

Direkte omzetting van warmte in elektriciteit (I)

Citation for published version (APA):

Bogaardt, M. (1961). Direkte omzetting van warmte in elektriciteit (I). *Atoomenergie en haar toepassingen*, 3(7), 139-146.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1961

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.



atoomenergie

en haar toepassingen

DE REDACTIONELE INHOUD STAAT ONDER VERANTWOORDELIJKHEID VAN HET REACTOR CENTRUM NEDERLAND

Directe omzetting van warmte in elektriciteit (I)

door Prof. Dr. M. BOGAARDT

1. De titel van dit overzicht duidt aan dat in hoofdzaak gesproken wordt over directe omzettingmethoden, die erop gericht zijn, een bepaalde vorm van energie, nl. *warmte*, om te zetten in *elektrische energie*. Om deze methoden en het belang ervan in een ruimer kader te kunnen bezien is het noodzakelijk ook de directe omzetting van *chemische energie* in *elektrische energie* bij onze beschouwingen te betrekken. Zo zal er dan gelegenheid zijn om een drietal verschillende energiebronnen met elkaar te vergelijken in het licht van de nieuwe omzettingmethoden.

De directe omzetting van chemische in elektrische energie is eigenlijk een terrein dat niet tot het vakgebied van de auteur behoort: het heeft noch met de kernenergie, noch rechtstreeks met de warmte-techniek te maken en een verontschuldiging tegenover de meer deskundigen op dit gebied voor het binnendringen op hun vakgebied is dus op zijn plaats.

2. Er is in de laatste jaren veel sprake geweest van ontwikkeling van nieuwe methoden van energieopwekking. Er zijn alarmerende berichten geweest over slinkende voorraden fossiele brandstoffen en er is veel publiciteit geweest rond de kernenergie. Welke redenen kunnen er nu zijn om naar nieuwe methoden van energieproductie te zoeken.

In hoofdzaak zijn drie soorten van redenen aan te wijzen. Ten eerste: drastische stijging in de totale energiebehoefte van de wereld. Zoals bekend is, stijgt grofweg het energieverbruik in de reeds ontwikkelde landen met een factor 2 per 10 jaar, terwijl daarnaast de ontsluiting van zogenaamde achtergebleven gebieden tot een nog snellere stijging van de totale wereldbehoefte zal leiden.

De stijging van de behoefte kan men trachten op te vangen door het aanboren van nieuwe energiebronnen; zo is men naast de waterkracht en de

chemische energie van de conventionele fossiele brandstoffen overgegaan tot het exploreren van de zonnestraling en van de kernenergie als uitgangspunt voor bruikbare energie. Verder kan men proberen door verfijning van de gebruikelijke produktiemethoden een beter rendement te behalen, waardoor een zuiniger gebruik gemaakt wordt van de energievoorraad en ten slotte kan men proberen nieuwe methoden te vinden, die een beter gebruik van de energievoorraad mogelijk maken.

Een tweede drijfveer tot het ontwikkelen van nieuwe omzettingmethoden is gelegen in de drang tot goedkopere produktie. Bij de enorme hoeveelheid kW-uren die per jaar wordt geleverd, betekent een kleine relatieve besparing op de produktiekosten een geweldige besparing in de totale hoeveelheid besteed geld.

De derde reden om tot nieuwe produktiemethoden van bruikbare energie te komen, is gelegen in de nieuwe soort behoeften, die in de laatste jaren zijn ontwikkeld. Drie categorieën mogen worden genoemd:

a. De energievoorziening voor aardsatellieten; hier gaat het om kleine eenheden.

b. Energievoorzieningen voor de ruimtevaart inclusief ruimtestations; het gaat hier om grotere tot zelfs grote eenheden.

c. De energievoorziening voor militaire behoeften; hier geldt het niet alleen voortstuwung, maar ook energievoorziening op afgelegen bases.

3. In dit overzicht wordt eerst uitgegaan van de nieuwe omzettingmethoden van energie; daarna wordt nagegaan welke vormen van energieconversie het meest geschikt zijn voor de verschillende denkbare energiebronnen en ten slotte wordt een uitstapje ondernomen op het terrein van de ruimtevaart, juist omdat daar de meest directe behoefte

pag.

130
130
130
130
130
130
127
123
125
126
126
126
126
126
126
126
126
125
127
127
127
127
123
127
123
123
123
122
128
128
127
127
126
128
126
128
128
128
129
127
126
127
124
128
127
129
129
129
129
123
127
129
129
125
124
123
124
129
130

bestaat aan de ontwikkeling van nieuwe methoden voor directe omzetting van allerlei vormen van energie in elektriciteit. De methoden, die de moeite waard zijn, zijn de volgende:

- 1) De thermo-elektriciteit, een principe dat reeds in 1821 door Seebeck is ontdekt.
- 2) De thermo-emissiemethode, die in 1878 door Edison naar voren is gebracht.
- 3) De magneto-hydrodynamische omzetting, die door Faraday reeds in 1831 is geformuleerd.
- 4) Chemische brandstofelementen, waarvan het principe in 1802 door Sir Humphrey Davy is aangegeven en waarvan Grove in 1831 de eerste belangrijke experimentele resultaten kon laten zien.
- 5) Fotogalvanische omzetting; een methode die nog maar zeer weinig ontwikkeld is.
- 6) Constante-stroombatterijen; apparaatjes waarmee men slechts zeer geringe vermogens, maar hoge spanningen kan opwekken.
- 7) Contact-potentiaal-cellen; en ten slotte:
- 8) De p-n silicium contactmethode, die reeds een grote rol speelt bij de ontwikkeling van de ruimtevaart. Wij zullen dadelijk zien hoe deze methode wordt toegepast in batterijen, waarmee de huidige satellieten uitgerust zijn.

