

Toepassing van Peltier-batterijen

W. TEBRA



Overdruk uit Polytechnisch Tijdschrift editie Elektrotechniek Nr. 13, 1970

Toepassing van Peltier-batterijen

Het juiste gebruik van warmtepompen werkende volgens het peltier-effect vereist in de meeste gevallen nadere toelichting. In het volgende worden beknopt enige algemene eigenschappen alsmede enkele praktische aanwijzingen behandeld, die enig inzicht geven voor een verantwoorde toepassing.

Eigenschappen

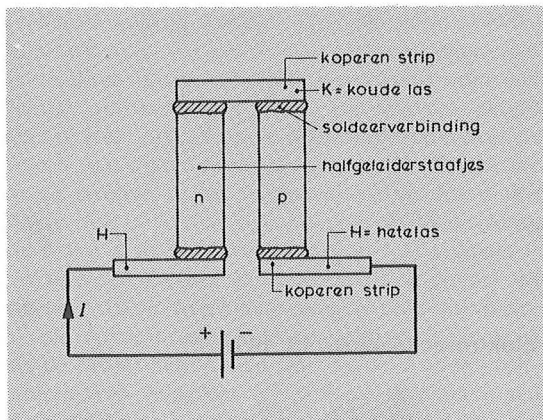
Welbekend is, dat een elektrische stroom in een weerstand joule-warmte ontwikkelt. Daarentegen treedt in een thermokoppel bestaande uit twee verschillende soorten geleiders, een elektrische stroom op door een temperatuurverschil tussen de lasplaatse te onderhouden (seebeck-effect).

De thermospanning gerekend per eenheid van temperatuurverschil noemt men de thermoëlektrische kracht a . Omgekeerd kan men ook een elektrische stroom door een thermokoppel zenden om een temperatuurverlaging respectievelijk verhoging aan de lasplaatse te krijgen (peltier-effect). De afkoeling respectievelijk verwarming van de lassen gerekend per eenheid van stroomsterkte is de peltier-coëfficiënt π . Tussen a en π bestaat het verband $\pi = a T_k$, waarin T_k de werktemperatuur is.

Bij het opwekken van thermoëlektriciteit en peltier-warmtetransport zijn drie factoren van belang:

- de temperaturen T_H en T_K van de respectievelijk hete en koude lassen;
- de elektrische weerstand van de gebruikte materialen;
- de warmtegeleiding tussen de lassen.

1. Peltier-element; bij de getekende stroomloop is K de koude las



De grootte van de peltier-coëfficiënt π is afhankelijk van de keuze van de materialen. In de momenteel beschikbare materialen is er echter een warmtegeleiding λ en een elektrische weerstand ρ , die de warmte van de hete las naar de koude las transporteren respectievelijk bij stroomdoorgang joule-warmte ontwikkelt.

Men kan de eigenschappen van materialen onderling vergelijken door een kwaliteitsfactor in te

voeren; in de literatuur gebruikt men $Z = \frac{a^2}{\lambda \rho}$.

Bepaalde halfgeleiders, o.a. bismuttelluride, tonen gunstige Z -waarden; namelijk $Z \approx 3 \cdot 10^{-3}$ per $^{\circ}\text{C}$. Hierbij onderscheidt men de materialen door een n- of p-type geleiding, d.w.z. bij het n-type materiaal is de elektrische geleiding hoofdzakelijk door elektronen, bij het p-type is dit hoofdzakelijk door gaten.

De maximale temperatuurverlaging die men over een peltier-element (figuur 1) kan ontwikkelen, is theoretisch

$$\Delta T = (T_H - T_K) = \frac{1}{2} Z T_K^2.$$

Houdt men de ene las op kamertemperatuur (T_H) dan is met het genoemde materiaal een temperatuurverschil met de andere las te verkrijgen van $\Delta T = 75^{\circ}\text{C}$.

