

Fa. Dr. D. Neumann
– Gerätebau –

Rübezahlstraße 65A
8000 München 83

Peltierelemente und Hochtemperaturkühlung



Vorwort

Vorausgeschickt werden muß, daß es nicht gelang, Informationen über das Verhalten von Peltierelementen unter hohen Drücken zu erhalten. Allerdings ist es u. E. auch nicht relevant, dieser Frage nachzugehen, da bei allen Betrachtungen unterstellt wurde, daß die einzubauenden Peltierblöcke niemals außerhalb des Sondenbehältnisses eingesetzt würden.

Die Hauptfrage nach der Möglichkeit, Peltierkühlung auch bei Umgebungstemperaturen von $+350^{\circ}\text{C}$ einsetzen zu können, kann bejaht werden. Allerdings wird es sich dann um ein vielstufiges Kaskadensystem handeln, um die beachtliche Temperaturdifferenz von 175 K zu erzeugen, damit $+175^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. Die dazu benötigten Peltierelemente müßten jedoch erst von uns gebaut und getestet werden, da sie nicht auf dem Markt sind. Infrage kämen die Halbleitermaterialien Bleitellurid, Cadmiumzinkantimonid u. Germaniumwismuttellurid. *)

Setzt man die Forderungen niedriger an (z.B. als Vorläuferstufe), so empfiehlt sich, hier die Materialien Wismuttellurid, Bleitellurid und Cadmiumzinkantimonid *) zu koppeln. Temperaturdifferenzen von ca. 90 K sind bei Anwendung des Kaskadensystems möglich, Umgebungstemperaturen bis ca. $+260^{\circ}\text{C}$ beherrschbar.

Allgemein ist allerdings zu sagen, daß es Transparenz über den sog. Stand der Technik nicht gibt. Gerade das Gebiet der Thermoelektrizität wird sowohl von den Amerikanern als auch von den Russen als top secret eingestuft.

Patente und Verfahren werden praktisch dann nicht mehr beantragt und veröffentlicht, wenn es um gravierende Neuerungen geht. Selbst einzelne Peltierblöcke einfachster Konfiguration dürfen nur dann aus den USA importiert werden, wenn der Empfänger (wie z.B. der Verfasser) eine eigene US-Regierungslizenz besitzt.

*) Persönliche Information, Prof. Justi gegenüber dem Verfasser; 1985

Die meisten der hier gebrachten Ausführungen basieren daher auf den Erfahrungen und Kenntnissen, die der Verfasser in 24-jähriger Beschäftigung ausschließlich mit der Peltier-Technik (einige 10.000 Peltier-Ausrüstungen und Peltiergeräte wurden entwickelt und gebaut) erwerben konnte.

Dr. Dietmar Neumann, München

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort.....	273
1. Erläuterung des Peltierprinzips.....	277
2. Temperaturgrenzen von Halbleitermaterialien beim Einsatz als Peltierelement.....	282
3. Kühlung der Warmseiten der Peltierblöcke.....	289
4. Abschätzung der Kühlleistung und des Wirkungsgrades.....	295
5. Einbaumöglichkeit in vorgegebene Dewargefäße..	299
6. Die Leistungsversorgung über 10 km lange Kabel.....	301
7. Aufwandsabschätzung.....	303
Literatur.....	304

I.) Erläuterung des Peltierprinzips

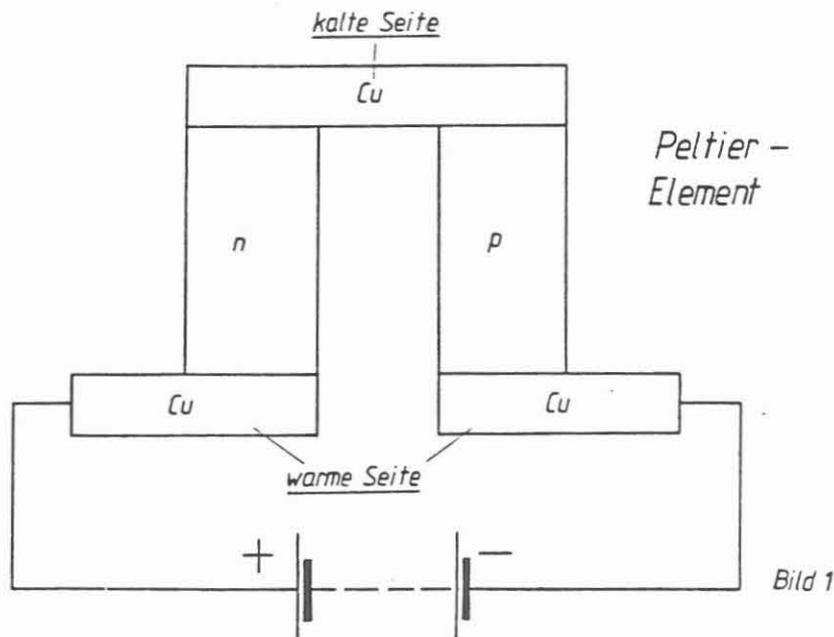
Die Entdeckung der thermoelektrischen Effekte fällt in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts. Es war Th.I. Seebeck, der 1822 folgendes, nach ihm benannte Phänomen (Seebeck-Effekt) beobachtete:

Bildet man eine geschlossene Leiterschleife aus zwei verschiedenen metallischen Leitern und herrscht zwischen den so entstehenden zwei Berührungspunkten der beiden Materialien eine Temperaturdifferenz, so fließt in der Leiterschleife ein Kreisstrom. Die heutigen Thermoelemente sind demonstrative Beispiele dafür.

Den umgekehrten Effekt (Erzeugung einer Temperaturdifferenz durch einen elektrischen Stromfluß) entdeckte Peltier im Jahre 1834 (Peltiereffekt).

Beide Effekte sind Vorgänge aus dem thermoelektrischen Bereich der direkten Energieumwandlung.

Um den Peltiereffekt wirtschaftlich nutzbar zu machen, verwendet man heute für den Aufbau eines Peltierelements nicht mehr zwei verschiedene Metalle. Die entstehende Temperaturdifferenz liegt hier unter 1 K. Vielmehr ersetzt man das eine Metall durch einen n-dotierten Halbleiter (die elektrische Leitung erfolgt durch negativ geladene Elektronen) und das andere durch einen p-dotierten Halbleiter (die elektrische Leitung erfolgt durch positiv geladene Löcher). Eine Kupferbrücke verbindet die beiden Halbleiter-Schenkel. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines aus Halbleitern bestehenden Peltierelements.



Schickt man Gleichstrom in der eingezeichneten Richtung durch das Peltierelement, so kühlt sich die Kupferbrücke, welche die beiden Elemente verbindet, ab. Die beiden, ebenfalls aus Kupfer bestehenden Anschlußstücke erwärmen sich. Anders ausgedrückt heißt dies, es findet ein stetiger Wärmetransport von der oberen Kupferbrücke zu den unteren Kupferstücken statt. Die pro Zeit vom oberen Reservoir (der sog. Kaltseite) abtransportierte Wärmemenge kann mit

$$Q_k = 2 \alpha \cdot T_k \cdot I$$

angegeben werden. α ist dabei der auf Kupfer bezogene Seebeck-Koeffizient (es sei hier vereinfachend angenommen, daß der Betrag des Seebeck-Koeffizienten von n- und p-leitendem Material gleich groß ist). T_k ist die Kaltseitentemperatur in Kelvin und I der durch das Peltierelement fließende Strom. *)

Allerdings entstehen dabei Verluste, die zum einen durch die im Halbleiter vom Stromfluß erzeugte Joulesche Wärme stammen und zum anderen durch den Wärmerückfluß vom warmen zum kalten Ende des Peltierschenkels durch die Wärmeleitfähigkeit der Halbleitermaterialien hervorgerufen werden.

Damit wird einsehbar, wie das ideale Halbleitermaterial für den thermoelektrischen Einsatz auszusehen hat: Es muß einen hohen

Seebeckkoeffizienten α (alpha),

eine hohe

elektrische Leitfähigkeit σ (sigma)

und eine niedrige

Wärmeleitfähigkeit χ (Kappa)

besitzen. Nach den Regeln der Physik findet man derartige Werte weder bei den Metallen, noch bei den Isolatoren, denn diese drei Forderungen widersprechen einander.

Die Halbleiter - physikalisch zwischen den Metallen und den Isolatoren eingeordnet - erfüllen dagegen einen großen Teil der gestellten Bedingungen für thermoelektrisches Material.

Um die Qualität dieses Halbleitermaterials beurteilen zu können, definiert man eine Größe

z als Thermoelektrische Effektivität.