Bij de bespreking van de verschillende methoden zal het opvallen dat alle methoden in hun ontwikkeling steeds hetzelfde soort problemen opwerpen: namelijk de materiaalproblemen. Telkens wordt gevraagd naar materialen die hoge temperaturen kunnen weerstaan, bestendig zijn tegen corrosie, behoorlijke mechanische eigenschappen bezitten en in sommige gevallen een geschikte mate van elektronenemissie vertonen bij de werkteemperatuur. Voorts zal men zien dat bij alle nieuwe methoden het huidige bereikte rendement zeer laag ligt. Figuur 1 laat zien welke rendementen men in een redelijk tijdsbestek hoopt te halen;

Overzicht methoden van electr. Opwekking					
	Thermo-electriciteit	Thermo-emissie	M. H. D.	Brandstof element	Con.
Datum	1821	1878	1831	1802	—
Litvinder	Seebeck			Davy	—
Bedrijfstemp.	>1100 °C	>2000°C	>2800°C	>1000 °C	<650°C
Efficiency	>0,30	>0,30	>0,60	>0,75	0,40

Fig. 1. Overzicht van methoden van elektriciteits-opwekking.

tevens toont die tabel de bedrijfstemperaturen van de verschillende apparaten.

Ten slotte is vermeldenswaard dat alle hier genoemde nieuwe methoden van directe elektriciteitsproductie met elkaar gemeen hebben, dat zij geen bewegende onderdelen hebben; het zijn zogenaamde statische apparaten.

4. Thermo-elektrische omzetting

Om de verschijnselen, die aan de thermo-elektriciteit en de thermo-emissiemethode van directe omzetting ten grondslag liggen, moet men zich eerst even begeven op een terrein, dat tot de vaste-stoftheorie behoort en zelfs moet men nog iets verder teruggaan en beginnen bij de bouw van het atoom. De bovenste helft van figuur 2 illustreert de situatie voor een vrij atoom. Links zijn schematisch de banen aangegeven waarin de elektronen zich om de kern kunnen bewegen. Elke baan wordt gekarakteriseerd door een bepaalde energie, hoger (d.w.z. minder sterk negatief) naarmate de baan verder naar buiten ligt. In de grondtoestand vullen de aanwezige elektronen deze banen op, beginnende bij de binnenste (in figuur 2 zijn deze banen getrokken). Toevoer van een bepaald kwantum energie doet één of meer elektronen in een meer naar buiten gelegen baan overgaan (gestippeld): het atoom is dan in een „aangeslagen” toestand. Nog grotere toevoer van energie doet het elektron geheel afsplitsen, zodat een positief geladen ion overblijft. Rechts boven in figuur 2 zijn de energieniveaux geschetst die met deze verschillende toestanden overeenkomen.

Beschouwen we nu een vaste stof, waarin een groot aantal identieke atomen zich in een regelmatig patroon op korte onderlinge afstanden bevindt. Van groot belang is dan de mate waarin de verschillende elektronenbanen elkaar overlappen. In metalen overlappen de bezette en onbezette elektronenbanen elkaar sterk. De elektronen in die banen kunnen zich daardoor vrijelijk door het metaal bewegen, zodat men van een „elektronengas” kan spreken. Hierbij vervloeien de atomaire energieniveaux tot een continuüm, zodat de elektronen in het gas nu alle mogelijke energieën hebben beneden een bepaalde bovengrens, die men aanduidt als het „fermi-niveau”.

In niet-metalen is de situatie ongeveer zoals voor twee atomen in de onderste helft van figuur 2 geschetst. De bezette banen overlappen in deze schets niet, wel echter bepaalde onbezette banen. Wordt nu door energietoevoer een electron in het rechte atoom in zo'n onbezette baan gebracht dan kan het zonder moeite overgaan op de overeenkomstige baan rond het naburige atoom. Aldus ontstaat een

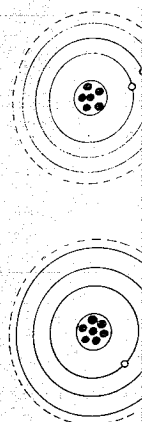


Fig. 2.

groot a
weinig
het n
tezame
trische
naarma
vinden
Wanne
geleidi
Het is
energie
mogeli
door h
warmte
de ele
wordt
Voor h
fen wa
in ener
fen zij
bij ma
noemt
Alvore
merkt
nog v
electron
naar b
radiobi
In vele
electron
lichaan
een tel
er blij
hete el
den op
maat
anode

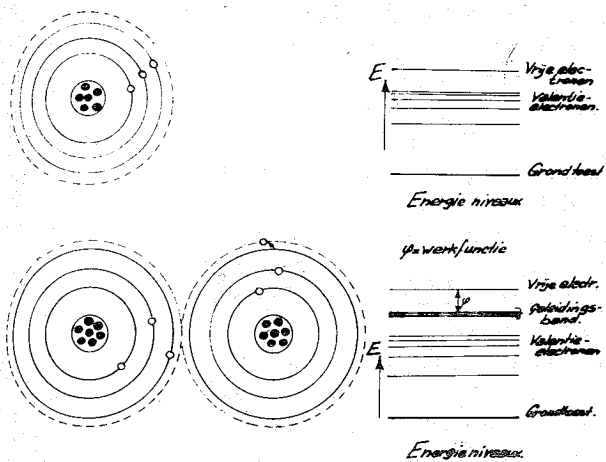


Fig. 2. Schema van energieniveaux van electronen.
Boven: In een vrij atoom.
Onder: In een rooster van atomen.

groot aantal mogelijke banen in het kristal, met weinig verschillende karakteristieke energieën. In het niveauschema (rechtsonder) vormen deze tezamen de zogenaamde „geleidingsband”; elektrische geleiding door het materiaal zal groter zijn naarmate er zich meer electronen in die band bevinden.

