

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 55 (1964)
Heft: 4

Artikel: Halbleiter-Kühlelemente
Autor: Hänlein, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916683>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

«Schwänze». Es handelt sich um ein Übergangsstück, bestehend aus einigen Zentimetern Leitungsschnur mit einem 2 P + E-Stecker am einen und einer 2-P-Kupplungssteckdose am andern Ende, welche dem Anschluss des Rasierapparates dient. In einem Badzimmer blieb dieses Übergangsstück — wie wohl überall — ständig in der 2 P + E-Steckdose stecken. Einer Frau, die ein 2½-jähriges Kind badete, fiel der daran angeschlossene elektrische Heizofen ins Bad. Der im Nebenraum sich aufhaltende Gatte hörte ein Geräusch, kam herbei und fand nun Frau und Kind im Bad. Die Frau hielt sich krampfhaft an einem Wasserleitungsrohr. Sie war tot, das Kind lebte. Wäre der Ofen geerdet angeschlossen gewesen, hätte der eingetretene Erdschluss die vorgeschaltete Sicherung wohl rasch zum Schmelzen gebracht.

14. Übrige Hausinstallationen

Es handelt sich hier grundsätzlich um die gleichen Unfallhergänge wie in Abschnitt 7 hievor beschrieben. Vor allem herrschen die Unfälle — meist Flambogenunfälle — an Hauseinführungen und Sicherungstafeln vor. Etwas mehr ausschalten, etwas sorgfältiger abdecken, und schon sind die Kosten von einigen hundert Tagen Arbeitsausfall eingespart!

15. Besondere Unfallumstände

Wie bereits im statistischen Teil angedeutet, verunfallte ein Arbeiter tödlich, der sich an den Zündkerzen eines

laufenden Automotors zu schaffen machte. Da der Mann gleichzeitig die Wagenmasse berührte, ist es wahrscheinlich, dass er sich der Zündspannung zwischen beiden Armen aussetzte. Jedenfalls stellte der Gerichtsmediziner Tod durch Elektrizität fest. Ins gleiche Kapitel gehört auch ein Unfall, der einem Soldaten bei Manövern zugestossen ist. Als er einen Weidezaun-Draht übersteigen wollte, wurde er so heftig elektrisiert, dass er sich nur mit grosser Mühe lösen konnte und Brandwunden an den Händen erlitt. Der Zaun wurde von einer Autozünd-Maschine, die von einem Elektromotor angetrieben war, gespeist.

Schliesslich ist noch ein Fall von alberner Dummheit erwähnenswert. Um einen Kollegen zu ärgern, verband ein Elektromonteur je ein Stück blanken Drahtes mit jedem Kontaktstift eines Steckers und legte die Drähte so an das Steckergehäuse, dass sie bei eingestecktem Stecker nicht bemerkt werden konnten. Als dann der Kollege den Stecker herausziehen wollte, wurde er selbstverständlich heftig elektrisiert. Er stand wochenlang in ärztlicher Behandlung. Der Urheber dieses gefährlichen Scherzes wurde fristlos entlassen.

Es geht uns mit diesen Beschreibungen nicht darum, irgend jemanden anzuklagen, sondern Fachleute und Laien auf die verschiedenen Gefahrenquellen hinzuweisen und sie anzuspornen, im Kampf gegen die Unfälle mitzuhelfen.

Halbleiter-Kühlelemente

Von W. Hänlein, Erlangen

621.362 : 537.322.1

Seit langem war eine Anzahl von thermoelektrischen Erscheinungen in Festkörpern bekannt. Zu nennen ist hier der Seebeck-Effekt, der im Jahre 1822 entdeckt wurde. Beim Seebeck-Effekt entsteht in einem aus zwei verschiedenen Metallen bestehenden Thermolement bei Vorhandensein einer Temperaturdifferenz zwischen den Lötstellen eine elektrische Spannung, die zur Energieerzeugung benützt werden kann. Die Umkehrung dieses Effektes, der sog. Peltier-Effekt, wurde 1834 entdeckt. Schickt man durch ein Thermolement einen Gleichstrom, so entsteht zwischen den Lötstellen eine Temperaturdifferenz.

Es sind bereits in früheren Zeiten viele Versuche unternommen worden, sowohl den Seebeck- als auch den Peltier-Effekt technisch auszunützen. Erst in neuerer Zeit ist den Bemühungen ein gewisser technischer Erfolg beschieden gewesen, insbesondere ist es gelungen, den Peltier-Effekt auf Grund der neueren Halbleiterentwicklung praktisch nutzbar zu machen.

Ein Peltierelement besteht aus den beiden Schenkeln 1 und 2 sowie aus den daran angelöteten Kupferlaschen 3 und 4 (in Fig. 1). Schickt man durch ein derartiges Element einen Strom, so entsteht zwischen den Lötstellen 3 und 4 eine Temperaturdifferenz. Die erzeugte Peltierkälte ist umso grösser, je grösser die Thermospannung α der beiden Schenkel und je grösser die durch die Schenkel geschickte Stromstärke I sind. Ausserdem ist sie abhängig von der Temperatur der kalten Lötstelle T_k . Die erzeugte Peltierkälte vermindert sich um die beim Fliessen eines Stromes erzeugte Joulesche Wärme, die von dem elektrischen Widerstand der Schenkel und dem Quadrat der Stromstärke abhängig ist. Ferner fliesst von der warmen Lötstelle

Wärme zur kalten Lötstelle. Dieser Wärmefluss, um den die erzeugte Peltierkälte ebenfalls herabgesetzt wird, ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Schenkelmaterials sowie von der Temperaturdifferenz zwischen der heissen und der kalten Lötstelle. Für die erzeugte Wärmemenge eines Peltierelements ergibt sich:

$$Q_k = 2\alpha T_k I - \frac{1}{\gamma S} I^2 - 2\lambda \frac{S}{l} (T_w - T_k)$$

worin

- α Thermokraft [V/Grad]
- λ Wärmeleitfähigkeit [W/Grad·cm]
- γ elektrische Leitfähigkeit [$\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$]
- l Länge der Schenkel [cm]
- S Querschnitt der Schenkel [cm^2]
- T_k Temperatur der kalten Lötstelle [$^\circ\text{K}$]
- T_w Temperatur der warmen Lötstelle [$^\circ\text{K}$]
- I Stromstärke [A]

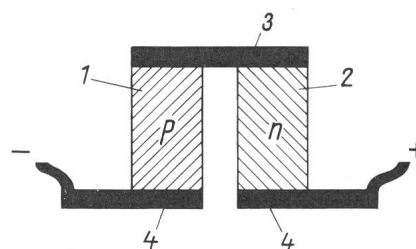


Fig. 1
Schema eines Thermo-Elementes

In gleicher Weise kann man die Wärmemenge errechnen, die an der warmen Lötstelle an den Kupferbrücken 4 entsteht. Hieraus ergibt sich dann die elektrische Leistung P , die bei der Stromstärke I von einem Element aufgenommen wird zu:

$$P = \frac{2I}{\gamma S} I^2 + 2\alpha (T_w - T_k) I \quad [\text{W}]$$

Aus den obigen Gleichungen ergibt sich dann die Leistungsziffer ε eines Peltierelements als das Verhältnis von Peltierkälte zu aufgewendeter elektrischer Leistung

$$\varepsilon = \frac{Q_k}{P} = \frac{2\alpha T_k I - \frac{I}{\gamma S} I^2 - 2\lambda \frac{S}{l} (T_w - T_k)}{\frac{2I}{\gamma S} I^2 + 2\alpha (T_w - T_k) I}$$

