Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 25

Artikel: Thermoelektrische Kühlung

Autor: Müller, H. / Rupprecht, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916433

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: 10.07.2025

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

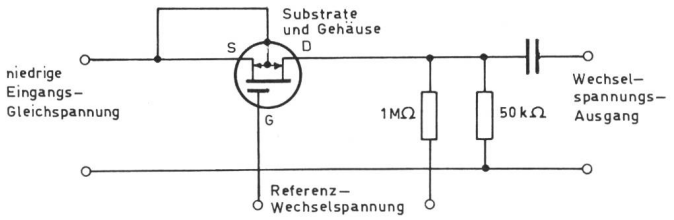


Fig. 16
Reihen-chopper-Kreis mit einem insulated gate-FET
(Datenblatt RCA)

storen ist die Konstruktion meistens schwieriger durchführbar. Besonders für integrated circuits vom monolithischen Typ können FET in einfacher Weise mittels Masken- und Aufdampfverfahren erzeugt werden.

5. Anwendungen

Da ein FET ein Dreielektroden-Bauelement ist, kann er auf drei verschiedene Arten in einen Vierpol eingebaut werden, je nachdem eine der Elektroden *S*, *G* oder *D* als gemeinsame Elektrode des Ein- und Ausganges dient (Fig. 12).

Wie bereits erwähnt, können die FET fast unmittelbar Trioden und Pentoden in elektronischen Schaltungen ersetzen. Als erstes Beispiel sei ein Anfangsstufenverstärker für den

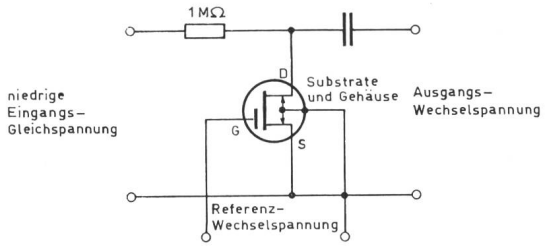
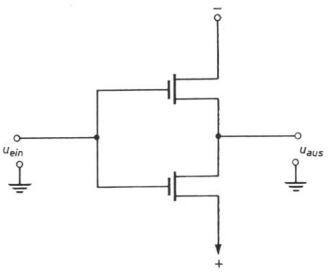


Fig. 17
Parallel-chopper-Kreis mit einem insulated gate-FET
(Datenblatt RCA)

akustischen Frequenzbereich erwähnt (Fig. 13). Einen abgestimmten Hochfrequenz-Anfangsstufenverstärker zeigt Fig.14. Auch in Fig. 15 ist ein Hochfrequenz-Anfangsstufenverstärker gezeigt, aber diesmal in Cascode-Schaltung. Zwei chopper-Kreise zeigen Fig. 16 und Fig. 17 (die Fig. 13...17 wurden einem RCA Datenblatt entnommen). Schliesslich zeigt Fig.18 einen bistabilen Kreis, der keinen Strom verbraucht, ausser wenn geschaltet wird.

Fig. 18
Bistabiler Kreis mit zwei insulated gate-FET, der nur dann Strom verbraucht, wenn geschaltet wird [3]



In integrated circuits vom monolithischen Typ werden heute fast ausschliesslich FET verwendet, weil sie sich beim Fabrikationsprozess in einfacher Weise in die Schaltungen einfügen lassen.

Literatur

[1] *W. Shockley:* A Unipolar Field-Effect Transistor. Proc. IRE 40(1952)11, S. 1365...1376.

[2] *G. C. Dacey* and *I. M. Ross:* The Field Effect Transistor. Bell Syst. techn. J. 34(1955)6, S. 1149...1189.

[3] *J. T. Wallmark:* The Field-Effect Transistor — an old Device with new Promise. IEEE Spectrum 1(1964)3, S. 182...191.

[4] *P. K. Weimer:* The TFT — A new Thin-Film Transistor. Proc. IRE 50(1962)6, S. 1462...1469.