Wanneer zich in het geheel geen electronen in de geleidingsband bevinden is de stof een isolator. Het is echter duidelijk dat als er maar voldoende energie wordt toegevoerd toch elektrische geleiding mogelijk wordt. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door bestraling, doch ook door de toevoer van warmte. Deze komt namelijk deels ten goede aan de electronen, waarvan een aantal dan in staat wordt de sprong naar de geleidingsband te maken. Voor het volgende zijn vooral van belang die stoffen waarin de geleidingsband slechts weinig hoger in energie ligt dan de bezette niveaus. Zulke stoffen zijn bij lage temperatuur isolerend, maar gaan bij matige temperatuurverhoging geleiden: men noemt ze *halfgeleiders*.

Alvorens hierop verder in te gaan zij nog opgemerkt dat zowel bij metalen als halfgeleiders bij nog verdere opvoering van de temperatuur de electronen in de geleidingsband uit het materiaal naar buiten kunnen treden. De gloeidraad van een radiobuis is daarvan het bekendste voorbeeld.

In vele van de te bespreken toepassingen worden electronen uit een electrode gestookt, waardoor een lichaam achterblijft met een tekort aan electronen, een tekort aan negatieve lading. Anders gezegd, er blijft een positief geladen lichaam over. De hete electrode is de *kathode* en de electronen worden opgevangen op de *anode*, waar zij een overmaat aan negatieve lading teweegbrengen. De *anode* is dus de *negatieve electrode*.

De stap nu, welke een electron moet maken om uit de geleidingsband over te gaan naar de toestand van vrij electron in de ruimte, noemt men de *werkfunctie* (aangegeven in volts, V). De energie voor deze stap wordt aangegeven in electron volts (eV).

Tot nu toe is gesproken over halfgeleiding in zuivere stoffen. In de praktijk echter wordt de halfgeleiding veelal bepaald door kleine onzuiverheden. Bepaalde bijmengsels doen plaatselijk in het materiaal energieniveaux ontstaan gelegen boven de gevulde energieniveaux en vlak onder de lege geleidingsband. De electronen in zulke extra niveaux zullen dus reeds bij geringe energietoevoer in de geleidingsband komen. De onzuiverheden blijven daarbij positief geladen achter, en de geleiding geschiedt door de electronen. Men spreekt van een „n-type” halfgeleider.

Tot nu toe is er eenvoudigheidshalve aan voorbijgegaan dat in werkelijkheid onder de tot nu toe beschouwde lege geleidingsband, nog een andere band ligt, gevormd door de overlap van gevulde electronenbanen. Deze band is dan geheel gevuld met electronen en geeft uiteraard geen geleiding. Echter, bepaalde onzuiverheden veroorzaken plaatselijk onbezette niveaux vlak boven deze band. Energietoevoer zal deze nu doen bezetten door electronen uit de gevulde band, waarin dan positieve „gaten” achterblijven. Deze kunnen migreren en geven dan eveneens aanleiding tot elektrische geleiding. Omdat nu de ladingsdragers positief zijn spreekt men van een „p-type” halfgeleider.

In figuur 3 is geschetst wat er gebeurt wanneer men een staafje halfgeleidend materiaal aan één uiteinde verhit. In geval van een n-type halfgeleider zullen er dan aan de warme kant electronen in de geleidingsband komen. Ze zullen de neiging hebben zich door het materiaal te verspreiden, met name naar de koude kant. Daardoor ontstaat echter een potentiaalverschil van het in figuur 3b ge-

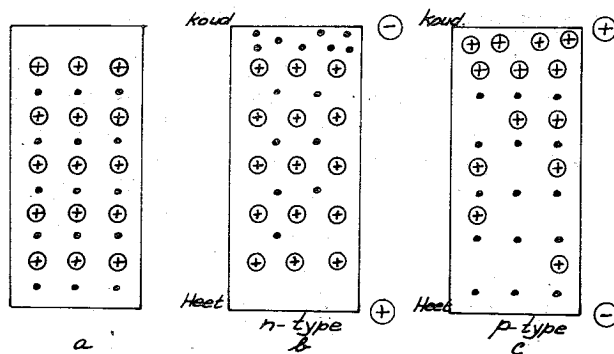


Fig. 3. Het optreden van een potentiaalverschil door het aanbrengen van een temperatuurverschil dat verplaatsing van ladingen veroorzaakt.

geven teken, dat verdere migratie tegenhoudt. Op die manier geeft een temperatuurverschil een spanning over het staafje. Voor een p-type halfgeleider geldt een overeenkomstige redenering, doch nu wordt het teken van het potentiaalverschil omgekeerd (figuur 3c).

Men kan van dit verschijnsel geschikt gebruik maken door een schakeling toe te passen zoals in figuur 4 is aangegeven. Afwisselend worden n-typen en p-typen halfgeleiders aaneengeschakeld, zodanig dat de potentiaalverschillen tussen warme las en koude las telkens bij elkaar kunnen worden opgeteld. In principe is hiermede het thermo-elektrische element, zoals dat thans wordt ontwikkeld voor allerlei toepassingen, beschreven.