ε Kälteleistungsziffer

Für viele Fälle ist es wichtig, die maximale Temperaturdifferenz zwischen der heissen und kalten Lötstelle bei einer Kälteleistung Null zu kennen; diese ergibt sich zu:

$$\Delta T_{max} = \frac{T_k^2}{2} \cdot \frac{\alpha^2 \gamma}{\lambda}$$

Aus diesen angeführten Gleichungen ergeben sich bereits die Forderungen, die an Materialien zu stellen sind, die eine technische Ausnützung des Peltiereffektes gewährleisten. Es ist zu fordern:

1. Möglichst hohe Thermokraft;
2. Gute elektrische Leitfähigkeit;
3. Schlechte Wärmeleitfähigkeit.

Diese Bedingung lässt sich bereits aus der Formel für die maximale Temperaturdifferenz ablesen als sog. Effektivität:

$$Z = \frac{\alpha^2 \gamma}{\lambda}$$

Die in früheren Jahren unternommenen Versuche, den Peltiereffekt technisch auszunützen, scheiterten, weil noch keine Werkstoffe mit einer genügend hohen Effektivität vorhanden waren. Trägt man in einem Diagramm die Thermospannung, die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit von Isolatoren, Halbleitern und Metallen auf (Fig. 2), so zeigt sich, dass ein Maximum von $\alpha^2 \gamma$ im Gebiet der Halbleiter bei einer Ladungsträgerkonzentration von 10^{19} cm^{-3} zu suchen ist. Im Bereich der Isolatoren sind hohe Thermokräfte, dagegen schlechte elektrische Leitfähigkeiten vorhanden, im

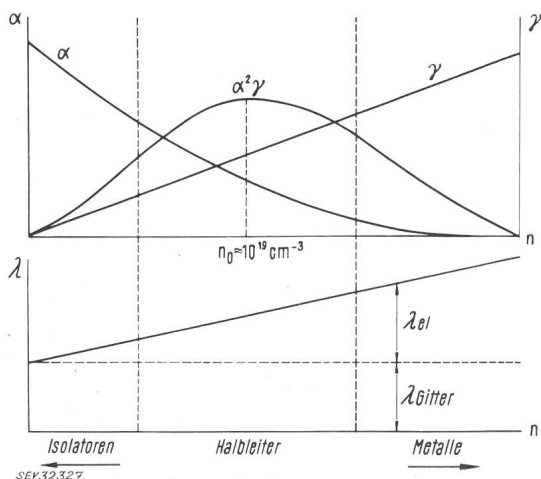


Fig. 2

Thermokraft α , elektrische Leitfähigkeit γ und Wärmeleitfähigkeit λ als Funktion der Ladungsträger-Konzentration n

Bereich der Metalle gute elektrische Leitfähigkeiten, aber zu hohe Wärmeleitfähigkeiten und niedrige Thermospannungen. Nur im Gebiet der Halbleiter gelingt es, Effektivitäten zu erreichen, die für praktische Zwecke in Frage kommen.

In den vergangenen Jahren wurde eine grosse Anzahl von Halbleitern auf ihre Verwendbarkeit für Kühlzwecke untersucht. Als brauchbar haben sich insbesondere Telluride erwiesen. Benützt werden heute für den p-leitenden Schenkel Wismut-Antimontellurid und für den n-leitenden Schenkel Wismut-Selentellurid. Die Abhängigkeit der thermoelektrischen Daten von der Zusammensetzung zeigt für Wismut-Antimontellurid die Tabelle I.

Abhängigkeit der thermoelektrischen Werte von der Zusammensetzung

Tabelle I

Zusammensetzung Atomprozente		α	$\gamma \cdot 10^{-2}$	$\lambda \cdot 10^2$	$n \cdot 10^{19}$	$Z \cdot 10^8$
Bi_2Te_3	Sb_2Te_3	$\mu\text{V/Grad}$	$\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$	$\text{W/Grad}\cdot\text{cm}$	cm^{-3}	Grad^{-1}
100	0	+240	5,25	2,0	(1,23)	1,51
90	10	+227	5,64	1,82	—	1,59
80	20	+202	7,35	1,78	1,25	1,68
60	40	+153	11,35	—	2,17	—
50	50	+153	13,2	1,75	2,73	1,77
40	60	+146	16,65	1,85	3,65	1,91
30	70	+146	20,0	2,08	5,11	2,05
20	80	+136	25,0	2,26	7,30	2,04
10	90	+108	38,0	3,42	8,80	1,30
0	100	+79	43,8	4,38	8,80	0,74

Für die Herstellung dieser Halbleiter werden heute zwei Verfahren benützt:

1. Pulvermetallurgische Methoden;
2. Schmelzverfahren.

Das pulvermetallurgische Verfahren nützt die Tatsache aus, dass man Formkörper aus Pulvern durch Pressen und Sintern herstellen kann. Hierzu werden die für den Halbleiter erforderlichen Substanzen im richtigen Verhältnis abgewogen, in eine Ampulle gefüllt, evakuiert und abgeschmolzen (Fig. 3). Der Inhalt der zugeschmolzenen Ampulle wird dann in einem Ofen unter ständigem Kippen des Ofens (zur besseren Homogenisierung) geschmolzen. Nach dem Erstarren wird der Inhalt der Ampulle entnommen und in einer Mühle zerkleinert. Nach Absieben der gewünschten Korngrösse wird das erhaltene Halbleiterpulver in Pressformen eingefüllt und zu den gewünschten viereckigen oder zylindrischen Körpern gepresst. Dem Pressen folgt ein Sintervorgang, dem die Formkörper unter Schutzgas unterzogen werden. Das pulvermetallurgische Verfahren hat den Vorteil niedriger Fertigungskosten, da sich die Fertigung weitgehend mechanisieren lässt; es gewährt ausserdem eine grosse Freiheit in der Formgebung der gewünschten Halbleiterkörper.

Beim Schmelzverfahren wird ebenfalls in einer Ampulle eine Vorlegierung hergestellt. Der Vorlegierungskörper wird in einer Mühle auf einen Korndurchmesser von ca. 3 mm zerkleinert und in Quarzglasampullen eingefüllt. Die Ampullen werden dann unter Erhitzen evakuiert und abgeschmolzen. Die

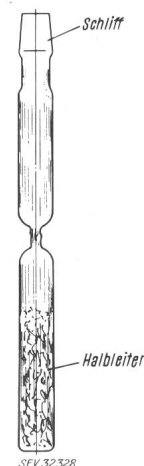


Fig. 3

Eingegossenes Rohr für die Vorschmelze

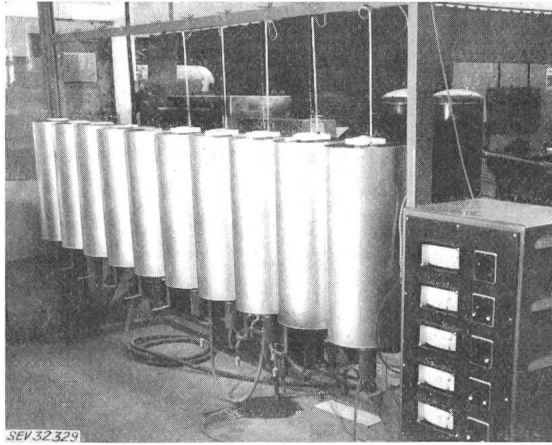


Fig. 4
Absenköfen

abgeschmolzenen Ampullen werden einem als Normal-Freezing bezeichneten Prozess unterzogen; hierbei werden die Ampullen an einen Draht in einem senkrecht stehenden Ofen (Fig. 4) eingehängt und mit einer Geschwindigkeit von einigen Millimetern pro Stunde gesenkt. Im unteren Teil des Ofens befindet sich ein wassergekühlter Zylinder, in den die Ampullen gegen Ende des Senkprozesses geführt werden. Hiedurch werden sie schnell abgekühlt, und das durch das langsame Senken gerichtete Kristallgefüge bleibt erhalten.

