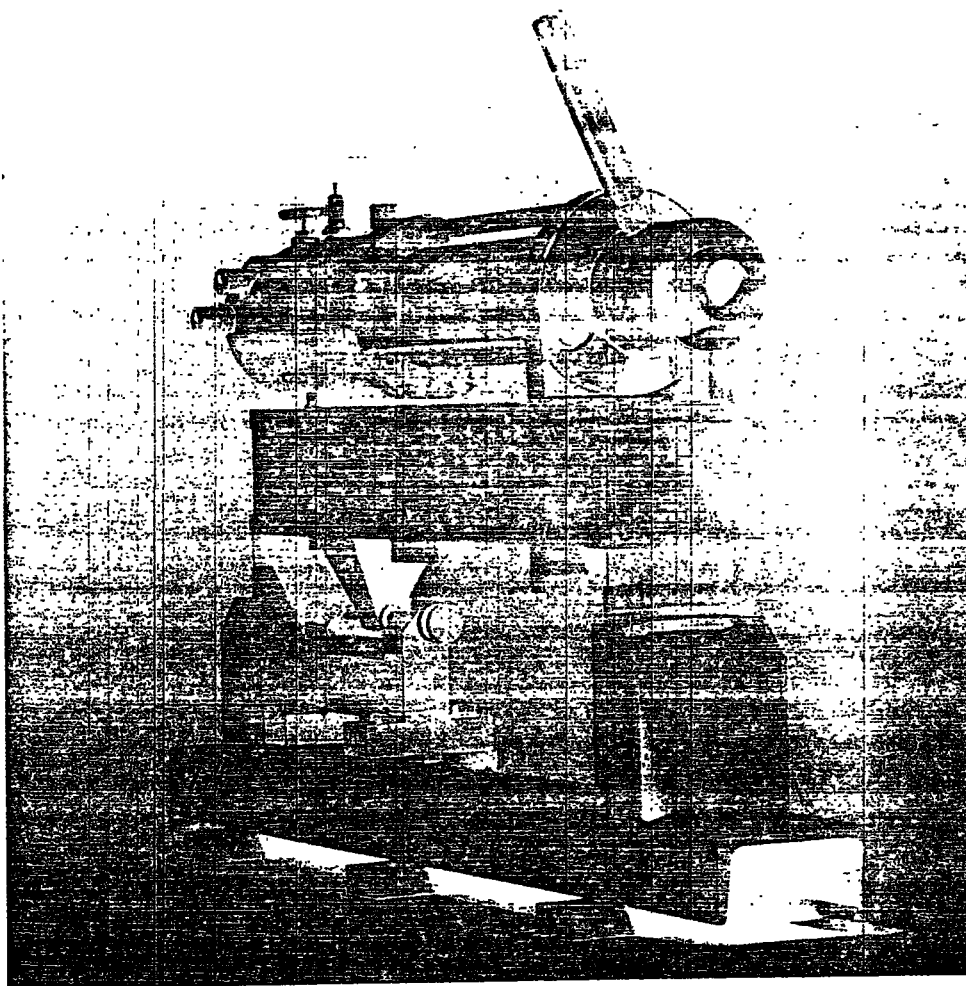
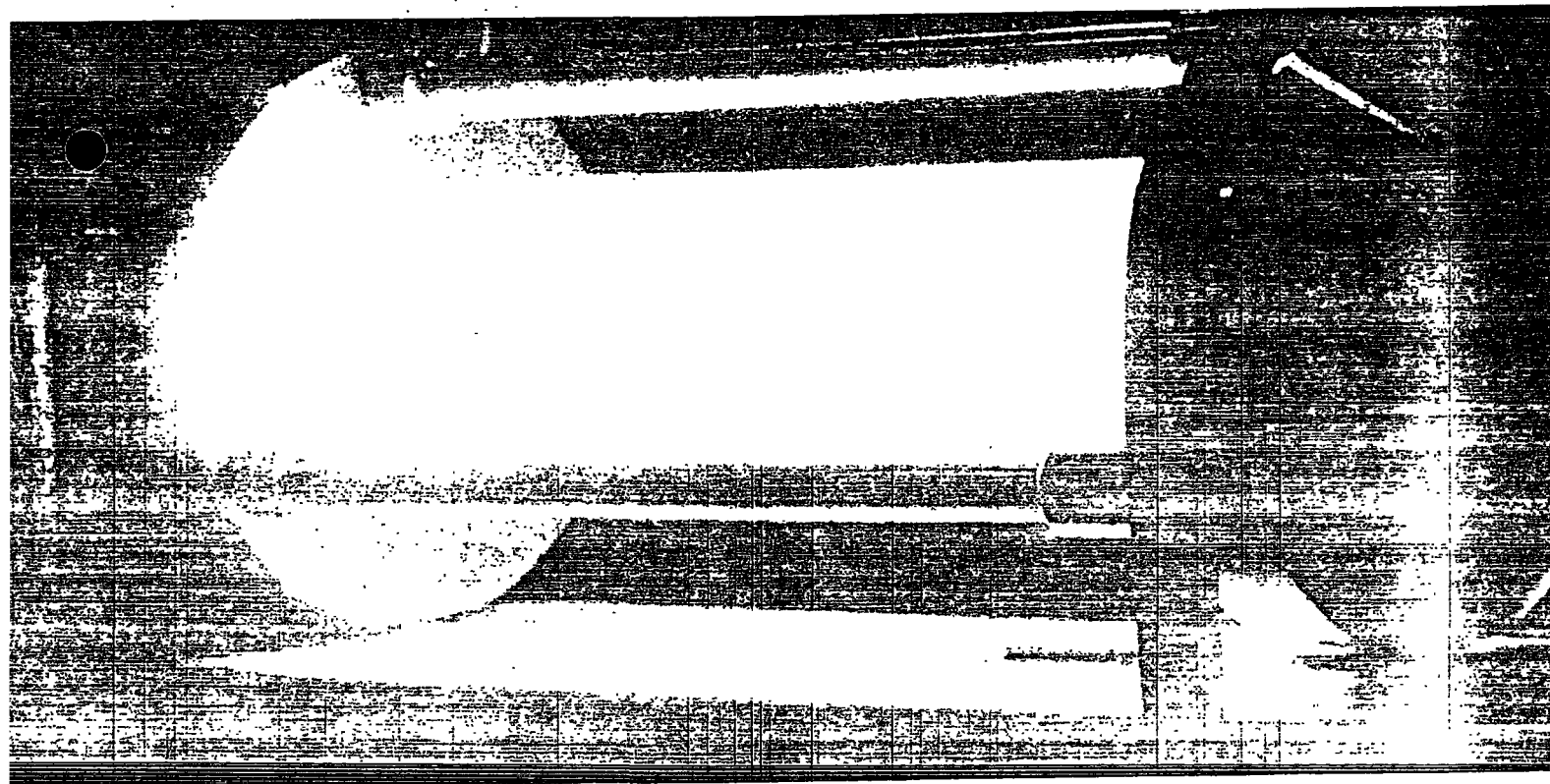