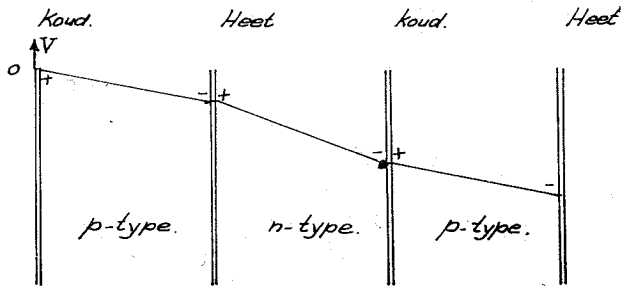


Fig. 4. De opbouw van een potentiaalverschil met behulp van afwisselend p- en n-type halfgeleiders.

Welke eisen moeten nu aan het materiaal van halfgeleiders gesteld worden?

In de eerste plaats moeten er zoveel vrije ladingdragers zijn dat wij voldoende transport van stroom door het materiaal kunnen krijgen. Anderzijds is bekend dat een hoge concentratie van vrije ladingdragers tot een laag potentiaalverschil per graad Celsius temperatuurverschil aanleiding geeft. Als voorbeeld worde genoemd:

Isolatoren	: 10^{10} e/cm ³	10.000 μ V/°C
Metalen	: 10^{23} e/cm ³	5 μ V/°C
Halfgeleiders	: 10^{19} e/cm ³	ca 150 μ V/°C

In het algemeen zal een geschikte halfgeleider slechts werken in een betrekkelijk nauw temperatuurgebied, met name zijn de bekende natuurlijke halfgeleiders bruikbaar bij een temperatuur < 600°C; bij hogere temperaturen worden de negatieve en positieve ladingdragers gelijk bewegelijk, zodat een temperatuurgradiënt niet langer aanleiding is tot het ontstaan van een potentiaalverschil. Om deze moeilijkheid te ontgaan, gaat men nu uit van isolatoren waaraan bepaalde zogenaamde „dopes” worden toegevoegd, zodat halfgeleiders ontstaan die bij hoge temperatuur bruikbaar zijn. Men vervaardigt nu een zodanige serie van mate-

rialen, dat een geheel temperatuurgebied nuttig kan worden gebruikt door van het ene soort halfgeleider op een ander soort over te gaan, telkens de optimale soort kiezende bij het temperatuurgebied in kwestie. Halfgeleiders die de meeste aandacht hebben zijn: zink, antimoon, lood-telluride, bismuth-telluride en germanium-telluride, en ook indium-antimonide en indium-phosphide.

Wanneer men nu een bruikbare thermo-elektrische eenheid wil maken, moet op de volgende ontwerp-eisen gelet worden:

- 1) Er moet een goed contact bestaan tussen de halfgeleider en de metaal-geleider die de verbinding met het uitwendige circuit vormt, want wij moeten zorgen dat er zo min mogelijk elektrische weerstand optreedt.
- 2) De materialen moeten beschermd worden tegen corroderende invloeden. Deze kunnen afkomstig zijn van verbrandingsgassen of van koelmiddelen, die gebruikt worden om de warme resp. koude electrode op temperatuur te houden.
- 3) De constructie moet schok- en trillingvast zijn.
- 4) Voor vele toepassingen, met name in de ruimtevaart, dient de constructie zo licht mogelijk te zijn. Waarden van 100 W/kg zijn reeds haalbaar.
- 5) Men verlangt een hoog rendement. Met de thans beschikbare materialen is theoretisch een rendement van 17% mogelijk; in praktische uitvoeringen blijkt het rendement ca 6% te zijn. Er is geen reden waarom in de toekomst geen rendementen van 40% haalbaar zouden zijn. Men verwacht in 1965 een rendement van 30% te zullen hebben bereikt.

Een bijzonderheid van de hier gegeven mogelijkheid om warmte om te zetten in elektriciteit is, dat het rendement onafhankelijk is van het vermogen. In de conventionele machines is dat nooit het geval en met name stijgt het rendement naarmate het vermogen wordt opgevoerd. In figuur 5 wordt dit verband weergegeven.

6) Men moet ervoor zorgen, dat zo min mogelijk warmte rechtstreeks van de warme naar de koude las wordt overgedragen. Voor zulk een ongewenste overdracht is bijvoorbeeld straling door de hete electrode aansprakelijk, maar ook warmtegeleiding door de halfgeleiders en door de verbindingen met het uitwendige circuit.

Het lijkt een aantrekkelijke mogelijkheid om de warmte, die uit de koude electrode moet worden afgevoerd door middel van het koelmedium, te gebruiken voor stoomproductie.

Bij de temperatuurniveaux, waarop op dit moment de koude elektroden worden bedreven, zal deze stoom echter van laagwaardige kwaliteit zijn.