Für die Prüfung der Eignung eines thermoelektrischen Materials muss die Effektivität bestimmt werden. Man kann hierbei so vorgehen, dass man die Thermospannung zwischen Kupferbacken definierter Temperatur misst, die elektrische Leitfähigkeit nach bekannten Methoden bestimmt und die Wärmeleitfähigkeit mit Relativ- oder Absolutmethoden feststellt. Schwierigkeiten bereitet die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Die für praktische Zwecke benötigten Halbleiterkörper haben meist ein Verhältnis von Durchmesser zu Länge von 1. Diese Abmessungen sind für die Verwendung der bekannten Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit ungünstig, da das Plattenmessverfahren voraussetzt, dass der Plattendurchmesser gegenüber der Plattenstärke gross ist. Das zylindrische Messverfahren für die Wärmeleitfähigkeit lässt sich ebenfalls schlecht anwenden, da es schwierig ist, aus den relativ spröden Halbleitermaterialien Hohlzylinder herzustellen. Verfahren, bei denen die Wiedemann-Franz-Lorenzsche Zahl, das Verhältnis von elektrischer Leitfähigkeit zur Wärmeleitfähigkeit, gemessen wird, sind nur bei Zimmertemperatur zuverlässig, da die Strahlungsverluste hierbei in das Messergebnis stark eingehen. Eine Methode, die eine direkte Messung der Effektivität gestattet, wurde von Harman angegeben. Ein Halbleiterstab wird an beiden Enden kontaktiert und mit Stromzuführungen versehen (Fig. 5). An den beiden Enden werden ebenfalls zwei Thermoelemente angelötet. Bestimmt man an einem solchen Halbleiter den mit Wechselstrom gemessenen Widerstand R sowie den aus einer Gleichstrommessung bestimmten Widerstand R_{eff} , so ergibt sich die Effektivität zu:

$$Z = \frac{1}{T_{absolut}} \cdot \frac{R_{eff} - R}{R}$$

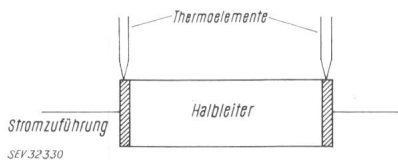


Fig. 5
Z-Bestimmung nach Harman

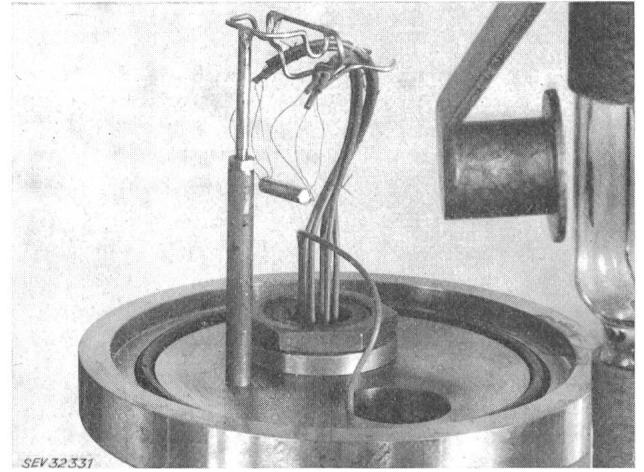


Fig. 6
Apparatur zur Messung von Z nach Harman

Diese Gleichung ergibt sich, wenn man im stationären Zustand bei Gleichstrom die erzeugte Peltierwärme dem Wärmefluss zwischen kalter und warmer Lötstelle gleichsetzt.

Die Ansicht einer derartigen Apparatur mit einem Probe-
stäbchen zeigt Fig. 6. Bei höheren Temperaturen ist diese Appa-
ratur mit Strahlungsfehlern behaftet; sie ist geeignet, um auch
bei tieferen Temperaturen Messungen vorzunehmen.

Wie bereits aus den abgeleiteten Gleichungen ersichtlich war, hat die Effektivität den entscheidenden Einfluss auf die erreichbare Temperaturdifferenz zwischen kalter und warmer Lötstelle. Sie ist ausserdem noch abhängig von der Temperatur der warmen Lötstelle, wie Fig. 7 zeigt. Man ersieht, dass z. B. bei einer Effektivität $Z = 3 \cdot 10^{-3}$ bei einer Temperatur der warmen Lötstelle von 120°C eine Abkühlung der kalten Lötstelle auf 0°C möglich ist, d. h. ein ΔT_{max} von 120°C . Befindet sich die warme Lötstelle auf 30°C , so ist eine theoretische Abkühlung der kalten Lötstelle auf -45°C möglich, d. h. nur noch eine maximale Temperaturdifferenz von 75°C .

Aus den abgeleiteten Gleichungen ist ersichtlich, dass die Kälteleistung eines Peltierkühlblockes stark von der erreichten maximalen Temperaturdifferenz abhängt. In Fig. 8 ist für verschiedene ΔT_{max} -Werte die Abhängigkeit der Kälteleistung von der maximalen Temperaturdifferenz bei einer Temperatur der warmen Lötstelle von $+40^\circ\text{C}$ aufgetragen. Bei Kälteleistung Null kann man an der Ordinate die maximale Temperaturdifferenz des verwendeten Blockes ablesen. Es ergibt sich hier-

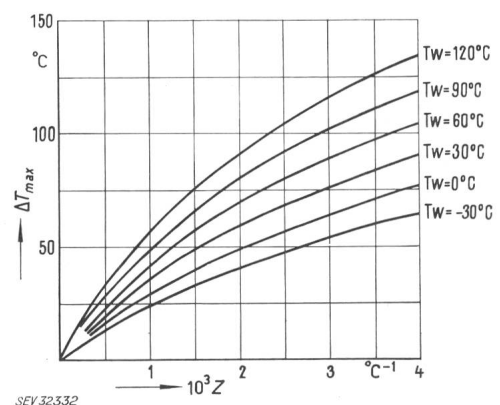


Fig. 7
Maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} in Abhängigkeit von der Effektivität Z
Temperatur der warmen Lötstellen T_w als Parameter

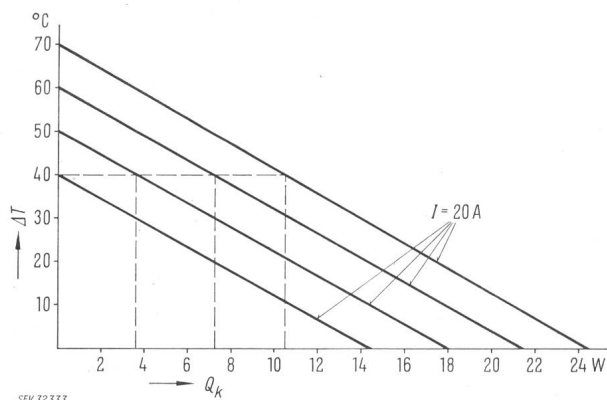


Fig. 8
Vergleichskurven der Kälteleistung Q_k von Kühlblöcken
Leistungsvergleich mit unterschiedlichen ΔT_{max} -Werten
 $I = 20 \text{ A}$, $T_w = +40^\circ \text{C}$

aus, dass für einen Block mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 70°C bei einer benützten Temperaturdifferenz von 40°C eine Kälteleistung von rund 10 W möglich ist, während bei einem Block mit niedriger Effektivität, d. h. niedrigem ΔT_{max} von 50°C nur noch eine Kälteleistung von rund 4 W erreichbar ist. Entscheidend ist also für die praktische Verwendbarkeit eines Kühlblockes eine möglichst hohe Temperaturdifferenz zwischen kalter und warmer Lötstelle bei der gewünschten Kälteleistung.