*) Justi, Eduard; Leitungsmechanismus und Energieumwandlung in Festkörpern; Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen; 1965

Die Formel lautet:

$$z = \alpha^2 \frac{\sigma}{\chi} = \text{Seebeckkoeffizient}^2 \times \frac{\text{Elektrische Leitfähigkeit}}{\text{Thermische Leitfähigkeit}}$$

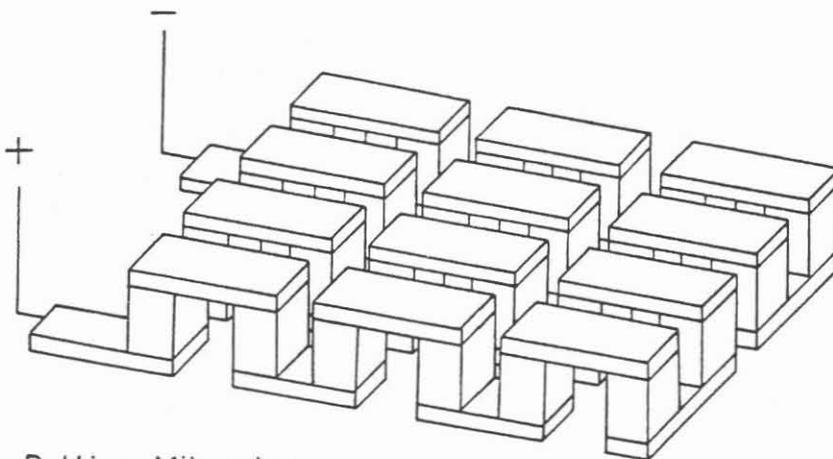
Je größer z ist, desto geeigneter ist das Material für thermoelektrische Anwendungen. Dies ersieht man aus der Formel für die bei einem Peltierelement maximal erreichbare

Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{max}} = \text{Temperatur der Warmseite } (T_w)$ minus Temperatur der Kaltseite (T_k):

$$\Delta T_{\text{max}} = T_k \cdot \frac{z}{2}$$

Im allgemeinen wird heute für den p-leitenden Schenkel antimon-dotiertes und für den n-leitenden Schenkel selen-dotiertes Wismuttellurid (Bi_2Te_3) verwendet. Ein damit hergestelltes Peltier-element erreicht bei einer Warmseitentemperatur von 25°C eine absolute (im Vakuum gemessene) Temperaturdifferenz von ca. 70 K bis 80 K.

Um für die technische Anwendung zweckmäßige Peltierblöcke zu erhalten, fügt man die einzelnen Peltierelemente mäanderförmig, wie in Bild 2 dargestellt, aneinander.



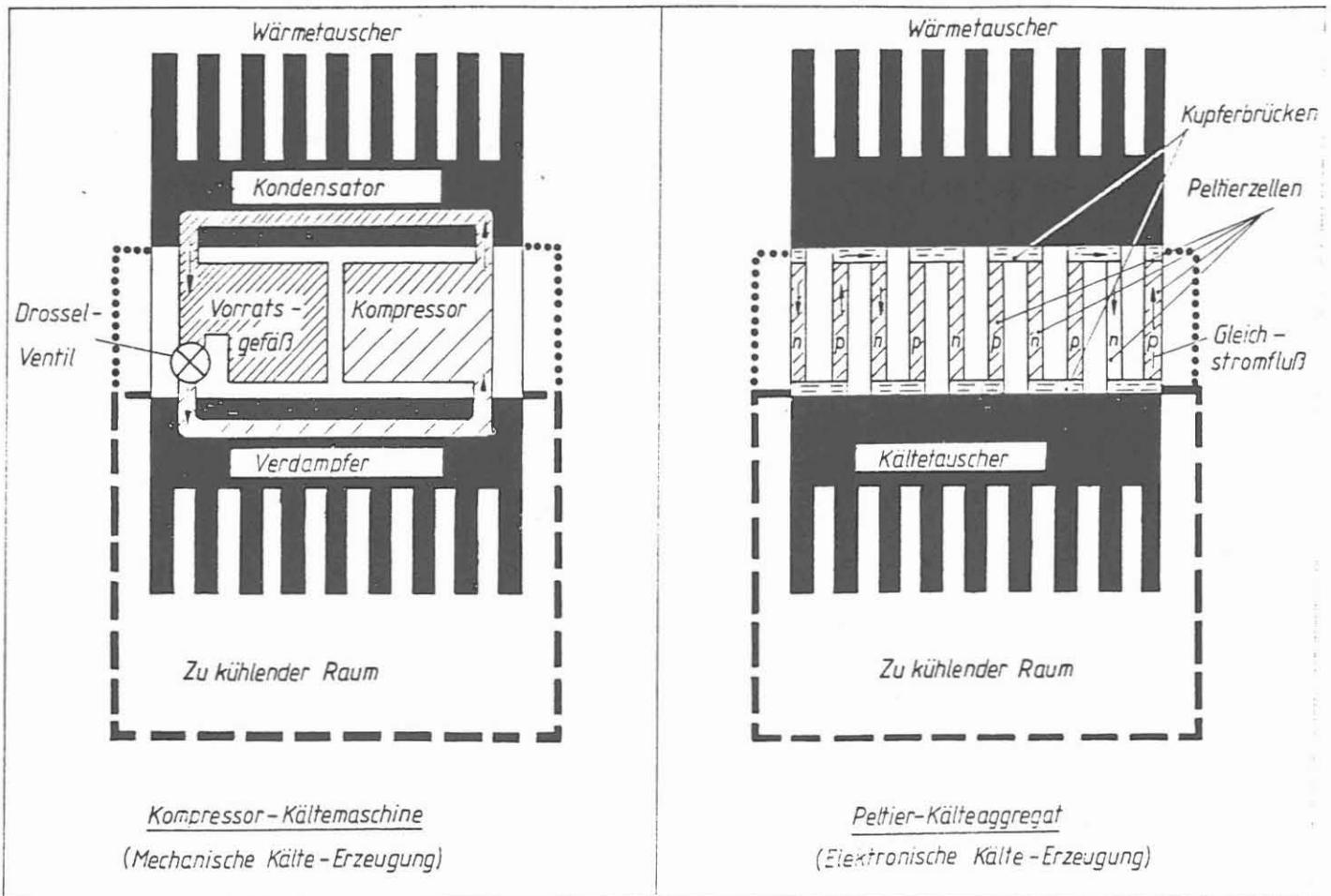
Peltier-Mäander

Bild 2

Die zu einem Peltierblock vereinigten Peltierelemente sind also elektrisch in Reihe und thermisch parallel geschaltet. Die Peltierblöcke ihrerseits kann man nun elektrisch in Reihe bzw. parallel schalten, wenn große Kühlflächen benötigt werden. Diese dann als Kühlpaneele bezeichneten Peltiergroßblocks wurden von Verfasser bereits bis zu einer Größe von 500 mm und Leistungen von 2000 Watt gebaut. Größere Paneele zu fertigen, stellt heute kein technisches, sondern nur ein preisliches Problem dar, das aber auch in Zukunft als lösbar anzusehen ist, wenn die Preise für Peltierelemente fallen sollten.

Für den Anwender stellt sich anfangs die Frage nach den Unterschieden und Gemeinsamkeiten von konventionellen Kompressoranlagen und Peltierkühlern, um Vor- und Nachteile abwägen zu können. In Bild 3 sind die vorhandenen Analogien zwischen beiden Systemen gut zu erkennen.

Schematische Darstellung



Bei beiden Kühlsystemen findet ein Wärmefluß von einem kalten zu einem warmen Reservoir statt. Bei der Kompressoranlage übernimmt den Wärmetransport eine Kühlflüssigkeit, die vom Kompressor komprimiert und durch das System transportiert wird. Im Peltierkühler entspricht der elektrische Strom, der Kühlflüssigkeit des Kompressors, die Gleichspannungsquelle dem Kompressor.

Obwohl die Peltierkälteerzeuger preislich höher liegen als konventionelle Kompressoranlagen, gibt es doch eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, die nur mit Peltierkühlbausteinen gelöst werden können. Ganz besonders hervorzuheben ist einmal pauschal die Miniaturkühlung, wo es nur auf kleine Kälteleistungen ankommt.

Ein wesentlich wichtigerer Faktor ist aber die Eigenschaft der Peltierblocks, daß sie elektrisch regelbar sind und somit zu Regelgenauigkeiten der Temperaturtechnik führen, die man mittels Kompressorkühlung nicht erreichen kann.

Ein weiterer Vorteil der Peltierkühlung/Peltierheizung ist es, daß sie leicht umkehrbar ist. Durch einfaches Umpolen des Gleichstroms kann dort Wärme erzeugt werden, wo zuerst Kälte entstand und umgekehrt. Die Einsatzmöglichkeiten mehren sich, wo mit möglichst kleinen Baueinheiten nicht nur Kälte, sondern auch Wärme erzeugt werden soll, bzw. wo ein ständiger Kühlen-Heizen-Kühlen-Wechsel gefragt ist.

II.) Temperaturgrenzen von Halbleitermaterialien beim Einsatz als Peltierelement

- 1.) Jedes Material ist nur in einem sehr begrenzten Temperaturbereich optimal einsetzbar.