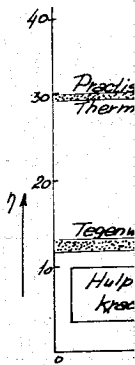


Fig. 5. omzett

5. Th

Het p-
sproke
losgen
vulde
electro
wordt
energie
figuur
dat da
dingsb
energie
materi
Het ve
 φ_c en
gewek
den. E
dat m
raturer
opstell
betrekl
energie
geven,
trode
ca 250
De hic
render
Het v
schil;

P in V
I in a
 φ in
Het r

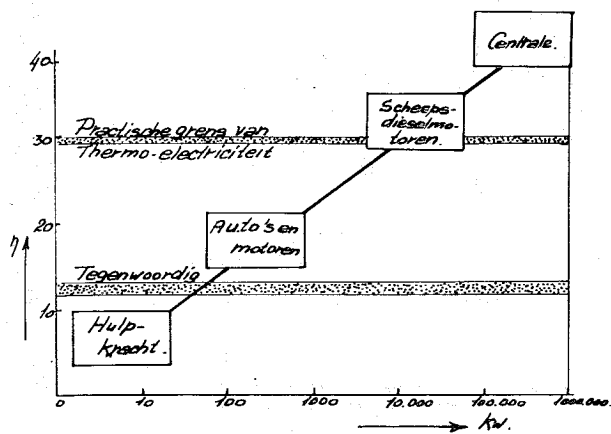


Fig. 5. Het rendement van toestellen voor energie-omzetting als functie van het vermogen per toestel.

5. Thermo-emissie apparaten

Het principe van de thermo-emissie is zojuist besproken. Uit de hete elektroden worden electronen losgemaakt, die een vacuum of een met gas gevulde ruimte doortreden om op de negatieve, koude elektrode te vallen. Aan de hete elektrode wordt aan een electron uit de geleidingsband een energie toegevoerd gelijk aan de werkfunctie; in figuur 6 is een en ander voorgesteld. Het electron, dat dan op de anode valt, valt daar in de geleidingsband van het anodemateriaal, waarbij een energie gelijk aan de werkfunctie van het anodemateriaal vrijkomt en wel in de vorm van warmte. Het verschil tussen de werkfunctie van de kathode φ_c en die van de anode φ_a is gelijk aan het opgewekte potentiaalverschil tussen de twee elektroden. Het is bij deze opstelling direct al duidelijk dat men te maken heeft met veel hogere temperaturen dan bij de zogenaamde thermo-elektrische opstelling. Hier immers moeten de electronen een betrekkelijk grote sprong maken, nl. gelijk aan de energiesprong, die door de werkfunctie is aangegeven, meestal in de orde van 5 eV. De hete elektrode in een emissiekoppel werkt dan ook bij ca 2500 °C.

De hierna volgende beschouwing laat zien hoe het rendement van een emissiekoppel eruit ziet.

Het vermogen = stroomsterkte \times potentiaalverschil; dus

$$P = I (\varphi_c - \varphi_a)$$

P in Watts/cm²;

I in amp/cm²;

φ in V.

Het rendement definiëren wij als:

$$\eta = \frac{\text{vermogen}}{\text{toegevoerde warmte}}$$

Het totaal van de toegevoerde warmte bestaat uit de volgende posten:

1) De energie, die nodig is om de electronen de sprong uit de geleidingsband te doen maken, dus $I \times \varphi_c$.

2) Tengevolge van de warmtebeweging hebben niet alle electronen in de geleidingsband dezelfde energie, maar er bestaat een bepaalde verdeling. Van de electronen, die genoeg energie bezitten om de sprong gelijk aan φ_c te maken, is gemiddeld de resterende energie na de sprong gelijk aan $2 kT$ en de toegevoerde energie, die daarmee correspondeert, $I/e \times 2 kT$, waarin k = constante van Boltzmann; T = absolute temperatuur, °K, en e = lading van het electron.

3) Ten slotte verliest de warme elektrode warmte door straling naar de koude elektrode; noem dit verlies S (in Watts/cm²).

De volgende uitdrukking voor het rendement wordt nu dus verkregen:

$$\eta = \frac{I (\varphi_c - \varphi_a)}{\text{input}} = \frac{I (\varphi_c - \varphi_a)}{I (\varphi_c - 2kT/e) + S} = \frac{\varphi_c - \varphi_a}{\varphi_c + 2kT/e + S/I}$$

Men ziet uit deze formule dat het van groot belang is φ_a , dus de werkfunctie van de koude elektrode, zo laag mogelijk te houden. De grootte van de werkfunctie van de kathode, de emissie-elektrode, blijkt in vele gevallen niet zo belangrijk te zijn: hij komt als grote term in teller en noemer voor. Voorts ziet men, dat het van belang is een zo hoog mogelijke specifieke emissiestroom, I , te halen. Dat betekent, dat — omdat de emissiestroom

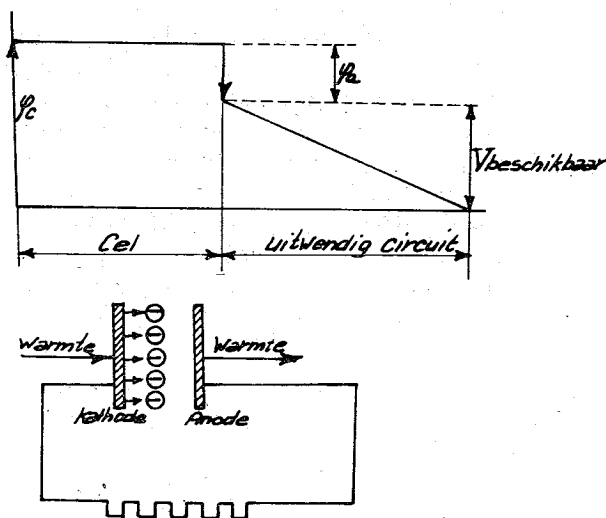


Fig. 6. Schema van een thermo-element dat op electronenemissie berust

van de temperatuur van de emitterende electrode afhangt — deze electrode een hoge temperatuur moet hebben. Dat betekent echter weer, dat ook de stralingsverliezen groter gaan worden.