Bij de praktische uitvoering van peltier-batterijen is de Z -waarde kleiner tengevolge van soldeerovergangen aan de lassen. Hiermee hangt de doorsnedelengte verhouding van de elementen samen. Daar dit probleem de fabrikant van de batterijen aangaat, zullen we hier alleen opmerken dat de Z -waarde van de goede batterijen zich meestal tussen $2 \cdot 10^{-3}$ en $2,5 \cdot 10^{-3}$ per $^{\circ}\text{C}$ beweegt. Daar de maximale temperatuursprong van de temperatuur van de koude las afhangt, wordt ΔT_{max} bij lagere temperatuur steeds kleiner, zodat bijvoorbeeld het gebruik als warmtepomp bij vloeibare luchttemperatuur vrijwel geen temperatuurval over het peltier-element te zien geeft.

Dit houdt onder meer verband met de oorzaak van het peltier-effect. Het effect treedt op doordat de potentiële energie van de ladingsdragers (fermi-energie) in de twee benen van het element onderling verschilt.

Verder is het verstrooiingsmechanisme van de ladingsdragers, dat het evenwicht in het materiaal regelt, onderling verschillend. Als gevolg hiervan zal energie worden uitgewisseld met de omgeving van de las, wanneer de ladingsdragers de las passeren, daar de energie en de lading constant blijven. Een ander belangrijk gegeven is het koelrendement. Dit is de verhouding van het bruikbare warmte-

transport tot het opgenomen elektrische vermogen, te schrijven als:

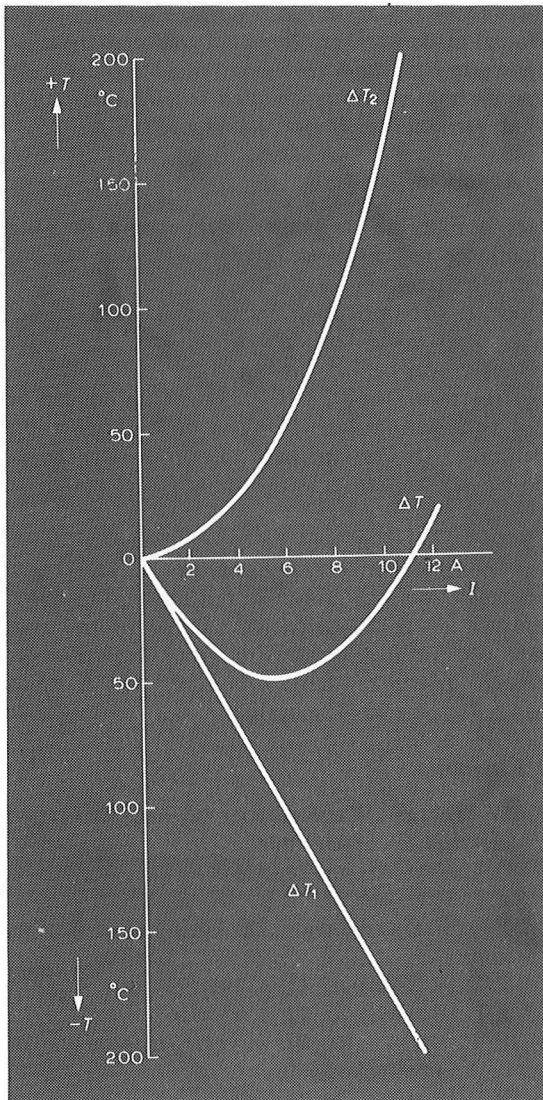
$$\eta = \frac{\text{peltier-warmte} - \frac{1}{2} \text{joule-warmte} - \text{warmte door staafjes}}{\text{joule-warmte} + \text{energie t.g.v. thermospanning}}$$

$$= \frac{a T_K I - \frac{1}{2} I^2 R - \Delta T \lambda}{I^2 R + a I \Delta T}$$

Hierbij is verondersteld dat de λ in de elementen ontwikkelde joule-warmte ($I^2 R$) zich gelijkmatig over de lassen verdeelt.