Die Effektivität eines Halbleitermaterials ist temperaturabhängig und besitzt bei einer bestimmten Temperatur einen Maximalwert. Steigen die Temperaturen über diesen Maximalwert, nimmt die Effektivität ab. Es kann ab einem gewissen Punkt kein wirkungsvoller Wärmetransport mehr stattfinden.

Jedes Peltiermaterial ist daher nur für einen bestimmten Temperaturbereich geeignet. Für den Temperaturbereich -100°C bis $+150^{\circ}\text{C}$ ($+200^{\circ}\text{C}$) wird heute üblicherweise Wismuttellurid verwendet. Für die Beherrschung höherer Temperaturen müssen andere Halbleiterwerkstoffe eingesetzt werden.

- 2.) Die Diffusion der Lote in die Halbleitermaterialien hat schädliche Einflüsse auf deren Peltiereigenschaften

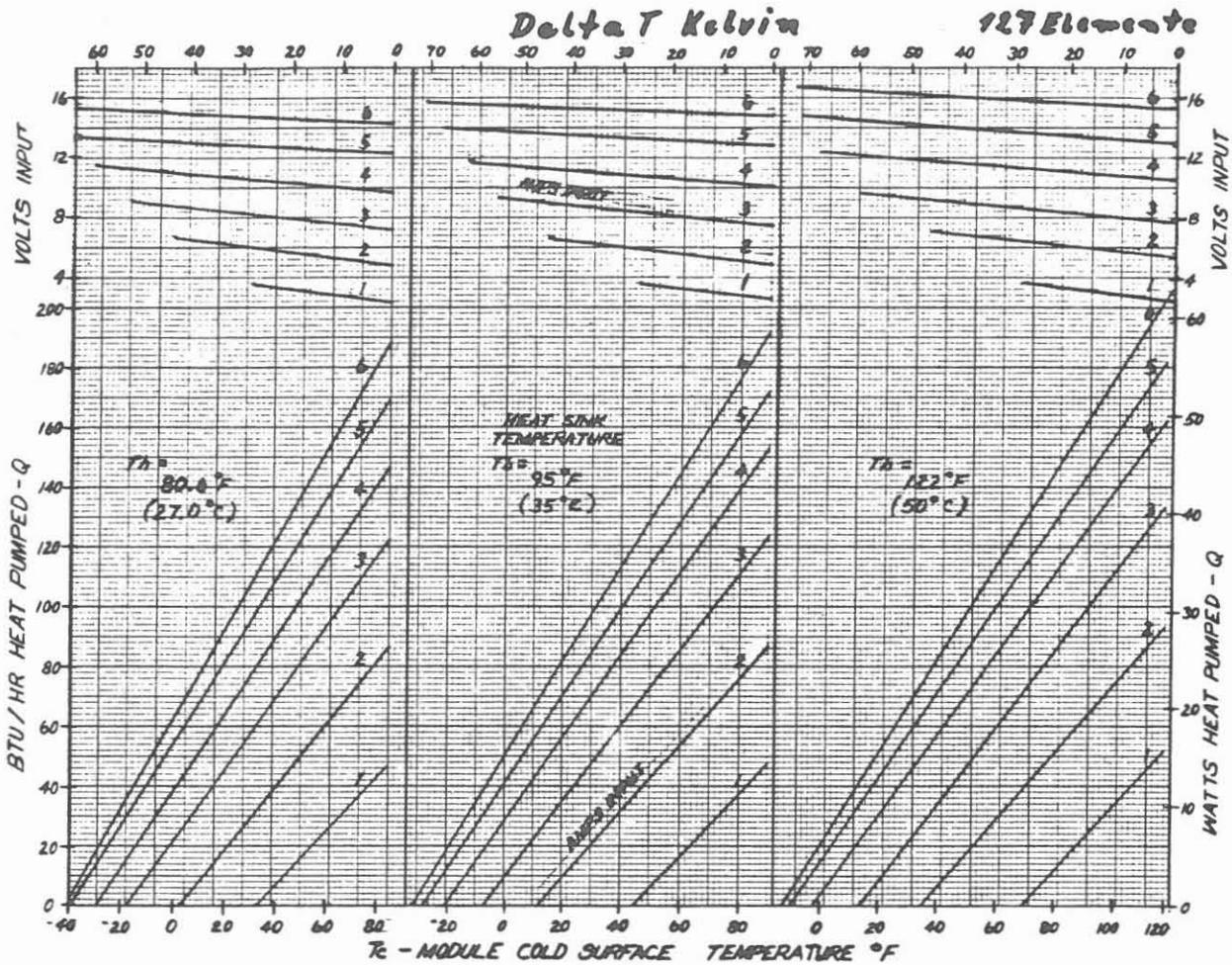
Es hat sich gezeigt, daß Peltierblöcke bei Temperaturen im Bereich von -30°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ bis zu einigen 100.000 Stunden fehlerfrei arbeiten. Diese Aussage basiert auf dem jahrzehntelangen, reibungslosen Funktionieren vom Verfasser Mitte der 60er Jahre gebauten Industriegeräten, die - Tag und Nacht im Einsatz - ab und zu zur Reparatur kommen. Defekt sind dann aber nicht die Peltierzellen, sondern die Steuerelektronik hat versagt, weil z.B. ein Kondensator ausfiel. Andererseits ist uns bekannt, daß die MTBF rapide sinkt, wenn ständig Temperaturen über $+150^{\circ}\text{C}$ anstehen. Hier stehen jedoch noch Recherchen an, wo genau die Schwachpunkte liegen.

Wie oben gezeigt, sind alle Peltierschenkel mit Kupferbrücken verbunden. Diese Verbindungen werden mit Loten hergestellt.

Wir selbst, gehen davon aus, daß es sich nicht primär um einen, bei höheren Temperaturen schneller fortschreitenden Alterungsprozeß des Halbleitermaterials handelt. Vielmehr sind für die Verschlechterung der Eigenschaften die auf den Halbleiter aufgebrachten Lote verantwortlich. Sie diffundieren mit steigenden Temperaturen verstärkt in den Halbleiter ein und "vergiften" ihn. Das heißt, die durch die Materialzusammensetzung des Halbleiters optimal eingestellten Peltiereigenschaften werden durch die eindiffundierenden Lotfremdatome zerstört. Die Folge ist, daß der Wirkungsgrad des entsprechenden Peltierelements absinkt.

ad 1.) Wismuttellurid besitzt je nach Qualität des Halbleitermaterials ein theoretisches Delta T (im Vakuum) von ca. 60 bis 70 K bei einer Warmseitentemperatur des Peltierblocks von +25°C. Dieses Delta T max. gilt immer dann, wenn die Wärmepumpleistung Null ist. Präzise Labormessungen zeigen, daß sich in den Kernbereichen des Temperaturbereichs von Peltierblöcken, d.h. also bei einem Delta T von 10 bis 40 Kelvin ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Delta T und der Wärmepumpleistung ergibt. In den Grenzbereichen geht die Gerade der grafischen Darstellung jedoch in eine Kurve über. Werden gar Strom- und Spannung über den jeweiligen Optimalbereich eines Peltierblocktyps erhöht, so kehrt die Kurve um, d.h. trotz höherer elektrischer Leistung sinken Wärmepumpleistung und das Delta T.

Den Zusammenhang kann man auch aus der Grafik der Fa. Cambion erkennen, die sie für einen Peltierblock mit 127 Elementen und einer optimalen Stromversorgung von ca. 4,4 Ampere bei ca. 12 Volt aufgestellt hat.



Im praktischen Einsatz erreicht man im High-tech-Bereich *) ein empirisches Delta T (ΔT_e) **) von ca. 50 K und im Consumer-Bereich (wegen der kostenbedingten schlechten Qualität

*) High-tech-Bereich = Geräte, die als Eichnormale, Testequipment etc. in Industrie, Hochschulen etc. eingesetzt werden und normalerweise mit ca. $\pm 0,01$ Kelvin oder besser arbeiten. Diese Geräte wurden vom Verfasser entwickelt. Zur Zeit sind gleichwertige Produkte in den USA und Europa uns nicht bekannt.

**) Unter dem "empirischen Delta T" verstehen wir denjenigen Wert, der sich aus den an einem fertigen und laufenden Peltiergerät gemessenen Temperaturdifferenzen ergibt. Hier werden also die Temperaturwerte der umgebenden Bauteile festgehalten und nicht die Oberflächentemperatur eines separierten Peltierblocks.

Praktisch beschrieben also: die Temperatur des Wärmetauschers und die Temperatur des zu kühlenden Probanden (oft auch der Cu-Block z.B., in dem sich die Aufnahmebohrungen für die zu testenden Sensoren etc. befinden), werden gemessen und verglichen.