In eerste instantie loopt echter I sneller met de temperatuur op dan de term S . Later bereikt de emissiestroom een zogenaamde verzadigingswaarde, zodat verdere temperatuurstijging dan niet meer leidt tot een verhoging van de emissiestroom, maar wel tot een vergroting van de stralingsverliezen.

In figuur 7 wordt voor een aantal materialen het rendement als functie van de absolute temperatuur getoond. Verder moet men wel bedenken, dat ook de voltage een functie is van de stroomdichtheid, dit hangt o.a. samen met het verschijnsel van de ruimtelading. De electronen, die met een bepaalde snelheid de emitterende electrode verlaten, bewegen zich tegen een potentiaalverschil in en verliezen dus hun energie, met andere woorden hun snelheid. In de buurt van de negatieve, koude electrode is daardoor een opeenhoping te vinden van zich traag bewegende electronen. Deze electronenwolk representeert een gebied van negatieve lading en dus van negatieve potentiaal ten opzichte van de emitterende kathode.

Deze wolk van electronen, dus eigenlijk een plaatselijke verdichting in de electronenbevolking van de ruimte tussen de twee electroden, noemt men de *ruimtelading*. Deze ruimtelading betekent een extra weerstand voor de uitgezonden electronen en dus een beperking van de totale stroomdichtheid en het daarmee samenhangende potentiaalverschil. Men heeft er nu het volgende op gevonden.

In de electrodenruimte wordt een positieve ladingdrager gebracht, bestaande uit zware ionen, die zich maar zeer traag bewegen, vergeleken bij de electronen en die daardoor praktisch bijzonder weinig aan het elektriciteitstransport door de electronen afdoen. De aanwezigheid van deze positief geladen ionen neutraliseert het effect van de negatief geladen electronenwolk bij de anode. Veelal wordt als zwaar-ion het caesium-ion gekozen. De dampspanningen, waarin de caesium-ionen worden toegepast, variëren van 10^{-3} tot enkele millimeters kwikdruk.

Een te hoge concentratie van caesium-ionen leidt tot: elektrische verliezen, warmtetransport door convectie en verhoging van de inwendige Ohmse weerstand van het element. Koppels, waarin men dergelijke zware ionen toepast, noemt men wel plasma-thermokoppels.

Het ontwerpen van thermo-emissie-elementen wordt uiteraard zeer sterk beïnvloed door de beschikbare materialen. Zoals gezegd, moeten de hete electroden bij zeer hoge temperatuur werken om vol-

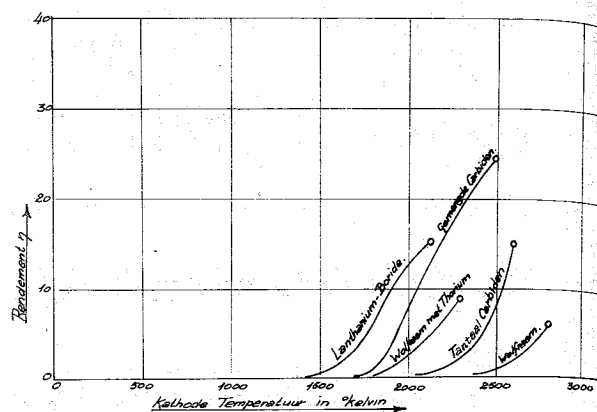


Fig. 7. Rendement van thermo-emissie-elementen als functie van de werktemperatuur.

doende electronen te emitteren; van de andere kant echter mag bij die temperatuur niet te veel materiaal verdampen. De elementen, waarin géén plasma wordt gebruikt om de ruimtelading te nivelleren, zijn al bijzonder moeilijk te maken omdat de twee electroden op een afstand van ca 1/1000 mm van elkaar moeten worden gebracht, juist om het ruimteladingeffect te vermijden. De meeste keramische materialen, die geschikt zijn voor het hoge temperatuurbedrijf, laten een zodanige bewerkingssnauwkeurigheid van het oppervlak niet toe. De ontwikkeling van geschikte materialen is, mede daardoor, een moeizaam proces.

Het is interessant om na te gaan welke soort energiebron het meest in aanmerking komt voor gebruik tezamen met thermo-emissie-elementen. Het blijkt dat de conventionele energiebron — kolen of olie — niet geschikt is; ten eerste omdat bij de verbranding te lage temperaturen beschikbaar komen, en ten tweede omdat het moeilijk is de electroden bij hoge temperatuur met rookgas te verhitten en tevens tussen de electroden een vacuum te handhaven; het rookgas zal namelijk naar de vacuumruimte diffunderen.

Ook bij de verbranding kan men zeer hoge temperaturen behalen, maar dan moet worden uitgegaan van zeer bijzondere brandstoffen zoals waterstof, acetyleen en zuurstof. Met dergelijke brandstoffen zal het moeilijk zijn een economisch aantrekkelijk voorstel te maken. Een veel geschiktere energiebron vinden wij in de kernreactor en in de zonne-energie.

Deze laatste bron is van veel interesse voor ruimtevaarttoepassing. Het lijkt zeker, dat in de toekomst de toepassing van thermo-emissie-elementen de aangepaste conversiemethode van energie voor de ruimtevaart zal worden.