Errechnet man aus den thermoelektrischen Daten die maximale Temperaturdifferenz und vergleicht sie mit einem aus diesen Materialien hergestellten Peltierelement, so zeigt sich, dass es praktisch nicht möglich ist, die errechnete theoretische maximale Temperaturdifferenz zu erreichen. Der Grund ist in dem Kontaktwiderstand an den angelöteten Kupferbrücken zu suchen. Trägt man das Verhältnis des Kontaktwiderstandes zum Elementwiderstand auf gegen das Verhältnis der erreichten Temperaturdifferenz zur theoretischen maximalen Temperaturdifferenz, so zeigt sich, dass bereits bei einem Verhältnis von Kontaktwiderstand zu Elementwiderstand von 0,5 nur noch die Hälfte der errechneten maximalen Temperaturdifferenz erreicht wird (Fig. 9). Hieraus ergibt sich, dass der Kontaktwiderstand an den Elementschenkeln 5 % des Elementwiderstandes nicht überschreiten sollte.

Für die Kontaktierung von Peltierelementen stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Da sich Halbleiter nicht direkt löten lassen, ist insbesondere bei Telluriden das Aufbringen einer Zwischenschicht erforderlich. Auch hierfür sind mehrere Verfahren möglich. Das Aufdampfen lötfähiger Schichten im Hochvakuum bietet Schwierigkeiten, da die aufgedampften Schichten meist nicht fest genug haften, teilweise aber auch zu tief in die Halbleiter eindiffundieren.

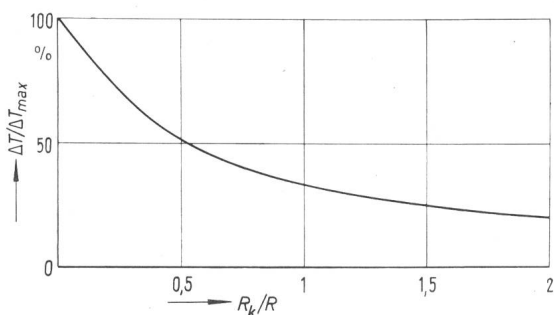


Fig. 9
Einfluss des Kontaktwiderstandes auf die erzielbare Temperatur-Differenz

Galvanische Verfahren sind ebenfalls untersucht worden, Schwierigkeiten bietet hierbei die Wahl eines Elektrolyten, der aus dem Halbleiter keine Komponenten herauslöst, sowie eine genügende Haftfestigkeit der aufgetragenen Schicht gewährleistet.

Ebenfalls untersucht worden sind Verfahren zur Aufbringung lötfähiger Schichten mit Hilfe eines Hochstrom-Lichtbogens, in den das auf den Halbleiter aufzubringende Material in Pulverform eingebracht und in geschmolzenem Zustand auf den Halbleiter aufgespritzt wurde.

Praktisch benützt werden heute in der Hauptsache Lötverfahren, bei denen die Zwischenschichten auf den Halbleiter teilweise mit Hilfe von Ultraschall aufgebracht werden, auf die man dann mit niedrig schmelzenden Loten die Kupferanschlüsse auflöten kann.

Da ein Peltierelement eine kleine Wärmepumpe darstellt, muss man mit Hilfe von Wärmeaustauschern an der kalten Lötstelle Wärme zuführen und an der warmen Lötstelle diese Wärmemenge zusätzlich der mehr verbrauchten elektrischen Leistung an die Umgebung mit Wärmeaustauschern abführen. Möglich sind für diesen Zweck Luftwärmeaustauscher, Flüssigkeitskühler sowie auch Verdampfungskühler.

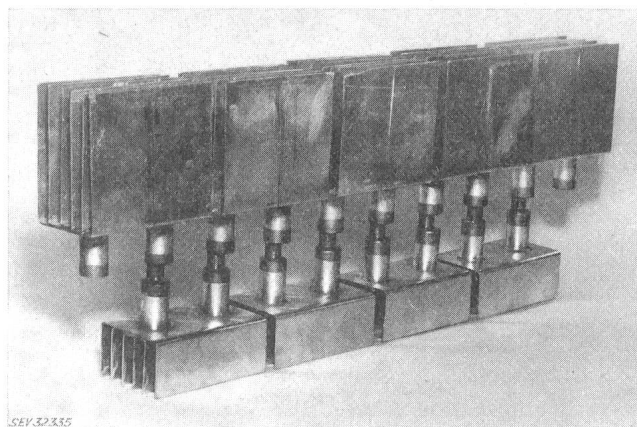


Fig. 10
Mäanderbauweise mehrerer Peltier-Elemente

Bei den ersten Versuchen einer praktischen Anwendung wurden die Halbleiter direkt an Rippenwärmeaustauscher angelötet und diese zu mäanderförmigen Elementen vereinigt (Fig. 10). Diese Anordnung hatte den Vorteil einer direkten Zufuhr bzw. Abfuhr der Wärme an den Halbleitern. Nachteilig war die etwas sperrige Bauweise, die den Halbleitern grosse mechanische Belastungen zumutete und leicht zum Bruch dieser Elemente führte. Auch von russischer Seite wurden ähnliche Konstruktionen verwendet. In der Folgezeit wurde diese Anordnung verlassen und man ging zu der sog. Blockbauweise über. Hierbei sind die meist zylindrischen Halbleiter in Mäanderform mit Kupferbrücken zu Leisten verlötet, die dann durch Querverbindungen zu einem Block (Fig. 11) vereinigt werden. Diese heute als Sirigor-Blöcke im Handel befindlichen Peltierkühlaggregate zeigt Fig. 12 in drei verschiedenen Ausführungen. Bei der Grundaussführung ist die Platte mit Kunstharz vergossen, wobei die kalten und warmen Lötstellen in Gestalt der aufgelöteten Kupferlaschen freiliegen. Ist bei der praktischen Benützung die Anwendung einer Wasserkühlung möglich, so werden diese Kühlblöcke mit einem oder zwei Kühlkästen, durch die Wasser hindurchgeleitet wird, aus-

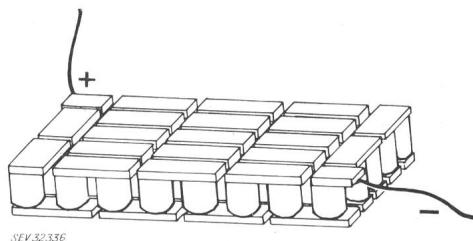


Fig. 11
Schematische Darstellung eines Peltierblocks

gestattet, wie aus der Figur zu ersehen ist. Ist Wasserkühlung nicht möglich, so kann man durch Zwischenfügung einer Isolierschicht einen metallischen Rippenkühler auf die Kühlplatte aufpressen und auf diese Weise den Wärmeaustausch mit der Umgebung bewirken. Man muss hierbei allerdings einen Temperatursprung in der Isolierschicht zwischen Kühlplatte und Wärmeaustauscher in Kauf nehmen. Verringern lässt sich dieser Temperatursprung, wenn man den Wärmeaustauscher als Nadelkühler ausbildet und diese Nadeln direkt auf die Kupferlaschen auflötet (Fig. 13).