Om de gedachte te bepalen, kunnen we een vergelijking maken met een compressiekoeler bij een temperatuurverschil $\Delta T = 25^\circ \text{C}$.

2. Verband tussen temperatuur en stroom; $\Delta T =$ temperatuurverschil over peltier-element, $\Delta T_1 =$ temperatuur aan koude las in ideaal element, $\Delta T_2 =$ temperatuur aan koude las bij afwezigheid van peltier-effect



Voor een peltier-element met $Z = 2.10^{-3}$ per $^\circ \text{C}$ is dan $\eta \approx 1$, voor de compressiekoeler, waarvan $Z \approx 15.10^{-3}$ per $^\circ \text{C}$, is $\eta \approx 4,5$. Bij de maximale temperatuurval ΔT_{max} is $\eta = 0$.

Op grond van deze vergelijking van systemen is het te verwachten dat zolang $Z < 6.10^{-3}$ per $^\circ \text{C}$, er van economische toepassing op grote schaal geen sprake zal zijn en het effect vanwege zijn geringe alleen in kleine aggregaten zal worden gebruikt.

De elektrische stroomsterkte I_η waarbij het maximale rendement wordt bereikt (stel $\frac{d\eta}{dI} = 0$) is

kleiner dan die voor maximale koudeproductie, doordat bij kleinere temperatuurverschillen het rendement toeneemt.

In het hierboven gegeven geval is bij $\Delta T = 25^\circ \text{C}$ het rendement $\eta \approx 1$, bij $\Delta T = 10^\circ \text{C}$ is $\eta \approx 3,5$. In het normale werkgebied van -60°C tot $+100^\circ \text{C}$ is het warmtetransport van de momenteel verkrijgbare peltier-batterijen bij kleine stromen ongeveer een lineaire functie van de door de batterij gevoerde stroom, volgens $q = \pi I$.

Als de stroom toeneemt, bereikt de temperatuurval ΔT tussen de lassen een maximum en neemt bij toenemende stroom af (zie figuur 2). Dit wordt veroorzaakt door de niet-reversibele warmteontwikkeling in de elementen, die zich gelijkmatig over de lassen verdeelt. In figuur 2 stelt ΔT_2 de temperatuurrelatie voor, als alleen de peltier-koeling werkzaam is en ΔT_1 de temperatuurstijging van de koude las, als er geen peltier-effect optreedt. Er is verondersteld dat de hete las op 0°C wordt gehouden.

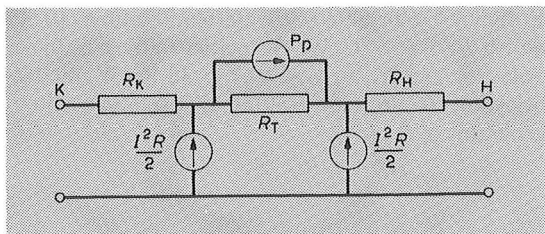
Vervangingschema

Bij de toepassing van een peltier-batterij dient men te bedenken dat aan de hete laskant behalve de peltier-warmte ook de helft van de joule-warmte wordt afgevoerd. De thermische overgangswaerstand van de hete las(sen) naar het koellichaam dient zo klein mogelijk te zijn. Aan de koude zijde is het belangrijk dat de thermische weerstand naar de omgeving groot is, omdat zij een belasting parallel aan de peltier-generator is. Men kan het een en ander voorstellen door middel van een vervangingschema als gebruikelijk voor elektrische netwerken. Figuur 3 toont een vereenvoudigd schema van een peltier-element. De thermische equivalente schakeling gebruikt de temperatuur ($^\circ \text{C}$) analoog aan de elektrische spanning, en de warmte-ontwikkeling of het warmtetransport (W) analoog aan de elektrische stroom. Thermische weerstanden worden uitgedrukt in $^\circ \text{C}/\text{W}$. De numerieke waarden van de generatoren en de weerstanden zijn dikwijls uit de gegevens van de fabrikant af te leiden.