Immer jedoch gilt: Delta T max = Wärmepumpleistung Null, e.v.v.

aller Bauteile) gar nur ca. 30 bis 40 K. Es wurden auch schon nur magere 20 K bei Kühlboxen für PKW gemessen. - Dabei ist zu bemerken, daß es sich bei dem "praktischen Einsatz im High-tech-Bereich" um komplette Geräte handelt. Denn uns nützt es nichts, allein mit Labormethoden die Oberflächentemperaturen quasi freischwebender Peltierblöcke festzustellen. Bei diesen unseren Werten liegt der Meßpunkt im Kaltbereich im masse-trächtigen Probanden 8 mm über dem kalten Porzellandecker des Peltierblocks und im Warmbereich im Wärmetauscher 8 mm unterhalb des warmen Porzellandeckers, wenn man davon ausgeht, daß die kalte Seite nach oben und die Warmseite nach unten zeigt. Erhöht man die Umgebungstemperatur, so führt dies bei Wismuttellurid-Peltierblöcken, die in Geräte eingebaut sind, zunächst zu einem beachtlichen Anwachsen des "empirischen" Delta T auf bis zu ca. 80 K bei einer Warmseitentemperatur von +170°C. Ab ca. +180°C T_w setzt jedoch eine Abnahme des Delta T_e ein. Bei ca. +270°C T_w sackt das Delta T_e auf einen so niedrigen Wert, daß dieser bereits bei geringfügigem Leistungsbedarf zusammenbricht. Verantwortlich für den Verlust der Effektivität ist der Schenkel aus p-dotiertem Wismuttellurid, der ab +140°C in seiner Effektivität stark abfällt. Der n-dotierte Schenkel behält hingegen auch in diesem Temperaturbereich seine guten thermoelektrischen Eigenschaften. Im Kältebereich stößt man auf ähnliche Grenzen: ab -60°C und tiefer, muß man den materiellen Aufwand beträchtlich erhöhen (z.B. bis hin zur 6-stufigen Peltier-Kaskade), um etwas Kälteleistung zu erhalten. Bei ca. -105°C hätte selbst eine weitere Stufenerhöhung keinen Sinn mehr, da das erzielbare Delta T_e in keinem Verhältnis zum Aufwand stünde. Die absolute Grenze liegt bei ca. -110°C...-115°C. Wohl aber bestünde auch hier die Möglichkeit, mit anderen thermoelektrischen Systemen (z.B. dem magnetothermoelektrischen Effekt) weitere Temperaturabsenkungen zu erreichen. Wie oben beschrieben, ist Wismuttellurid ab Temperaturen von ca. +240°C an aufwärts für den Aufbau eines Peltierelements nur mehr bedingt geeignet.

Im Bereich von +190°C bis +325°C bietet sich aber Cadmium-Zinkantimonid *) als Halbleitermaterial für den p-dotierten Schenkel und Bleitellurid als Material für den n-leitenden Schenkel an. Da letzteres in seinem Wirkungsgrad noch über dem des Wismuttellurids liegt, stört der relativ geringe Wirkungsgrad des Cadmium-Zinkantimonids nicht so sehr. **) Hier muß noch Grundsätzliches zum Wirkungsgrad gesagt werden.

Alle Peltierblöcke werden mit Gleichstrom betrieben. Der eingespeiste Leistungswert setzt sich aus Spannung und Strom (VA) zusammen. Diese Leistungsaufnahme (Volt mal Ampere) wird oft als "sog. Maximale Kälteleistung" bezeichnet, obwohl dieser Wert durch viele Faktoren, wie Qualität der Elemente, Qualität der Lötstellen, Art der Lote, Art und Qualität der Keramikdecker etc. stark beeinflusst wird.

Geht man jedoch einmal aus Vereinfachungsgründen von einer guten Qualität ($\Delta T_{\max} = 70$ Kelvin bei effektiver Kälteleistung = 0) aus, so haben sich im Durchschnitt bei Messungen durch den Verfasser Wirkungsgrade von 80 % ergeben. Das bedeutet, daß sich bei beispielsweise einer Versorgung mit 5 Volt bis 2 Ampere (= 10 VA) sich ein max ΔT von 56 Kelvin einstellen sollte. Die tatsächlichen Temperaturen lagen bei 55 Kelvin, bei einer Warmseitentemperatur von +50°C. Als Faustregel gilt jedoch, da man allein mit dem ΔT nicht arbeiten kann, daß bei einem ΔT von 28 Kelvin immerhin noch ca. 60 % des elektrischen Leistungseinschusses (hier also 10 VA) als Kälteleistung mit 6 Watt zur Verfügung stehen.

Zu dem Bereich über +325°C ist folgendes zu sagen:

Bleitellurid (gegossen) besitzt bis ca. +440°C einen ausreichenden Wirkungsgrad. In gepreßter und gesinterter (statt

*) Barmat, Anderson, Bollmeier; Nucleonics 17, 166, 1959

**) Szégo, Kelley. 6. Agard Combustion and Propulsion Colloquium, Cannes 1964

gegossener) Form ist es bis ca. +520°C mit gutem Wirkungsgrad einsetzbar. Im p-Bereich bietet sich Germanium-Wismuttellurid an, das bei ca. +520°C sogar den größten Wirkungsgrad aller hier genannten Materialien erreicht. Der Temperaturbereich von +330°C bis 520°C ist also mit diesen beiden Materialien abgedeckt. ***)

Es muß klar gesagt werden, daß obige Aussagen, soweit sie den Temperaturbereich über +250°C betreffen, nur im Seebeckversuch tatsächlich erprobt wurden. *) Die Aussagen über die thermoelektrische Effektivität gelten aber prinzipiell für Seebeck- und Peltiereffekt gleichermaßen. In der Praxis könnten sich geringfügige Unterschiede ergeben, da Donatoren- und Akzeptoren-Unterschiede zwischen Seebeckeinsatz und Peltiereinsatz üblich sind.

Die prinzipielle Austauschbarkeit von Peltier- und Seebeckmodulen setzt übrigens der Verfasser in der Praxis beim Bau von Super-Kleinstkühlschränken ein:

Im Ratio 4:1 (also aus 4 erhitzten Peltierblöcken auf Wismuttelluridbasis) wird per (Kerzen)-Flamme soviel Strom erzeugt, daß damit ein (5.) Peltierblock zur Kälteerzeugung versorgt werden kann. Die ersten 4 Peltierblocks bestehen aus dem gleichen Material wie der 5. Sie werden eben nur als Seebeck-generatoren eingesetzt. Von Form und Gestalt unterscheiden sie sich in nichts vom fünften Block, der die Kälte erzeugt. Der Wirkungsgrad beträgt beim Einsatz von thermoelektrischen Zellen als Generator nur 2 bis 3 %.

ad 2.) Wie oben beschrieben, wird der Peltier-Halbleiter bei höheren Temperaturen durch das Eindiffundieren des Lotes "vergiftet". Es kann dann vorkommen, daß die Leistung des Peltierblocks bereits nach einigen 100 Stunden merklich nachläßt.

*) Barmat, Anderson, Bollmeier; Nucleonics 17, 166, 1959

**) Szego, Kelly. 6. Agard Combustion and Propulsion Colloquium, Cannes 1964

***) Justi, Eduard, Leistungsmechanismus und Energieumwandlung 1965

Es gibt zwei Möglichkeiten, die verstärkte Lotdiffusion bei höheren Temperaturen zu unterbinden:

- a.) Man kann zwischen Lot und Halbleiter eine weitere Schicht als Diffusionssperre einbringen. In einer privaten Mitteilung an den Verfasser, Ende der sechziger Jahre, wies Justi auf die Möglichkeit von Molybdän als Diffusionsbremse hin. Auch habe sich Stahl als nützlich erwiesen, zumindest im Laborversuch. *)

Es ist jedoch anzunehmen, daß Stahl (abgesehen davon, daß die Zusammensetzung des Stahls leider nicht benannt wurde) durch seine Oxidationsfreudigkeit Nachteile mit sich bringt!

- b.) Die zweite Möglichkeit, die Loteindiffusion zu vermeiden, besteht darin, auf das Lot zu verzichten.

Das heißt, man schafft zwischen Kupfer und Halbleiter nur einen mechanischen Kontakt. Die in Kontakt zu bringenden Teile müssen in diesem Fall äußerst plan sein.

Es hat sich herausgestellt, *) daß hauptsächlich die Kaltseite empfindlich auf die Diffusionsverunreinigungen reagiert. - Aus diesem Grunde sollte man erwägen, ob es als Übergangslösung nicht hilfreich wäre, nur eben die Kaltseite entsprechend zu behandeln und mechanisch auszudrücken. Die Warmseite könnte in der bisherigen Technik weitergefertigt werden, da Lotdiffusion hier wenig stört.