In een bunker van TNO in Rijswijk staat een experimentele raketmotor die veel wetenschappelijke belangstelling trekt. Geen wonder. De motor kan aantrekkelijke perspectieven bieden voor de toekomst: hij brandt op huisvuil, sluit aan bij moderne methoden voor elektriciteitsopwekking en zorgt voor gewichtsbesparing in de ruimtevaart.



EXPERIMENTELE RAKETMOTOR



Foto's: Prins Maurits Laboratorium/TNO

Kyhl okt 82

Het apparaat ziet eruit als een stompe torpedo op een voetstuk: ongeveer 1 meter lang, 20 centimeter dik, de ene helft doorzichtig en de andere helft van glimmend staal. Nadat de sirene heeft geloeid als aankondiging van de start, klinkt even later een droge knal. De doorzichtige buis licht op door de witte verbrandingsgassen. Het gierende geluid als van een straalmotor, klinkt overweldigend. Vooral als het uit zo'n klein machientje komt. Nadat de motor is gestopt, kan de kort tevoren nog oplichtende buis met de hand worden aangeraakt: prettig warm. Het lijkt boerenbedrog, een doordachte goocheltruc, maar het is een echte, experimentele raketmotor.

De motor werkt met de vaste, doorzichtige brandstof plexiglas. Maar de machine doet het ook op het samengeperste, brandbare deel van gescheiden huisvuil, op samengeperste houtspaanders en samengeperste, gemalen kolen. Het idee om de space shuttle omhoog te schieten met raketmotoren op oud brood en groenteresten, klinkt op zijn zachtst gezegd absurd. Toch toont dit Nederlandse experiment aan dat het tot de theoretische mogelijkheden behoort. Bij het woord raketmotoren denken velen direct aan de gigantische Saturnus draagraketten, die de Apollo capsules lanceerden. Of aan de twee vuurspuwende „boosters” van de space shuttle, die na het opbranden worden afgeworpen, in zee landen en weer opnieuw worden gebruikt. Krachtige motoren waarmee ruimtevaartuigen zich losmaken van de aarde. Maar vooral motoren die kunnen werken *buiten* de aardse dampkring. Zij hebben namelijk

zowel brandstof als zuurstof aan boord. De raketmotor was de enige oplossing voor het rond de eeuwwisseling belangrijke vraagstuk: is reizen buiten de atmosfeer mogelijk? Dat het mogelijk is, weten we inmiddels al ruim 25 jaar.