Für die praktische Anwendung ist entscheidend die erreichte maximale Temperaturdifferenz bei Kälteleistung Null sowie die Kälteleistung des Blockes.

Die Bestimmung der maximalen Temperaturdifferenz bei Kälteleistung Null ist von vornherein mit einem geringen Fehler behaftet, da es praktisch niemals zu verhindern ist, dass bei der Messung den kalten Lötstellen Wärme zufließt. Die Messung der maximalen Temperaturdifferenz geschieht in folgender Weise:

Der Kühlblock wird auf einen Kupferkasten unter Zwischenlage einer Glimmerfolie gepresst, der Kupferkasten wird mit einer Flüssigkeit durchspült, die mit Hilfe eines Thermostaten auf einer Temperatur von 40°C gehalten wird. In Abhängigkeit von der Stromstärke wird dann die Temperatur der kalten Lötstellen gemessen. Die kalten Lötstellen werden dabei gegen die Umgebung mit einer Isolierhaube abgedeckt. Besser noch wird diese Messung im Hochvakuum durchgeführt.

In Fig. 14 ist die Temperatur der kalten Lötstellen in Abhängigkeit von der Stromstärke aufgetragen, wobei die Temperatur der warmen Lötstellen 40°C beträgt. Gleichzeitig ist aus diesen Kurven der Einfluss des Kunstharzes zu ersehen, mit dem die Platten aus Festigkeitsgründen vergossen werden. Bei vollständigem Vergiessen der Platten wird die Temperatur der kalten Lötstellen um einige Grade herabgesetzt. Praktisch

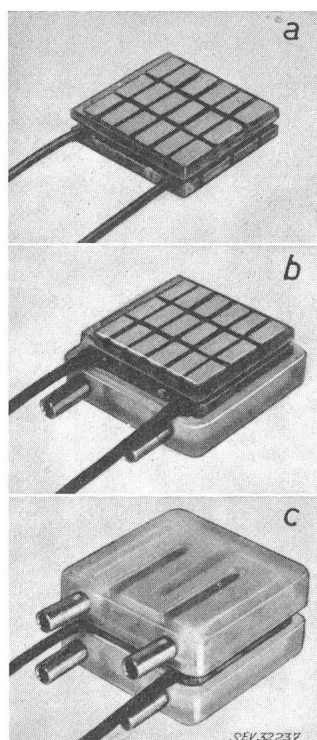


Fig. 12
Halbleiter-Kühlblöcke in Normalausführung
a Grundaussführung; b mit einem Flüssigkeits-Wärmeaustauscher
c mit zwei Flüssigkeits-Wärmeaustauschern

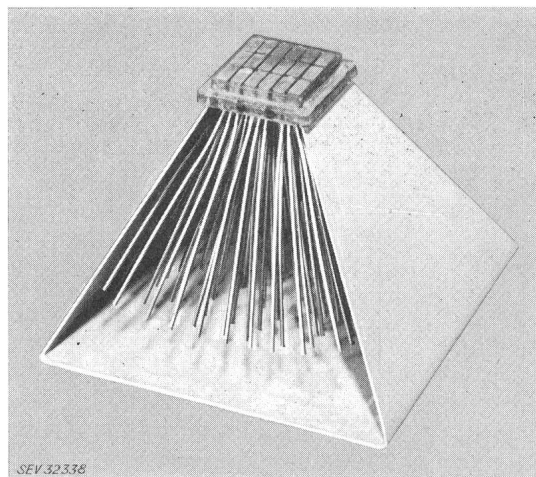


Fig. 13
Peltierblock mit aufgelöteten drahtförmigen Wärmeaustauschern

begnügt man sich daher heute damit, die Platten nur an den Kupferlaschen zu vergiessen.

Will man die Kälteleistung eines Kühlblockes ermitteln, kann man hierfür eine kalorimetrische Methode benutzen. Hierbei wird, wie aus der Fig. 15 schematisch ersichtlich, der Sirigor-Kühlblock auf beiden Seiten mit zwei Flüssigkeitsbehältern versehen. Diese besitzen Schlauchanschlüsse, so dass sie von einer Kühlflüssigkeit durchflossen werden können. Die Flüssigkeitsmenge wird durch zwei kleine Zähler bestimmt, die elektrische Leistung in bekannter Weise gemessen. Das ganze wird mit einem Isoliermantel versehen, um Wärmeverluste zu vermeiden. Durch Thermoelemente wird ferner die Eintritts- und Austrittstemperatur der Kühlflüssigkeiten ermittelt, so dass man hieraus die Wärmemengen errechnen kann. Man erhält auf diese Weise ein Nomogramm (Fig. 16), bei dem man die Kälteleistung in Watt in Abhängigkeit von der Temperatur der kalten und der warmen Lötstellen sowie der Stromstärke ablesen kann. Will man z. B. bei einer Stromstärke von 20 A eine Temperatur von -20°C erreichen, so ergibt sich für eine Kühlwassertemperatur von 20°C eine Kälteleistung von 5 W. Mit

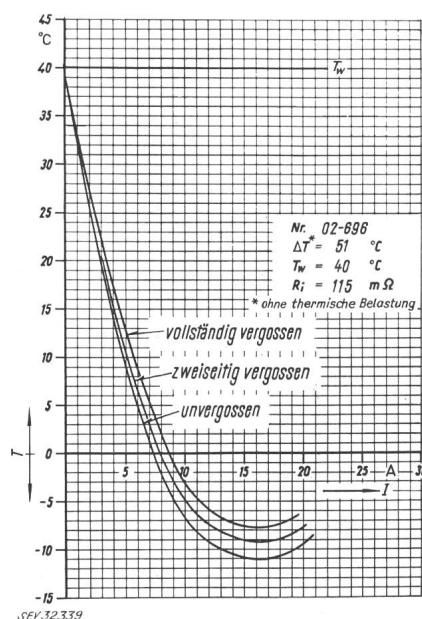


Fig. 14
Prüfkennlinie für Sirigor-Kühlblöcke
Einfluss der Vergussmasse auf ΔT

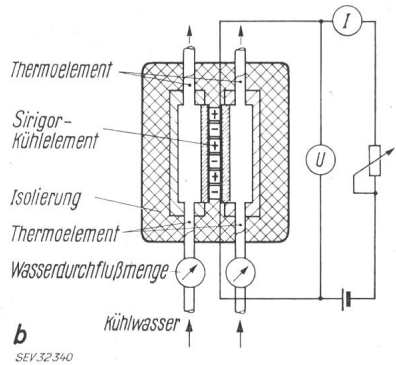
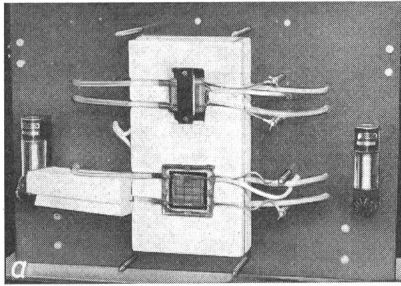


Fig. 15

Kalorimetrische Messeinrichtung zur Bestimmung der Kälteleistung von Kühlblöcken

Hilfe eines solchen Nomogrammes ist es möglich, für praktische Zwecke die erforderlichen Werte abzulesen.