Da leider hier aus den USA keinerlei wichtige neue Informationen zu erhalten sind und in der Bundesrepublik mit dem kürzlichen Tode von Prof. Justi die Peltierforschung ein Ende fand, sind wir de facto gezwungen, unsere spärlichen Erfahrungen verbunden mit Gelegenheitserkenntnissen zugrunde zu legen. Peltier- bzw. Thermoelektrische Forschung wird in der Bundesrepublik nicht mehr betrieben, obwohl sie eine der wichtigen Säulen auf dem Gebiet der direkten Energieumwandlung ist. Sicher nicht weniger wichtig als die Photovoltaik (Solarzellen). Alle bisherigen Versuche und Entwicklungen machte der Verfasser auf seine eigenen Kosten.

*) Hänlein; Kältetechnik 12, 137; 1960

III.) Kühlung der Warmseiten der Peltierblöcke

Man geht grundsätzlich bei der Wärmeabfuhr bei Peltierblöcken davon aus, daß man die Kühlung heute über Lüfterbestückte Aluminiumwärmetauscher praktiziert.

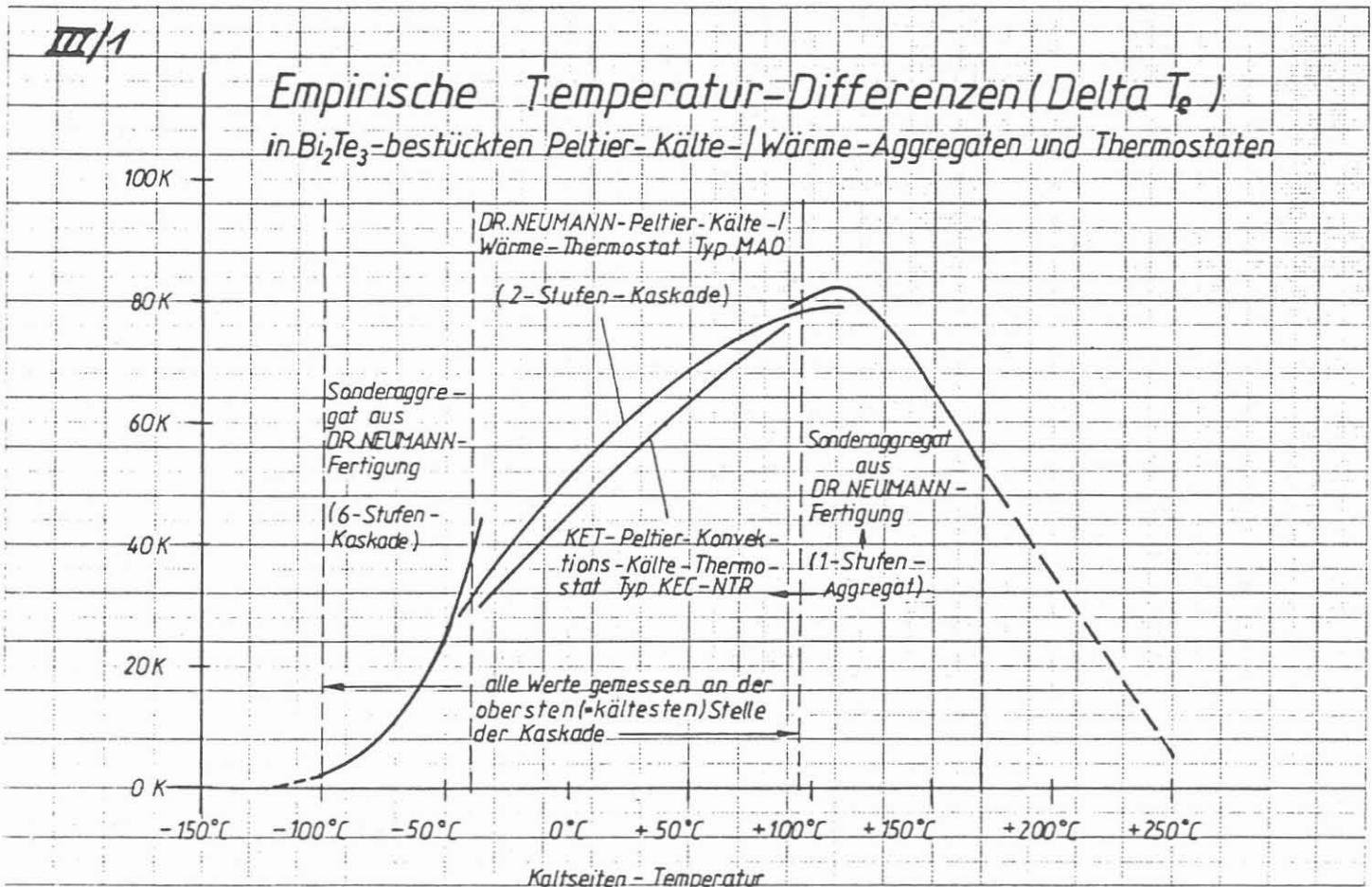
Flüssigkeitskühlung dagegen wird nur noch selten und wenn, dann hauptsächlich bei stationären Anlagen angewandt.

Als beste Alternative hat sich die sogenannte Siedekühlung bewährt, wenn es darum geht, das technisch Machbare zu erreichen. Preisliche Überlegungen der Peltier-Anwender stehen allerdings häufig als Hinderungsgrund dem Einsatz von Heatpipes (=siedekühlende Wärmetransportrohre) entgegen.

Alle diese Wärmeabfuhrsysteme setzen immer die Angriffsmöglichkeit am heißen Keramikdecker des Peltierblocks voraus. Diese Betrachtung geht von einer einstufigen Peltierkühlung aus.

Nun gibt es aber noch die Möglichkeit, die heiße Seite des Peltierblocks durch die kalten Seiten weiterer Peltierblocks zu kühlen (=Kaskadenschaltung) und erst dann die oben erwähnten Wärmetauscher angreifen zu lassen.

1.) Nehmen wir zunächst einmal an, daß wir auf der Kaltseite eine Temperatur von $+175^{\circ}\text{C}$ benötigen; so würde sich, gemäß der extrapolierten Grafik (siehe Bild III/1) des

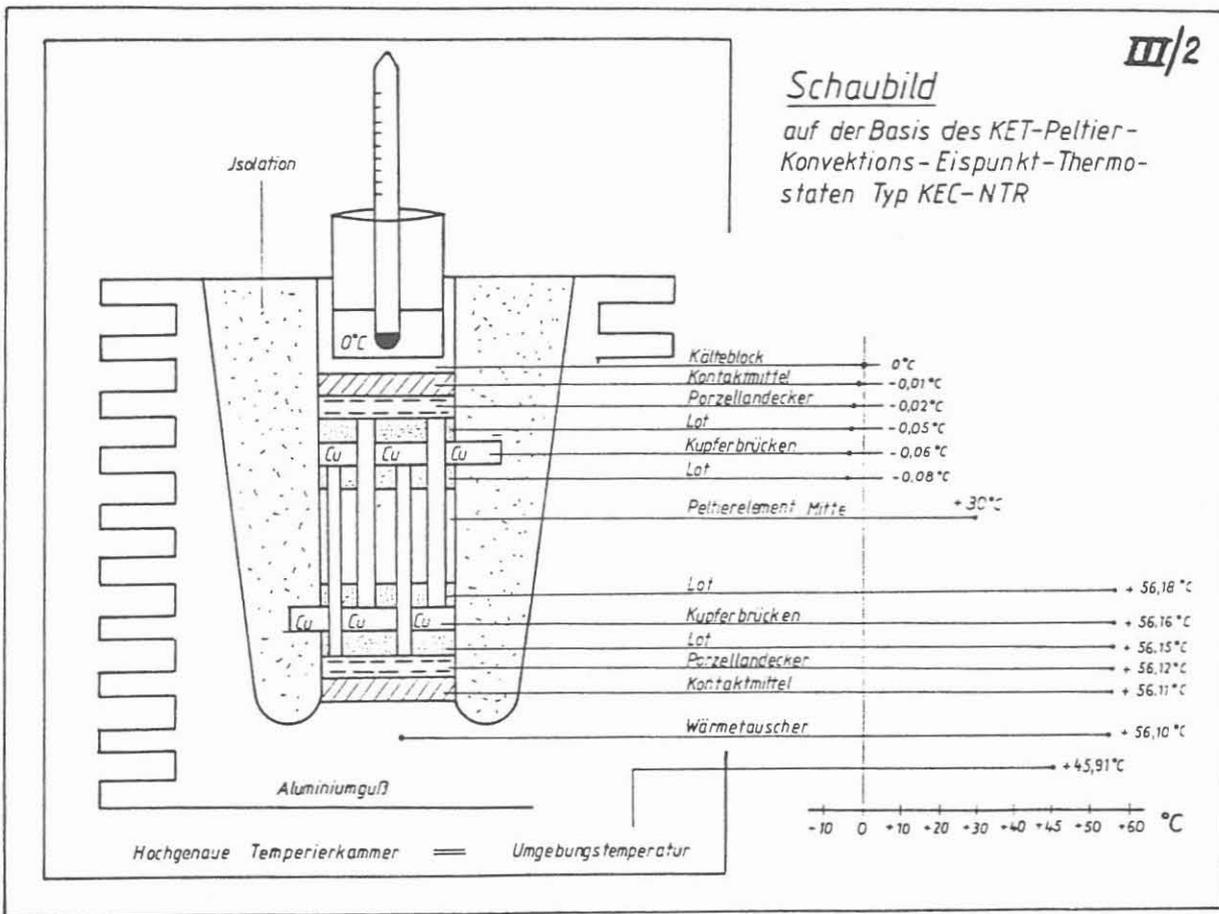


Delta-T-Verhaltens von wismuttelluridbestückten Peltieraggregaten eine praktische Temperaturdifferenz von ca. 50 K ergeben. Dies ergäbe rein rechnerisch eine Warmseiten-Umgebungstemperatur von ca. 225°C.