Raketmotoren zijn er in twee typen: de vaste stuwstofmotor (met vaste brandstof en chemisch gebonden „vaste” zuurstof), zoals de „boosters” van de space shuttle. En de vloeibare stuwstofmotor (met vloeibare brandstof en ongebonden, vloeibare zuurstof), zoals de Saturnus draagraketten en de hoofdmotor van de space shuttle. Beide typen hebben voor- en nadelen. De raketmotor op vaste stuwstof is heel eenvoudig en (daardoor) betrouwbaar. Vaste stuwstof is makkelijker handelbaar en minder explosief dan vloeibare stuwstof. Daarentegen is de stuwkracht van zo'n raketmotor niet regelbaar. De motor werkt op volle kracht, of doet het helemaal niet. En als ze eenmaal werken zijn ze moeilijk te stoppen.

De vloeibare brandstof en zuurstof gaan in aparte tanks mee omhoog. Beide worden in de verbrandingskamer gespoten, waar ze verbranden. Deze motoren zijn veel krachtiger dan motoren op vaste stuwstof. Bovendien is het vermogen regelbaar, door meer of minder mengsel in de verbrandingsruimte te pompen (zie ook Kijk juni 1981, over de space shuttle).

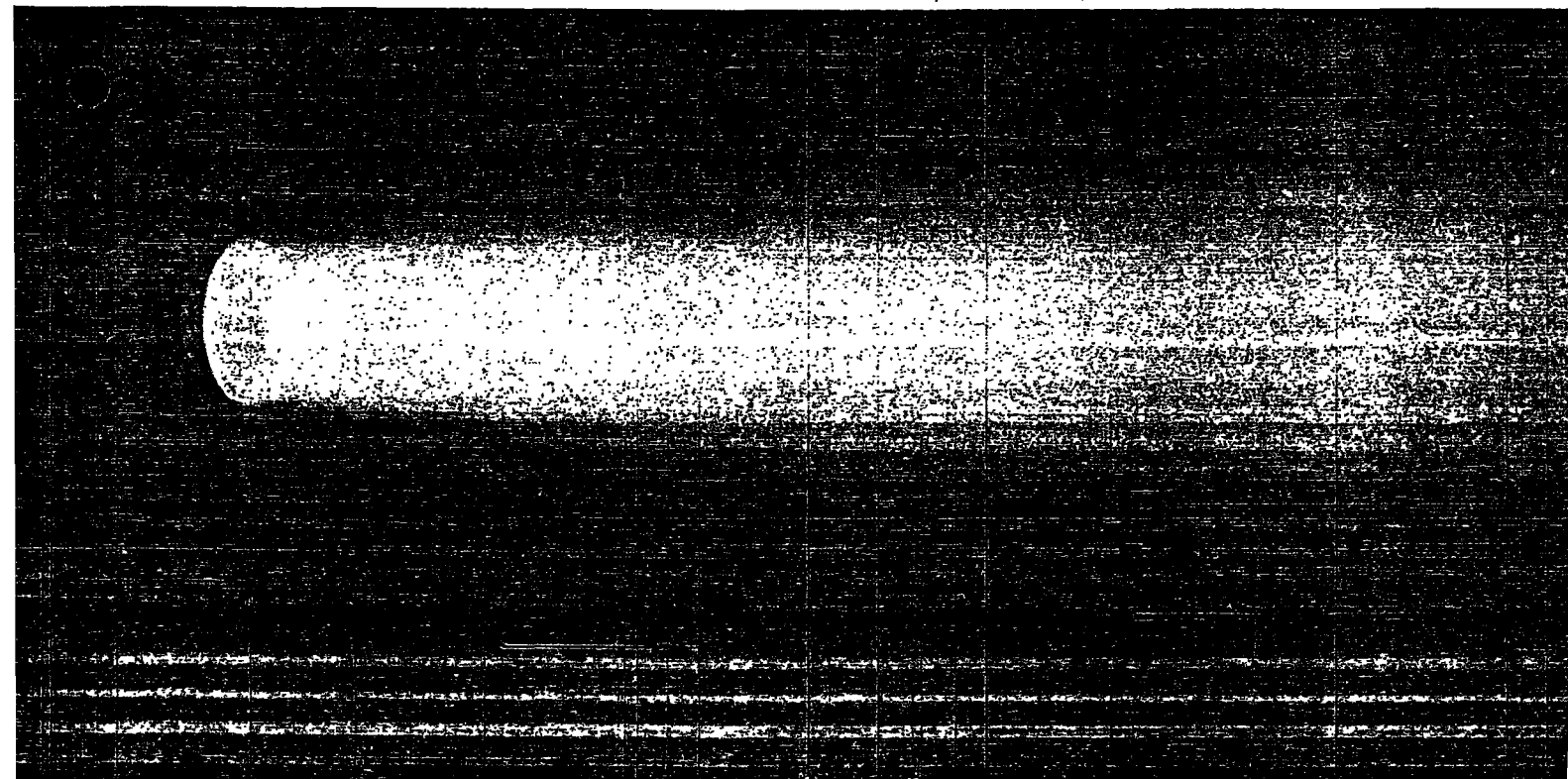
Met beide typen raketmotoren kan men alles voortstuwen: draagraketten voor satellieten en ruimtecapsules, kernkoppen en dragsters (zie Kijk, sept. '82, pag 46/47). Niemand had dus de behoefte en het geld om uitgebreid de mogelijkheden te onder-