[5] *G. C. Onodera, W. J. Corrigan* and *R. M. Warner:* Silicon Field-Effect Transistor with Internal Epitaxial Channel. Proc. IRE 50(1962)8, S. 1824.

[6] *H. Borkan* and *P. K. Weimer:* An Analysis of the Characteristics of Insulated-Gate Thin-Film Transistors. RCA Rev. 24(1963)2, S. 153...165.

[7] *S. R. Hofstein* and *F. P. Heiman:* The Silicon Insulated-Gate Field-Effect Transistor. Proc. IEEE 51(1963)9, S. 1190...1202.

[8] *W. Guggenbühl, M. J. O. Strutt* und *W. Wunderlin:* Halbleiterbauelemente. Bd. I: Halbleiter und Halbleiterdioden. Birkhäuser Basel 1962.

[9] *R. S. C. Cobbold* and *F. N. Trofimenkoff:* Theory and Application of the Field-Effect Transistor. Part I: Theory and d. c. Characteristics. Proc. IEE 111(1964)12, S. 1981...1992.

[10] *F. N. Trofimenkoff, R. D. Silverthorn* and *R. S. C. Cobbold:* Theory and Application of the Field-Effect Transistor. Part 2: High-Frequency Properties. Proc. IEE 112(1965)4, S. 681...688.

[11] *R. R. Bockemuehl:* Analysis of Field-Effect Transistors with Arbitrary Charge Distribution. Trans. IEEE Electron Devices ED-10(1963)1, S. 31...34.

[12] *D. R. Olsen:* Equivalent Circuit for a Field-Effect Transistor. Proc. IEEE 51(1963)1, S. 254.

[13] *A. Van der Ziel:* Thermal Noise in Field-Effect Transistors. Proc. IRE 50(1962)8, S. 1808...1812.

[14] *A. Van der Ziel:* Gate Noise in Field-Effect Transistors at Moderately High Frequencies. Proc. IEEE 51(1963)3, S. 461...467.

[15] *A. Van der Ziel:* Carrier Density Fluctuation Noise in Field Effect Transistors. Proc. IEEE 51(1963)11, S. 1670.

[16] *C. T. Sah:* Theory of Low-Frequency Generation Noise in Junction-Gate Field Effect Transistors. Proc. IEEE 52(1964)7, S. 795...814.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn., Dr.-Ing. h. c., Prof. *M. J. O. Strutt,* Vorstand des Institutes für höhere Elektrotechnik der ETH, Gloriastrasse 35, 8006 Zürich.

Thermoelektrische Kühlung

Von *H. Müller* und *J. Rupprecht,* Erlangen

537.322.15

Es wird über den Entwicklungsstand geeigneter Halbleitermaterialien für die technische Nutzung des Peltiereffektes, den Aufbau und die Anwendung von Aggregaten berichtet. Die derzeit günstigsten Halbleiter sind Mischkristalle der Telluride und Selenide des Wismut und Antimon. Die Aufbereitung erfolgt entweder nach pulvermetallurgischen oder dem Normal-Freezing-Verfahren. Die Anwendung plattenförmiger Aggregate wird am Beispiel eines Thermofaches für den wahlweisen Kühl- oder Wärmebetrieb sowie für die Bauelementekühlung bei tiefen Temperaturen mittels Peltierkaskaden beschrieben.

Les auteurs relatent où en sont le développement des semiconducteurs convenant pour l'utilisation technique de l'effet Peltier, ainsi que la fabrication et l'emploi des piles thermo-électriques. Les semi-conducteurs les plus appropriés sont actuellement des cristaux mixtes de tellurures et séléniures de bismuth et d'antimoine. On les obtient soit par le procédé pulvéro-métallurgique, soit par «normal-freezing». Comme exemple d'application des piles plates, l'article décrit leur emploi pour réaliser une loge thermique pouvant servir, à volonté, à chauffer ou à refroidir, ainsi qu'à réfrigérer des éléments de construction au moyen de cascades Peltier, jusqu'à de basses températures.