Anders ausgedrückt: hielte das Wismuttellurid eine Stirnflächentemperatur von ca. +240°C aus, so könnte man bei einstufigem Betrieb mit einem üblichen Peltierblock des Typs TAH eine Temperaturabsenkung auf ca. +175°C erreichen.

Aus dem untenstehenden Bild III/2 ist ersichtlich, warum

III/2



unterschiedliche Temperaturdifferenzen auftreten: jede Kontaktschicht stellt ein Wärmeübergangshindernis dar, auch wenn die Schicht noch so dünn ist.

Eine Erkenntnis übrigens, die bei High-tech-Peltiergeräten zur besonderen Beachtung höchster Oberflächenqualitäten führt. Transponiert man nun den Temperaturgradientenverlauf vom Temperaturniveau $-0,1^{\circ}\text{C} \dots +56,2^{\circ}\text{C}$ auf den Sollkühlwert von $+175^{\circ}\text{C}$ und stellt den Kerngradienten (= Differenz Umgebungstemperatur ./ Kälteblocktemperatur) von ca. 46 K (= $+45,91^{\circ}\text{C} ./ 0^{\circ}\text{C}$) auf das höhere Temperaturplateau von $+175^{\circ}\text{C}$, so erhält man in Anlehnung an die ca. 50 K Temperaturdifferenz insgesamt eine innere Temperaturdifferenz von ca. 43 K.

Die Peltierelemente selbst werden also an ihrer heißen Seite (also dem Warmseiten-Porzellandecker) bis zu ca. $+218^{\circ}\text{C}$ warm; das Spül- und Kühlmittel dürfte daher höchstens eine Temperatur von ca. $+207^{\circ}\text{C}$ haben, um die Kaltseitentemperatur der Peltierblöcke bzw. deren Heatpipes, die mit den "kühl" zu haltenden Elektronik-Bauteilen beaufschlagt sind, nicht über 175°C ansteigen zu lassen.

Um ein Spülmedium mit einer höheren Temperatur zu verkräften, müßte man über den Weg der Kaskadierung gehen. Die dadurch erzielbare Vergrößerung des Delta T läge jedoch nicht in der Verdoppelung, sondern - trotz der 3- bis 4fachen Leistung - nur in einer ca. 50 %-Zunahme.

Immerhin würde dies bedeuten, daß das Kühlmedium eine Temperatur von ca. $+230^{\circ}\text{C}$ haben dürfte. Der Kühleffekt auf $+175^{\circ}\text{C}$ wäre damit gesichert.

Nach wie vor bleibt jedoch unsere Anregung bestehen, besonders gefährdete Bauteile per Spot-Peltierkühlung bereits an Ort und Stelle einer Temperaturabsenkung zu unterziehen. Dies würde einer 3. Kaskaden-Stufe gleichkommen.

Eingangs wurde auf die Problematik der Lot-"Vergiftung" hingewiesen. Eine andere Kontaktierungsmöglichkeit besteht darin, auf das Lot zu verzichten und - wie bereits angeführt - die rein mechanische Druck- bzw. Pressverbindung intern im Peltierblock herzustellen. Vorteile: 4 der (minimalen) Wärmeübergangshindernisse entfallen und ein Eindiffundieren von Lot gibt es nicht mehr. Leider kann aber bei beengten Raumverhältnissen die Press-Vorrichtung diesen Vorteil wieder zunichtemachen, weil thermische Rückströme durch die mechanischen Teile fließen. Allerdings läßt sich dieses Negativum durch geschickte Anordnung sehr klein halten.

Langzeiterfahrungen mit mechanisch gespannten Peltiermaterialien im Einsatz über $+200^{\circ}\text{C}$ liegen nicht vor. Wohl aber sind Anwendungen des inversen Effekts bei der Stromgenerierung mittels thermoelektrischen Zellen bekannt, die im Raumfahrtbereich vorgenommen wurden. Temperaturen bis zu fast $+600^{\circ}\text{C}$ wurden von diesen Zellen verkraftet. Allerdings kamen hier keine Wismuttelluridelemente, sondern wismutdotierte und natriumdotierte Bleitelluridmaterialien zum Einsatz *)

Außerdem waren die Schenkel segmentiert, d.h. beide Schenkel waren als Quasi-Kaskaden aufgebaut, um eine Optimierung zu erreichen.

Wesentlich ist aber, daß man auf Lote völlig verzichtet. Die Elemente wurden mechanisch über Pressung kontaktiert. Die Lebensdauer insgesamt betrug ca. 1 1/2 Jahre, wobei allerdings angemerkt werden muß, daß sich die Anfangstemperatur von ca. $+600^{\circ}\text{C}$ auf ca. 380°C im Laufe der Zeit absenkte.

*) Justi, Eduard; Leistungsmechanismus und Energieumwandlung in Festkörpern; Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1965

Die von den Peltierelementen bei der Kühlung erzeugte Abwärme wird in konventionellen Geräten über Aluminium-Rippenwärmetauscher, oft lüftergestützt, abgeführt. Wasserkühlung wird immer seltener, Heatpipe-Kühlung nimmt zu.

Unter Heatpipes (schlecht eingedeutscht: Wärmerohre genannt) versteht man ein Teilgebiet der Siedekühlung. Rohre bestimmter Konfiguration werden derart mit einer Flüssigkeit gefüllt, daß diese Flüssigkeit bei vorher bestimmten Grenztemperaturen zu sieden beginnt, der Dampf zu den kühleren Stellen des Rohres wandert und sich dort als Kondensat niederschlägt. Über bestimmte mechanische (Docht-)Strukturen fließt dieses Kondensat wieder in die heiße Zone zurück, um dort erneut zu verdampfen.

Da der Wärmetransport über diesen Weg der optimale ist, wählen wir für unsere Wärmeabfuhr ebenfalls ein Heatpipe-System.

Solange keine ausreichenden praktischen Erfahrungen mit Hochtemperatur-Peltierblöcken (+500°C) vorliegen, muß man davon ausgehen, die Heatpipes in mitgeführten (Latent-)Speichern enden zu lassen. Diese - im Hinblick auf die Peltierwärme - als Kühlreservoirs zu bezeichnenden Latentspeicher wären, wenn auch zeitlich befristet, in der Lage, die Abfallwärme der Peltierzellen solange zu speichern, bis die Sonde wieder in kühlere Zonen zurückkehrt.

Doch unabhängig davon steht der Verfasser auf dem Standpunkt, daß bei der Hochtemperatur-Kühlung nicht im Gießkannenprinzip, sondern im Spot-Verfahren gekühlt werden sollte. Anders gesagt: Nur diejenigen Bauteile, die thermisch gefährdet sind, sollten speziell gekühlt werden, denn es ist hinreichend bekannt, daß auch im Rahmen hochelektronifizierter Schaltungen eine Vielzahl von Bauteilen vorhanden sind, die entweder von vornherein sehr hohe Temperaturen überstehen, oder die durch einfache Maßnahmen hochtemperaturfest gemacht werden können. Diese Teile aber dann

pauschal mitzukühlen, hieße nicht nur Geldmittel, sondern insbesondere auch Energie zu verschenken, die bekanntlich über tausende von Meter per (beengtes) Kabel zugeführt werden muß.

Bleiben wir aber noch bei diesem Problem, das uns noch im Themenkreis "Energiezuführung" beschäftigen wird.

Haben wir oben angeregt, mit der Spot-Kühlung zu arbeiten, also bestimmte Punkte zu kühlen, so gehen wir an dieser Stelle noch einen Schritt weiter, weil die gezielte Wärmeabfuhr eine Spotwärmeabfuhr bis heute nur durch Metalle erfolgt. Es ist mit Sicherheit viel erfolgversprechender, wenn hitzeerzeugenden Bauteilen von vornherein gleich die Möglichkeit genommen wird, Hitzenester zu bilden. Hier würde die direkte Siedekühlung am Ort des Geschehens, also am besten noch innerhalb des Halbleitergehäuses, eine drastische Senkung des Kühlbedarfs ergeben.