Als volgt is:

P_p de peltier-generator, die een warmtestroom $q = I n a T_K$ voert.

Hierin is: $I =$ gelijkstroom in A; $n =$ aantal halfgeleiderstaafjes in de batterij; $a =$ seebeck-coëfficiënt, die voor bismuttelluride voor het p- en n-materiaal gemiddeld $185 \mu \text{V}/^\circ \text{C}$ bedraagt; $T_K =$ temperatuur in $^\circ \text{K}$ aan koude zijde.



3. Equivalent thermisch vervangingschema van peltier-element

De fabrikant geeft meestal met een grafiek op, dat bij een gelijkstroom I met een temperatuurverschil $\Delta T = T_H - T_K = 0$ er een koelvermogen van q watt wordt getransporteerd.

Daar de peltier-batterij een bepaalde elektrische weerstand R heeft, wordt er $\frac{1}{2} I^2 R$ aan warmte aan elke zijde gedissipeerd. Deze warmte wordt door P_p naar de warme zijde H getransporteerd. De peltier-generator levert dus

$$P_p = q + \frac{1}{2} I^2 R \text{ watt.}$$

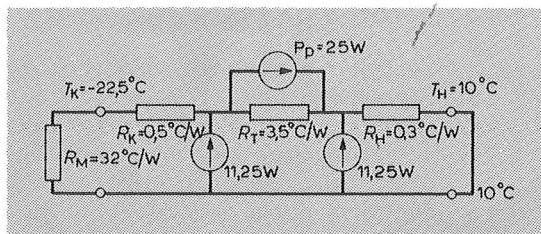
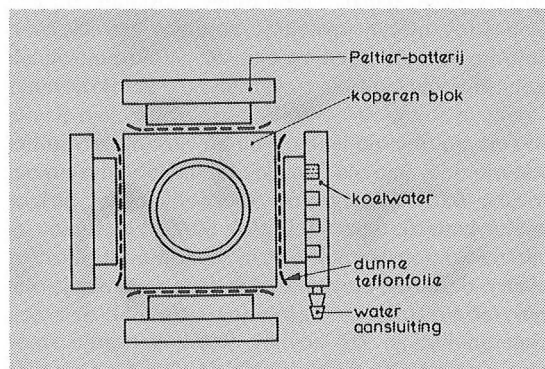
De parallel aan de peltier-generator getekende R_T is de warmteweerstand tussen koude (K) en hete (H) zijde. De waarde is te berekenen door bij de gekozen stroomsterkte I optredende maximale temperatuurval ΔT_{\max} te delen door het koelvermogen q , zodat

$$R_T = \frac{\Delta T_{\max}}{q} \text{ } ^\circ\text{C/W.}$$

Verder is de in serie met de generator aangegeven R_K de thermische overgangsweerstand van de koude zijde naar het te koelen voorwerp. Veelal is het element voorzien van een isolerende laklaag of folie en wordt R_K bepaald door de dikte ervan en het oppervlak van het contactvlak.

Ten slotte kan men R_H zien als de overgangsweerstand van de warme zijde van het element naar de warmteafvoer. Bij symmetrisch uitgevoerde elementen is $R_H = R_K$, maar bij sommige uitvoeringen is door een bijzondere constructie getracht R_H zeer klein gehouden, b.v. door elke las afzonderlijk via een koelvin in contact te brengen met het koelmedium (het medium is in de meeste gevallen koelwater).

4. Uitvoering van de koeler; de vier peltier-batterijen zijn elektrisch geïsoleerd tegen het blok geklemd



5. Vervangingschema van peltier-koeler met belasting bij een elektrische stroom $I = 5 \text{ A}$

Met behulp van dit schema kan men betrekkelijk eenvoudig de temperatuur van het gekoelde voorwerp berekenen.