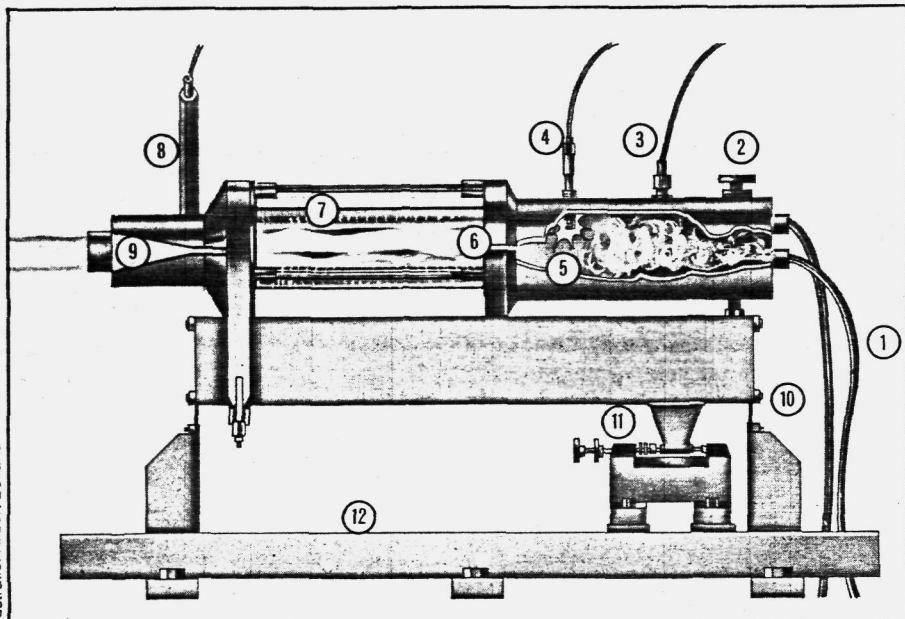
zoeken van een combinatie van beide motoren. Maar sinds brandstofbesparing in het middelpunt van de belangstelling staat, is het idee voor deze „motormenging” uit de kast gehaald en bestudeerd. Het resultaat is dat er in een bunker op het terrein van het Prins Maurits Laboratorium van TNO te Rijswijk een experimentele raketmotor staat. Het apparaat werkt met vaste brandstof en gasvormige zuurstof en heet daarom hybride (= tweeslachtig) raketmotor.

Deze motor combineert de eenvoud van een vaste stuwstofraket met de regelbaarheid van de stuwkracht van een vloeibare stuwstofraket. Omdat zuivere zuurstof duur is, bestuderen de onderzoekers voor de toekomst de mogelijkheden van een hybride raketmotor op gewone lucht. De hierin aanwezige zuurstof is gratis. TNO noemt de toekomstige versie van de hybride raketmotor op lucht geen raketmotor, maar *vaste brandstof verbrandingskamer*, afgekort tot VBVK. Maar net als elke raketmotor levert ook een VBVK snelstromende, hete gassen; waarmee we bijvoorbeeld elektriciteit kunnen opwekken (zie kader). Uiteraard heeft de nieuwe vinding nog technische onvolkomenheden. De vastheid van de brandstof leidt ertoe dat na het opbranden de motor stopt. De brandstofstaaf wordt verwijderd en vervangen door een

Links: De experimentele raketmotor op zijn voetstuk. De ongeveer 1 meter lange motor verbrandt plexiglas en levert dan 40 kilogram stuwkracht. Onder: uit de uitlaat stromen de hete gassen met een snelheid van 2 kilometer per seconde.