1. Einleitung

Die Theorie der thermoelektrischen Kühlung, basierend auf dem Peltiereffekt, sowie die Bemessung von Peltieraggregaten wurde in den letzten Jahren ausführlich in der Fachliteratur behandelt [1; 2; 3][1]). Im vorliegenden Beitrag wer-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

34'257-267

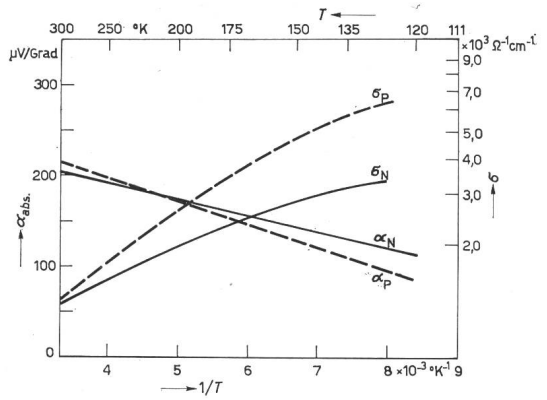


Fig. 1
Absolute Thermokraft $\alpha_{abs.}$ und elektrische Leitfähigkeit σ P- und N-leitenden Materials
T absolute Temperatur

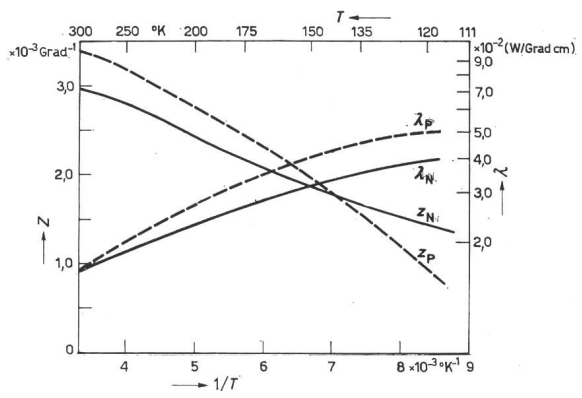


Fig. 2
Wärmeleitfähigkeit λ und thermoelektrische Effektivität Z P- und N-leitenden Materials
T absolute Temperatur

den diese Gesichtspunkte daher nur kurz angedeutet. Näher soll dagegen auf den Stand der Material- und Aggregatherstellung eingegangen werden, wobei abschliessend spezielle Anwendungen diskutiert werden.

2. Halbleiterwerkstoffe

Eine technische Nutzung des Peltiereffektes wurde erst durch die Entwicklung geeigneter Halbleiter möglich, deren Ladungsträgerkonzentration im Bereich von $10^{19}...10^{20}$ Trägern pro cm^3 liegt. Man vermeidet so die ungünstige Kopplung von thermischer und elektrischer Leitfähigkeit nach *Wiedemann — Franz — Lorenz*, wie sie bei Metallen vorliegt, und entgeht anderseits der allzu niedrigen Ladungsträgerdichte von Isolatoren. Damit die thermoelektrische Effektivität

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{K} \qquad (1)$$

gross wird, sollten phänomenologisch gesehen die absolute Thermokraft α und die elektrische Leitfähigkeit σ gleichfalls hoch sein, die Wärmeleitfähigkeit K aber sollte einen möglichst niedrigen Wert annehmen. Bei genauer Betrachtung der Halbleitergesetzmässigkeiten findet man die Effektivität

$$Z = \frac{m^{3/2}\,\mu}{K_g} \qquad (2)$$

Eine hohe Effektivität ist demnach mit einem grösseren Produkt aus effektiver Masse m und Beweglichkeit μ, sowie einer kleinen Gitterleitfähigkeit K_g verbunden.