Voorbeeld

Als voorbeeld nemen we de koeling van een fotomultiplierbuis met behulp van vier Philips' peltier-batterijen type PT 47/5.

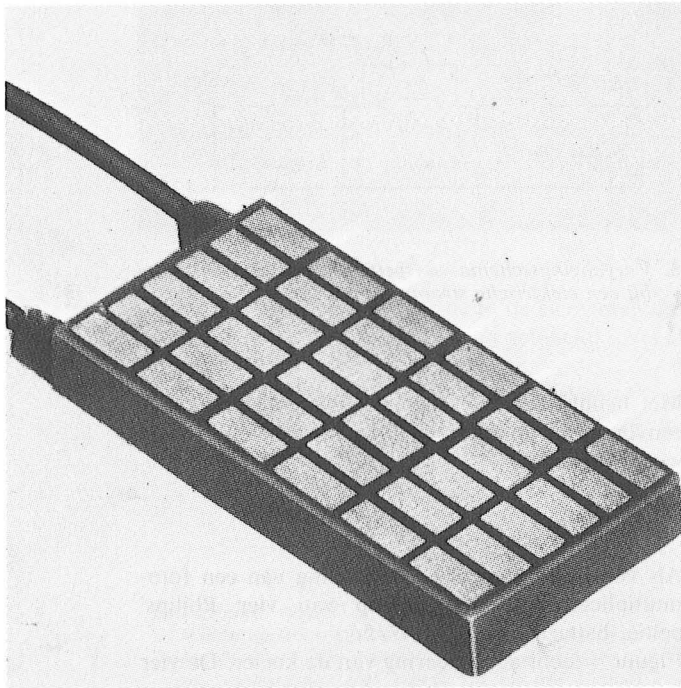
Figuur 4 toont de uitvoering van de koeler. De vier peltier-batterijen zijn op een koperen blok gemonteerd. In het blok is een cilindrisch gat aangebracht, waarin de fotomultiplierbuis wordt geplaatst. Met fosforbronzen veren wordt een zo goed mogelijk thermisch contact tussen blok en buis bewerkstelligd.

Het elektrisch vermogen met vier elektrisch in serie geschakelde batterijen is ongeveer 20 V bij 5 A.

De noodzaak een fotomultiplierbuis te koelen, vindt zijn oorzaak in het meten aan de ondergrens van de buis. De signaal-ruisverhouding wordt bepaald door de donkerstroom. Deze donkerstroom wordt bij een goede buis hoofdzakelijk opgewekt door de thermische emissie van de fotokathode. Het blijkt dat de donkerstroom verminderd kan worden door de buis af te koelen. Bij een buis die een donkerstroom heeft van $I = 10^{-9} \text{ A}$ bij kamertemperatuur, toont een $I = 5.10^{-11} \text{ A}$ bij $-25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Figuur 5 toont het vervangingschema van de opstelling.

In het schema zijn de waarden voor een peltier-batterij bij een gelijkstroom van 5 A aangegeven. Verder is R_M de thermische belastingsweerstand aan de koude zijde; deze wordt gevormd door de houder van de fotomultiplierbuis naar de omgeving en de in de buis ontwikkelde warmte, alsmede geleiding in de constructie. De batterij PT 47/5 levert bij een gelijkstroom $I = 5 \text{ A}$ een peltier-effect $P_p = 25 \text{ W}$. Daar er aan de koude las $\frac{1}{2} I^2 R$ warmte wordt toegevoerd, blijft er 13,75 W voor warmtetransport over. Dit warmtevermogen wordt verdeeld over de warmteweerstand R_T en de belasting. Bij een perfecte isolatie, dus als $R_M = \infty$ wordt $\Delta T = (P_p - \frac{1}{2} I^2 R) R_T = 13,75 \times 3,5 \approx 48 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Naar de hete las vloeit $P_p + \frac{1}{2} I^2 R = 25 \text{ W} + 36,25 \text{ W}$. Dit veroorzaakt een temperatuurval over R_H gelijk aan $T_{HR} = 36,25 \times 0,3 = 10,9 \text{ } ^\circ\text{C}$. Daar $T_H = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$, is de temperatuur aan de peltier-generator $T_H + T_{RH} = 10 \text{ } ^\circ\text{C} + 10,9 \text{ } ^\circ\text{C} = 20,9$