De andere bron die genoemd is, de kernreactor, moet voor gebruik met dit soort elementen een

gewel
bouwe
nog n
plasma
rechtst
voorbe
geven.
In het
de pla
ment
Op di
de bes
dan 2
dit is
electro
produ
behoor
den g
dynam
Als v
stoom
neer r
van d
omgez
ment
totaal
spronk
MW d
méér.
norma
haald.
toepas
44%
440 M
Het z
koppel
logisch
reacto
denke
verger
6. M
Zoals
omzet
genoe
een n
opwel
trische
passin
stroom
breng
Farad
te win
dat b
sche v
plaats

geweldige ontwikkeling doormaken. De reactorbouwers zijn aan die ontwikkeling op dit moment nog niet toe, hoewel anderzijds reeds een aantal plasma-thermokoppels is gemaakt, die hun energie rechtstreeks aan de kernenergie ontleen. Een voorbeeld van zulke koppels wordt zo dadelijk gegeven.

In het begin van dit overzicht is erop gewezen, dat de plasmakoppels op den duur zeker een rendement van meer dan 30% zullen kunnen behalen. Op dit moment is het haalbare maximum, dat door de beschikbare materialen wordt gesteld, niet meer dan 20%. Wanneer men echter de verlieswarmte, dit is de warmte die uit de zogenaamde „koude” electrode wordt afgevoerd, gebruikt voor stoomproductie, dan kan, omdat ook de koude electrode behoorlijk warm is, stoom van hoge kwaliteit worden geproduceerd, waarmee een hoog thermodynamisch rendement bereikbaar is.

Als voorbeeld diene een moderne, conventionele stoomcentrale met een rendement van 42%. Wanneer nu de centrale wordt aangepast, zodat 20% van de energie rechtstreeks in elektriciteit wordt omgezet, terwijl de andere 80% met een rendement van 42% wordt omgezet, dan wordt het totaalrendement 0,54 in plaats van de oorspronkelijke 0,42, dat wil zeggen dat een 300 MW centrale nu 385 MW kan leveren, dat is 30% méér. In geval van een kernenergiecentrale wordt normaliter niet meer dan ca 30% rendement behaald. Een analoog rekensommetje leert nu, dat toepassing van plasmakoppels dat rendement tot 44% opvoert. Een centrale van 300 MW zal nu 440 MW kunnen leveren, of 50% méér.

Het ziet er naar uit, dat de toepassing van plasmakoppels in kernenergetische installaties een van de logische technische ontwikkelingen van de kernreactor aanduidt. Maar men dient zich wel te bedenken, dat deze ontwikkeling nog wel 20 jaar zal vergen.

6. Magneto-hydrodynamica.

Zoals gezegd is ook deze methode van energie-omzetting al vrij oud. Zij is in 1831 door Faraday genoemd. Het principe is dat een geleider, die in een magnetveld beweegt, een elektrische stroom opwekt. Dit beginsel wordt toegepast in de elektrische generator, en een elektromotor is een toepassing in omgekeerde zin: daar wordt namelijk stroom toegevoerd om de geleider in beweging te brengen.

Faraday wilde dit beginsel toepassen om energie te winnen uit de beweging van het zoute zeewater, dat betrekkelijk geleidend is, in het aardmagnetische veld. De vloeiende geleider neemt hierbij de plaats in van de bewegende vaste geleider.

Een andere toepassing van het beginsel van Faraday vindt men in de elektromagnetische pompen, waar een geleidende vloeistof wordt rondgepompt, doordat men dwars op de bewegingsrichting van de vloeistof stroom laat doorgaan en tevens een permanent magnetisch veld aanbrengt.

Het omgekeerde, namelijk stroomopwekking door beweging van de geleidende vloeistof in een magnetisch veld, past men nu toe in de magneto-hydrodynamische machines. In plaats van de geleidende vloeistof (het zeewater van Faraday) gebruikt men een sterk geleidend gas: een plasma, dat wil zeggen een gas waarvan de atomen merendeels geïoniseerd zijn. Die ionisatie brengt men teweeg door het gas op zeer hoge temperatuur te brengen, bijvoorbeeld 2500—3000°C. Ook bij die temperatuur is echter de ionisatiegraad van de meest in aanmerking komende gassen, zoals bijvoorbeeld de rookgassen van een industrieel fornuis, te laag en de geleidbaarheid van het gas daardoor te klein. Dat komt doordat de ionisatie-potentiaal — dat is de energie die moet worden toegevoerd om het buitenste electron uit zijn baan te verwijderen — te groot is.

Men zou tot veel hogere temperaturen moeten gaan om vele van deze atomen geïoniseerd te krijgen. De geleidbaarheid van het gas wordt daarom verhoogd door toevoeging van speciale licht-ioniseerbare atomen, zoals caesium en kalium. Maar deze atoomsoorten zijn relatief duur en men zal ze dus op de een of andere wijze uit de uitlaatgassen moeten terugwinnen. Voorlopig lijkt het er dan ook naar, dat men in plaats van rookgassen — verkregen uit conventionele brandstoffen — een gas als helium zal gebruiken, dat in een gesloten kring-

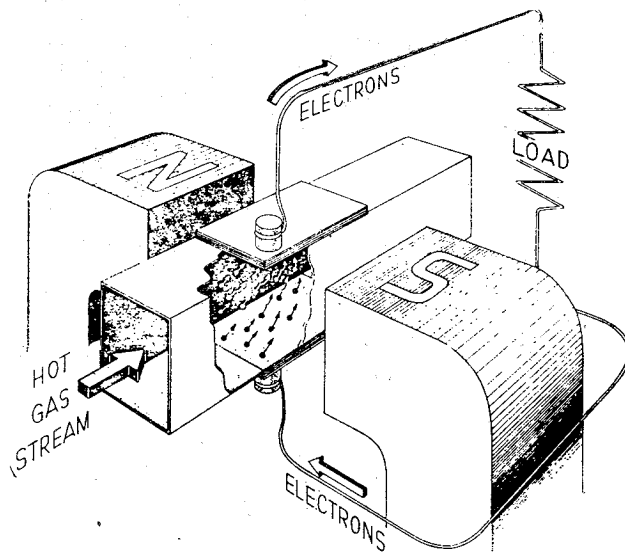


Fig. 8. Principe van een magneto-hydrodynamische generator.