Der Einbau eines Kühlblockes in eine kleine Kühlzelle ist schematisch in Fig. 17 dargestellt. Der Halbleiterkühlblock wird in die Isolierwand der Kühlzelle eingesetzt. Unter Einfügung einer Isolierschicht wird auf der kalten und auf der warmen Seite ein Wärmeaustauscher, in diesem Falle ein Rippenkühlkörper, angepresst. Da der Kühlblock als Wärmepumpe arbeitet, fördert er die aus der Umgebung durch die Isolierwand in die Kühlzelle eingedrungene Wärme wieder in die Umgebung zurück. Es ist auf diese Weise möglich, kleine Thermostaten und Kühlzellen für medizinische und chemische Zwecke zu bauen. Sie bieten den Vorteil, geräuschlos, geruchlos und lageunabhängig zu arbeiten.

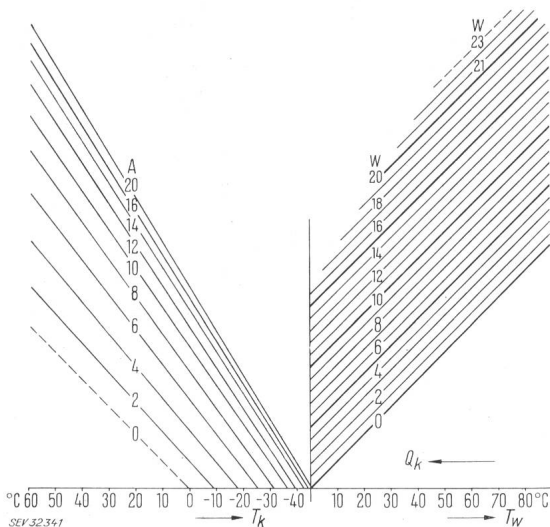


Fig. 16

Sirigor-Nomogramm

Bestimmung der Temperatur von kalten und warmen Lötstellen (T_k , T_w) der Kälteleistung Q_k und der Gleichstromstärke I
Elementtype PKE 18F02 60, elektrischer Widerstand R etwa $90 \text{ m}\Omega \pm 20 \%$
 $\Delta T = 60^\circ \text{C}$ bei $T_w = 40^\circ \text{C}$

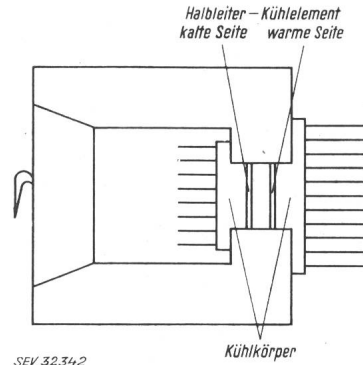


Fig. 17

Schema einer elektrothermischen Kühlzelle

Für Messzwecke werden häufig Thermostate benötigt, die z. B. Bauelemente oder die Aussenlötstellen von Thermoelementen auf einer definierten Temperatur halten. Für diesen Zweck lässt sich mit Hilfe eines Sirigor-Kühlblockes ein Kleinthermostat aufbauen. Bei diesem wird unter Zwischenfügung einer Isolierschicht auf der kalten Seite eine Platte mit Bohrungen aufgepresst, in welche die zu kühlenden Bauelemente eingeführt werden können. Die Platte wird dann durch eine Isolierkappe gegen Wärmeeinströmung aus der Umgebung abgedeckt. Die auf der warmen Seite entstehende Wärme wird mit Hilfe eines Rippenwärmeaustauschers abgeführt (Fig. 18).

Bei gedrängter Bauweise ist es manchmal schwierig, die für Transistoren und andere Bauelemente vorgeschriebene Temperatur einzuhalten. Hier bietet die Verwendung von Sirigor-Kühlblöcken eine bequeme Möglichkeit, eine Kühlung zu bewirken. Das Bauelement (Fig. 19) wird hierbei auf eine Metallplatte geschraubt, die unter Zwischenfügung einer Isolierschicht auf den Sirigor-Block aufgesetzt wird. Die an der warmen Seite des Blockes entstehende Wärme kann entweder an das Gehäuse oder an einen Wärmeaustauscher abgeführt werden.

Mit Hilfe einer Veränderung der Stromstärke ist es leicht möglich, die Temperatur auf der kalten Seite eines Sirigor-Blockes zu verändern. Diese Tatsache bietet eine bequeme Möglichkeit, ein Taupunktmessgerät zu bauen. Zu diesem Zweck wird ein wassergekühlter Block auf der kalten Seite unter Zwischenfügung einer Isolierschicht mit einem hochglanzpolierten Silberspiegel versehen. Sinkt die Temperatur

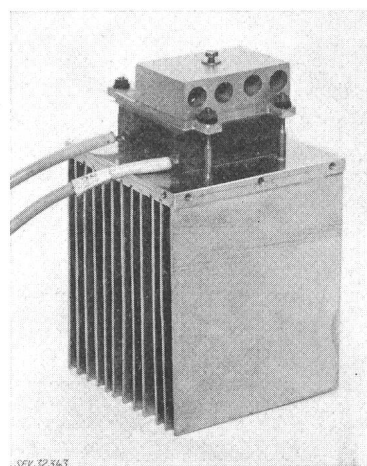


Fig. 18

Peltier-Kleinthermostat

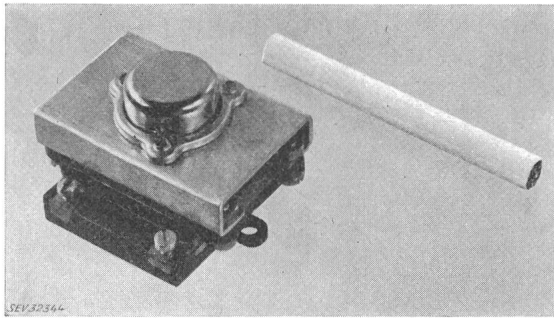


Fig. 19
Kühlblock mit Transistor

des Spiegels unter den Taupunkt, so beschlägt er und sein Reflexionsvermögen für sichtbares Licht wird herabgesetzt. Mit Hilfe einer Lichtquelle und einer Fotozelle ist es auf diese Weise möglich, einen Raum auf konstanter Luftfeuchtigkeit zu halten (Fig. 20).

Da ein Kühlblock wie eine Wärmepumpe arbeitet, kann man hiemit nicht nur kühlen, sondern auch Flüssigkeiten erwärmen. Schaltet man, wie Fig. 21 zeigt, mehrere mit Kühlkästen versehene Kühlblöcke in Serie, so kann man auf der

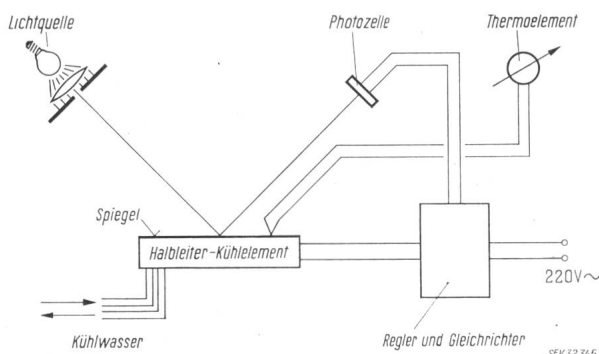


Fig. 20
Taupunktmessgerät mit Halbleiter-Kühlblock

warmen Seite eine durchlaufende Flüssigkeit erhitzen und in einem Speicher ansammeln. Auf der kalten Seite dieser Blöcke kann man eine Flüssigkeit im Gegenstrom abkühlen. Diese Kühlflüssigkeit wird den Kühlkästen von zwei weiteren Kühlblöcken zugeführt, die dort die Wärme aufnehmen, die diese Kühlblöcke aus einem Kühlraum abgeführt haben. Da bei der