6. De symmetrische peltier-batterij PKE 36 E 0260 toont de koperen strips van de elementen; bij deze batterij is elektrische isolatie, bijvoorbeeld in de vorm van een dunne folie, noodzakelijk

°C. Hieruit volgt voor $T_K = -\Delta T + T_H = -48 + 20,9 \approx -27$ °C. Het oppervlak van de houder dat met de omringende lucht contact maakt en de constructiegeleiding bepalen R_M grotendeels, daar de dissipatie in de buis bij normale instelling verwaarloosbaar klein is. De warmteweerstand door constructiegeleiding is vaak moeilijk te berekenen; in het geval van een multiplicatorbuis kunnen we een totale weerstand van ongeveer 40 °C/W aannemen. De warmteweerstand van metaalvlakken aan de lucht is te berekenen met $R_1 = 670$ °C/W per cm². Stel dat de houder een onbeschermd oppervlak heeft van 50 cm², dan is $R_1 = 13,4$ °C/W. De totale warmteweerstand naar de omgeving (20 °C) is $R_M \approx 10$ °C/W. Omgerekend naar de

Tabel I

ΔI in A	ΔT in °C	ΔT_K in °C	ΔT_H in °C	T_K in °C
1	14,3	0,2	1,6	- 2,5
2	25,8	0,3	3,5	-12,0
3	34,6	0,5	5,7	-18,4
4	40,4	0,5	8,2	-20,7
5	43,3	0,6	10,9	-21,8
6	43,4	0,5	13,9	-19,0
7	40,8	0,4	17,2	-13,2

in figuur 5 gebruikte koelwatertemperatuur (10 °C) wordt $R_M^* = 8$ °C/W. Per peltier-batterij is dit een belasting van $R_M = 4 \times R_M^* = 32$ °C/W. Bij deze belasting is de temperatuurval over de peltier-generator $\Delta T =$

$$\left(P_p - \frac{I^2 R}{2} \right) \cdot \frac{R_T \cdot R_M}{R_T + R_M} = 13,75 \times 3,15 = 43,4 \text{ °C.}$$

Hieruit volgt de temperatuur aan de houden van de buis

$$T_K = \frac{R_M}{R_M + R_H} (-\Delta T + T_H) = -22,5 \text{ °C.}$$

Deze waarde stemt redelijk overeen met de gemeten temperatuur aan een dergelijke houder.

Men kan met behulp van een schuimpolystyreen, b.v. Tempex, de isolatie ongeveer 4 × groter maken, zodat $R_1 = 62,4$ °C/W. In dat geval wordt $T_K = -25$ °C.

Een richtlijn voor de vereiste isolatie bij toepassingen waarbij de grootste temperatuurval is gewenst, is $R_M > 10 R_T$.