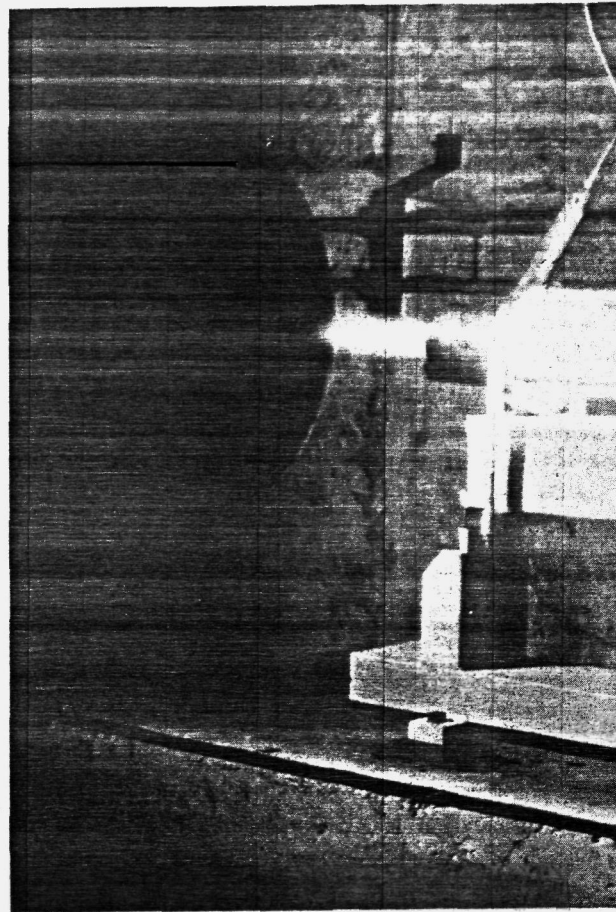
VERKT ZELFS OP VUILNIS



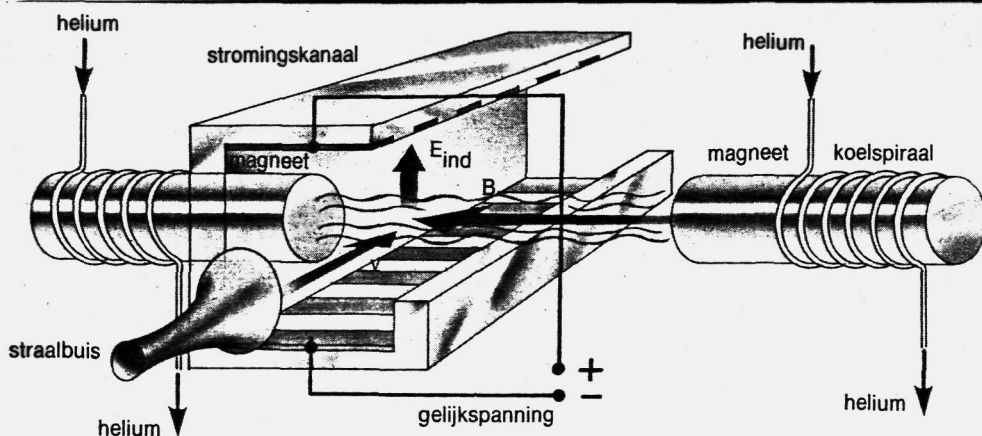


De hybride raketmotor werkt met vaste brandstof en gasvormige zuurstof. De vaste brandstof ontsteekt niet vanzelf, de verbranding moet worden ingeleid. Daarom voeren slangen zuurstof en – korte tijd – waterstof naar de mengkamer. Bougievonken ontsteken dit mengsel, dat met grote snelheid en hoge temperatuur in de verbrandingsruimte komt. Door de hitte verdampt een flinterdunne laag van de brandstof, die daarop mengt met de zuurstof en verbrandt. De rest van de staaf blijft verrassend koel, door de slechte geleidbaarheid van plexiglas. De hete gassen worden in de straalbuis in de uitlaat versneld (2 km/sec) en leveren daardoor de stuwkracht.