IV.) Abschätzung der Kühlleistung und des Wirkungsgrades

Die Kühlleistung eines Peltierblocks steht diametral der gelieferten Temperaturdifferenz gegenüber. Bei einem maximalen Delta T ist die Kälteleistung gleich Null und beim Kühlleistungsmaximum gibt es keine Temperaturdifferenz mehr. In der Praxis geht man von einem linearen Zusammenhang aus. Der physikalische Kurvenverlauf, der an den Enden Krümmungen aufweist, wird ignoriert, da man beim Bau von Peltiergeräten sowieso nicht die Peltierelemente bis zum letzten ausreizt. Unterstellen wir auch hier zunächst einmal praktische Erfahrungswerte, so wissen wir aus der Fertigung von weit über 10.000 Peltierkälteerzeugern, daß bei z.B. 0°C im Kältebad und einer Umgebungstemperatur von 22°C der Peltierblock Typ TAH eine Versorgungsleistung von 2 Volt bei 1,1 Ampere abrufen (PID-Regelung *), sich also auf 2,2 VA einstellt. Da dies jedoch nur ein Bruchteil der möglichen Peltierleistung des Blockes ist, der in der Einschaltphase bei 6 Volt 3,3 Ampere zieht (= ca. 20 VA), ist leicht einzusehen, daß das Gerät ohne weiteres auf tiefere Temperaturen heruntergehen kann oder noch wesentlich höhere Wärmelasten (ver-) tragen könnte. Stellen doch die oben erwähnten 2,2 VA nur die Kompensation der thermischen Leckverluste bei 0°C dar, die durch die (niemals perfekte und somit naturgemäß "mangelhafte") Isolierung entweichen. Auch ist es eben diese "mangelhafte" Isolierung, die es uns in der Praxis unmöglich macht, die theoretischen Werte des Peltierblocks auszuschöpfen. Für die bekanntesten drei Wärmepumpenarten gilt eine einfache Faustformel für den Wärmepumpenwirkungsgrad, d.h. die Relation

$$\frac{\text{Wärmepumpleistung (Output)}}{\text{Elektrische Leistung (Input)}} :$$

*) PID = (platinwiderstandfühlersystem-gesteuerter) Proportional-Integral-Differential-Regler

Absorber 2,0; Peltier 2,4; Kompressor 3,0.

Genauer gesagt, liegt der Wert für Peltier bei nur ca. 2,15...2,40, je nach Qualität. Mit anderen Worten: 1 Watt elektrische Leitung pumpt im Peltiersystem 2,15 bis 2,40 Watt Wärme.

Betrachten wir nochmal den Peltierblock Typ TAH, der eine Fläche von 30 x 30 mm hat (= 9 cm²), so erhalten wir eine Wärmepumpleistung von ca. 2,3 x 20 Watt = 46 Watt, die auf der warmen Seite des Peltierblocks (9 cm²) ansteht. Somit also ca. 5 Watt pro cm².

Nun stellt es zwar kein grundsätzliches Problem dar, die Leistung pro cm² zu verdoppeln, indem man die Höhe der Peltierzellen kürzt. Die Schwierigkeiten liegen nämlich darin, daß schon ab 8 Watt pro cm² selbst Kupfer und Silber nicht mehr die entstehenden Wärmemengen optimal abführen können. So passiert es in der Praxis häufig, daß Laien Peltierblöcke der höchsten Leistungsstufe bei uns ordern, mit der Bemerkung, daß man doch "für's gleiche Geld", die gleiche Größe (von 30 x 30 mm) mit der doppelten Leistung (40 Watt) bekäme. Sie berücksichtigen dabei nicht, daß nicht nur die Wärme von ca. 92 Watt auf 9 cm² abgeführt werden muß, sondern übersehen auch, daß die wesentlich geringere Höhe der leistungsfähigeren Peltierblocks - also ca. 3 mm Höhe bei den 92-Watt-Wärmeleistung-Blocks gegenüber ca. 5 mm Höhe bei den TAH - dazu führt, daß sich Kalt- und Warmbereich räumlich sehr stark annähern. Die Isolierung ist dann bei 3 mm Abstand zwischen "Warm" und "Kalt" so ungenügend, daß die Warmseite auf die Kaltseite strahlt.

Was vorher an Kälte erzeugt wurde, geht hierdurch wieder teilweise verloren. In der Praxis kommt es sogar vor, daß nominell stärkere Peltierblocks effektiv schlechtere Kühlwerte aufzeigen, als sie sog. "niederstromigen" Moduls. Genau gleich verhält es sich selbstverständlich auch auf höherem Temperaturniveau. Auch hier werden Kühl-Leistung und Delta T immer entgegengesetzt reagieren.

Gehen wir in Gedanken nochmal auf die Effektivitätskurve der Wismuttellurid-Elemente zurück, so erinnern wir uns, daß bei weiter steigender Temperatur die Effektivität abnimmt. Zwar liegen uns exakte wissenschaftliche Werte nicht vor, aber wir dürfen aus unserer Grundsatterfahrung sagen, daß sich auch im Bereich von $+220^{\circ}\text{C}$ noch interessante Wärmepump-leistungen ergeben haben. Wir wissen aber noch nicht, wie Kaskadierungen, (d.h. Abführung der Wärme eines Peltier-blocks mittels der Kälte weiterer Blocks) im Hochtemperaturbereich gestaltet werden müssen. Es könnte also nötig sein, die obere (=kälteste) Peltierstufe auf deren Unterseite mit dem fünffachen Wert zu kühlen und nicht mehr nur mit dem 3-fachen oder 4-fachen, wie es heute im Rahmen der Normaltemperatur— Bi_2Te_3 -Technik üblich ist.

Die Kaskadierung setzt man immer ein, wenn man größere Temperaturdifferenzen erzeugen will, als sie von nur einer Peltierstufe erbracht werden.

Unter einer Peltier-Kaskade versteht man die Aufeinanderstapelung von Peltierblocks. Man schichtet unter den obersten Peltierblock (an seine heiße Seite) eine vielfache (3- bis 6-fach) Menge von Peltierblocks, damit diese mit ihren Kaltseiten die Warmseite des obersten Blockes kühlen.

Unter diese Schicht setzt man wiederum Peltierblocks in der 3- bis 6-fachen Anzahl der vorhergehenden Schicht, also 9 bis 36 Stück. Eine 3-Stufen-Kaskade besitzt somit 3 Peltierblock-Schichten. Im Normaltemperaturbereich sind 3- und 4-stufige Kaskaden nicht außergewöhnlich. Der Verfasser setzt hauptsächlich Peltierblocks im Verhältnis (Ratio) von 1:4 ein, d.h. 4 Peltierblocks kühlen den oberen (kältesten) Peltierblock. Kaskaden, die mehr als 6 Stufen haben, sind nicht bekannt, da die 7. Stufe das 729- (Siebenhundertneunundzwanzig)fache der 1. Stufe haben müßte, selbst wenn nur im Ratio von 1:3 gefahren würde.

Grundsätzlich heißt das, daß eine Pyramide entstünde, deren Basis 729 Peltierblöcke besäße, die 243 auf ihr liegende Pel-

tierblöcke kühlen müßte, die ihrerseits 81 weitere Blöcke kühlen müßten etc. etc.

Bei einem aufwendigeren Ratio von 1:4 oder gar 1:6 wären dies fast schon astronomische Zahlen, die - von der Technik mal abgesehen - auch schon finanziell nicht tragbar wären. Und - und dies ist besonders ernüchternd - man hätte nur einen Gewinn von ca. 1 bis 2 K. Anstelle von -110°C würden also -111°C oder -112°C erreicht. Die Optimierung der Isolationsmaßnahmen wäre da wesentlich sinnvoller und wirtschaftlicher.

V.) Einbaumöglichkeit in vorgegebene Dewargefäße

Geht man von der Annahme aus, daß die Wandung der Sonde im Bereich der schutz- u. kühlungsbedürftigen Elektronik aus einem Dewarmantel besteht, so ergibt sich die Konsequenz, entweder die Abwärme der Bauelemente direkt oder die in das Behältnis durch das Dewar eindringende Umgebungstemperatur (plus Bauteilewärme) zunächst einmal axial abzuführen. Diese abgeführte Wärme gilt es zu "vernichten".