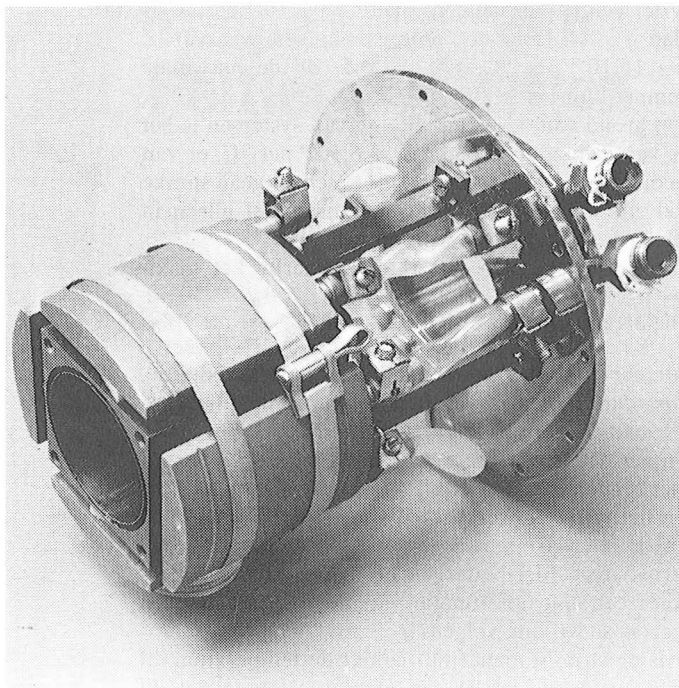
Stroomafhankelijkheid

Rekent men aan het gegeven voorbeeld de temperatuurverdeling uit bij verschillende stroominstellingen, dan verkrijgt men de in tabel I vermelde getallen.

Men ziet hieruit, dat tengevolge van de overgangswaerstand R_H de laagste temperatuur bij een lagere stroomsterkte wordt verkregen dan waarbij de grootste temperatuurval wordt opgewekt. De invloed van R_K is daarentegen klein, tengevolge van de geringere warmtestroom naar de koude zijde. In de hier besproken peltier-batterijen stroomt het koelwater direct langs de met lak elektrisch geïsoleerde koelvinnen. Voor optimale koeling verdient het aanbeveling de waterstroom turbulent te maken, zodat de temperatuursprong van de vinnen naar het water klein blijft. Bij een volumestroom van 3 liter per minuut wordt bij de Philips' peltier-batterijen PT 47/5 een voldoende warmteafvoer verkregen.

De peltier-elementen zijn in deze uitvoering tot een batterij verenigd met behulp van een laag smeltende soldeerlegering. De stroom door de batterij is zonder warmteafvoer in staat de temperatuur zó hoog op te voeren, dat de verbindingen loslaten. Bij een toepassing in een opstelling verdient het dus aanbeveling dat de voeding van de peltier-batterij alleen ingeschakeld kan worden als het koelwater vloeit.

In verband met de lekkage en de vervuiling van het waterkanaal aan de vinzijde, is later een symmetrische batterij toegepast. Deze Siemens' Sirigor peltier-batterij type PKE 36 E 0260, zie figuur 6, heeft 36 koppels en levert in de fotomultiplicator-koeler dezelfde prestaties. De hete lassen zijn via een teflon folie in verbinding gebracht met een koperen blokje. De koeling wordt verzorgd door een waterstroom door dit blokje. Op deze manier



7. Geopende peltier-koeler met vier elementen voor een fotomultiplikatorbuis. De vier met water gekoelde koperen blokken aan de buitenzijde voeren de ontwikkelde warmte af. Tussen deze blokken en het huis bevinden zich de peltier-batterijen. In het huis is een fosforbronzen verende houder aanwezig, die tegen het glas van de buis drukt en voor een warmtecontact zorgt. Het geheel is afgesloten en is vacuüm gezogen om condensvorming en warmtegeleiding te voorkomen

is het mogelijk aan drukstoten tengevolge van het afsluiten van aan- en afvoer van het koelwater, voldoende weerstand te bieden. Verder is de warmteafvoer voor de lassen meer uniformer dan bij de peltier-batterij, waar de hete lassen via koelvinnen in het water staan.

Figuur 7 toont de uitvoering van de koeler met vier Sirigorbatterijen.