1) Slangen gastoevoer; 2) Fijnregeling waterstoftoevoer; 3) Drukmeting; 4) Bougie; 5) Mengkamer; 6) Diafragma (vernuwing); 7) Brandstofstaaf; 8) Drukmeting; 9) Straalbuis; 10) Flexibele ophanging; 11) Stuwkrachtmeting; 12) Zwaar frame;



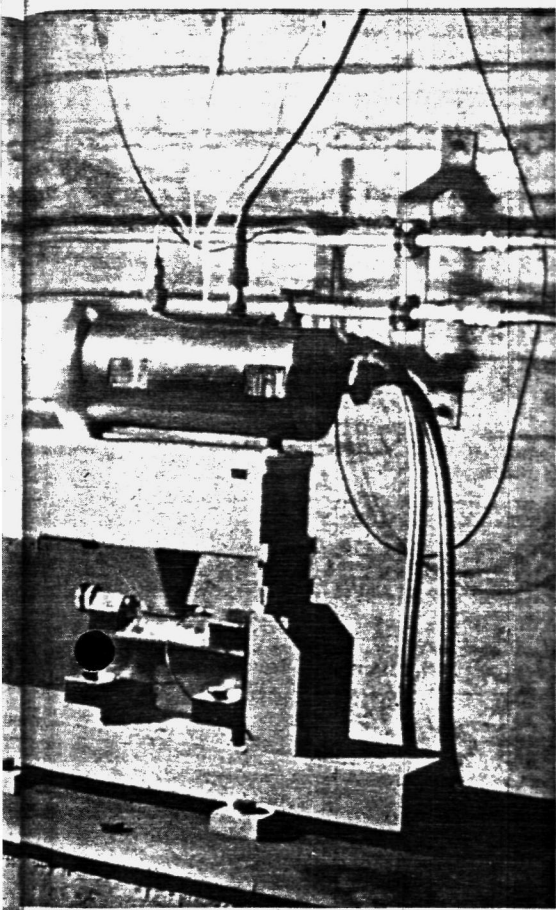
nieuwe. Al die tijd werkt de motor niet en levert dus geen snelstromende gassen. Veel processen hebben echter een continue toevoer nodig van warmte (stoomketel) of snelstromende gassen (gasturbine). Een praktisch bruikbare toepassing zit er daarom de eerste jaren nog niet in. Maar dat doet niets af aan de aantrekkelijkheid van de motor: met een hoog rendement goedkope brandstof (huisvuil) omzetten in warmte. Deze brandstofvoorraad wordt zeer regelmatig aangevuld, zodat er voorlopig geen gebrek zal zijn. Bovendien verloopt het doelmatig gebruik van brandbaar huisvuil en industrieel afval ons van een groot vuilnisprobleem (zie Kijk november '81, over Nederlands grote afvalberg). Terwijl de Rijswijkse ontwerpers hun best doen de overheid en de Nederlandse industrie voor hun motor te interesseren, komen vooral raketdeskundigen naar de hybride miniraket kijken. De afdeling Lucht- en Ruimtevaarttechniek van de Technische Hogeschool Delft werkt nauw samen met het laboratorium van TNO. Het doorzichtige plexiglas biedt uitstekende mogelijkheden om het verbrandingsproces te besturen. Met snelle camera's wordt de turbulente verbranding gefilmd en vertraagd afgedraaid. In geen enkel ander type raketmotor kan zo goed in het hart van de verbrandingskamer worden gekeken. Zo hoopt men meer kennis te verwerven, die de raketbouw ten goede kan komen. Plexiglas is een doorzichtige kunststof, een van de vele aardolieproducten en dus brandbaar. Door de hitte verdampt het plastic, mengt met de zuurstof en verbrandt vervolgens hevig. De temperatuur



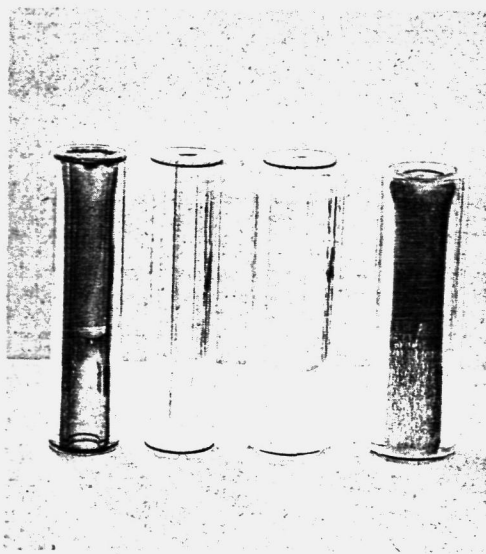
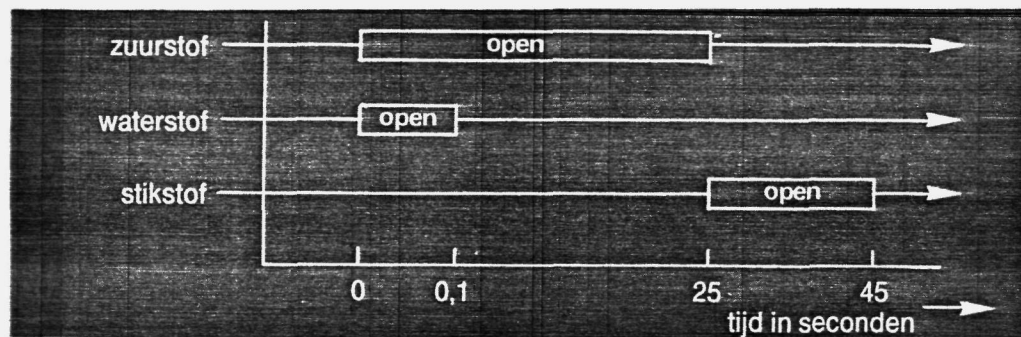
STROOM ZONDER STOOM