Diese Forderungen sind bei gewissen Halbleitern in hohem Masse erfüllt. Es handelt sich vorzugsweise um fast entartete N- oder P-leitende Mischkristalle der Telluride und Selenide des Wismut und Antimon. Umfassendere Auswahlregeln, die zur Auffindung derartiger Substanzen führen, seien hier nicht diskutiert [4].

Als N-leitende Materialien verwendet man Legierungen des Systems Bi_2Te_3-Bi_2Se_3, deren Elektronenleitung mit Hilfe der Halogene (ausser Fluor) oder von Silber- und Kupferhalogeniden eingestellt ist. Bei Zimmertemperatur dürfte die aus 90 Mol-% Bi_2Te_3 und 10 Mol-% Bi_2Se_3 (Bromdotierung) bestehende Legierung die höchste Effektivität besitzen. Ihre thermoelektrischen Eigenschaften sind für technische Anwendungen besonders günstig. Den Fig. 1 und 2 ist die Temperaturabhängigkeit dieser Daten zu entnehmen. Tiefe Temperaturen vermindern Effektivität und Thermokraft, hingegen erhöhen sie die elektrische Leitfähigkeit. Auch die Wärmeleitfähigkeit K, die sich additivaus einem Gitter- (K_g-) und elektronischen (K_{el}) Anteil zusammensetzt:

$$K = K_g + K_{el}$$

wächst bei tieferen Temperaturen an. Als Ursache dieser Erscheinungen ist die verminderte Streuung der Elektronen durch das Gitter anzusehen. Bei 20,3 °C beträgt die Gitterwärmeleitfähigkeit $1{,}09 \cdot 10^{-2}$ W/cm · Grad. Vorausgesetzt sind thermische Gitterstreuung und Nichtentartung. Das geringfügig tiefere Minimum der Gitterwärmeleitfähigkeit ist der Legierung mit 20 Mol-% Bi_2Se_3-Anteil zugeordnet. Verschiebt man das Maximum der Effektivität zu höheren Temperaturen, indem man den Bi_2Se_3-Gehalt oder die Dotierung heraufsetzt, ist immer eine Abnahme der maximalen Effektivität die Folge.

Höchste Effektivität P-leitender Materialien ist im System Bi_2Te_3-Sb_2Te_3 zu realisieren. Ein besonders günstiger Zusammensetzungsbereich erstreckt sich von 70...80 Mol-% Sb_2Te_3. Die Fig. 1 und 2 enthalten die thermoelektrischen Eigenschaften einer in Tellur überstöchiometrischen mit Selen dotierten Legierung (75 Mol-% Sb_2Te_3-25 Mol-% Bi_2Se_3). Nimmt man wiederum thermische Gitterstreuung und Nichtentartung bei Raumtemperatur (21 °C) an, dann ergibt sich eine Gitterwärmeleitfähigkeit $K_g = 1{,}06 \cdot 10^{-2}$ W/cm · Grad. Zwischen Sb_2Te_3-Konzentrationen von 60...80 Mol-% dürfte das minimale K_g liegen. Überstöchiometrische Zugaben von Tellur und Zusätze von Selen vermindern in diesem System die elektrische Leitfähigkeit und erhöhen die Thermokraft. Aus Fig. 2 ist die mit fallender Temperatur stärkere Abnahme der Effektivität des P-leitenden Typs als diejenige des N-leitenden zu entnehmen. Zusätzliche Elektronenstreuung an ionisierten Zentren (Brom) dürfte die Ursache sein, während die Streuung der Löcher nur von Gitterschwingungen bestimmt wird.