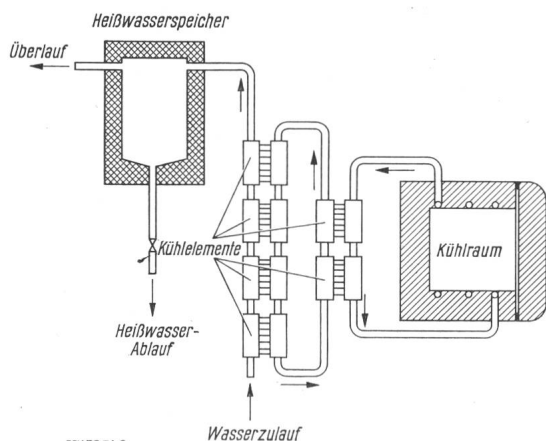


Fig. 21
Heißwasserbereitung und Kühlung mit Kühlblöcken

Wärmeerzeugung Kühlblöcke mit einer sehr hohen Leistungsziffer arbeiten, ist es hier möglich, einen Kühlprozess und eine Aufheizung von Flüssigkeiten in sehr rationeller Weise miteinander zu koppeln.

Für die praktische Anwendung ist, wie ausgeführt, die entscheidende Grösse die Effektivität Z . Je mehr es gelingt, diese zu steigern, desto eher wird es möglich sein, weitere Anwendungsgebiete zu erschliessen. Da in sehr vielen Laboratorien an der weiteren Vervollkommenung der thermoelektrischen Werkstoffe gearbeitet wird, ist zu hoffen, dass es auch in Zukunft gelingt, Fortschritte auf dem Gebiet der thermoelektrischen Halbleiter und damit ihrer technischen Anwendung zu erreichen.

Literatur

- [1] Peltier, J. C. A.: Nouvelles expériences sur la calorité des courants électriques. Ann. chim. phys. 56(1834), S. 371...386.
- [2] Seebeck, T. J.: Abh. Kgl. Wiss. Akad. Berlin (1822/23), S. 265.
- [3] Altenkirch, E.: Über den Nutzeffekt der Thermosäule. Phys. Z. 10(1909)16, S. 560...568.
- [4] Altenkirch, E.: Elektrothermische Kälteerzeugung und reversible elektrische Heizung. Phys. Z. 12(1911)21, S. 920...924.
- [5] Altenkirch, E.: Elektrothermische Kälteerzeugung und reversible elektrische Heizung. Z. ges. Kälte-Ind. 19(1912)1, S. 1...9.
- [6] Telkes, M.: The Efficiency of Thermoelectric Generators. J. appl. Phys. 18(1947)12, S. 1116...1127.
- [7] Justi, E. und G. Lautz: Über Störstellen- und Eigenhalbleitung intermetallischer Verbindungen. Z. Naturf. 7a(1952)2, S. 191...200; 9, S. 602...613.
- [8] Justi, E. und G. Lautz: Über die Halbleitereigenschaften intermetallischer Verbindungen. Abh. Braunschweig. wiss. Ges. 4(1952), S. 107...116.
- [9] Justi, E.: Elektrothermische Kühlung. Kältetechnik 5(1953)6, S. 150...157.
- [10] Goldsmid, H. J. und R. W. Douglas: The Use of Semi-Conductors in Thermoelectric Refrigeration. Brit. J. appl. Phys. 5(1954)11, S. 386...390.
- [11] Goldsmid, H. J.: Thermoelectric Applications of Semiconductors. J. Electronics 1(1955)2, S. 218...222.
- [12] Goldsmid, H. J.: On the Thermal and Electrical Conductivity of Semiconductors. Proc. Phys. Soc. Lond. -B 67(1954), S. 360...363 und S. 599.
- [13] Goldsmid, H. J.: The Thermal Conductivity of Bismuth Telluride. Proc. Phys. Soc. Lond.-B 69(1956)2, S. 203...209.
- [14] Joffe, A. F.: Halbleiterthermoelemente. Moskau-Leningrad: 1956.
- [15] Jordanischwili, J. und L. Ss. Stilbanss: Žurn. techn. Fiz. 26(1956), S. 482 und 945.
- [16] Joffe, A. F., L. Ss. Stilbanss, Je. K. Jordanischwili und T. Ss. Stawitzkaja: Elektrothermische Kühlung. Moskau-Leningrad: 1956.
- [17] Joffe, A. W. und A. F. Joffe: Žurn. techn. Fiz. 24(1954), S. 1910.
- [18] Joffe, A. W. und A. F. Joffe: Dokl. Acad. Nauk SSSR 98(1954), S. 757.
- [19] Wassenin, F. L.: Žurn. techn. Fiz. 25(1955), S. 397.
- [20] Wlassowa, R. M. und L. Ss. Stilbanss: Žurn. techn. Fiz. 25(1955), S. 569.
- [21] Wassenin, F. I. und P. F. Kononov: Žurn. techn. Fiz. 26(1956), S. 1406.
- [22] Kononov, P. P.: Žurn. techn. Fiz. 26(1956), S. 1400.
- [23] Abrikossow, N. Ch., W. F. Bankina und G. A. Fedorowa: Fragen der Halbleitermetallurgie und -physik. Moskau: 1957.
- [24] Ssinani, Ss., G. V. Kokosh und G. H. Gordjakowa: Žurn. techn. Fiz. 28(1958), S. 3.
- [25] Ssinani, Ss. und G. H. Gordjakowa: Žurn. techn. Fiz. 28(1958), S. 2398.
- [26] Joffe, A. F., L. Ss. Stilbanss, E. Jordanischwili und A. Fedorowitsch: Choolodilnaja Technika 53(1956), S. 5.
- [27] Jouse, W. P.: Žurn. techn. Fiz. 25(1955), S. 2079.
- [28] Airapetjan, S. W.: Žurn. techn. Fiz. 27(1957), S. 478.
- [29] Dewjatkowa, E. D.: Žurn. techn. Fiz. 27(1957), S. 461.
- [30] Birkholz, U.: Untersuchungen der intermetallischen Verbindung Bi_2Te_3 , sowie der festen Lösungen $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Se}_3$ hinsichtlich ihrer Eignung als Material für Halbleiter-Thermoelemente. Z. Naturf. 13a(1958)9, S. 780...792.
- [31] Wassenin, F. I.: Žurn. techn. Fiz. 25(1955), S. 1190.