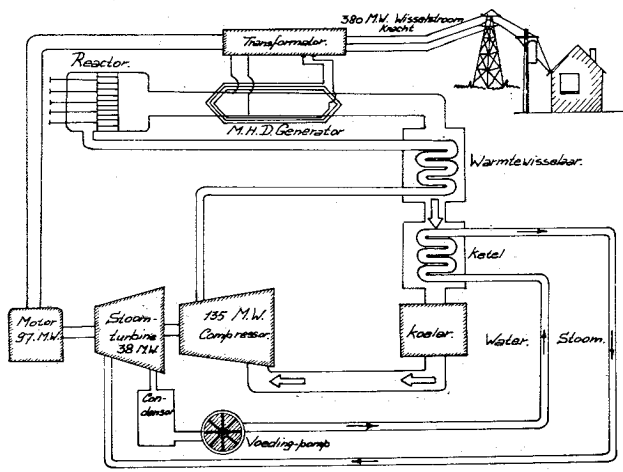


Fig. 9. Schema van een installatie met een magneto-hydrodynamische generator en een kernreactor als energiebron.

loop in een kernreactor door kernenergie tot de vereiste temperatuur wordt opgewarmd. Op dit ogenblik lijkt het, dat bij maximaal vermogen van een magneto-hydrodynamisch-apparaat een rendement van ca 50% haalbaar is. Veel gunstiger wordt het rendement nog indien men niet het maximaal doch een iets lager dan maximaal vermogen afneemt. Het rendement kan dan tot 80 à 90% stijgen.

Voorbeelden van een magneto-hydrodynamische installatie worden getoond in de figuren 8, 9 en 9a.

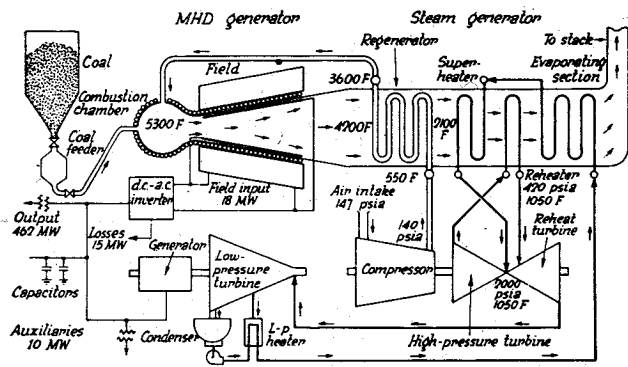


Fig. 9a. Schema van een installatie met een MHD-generator en kolen als energiebron.

De grootste machine, die in gebruik is geweest, heeft gedurende enkele seconden gewerkt met verbrandingsgassen en daarbij een vermogensdichtheid van 36 kW/l gehaald. Een installatie, zoals getoond in figuur 9, kan een rendement van 60% halen. De getoonde installatie is ontworpen voor de circulatie van helium waaraan caesium is toegevoegd. De magneto-hydrodynamische generator is 10—13 m lang en werkt bij een temperatuur van 2200°C. Het totale vermogen van de generator is 380 MW, terwijl voorts uit de restwarmte stoom wordt ontwikkeld voor de 38 MW turbocompressor, die voor helium-circulatie zorgt. De opstelling kan ook worden aangepast voor gebruik van conventionele brandstof. In figuur 10 wordt een af-

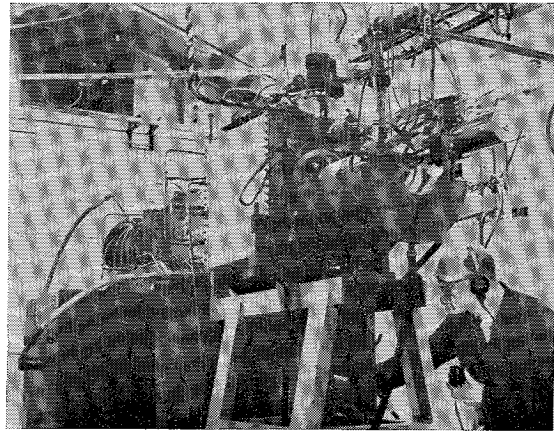


Fig. 10. Een experimentele MHD-generator in het laboratorium.

beelding vertoont van een 22,5 kW generator, die gedurende 4 minuten gewerkt heeft met olie en zuurstof als brandstof, en zeep als toevoegsel aan het rookgas.

Een probleem dat zich bij de directe conversie nog voordoet is de omzetting van de opgewekte gelijkstroom in wisselstroom. Aan de modernste ontwikkeling op dit gebied moge hier voorbijgegaan worden; de toepassing van halfgeleiders is bijzonder veelbelovend. In het geval van de magneto-hydrodynamische generator kan men bovendien hopen de generator rechtstreeks wisselstroom te laten leveren, bijvoorbeeld door periodieke omkering van het magneetveld.

(wordt vervolgd)

Sinds 1960 tingen de eig bij ver elemer dat als den o beken De be wel: de ho kritiek de reg de eff de ve de rea de in stralin Om h metin rangs 250 r konder moge werde actief moge met d van n neutro levero De re rappo wordt reacto De h te ma afhan eleme kunne (zie t De k ongev van c de tw misch wend somm biedt moge *) V ga