Voeding

Voor het peltier-effect is een gelijkstroom vereist. Gezien de invloed van de in de elementen ontwikkelde warmte, verwacht men dat een niet-afgevlakte, dubbelfasige gelijkgerichte wisselstroom, een kleinere prestatie levert dan een zuivere gelijkstroom. Het blijkt dat de temperatuurrelatie over de batterij niet direct samenhangt met de vormfactor van de stroom. In het voorbeeld van de fotomultiplikatorbuis blijkt, dat bij een niet-afgevlakte stroom van $I = 5 \text{ A}$ de temperatuur $T_K \approx 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ hoger is dan met een zuivere gelijkstroom. Een rimpel tot ongeveer 10 % heeft daarentegen geen merkbare invloed op de prestatie. Het is voldoende, in serie met de peltier-batterij een smoorspoel met een zelf-inductie van ongeveer 50 mH op te nemen, ten einde de invloed van de rimpel te elimineren.

Keuze van de peltier-batterij

Een groot aantal fabrikanten brengt peltier-batterijen in de handel. De keuze hieruit zal in vele gevallen worden bepaald door de afmetingen en de uitvoering. Andere overwegingen zijn prijs, rendement en elektrische eigenschappen.

Het is in het algemeen gunstig de batterij te kiezen die bij vergelijkbare afmetingen en elektrisch vermogen het grootste koelvermogen bij $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ levert en onbelast de grootste temperatuursprong ΔT_{max} heeft.

Deze temperatuursprong wordt door verschillende fabrikanten anders opgegeven. Daar $\Delta T_{\text{max}} = \frac{1}{2} Z T_K^2$ zal gerekend vanaf $0 \text{ }^\circ\text{C}$, een element met $Z = 2 \cdot 10^{-3}$ per $^\circ\text{K}$ een $\Delta T_{\text{max}} = 74 \text{ }^\circ\text{C}$ hebben als $T_H = 74 \text{ }^\circ\text{C}$ en een $\Delta T_{\text{max}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ als $T_H = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Verder is het gunstig een batterij te kiezen waarvan de optimale stroomwaarde niet hoog is. Boven bijvoorbeeld 20 A is het rendement van de gelijkrichterschakeling zeer laag en kunnen tengevolge van de dan lage spanning over de peltier-batterij, gemakkelijk grote veranderingen in de stroom optreden als gevolg van verwarming. Door verschillende halfgeleider-elementen in serie te schakelen, waarvan de doorsnede per element kleiner is, kan men batterijen voor een kleinere stroom maken. Omdat er dan een groter aantal soldeerovergangen aanwezig zijn, is het rendement minder gunstig dan van de hoge-stroomtypen. Een redelijk compromis vindt men bij een stroom van ongeveer 5 A.

Andere toepassingen

Het is mogelijk de peltier-warmtepomp in beide richtingen te gebruiken, bijvoorbeeld voor regeling van een thermostaat.

Door de stroomrichting om te schakelen kan men naar wens koelen of verwarmen. Het is mogelijk gebleken met behulp van stuurbare siliciumdioden, een thermostaat op $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ te houden bij een verandering van $10 \text{ }^\circ\text{C}$ in de omgevingstemperatuur. Als bijzonderheid valt op te merken, dat de warmtestroom bij verwarming groter is dan bij koeling.

Cascadeschakeling van peltier-batterijen is mogelijk. Zoals uit het vervangingsschema blijkt, zal men voor een zo groot mogelijke (bij koeling) temperatuurval, de peltier-batterijen aan de warme zijde met een verhoudingsgewijze groot koelvermogen nemen. Bij een Z -waarde $Z = 2 \cdot 10^{-3}$ per $^\circ\text{K}$ is dan een $\Delta T_{\text{max}} \approx 90 \text{ }^\circ\text{C}$ mogelijk.

Literatuur

1. W. Tebra: „Warmteafvoer bij halfgeleiders in elektronisch apparaat”. P.T. 20 (1965), nr. 24, p. 848-853. P.T. 21 (1966), nr. 2, p. 44-48.
2. B. van Dusschoten: „De koeling van de toekomst”. P.T. 19 (1964), nr. 11, p. 385-392. P.T. 19 (1964), nr. 12, p. 421-426.
3. P. E. Derkx: „Koelen en verwarmen door middel van halfgeleiders”. P.T. 22 (1967), nr. 3, p. 87-90.