Folgende Möglichkeiten bestehen:

- 1.) Der Dewarmantel wird an bestimmten Stellen durchbrochen, um (via Peltierkühlung) die Abfallwärme nach außen zu transportieren. Dies setzt allerdings gleichzeitig einen Wärmetauschermantel voraus, der den direkten Kontakt zum Kühl- und Spülmittel hat.
- 2.) Der Dewarmantel bleibt über eine große Länge geschlossen. Im Inneren des Sondenzylinders werden über Heatpipes die Wärmequellen oder die Warmräume "angezapft". Die Wärme wird dann - evtl. über sog. Peltier-Knoten-Vertärker axial innerhalb des Zylinders bis über das Ende des Dewarman- tels hinaus weitergereicht. Erst dann geben radial ange- ordnete Peltierkaskaden an einen mit der Umgebung in Kon- takt stehenden Wärmetauscher die Wärme nach außen an die Bohrspülung ab.
- 3.) Sollte in der ersten Phase die Hochtemperaturkühlung noch nicht fertig entwickelt und erprobt sein, kann auch ein Latentspeicher eingesetzt werden. Latentspeicher haben jedoch den Nachteil der begrenzten Aufnahme. Die Sonde muß lange vor dem Ende der Speicherkapazität den heißen Bereich verlassen, da der Rückweg durch nicht minder heiße Zonen des Bohrlochs ebenfalls Zeit beansprucht.
- 4.) Bei Vorhandensein hochtemperaturfester Peltierblocks kann dann allerdings geprüft werden, ob nicht eine Se- paratkühlung des Latentspeichers dessen Kapazität wesent-

lich vergrößert. Hier bedarf es allerdings zahlreicher Versuche, um die Frage zu klären, ob auf diese Weise nicht in größerem Maße Versorgungsenergie gespart werden könnte. Immer aber gilt beim Einsatz von Speichern, deren endliche Kapazität im Auge zu behalten. Die Vorteile der aktiven Kühlung durch Peltierblocks können durch Latentspeicher nicht eingeholt werden.

VI.) Die Leistungsversorgung über 10 km lange Kabel

Gehen wir von einem angenommenen Kälteleistungsbedarf von 200 VA (= 50 Volt; 4 Ampere) vor Ort aus, so ist zunächst festzustellen, daß wir zum Betrieb der Peltierblöcke Gleichstrom benötigen.

Die Frage, ob es nicht bei dieser Länge der Kabel besser wäre, hochgespannten Wechselstrom zu benutzen, um möglichst geringe Leitungsverluste zu erzielen, wird u.E. jedoch nicht allein von der Kühl- bzw. Peltier-Seite aus zu betrachten sein. Auch wird man nicht einfach hochfrequenten Wechselstrom (je höher die Frequenz, um so niedriger ist die Restwelligkeit; je niedriger die Restwelligkeit, umso größer ist der Wirkungsgrad der Peltierelemente) vor Ort bringen können, weil die Behältnisse in der Sonde sowieso bereits voll ausgelastet sind und für die Umspann- und Gleichrichterelemente zusätzlich Raum geschaffen werden müßte. Zudem bilden sie eine weitere zusätzliche Wärmequelle. Auch von einer Einrichtung hochgespannten Gleichstroms in Niederspannung möchten wir wegen der zusätzlichen Wärmeentwicklung in der Sonde abraten.

Das Hauptproblem liegt vermutlich in der exorbitanten Störstrahlung, die vermutlich, trotz Schirmung, wegen der großen Länge der äußerst dicht liegenden Kabelstränge, nicht zu unterdrücken sind wird.

Optimal ist Gleichstrom. Wir schlagen sogar vor, Gleichstrom mit einer Restwelligkeit von absolut Zero zu benutzen. Dazu wählt man entweder ausreichend dimensionierte Akkumulatoren oder Thermoelektrische Generatoren.

Der Vorteil liegt auf der Hand:

Absolute Störfreiheit; der Strom kommt genau in der gewünschten Form vor Ort an; der Platz für eine Umspannvorrichtung in der Sonde wird nicht benötigt.

Wichtig wäre es zu wissen, welche Drahtstärken für die Peltierversorgung zugelassen werden, denn davon hängt die Konstruktion der Peltierblöcke ab.

Ferner ist zu vermuten, daß man mit den 200 VA vor Ort nicht auskommt. Einmal ist anzunehmen, daß der Kühlbedarf sicher größer sein wird als 200 VA. Zum anderen muß man berücksichtigen, daß diese 200 VA nicht restlos in Kälteleistung (dazu noch mit einer Temperaturdifferenzerzielung) umgesetzt werden können.

In der täglichen Praxis rechnet man im Normalbereich (d.h. Wismuttellurid bei Raumtemperatur) mit 50 % dieser sog. theoretischen, maximalen Kälteleistung, wenn man eine Temperaturdifferenz von 25 K erreichen will.

Es sollten daher auch alle Nichtpeltier-Bauelemente bezüglich ihres elektrischen Wirkungsgrades selektiert werden. Dies hätte zwei Vorteile: Je weniger Leistung verbraucht wird, um so weniger wird das Kabel belastet. Je weniger Hitze entsteht, um so weniger muß abgeführt werden.

Außerdem sei erlaubt, einen wichtigen Grundsatz aus der Peltiertechnik hier zu erwähnen: Je näher die Peltierkühlung an die Hitzequelle rückt, umso effektiver kann sie arbeiten. Und das ideale Transportmedium der (unerwünschten) Hitze im zu kühlenden Bauteil ist immer noch die siedende Flüssigkeit. Diese Wärmeabfuhr allein (ohne Peltier) ist, gegenüber der Wärmeleitung von Kupfer, ca. 100 (einhundert) Mal besser. Daher weisen wir an dieser Stelle auch noch auf die Stichworte "Spot-Siedekühlung" kombiniert mit "Spot-Peltierkühlung" hin.

VII.) Aufwandsabschätzung

- 1.) Die Aufwendungen für eine sogenannte Vorläuferstufe, d.h. also, die Erreichung einer Temperatur von ca. $+175^{\circ}\text{C} \dots +180^{\circ}\text{C}$ mittels eines Hybriden aus konventioneller (Wismuttellurid)-Technik und exotischen Halbleitermaterialien, die erst entwickelt und hergestellt werden müssen, wie Bleitellurid und evtl. Cadmiumzinkantimonid, werden bei ca. 90.000,-- bis 120.000,-- DM liegen. In diesem Preis wären die für einige T05-Gehäuse-ICs und einige Flat-Pack-ICs nötigen Kühlsysteme eingeschlossen.

Die Konfiguration dieser Kühlsysteme würde auf dem von uns vorgeschlagenen Weg der Spot-Siedekühlung und der Spot-Peltierkühlung basieren. Ambient-Testvorrichtungen sind nicht in diesen Preisen enthalten.

Das Kühlmittel muß vom Auftraggeber gestellt werden. Es wird dann mit einer Temperatur von $+250^{\circ}\text{C}$ den Wärmetauscher unserer Kühlsysteme beaufschlagen.

- 2.) Für die Endstufe des Programms, Umgebungstemperatur $+350^{\circ}\text{C}$, eine Aufwandabschätzung abzugeben, ist zur Zeit noch nicht möglich. Die Zahl der benötigten Kaskadenstufen ist im momentanen Stadium nicht abzusehen. Auch sollten unbedingt erst die Ergebnisse der sog. Vorstufe abgewartet werden, um die darin gewonnenen Erkenntnisse weiterverarbeiten zu können.

Literatur

(die spezifischen Zitate sind bereits im Text erwähnt)

- 1) Abeles, B., D.S, Beers, G.D.Gody u.I.P.Dismukes, Phys. Rev. 125, 44, 1962 (Ge/Si-Mischkristalle).
- 2) Bockris/Justi, Wasserstoff-Energie für alle Zeiten, Udo Pfriemer-Verlag München, 1980
- 3) Cambion, *Firmenschrift*
- 4) Egli, P.H., New York 1960, J. Wiley & Sons, Inc.
- 5) Emin, David; Icosahedral Boron-Rich-Solids; Physics Today; Januar 1987
- 6) Hänlein, W., Kältetechnik 12, 137, 1960 (Schwermetallschicht als "Diffusionsbremse").
- 7) Hogarth, Materials used in Semiconductor Devices New York, London, Interscience Publishers, 1965
- 8) -, DBP 858925 v. 21.07.50 (In-Bi-Lot).
- 9) Justi, G. Neumann, Akad.d.Wiss.u.d.Lit., Mainz, Jahrbuch 1958, S. 247. Wiesbaden 1959, Verlag F. Steiner - Justi, E., G. Neumann u.G.Schneider, Zs.f.Phys.156, 217, 1959 (Zn Cd - Sb als Peltierwerkstoff).
- 10) Justi, G.Schneider, Zs.f.Naturforsch. 16a, 628, 1961; Proc. Internat.Conf.on Semicond.Physics, S. 1074, Prag 1960 (Häufigkeit der p- und n-Thermoelektrika).
- 11) Justi, E. Lang u. G.Schneider, Adv.En.Conv. 4, 15, 1964, (Invertierung von (Zn Cd Sb)).
- 12) Neumann, Dietmar; Peltiergeräte in der Praxis. Klimatechnik Nr. 12, 1967 u. Nr. 1, 1968; Technischer Verlag Kopf, Stuttgart.
- 13) Neumann, Dietmar; Miniaturkühlung; Technisch genutzter Peltiereffekt; Industrieanzeiger 84; 1987; Konradin Verlag.
- 14) Szego, G.C. u. C.M.Kelley, 6. Agard Combustion and Propulsion Colloquium, Cannes 1964.