3. Herstellung der Materialien

Da die Materialien in polykristalliner Form verwendet werden, können zur Herstellung grundsätzlich die pulvermetallurgischen Verfahren der Sintertechnik Anwendung finden. Zweckmässigerweise ist in den folgenden Schritten vorzugehen:

Man stellt in einem evakuierten Quarzgefäss eine homogene Vorlegierung her, die man anschliessend pulverisiert, presst und sintert. Besonders ist auf geeignete Korngrösse, optimalen

Pressdruck und günstige Sintertemperatur zu achten. Warmpressen und Sintern unter Schutzgas oder Vakuum haben sich bewährt. Da Kristallgrösse und -orientierung der anisotropen Bi_2Te_3-Legierungen ausserordentlichen Einfluss auf die thermoelektrische Qualität haben, erhält man die besten Ergebnisse mit möglichst grossen, vollständig achsial orientierten Kristallen, wie sie mit Verfahren des gerichteten Erstarrens der Schmelze (Normal-Freezing) zu erhalten sind. Bei der Durchführung des Absenkverfahrens geht man stets von einer homogenen Vorlegierung der Komponenten aus, deren Reinheit zwischen 99,99 und 99,999 % festzulegen ist. In einem evakuierten Quarzrohr gewünschter Weite wird dieses Material dann aufgeschmolzen und vertikal in eine Zone niedriger Temperatur abgesenkt, so dass es über einen steilen Temperaturgradienten erstarrt. Da die Phasengleichgewichte der Komponenten derartig beschaffen sind, dass zwischen Liquidus- und Soliduskurve Mischkristalle und Schmelze gemeinsam existieren, tritt eine gewisse Entmischung durch partielle Kristallisation ein [5]. Die Absenkgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass bei «begrenzter Mischung», d.h. unvollständigem Konzentrationsausgleich in der Schmelze durch Konvektion und Diffusion, ein nicht übermässig grosser Zusammensetzungsgradient resultiert. Kristallitgrösse und Orientierung der Kristallite sind gleichfalls von der Absenkgeschwindigkeit und dem Temperaturgradienten abhängig. Grosse, thermoelektrisch günstige Kristalle erhält man bei kleiner Absenkgeschwindigkeit. Da dann aber eine Entmischung zu erwarten ist, muss man sich mit einem Kompromiss begnügen, den eine Absenkgeschwindigkeit der Grössenordnung einiger mm/h darstellen dürfte. Um einen optimalen Orientierungsgrad in Richtung der Stabachse zu erreichen, ist hiebei der Temperaturgradient so einzustellen, dass der erstarrte Halbleiterstab in die Schmelze konvex hineinragt.

Wie stark auch der Erstarrungsquerschnitt die thermoelektrische Güte der Halbleiter berührt, ist in Fig. 3 wiedergegeben. Die konstruktive Effektivität Z', die der Effektivität Z proportional ist, durchläuft bei sonst konstanten Verhältnissen über dem Absenkdurchmesser D ein Maximum. Es ist demnach nicht besonders vorteilhaft, extrem dünne oder dicke Halbleiterstäbe unter den gewählten Bedingungen zu erzeugen.

4. Kühlaggregate

Als Grundbauelement der Peltiertechnik hat sich ganz überwiegend das plattenförmige Aggregat mit elektrischer Reihenschaltung abwechselnd P- und N-leitender Schenkel durchgesetzt. Diese Halbleiterschenkel werden — sieht man von der Sintertechnik ab — entweder unmittelbar mit dem gewählten Durchmesser im Normal-Freezing-Prozess erzeugt oder aus Stäben grösseren Querschnittes mit Hilfe von Schneidverfahren erhalten.