- [32] Birkholz, U.: Diplomarbeit. Braunschweig 1956.
- [33] Halbleiter-Institut: Halbleiter in Wissenschaft und Technik. Moskau-Leningrad: 1958.
- [34] Justi, E.: Leitfähigkeit und Leitungsmechanismus fester Stoffe. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht 1948.
- [35] Kohler, M.: Das Verhalten der thermoelektrischen Effekte in tiefsten Temperaturen. Abh. Braunschweig. wiss. Ges. 2(1950), S. 49...54.
- [36] Justi, E. und G. Lautz: Referat Phys. Tag Heidelberg 1957.
- [37] Haken, W.: Ann. Phys. 32(1910), S. 291.
- [38] Körber, F. und U. Haschimoto: Z. anorg. Chemie 188(1930), S. 116.
- [39] Plank, R.: Elektrothermische Kälteerzeugung. Kältetechnik 10(1958)1, S. 2...10.
- [40] Ainsworth, L.: Single Crystal Bismuth Telluride. Proc. Phys. Soc. Lond.-B 69(1956)6, S. 606...612.
- [41] Wright, D. A.: Vortrag Halbleitertagung, Garmisch 1956.
- [42] Shilliday, T. S.: Performance of Composite Peltier Junctions of Bi_2Te_3 . J. appl. Phys. 28(1957)9, S. 1035...1042.
- [43] Satterthwaite, C. B. und R. W. Ure: Electrical and Thermal Properties of Bi_2Te_3 . Phys. Rev. 108(1957)5, S. 1164...1170.
- [44] Putley, E. H.: The Hall Coefficient Electrical Conductivity and Magneto-Resistance of Lead Sulphide, Selenide and Telluride. Proc. Phys. Soc. Lond. -B 68(1955)1, S. 22...34.
- [45] Putley, E. H.: Thermoelectric and Galvanomagnetic Effects in Lead Selenide and Telluride. Proc. Phys. Soc. Lond. -B 68(1955)1, S. 35...42.
- [46] Forsberg, N.: Kylteknisk Tidskrift 11(1952), S. 53.
- [47] Harman, T. C.: Special Techniques for Measurement of Thermoelectric Properties. J. appl. Phys. 29(1958)9, S. 1373...1374.
- [48] Fleischmann, H., H. Guy und J. Rupprecht: Untersuchungen an IV III-I V VI₂-Mischkristallen. Z. Naturf. 18(1963); [erscheint demnächst *].
- [49] Hänlein, W.: Die technologischen Probleme bei der Anwendung des Peltiereffektes. Kältetechnik 12(1960)5, S. 137...144.
- [50] Hänlein, W.: Neuartige Halbleiter-Kühlelemente. Siemens-Z. 35(1961)4, S. 264...265.
- [51] Hänlein, W.: Technische Anwendungsmöglichkeiten des Peltiereffektes. Kältetechnik 14(1962)3, S. 81...85.
- [52] Schreiner, H. und F. Wendler: Die Theorien der Sinterung im Hinblick auf Effekte bei der pulvermetallurgischen Herstellung thermoelektrischer Werkstoffe. I, II. Z. Metallkde. 52(1961)4, S. 218...223; S. 224...228.
- [53] Schreiner, H.: Pulvermetallurgische, thermoelektrische Werkstoffe. Österr. Chem.-Z. 63(1962)2.
- [54] Schreiner, H. und F. Wendler: Inversion der Thermokraft bei gesinterten thermoelektrischen Werkstoffen. Metall 16(1962)5, S. 399...402; 9, S. 855...858.

Adresse des Autors:

Dr. W. Hänlein, Laboratorium der Zentralwerkverwaltung der Siemens-Schuckertwerke AG, Nürnberg (Deutschland).

Bericht über Abschalt- und Regeluntersuchungen der Schweiz im westeuropäischen Verbundnetz

Von H. Luder, A. Pfander, Laufenburg, und H. Bloch, W. Frey, Baden

621.311.161.072.8 (4)

Die Berechnung der für den Verbundbetrieb massgebenden Netzkenngrossen ist infolge der vermaschten Netze kompliziert und führt nur teilweise auf die wirklichen Werte. Im Oktober 1961 wurden in der Schweiz Versuche zur empirischen Ermittlung dieser Werte vorgenommen. Die Messungen wurden im Höchstspannungsnetz 220 kV durchgeführt und zwar innerhalb des schweizerischen Netzes, im Verbundnetz Deutschland-Frankreich-Schweiz und zwischen ad hoc gebildeten Netzgruppen. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss grosser Laständerungen auf die Netzfrequenz und die verabredeten Übergabeleistungen. Weiter wurde die Wirkung der Netzregler auf solche Netzschwankungen im Normalbetrieb aufgenommen.

1. Einleitung

Der Verbundbetrieb der Schweiz mit dem westeuropäischen Netz wurde in verschiedenen Etappen erreicht. Vor einigen Jahren musste noch aus betrieblichen Gründen das schweizerische Hochspannungsnetz in zwei oder mehrere Regionen aufgeteilt werden, damit überhaupt ein Energieaustausch mit dem Ausland möglich war. Um den Energieaustausch sowohl mit Frankreich als auch mit Deutschland gleichzeitig tätigen zu können, kamen die betreffenden Gesellschaften überein, im Norden der Schweiz ihre Netze sternförmig zusammenzuschalten. Im Laufe der Zeit wurde das schweizerische Hochspannungsnetz im Südwesten nochmals mit Frankreich verbunden, parallel zu der bereits im Norden bestehenden Verbindungsleitung über Laufenburg nach Kembs. Später wurden auch die grenzüberschreitenden Leitungen Richtung Italien zum Parallelbetrieb herangezogen.

Um das betriebliche Verhalten der Regelung im Verbundbetrieb kennen zu lernen, wurden erstmals im Jahre 1957 durch die Arbeitsgruppe für Betriebsfragen der UCPTE (Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité) Versuche anberaumt zur Ermittlung der Leistungszahl der am Energieaustausch beteiligten Netze.

Auf Initiative der Autoren wurden im Oktober 1961 im Rahmen des westeuropäischen Verbundbetriebes verschiedene weitere Versuchsreihen durchgeführt.

Du fait que les réseaux sont maillés, le calcul des caractéristiques des réseaux interconnectés est compliqué et n'aboutit que partiellement à des valeurs réelles. En Suisse, des essais ont été entrepris en octobre 1961 afin de déterminer empiriquement ces valeurs. Les mesures ont eu lieu dans le réseau suisse, dans le réseau interconnecté Allemagne-France-Suisse, ainsi qu'entre des groupes de réseaux constitués dans ce but. Les résultats montrent l'influence des grandes variations de charge sur la fréquence des réseaux et sur les puissances échangées aux points d'interconnexion. On a en outre enregistré l'action des régulateurs de réseaux sous l'influence de telles fluctuations en régime normal.

In den nachfolgenden Aufzeichnungen wird nun über diese Versuche (16. bis 20. Oktober 1961) berichtet.

2. Regelprinzip und Messorgane

Die Einregelung der Übergabeleistung erfolgte, indem jeder Partner die Summe der mit den beiden andern Partnern verabredeten Energieaustauschprogramme einhielt (Fig. 1).

a) Die EdF (Electricité de France) regelte ihre Übergabeleistung für die Schweiz und Deutschland nach dem FrequenzLeistungsverfahren im Punkt Kembs Richtung Laufenburg.

b) Das RWE (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk) re-

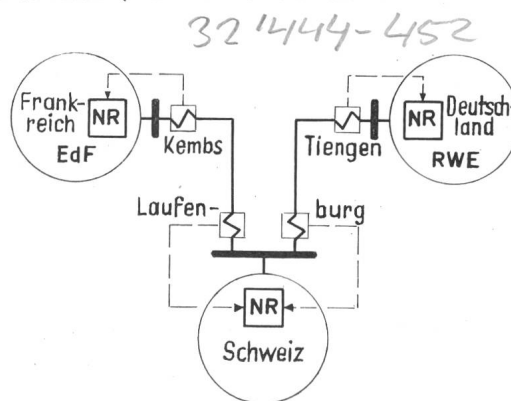


Fig. 1

Regelprinzip im Verbundbetrieb Frankreich-Deutschland-Schweiz