De meeste elektriciteit in Nederland wordt opgewekt via de keten: brandstof, stoomketel, stoomturbine, elektrische generator. Aan de Technische Hogeschool Eindhoven staat echter een experimentele centrale, die volgens een ander opzet elektriciteit opwekt. Daar voert men de hete verbrandingsgassen van kolen, met daarin elektrisch geladen deeltjes (ionen en elektronen), door een magnetisch veld. De positief en negatief geladen deeltjes worden elk naar een andere zijde van het stromingskanaal afgebogen door de Lorentzkracht – volgens de beroemde „kurketrekkerregel“. Elektroden vangen de ladingdeeltjes, waarna ze als elektrische stroom worden afgetapt. Deze gelijkstroom wordt omgezet in wisselstroom en aan het openbaar net geleverd. Deze techniek heet magnetohydrodynamische energie-omzetting, afgekort tot MHD (zie tekening).

Het hierboven beschreven principe is heel eenvoudig en al beschreven in 1840 door Michael Faraday. Maar voor de opwekking van elektriciteit is het proces alleen aantrekkelijk als er *zeer veel* elektronen zijn, die met *zeer hoge* snelheid door een *zeer sterk* magnetisch veld stromen. Door bijvoorbeeld kolen te verhitten met voorverhitte lucht, krijgen de verbrandingsgassen een hoge temperatuur (2000 – 2500°C). Dergelijk hete gassen bevatten ionen en elektronen. De concentratie hiervan wordt nog verhoogd door kalium aan de gassen toe te voegen. Vóór de gassen door de schoorsteen verdwijnen, wordt het kalium teruggewonnen en opnieuw gebruikt. De gasstroom krijgt een hoge snelheid door expansie in de straalbuis voor het kanaal. Het sterke magneetveld (5 tesla) wordt geleverd door een supergeleidende magneet. Die wordt gekoeld met vloeibaar helium van –271 °C (zie ook Kijk december '80, pag. 10). Het helium wordt vloeibaar gehouden door koeling met vloeibare stikstof (–200°C).



Foto's: Prins Mauritslaboratorium/TNO



Boven: De toevoer van verschillende gassen tijdens een proef. Bij het begin van de proef opent de zuurstofkraan. Gedurende 0,1 seconden wordt waterstof bijgemengd. Bougievonten onsteken het mengsel. Daarna sluit de waterstofkraan en mengt de zuurstof met het plexiglas. Na afloop wordt de motor schoon geblazen met stikstof.

Links: Twee typen brandstofstaven van doorzichtig plexiglas, voor en na gebruik. De een is dikwandiger dan de ander. Let op de sterke inbranding onder de bovenzijde. Dat komt door de werveling achter het diafragma. De onderzoekers streven naar het gebruik van brandstofstaven van brandbaar huishoudelijke afval.

Daarnaast: De hybride raketmotor in de bunker van het Prins Maurits Laboratorium in Rijswijk. Via de grote stalen pijp achter de uitlaat stromen de gassen weg. De technicus regelt de proef in een aparte ruimte en volgt het proces via een videocamera. Uit veiligheidsoverwegingen is er niemand in de bunker tijdens de experimenten.

De temperatuur van de gassen ná het MHD-kanaal is nog hoog genoeg om in een ketel stoom te produceren voor een turbine. Beide typen elektriciteitsmakers vullen elkaar dus aan. De stoom is na de turbine en de condensor afgekoeld tot water. Vóór het water terugstroomt in de ketel voor een nieuwe kringloop, wordt het in het MHD-kanaal voorverwarmd. Het koelt aldus de 640 paar elektroden in het stromingskanaal. Het materiaal waarvan – metaal met daarop een dunne keramieklaag – is namelijk niet bestand tegen de immense hitte. De hete gassen komen uit een speciale oven (cycloonbrander). Maar straks kunnen ze waarschijnlijk ook geleverd worden door een batterij hybride raketmotoren op voorverhitte lucht en brandbaar afval. De gassen mogen geen vaste deeltjes (slak) bevatten. Het kanaal moet namelijk slakvrij blijven, anders kunnen de elektroden hun werk niet naar behoren verrichten.