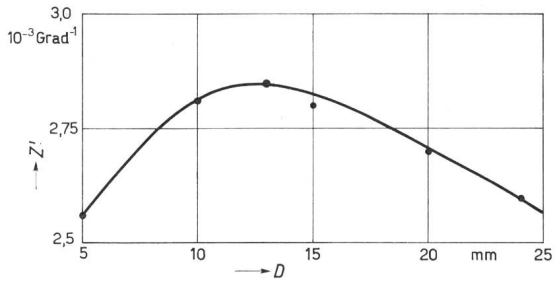


Fig. 3
Konstruktionseffektivität Z' in Abhängigkeit vom Absenkungdurchmesser D

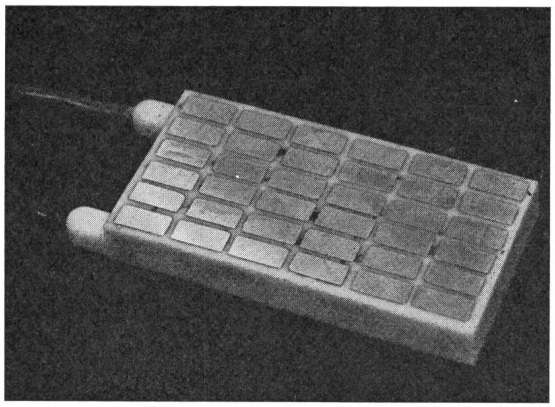


Fig. 4
Kunststoffvergossener Kühlblock

Ausserordentliche Bedeutung für die Funktion des Kühlblocks hat der Übergang Halbleiter-Metallbrücke. Diese Zone muss die Bedingung verschwindenden elektrischen und thermischen Widerstandes erfüllen. Ausserdem soll sie gegen Temperaturwechselbeanspruchungen beständig sowie in gewissem Mass druck- und zugfest sein. Damit die Halbleitereigenschaften sich nicht in ungünstigem Sinne ändern, ist des weiteren darauf zu achten, dass während des Kontaktierungsvorganges und später eine möglichst geringe Diffusion des Kontaktmaterials in die Schenkel stattfindet.

Wie gravierend die Frage des Kontaktwiderstandes ist, geht daraus hervor, dass bei dem Kontaktwiderstand R_c einer Lötstelle die maximal erreichbare Temperaturdifferenz nur noch

$$\Delta T'_{max} = \frac{\Delta T_{max}}{1 + 4\,(R_c/R_i)} \tag{3}$$

im Gegensatz zu ΔT_{max} beim Kontaktwiderstand Null beträgt.

Zwischenschichten aus Nickel, Kobalt oder Wismut haben sich zum Verhindern der Diffusion und zum Verbessern der Haftfestigkeit des Lotes bewährt. Das Lot legiert man dann (gegebenenfalls im Ultraschallfeld) auf und verbindet die Halbleiterschenkel mit metallischen Brücken. Man kann die Verbindungsbrücken aber auch direkt galvanisch oder im Flammsprühverfahren aufbringen. In allen Fällen erhält man ein Bauelement, dessen warme und kalte Kontaktstellen bei Stromfluss thermisch jeweils parallel liegen. Fig. 4 zeigt einen solchen kunststoffvergossenen Kühlblock. Dieser besteht aus 36 Schenkeln, deren Einzelfläche 3,2 · 3,2 mm² und deren Länge 5 mm beträgt. Mit einer derartigen Einheit ist eine maximale Temperaturdifferenz von 65 °C zu erreichen, wenn man die Temperatur der warmen Seite konstant auf + 40 °C hält und der kalten Seite keine Wärme zuführt. Die maximal erreichbare Temperaturdifferenz ist, wie bereits bemerkt, ein wichtiges Kriterium für die thermoelektrische Qualität der Kühleinheit. Man kann daraus mit Hilfe der Beziehung:

$$\Delta T_{max} = \frac{Z^*}{2}\, T_K^2 \tag{4}$$

eine «Blockeffektivität» Z^* ableiten, die sich im genannten Beispiel auf $2{,}12 \cdot 10^{-3}$ Grad^{-1} beläuft. Eine zweite charakteristische Grösse stellt die maximale Kälteleistung dar. Sie liegt hier bei 22 W und wird mit dem Strom 8 A bei der Temperaturdifferenz Null erreicht. In der Regel scheidet dieser Betriebszustand für die Kühlanwendung aus. In diesem Zusammenhang dürfte die bei einer mittleren Temperaturdifferenz von