Bij een MHD-omzetting wordt chemische energie (warmte) direct in elektrische energie (spanningsverschil) omgezet. Er is geen tussenfase nodig, zoals bij een stoominstallatie. Daar wordt warmte omgezet in snelheid (kinetische energie) van stoomdeeltjes, die via een turbine en een generator elektriciteit opwekken. De doelmatigheid van een combinatie van een MHD en een stoomturbine, is dan ook beduidend hoger dan de gebruikelijke stoomturbine installatie (49,5 procent tegen 38 procent). Althans, dat verwacht projectleider professor Rietjens van de Eindhovense TH, als over 10 jaar de kinderziekten zijn genezen. Onder zijn leiding wordt het experiment uitgevoerd, dat uniek is in zijn soort in Europa. In de Verenigde Staten, maar vooral in Rusland, is men al verder met de ontwikkeling van MHD-omzetting.

SCHONE RAKETMOTOR

We verbranden heel wat. In motoren, in huis, in elektrische centrales en in de industrie. Door de vaak niet optimale verbranding, vervuult de lucht. De overheid bestrijdt deze vervuiling met steeds strengere milieu-eisen voor nieuwe verbrandingsmotoren en verbrandingsprocessen. En de technici moeten maar middelen vinden om aan de eisen te kunnen voldoen. Zo'n middel is de Vaste Brandstof Verbrandingskamer (VBVK). De bijzonder hoge verbrandingstemperatuur in deze motor zorgt voor een vrijwel volledige verbranding van de brandstof. Dat is een voordeel van een hoge verbrandingstemperatuur. Het nadeel is het ontstaan van stikstofoxyden, door binding van stikstof en zuurstof uit de aangezogen lucht. Stikstofoxyden kunnen direct de gezondheid schaden, maar bovenal spelen ze een rol bij het ontstaan van de beruchte foto-chemische smog. Eindhoven heeft er dit voorjaar nog last van gehad. Stikstofoxyden ontstaan niet als er precies genoeg zuurstof wordt aangezogen om alle koolwaterstoffen te verbranden. Zo'n verbranding heet *stechiometrische* verbranding. Maar de huidige oven- en motortechnieken kunnen helaas niet werken met een dergelijke verbranding. Bij de hybride raketmotor en zijn toekomstige variant, de VBVK, is het wel mogelijk. Proeven daarmee toonden aan dat een *lage* verbrandingstemperatuur en een *overmaat* lucht dertig maal meer stikstofoxyden opleverden dan een *hoge* verbrandingstemperatuur en een *geringe ondermaat* lucht. Dat laatste houdt overigens het gevaar in voor het ontstaan van het giftige koolmonoxyde. Maar de VBVK is een stap in de richting van de rookloze motor.

in de verbrandingskamer is ongeveer 3000 K (2727°C). Maar plexiglas geleidt warmte slecht. Bovendien brandt het verhitte deel van plexiglas op en verdwijnt als verbrandingsgas. Daarom blijft het overige plexiglas redelijk koel en kan het na afloop worden aangeraakt. De vastheid en het zichzelf koel houden van de brandstof, maakt een ommanteling van de brandstofstaaf overbodig. De brandstof vormt *zelf* de buitenwand van de verbrandingskamer. Het is onwaarschijnlijk, maar geen sprookje. In een doorzichtige buis heerst inwendig een temperatuur van 3000 K (2727°C) en een druk van 20 bar. Een paar centimeter verder heerst aan de buitenzijde de omgevingsdruk van 1 bar en wordt het oppervlak slechts 300 K (27°C)!

Een stuwmotor, die zuurstof uit atmosferische lucht haalt, hoeft zelf geen zuurstof mee te nemen. Dat scheelt vanzelfsprekend in het totale gewicht van de motor. De onderzoekers hebben berekend dat het lanceergewicht van de space shuttle met 18 procent (350 ton) kan worden vermindert, als de ruimtendeel deze motoren krijgt. De 'boosters' werken namelijk alleen tijdens het vluchtgedeelte in de dampkring. De hybride raketmotor brandt op huisvuil, heeft een nagenoeg volledige verbranding door de hoge temperatuur, sluit aan op de moderne methode van elektriciteitsopwekking, zorgt voor gewichtsbesparing in de ruimtevaart. Bij elkaar genoeg redenen om de ontwikkeling van deze machine in de gaten te houden.

Tekst: Nico Wittebrood

informatie verkrijgbaar bij stafafdeling In- en Externe betrekkingen TNO, postbus 297, 2501 DB Den Haag.