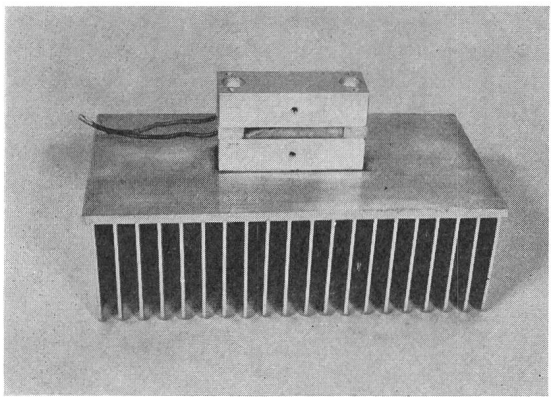


Fig. 5
Kühlblock mit warm-kalt-Verspannung

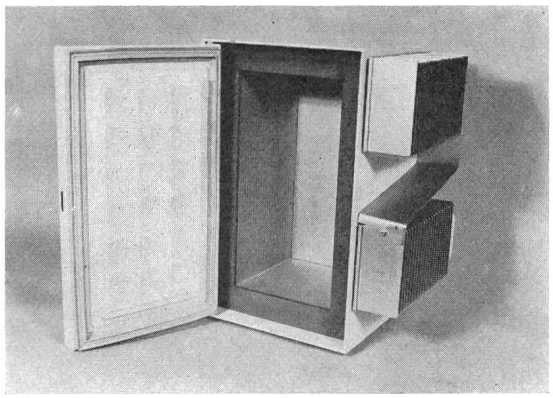


Fig. 6
Thermofach für Kühl- und Wärmebetrieb
(6/63 °C)

30 Grad verfügbare Kälteleistung interessant sein, die mit 12 W bei 40 °C Warmseitentemperatur und 8 A Betriebsstrom anzusetzen ist.

Die Aufnahme der nutzbaren Peltierwärme an der kalten und ihre Abgabe — vermehrt um die Verlustleistung — an der warmen Seite geschieht über Wärmeübertrager, die als Luft-, Flüssigkeits- oder Verdampfungswärmetauscher ausgebildet sein können. Keinesfalls aber darf der Wärmetauscher die stromführenden Brücken elektrisch kurzschliessen. Deshalb sind Zwischenschichten einzufügen, die Brücken und Wärmeübertrager elektrisch trennen.

Der thermische Widerstand dieser Schichten muss äusserst niedrig sein, da jeder Temperaturabfall an diesen Stellen sich störend auf die Funktion des Aggregates auswirkt. Als technische Lösung dieses Problems haben sich Kleb- und Druckverbindungen eingeführt. Allerdings erfordert die Einstellung der minimalen Schichtdicke im ersteren Fall besondere Aufmerksamkeit, auch ist die Temperaturwechselfestigkeit nicht hoch. Als Zwischenschicht der Druckverbindung dient eine dünne Glimmer- oder Kunststoffolie. Thermisch bedingte Längenänderungen von Kühlblock und Wärmetauscher können sich durch Gleiten der Flächen ausgleichen. Das hat eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit zur Folge (> 100 000 Wechsel). Bei der konstruktiven Durchbildung der Druckverbindung ist dafür zu sorgen, dass die thermisch parallel zum Block geschalteten Spannelemente (Schrauben) einen hohen Wärmewiderstand haben.

Zu einer völlig anderen Blockbauweise gelangt man, wenn man die Zwischenschicht als massive, dünne Keramikplatte ausbildet. Sie ist dann gewissermassen das tragende Element, auf welches Metallschichten als Brücken aufgebracht sind. Diese werden auf konventionelle Art mit den Halbleitern verbunden. Äussere Metallisierung der Keramikplatten erlaubt nun eine unmittelbare Lötverbindung mit den Wärmetauschern. Man erhält so ein sehr kompaktes Aggregat. Bei Verwendung hoch wärmeleitfähiger, dünner Keramikplatten können die Temperatursprünge in diesen Schichten auch bei hohen Wärmestromdichten sehr klein gehalten werden.

5. Anwendungen

Beim Zusammenbau eines kunststoffvergossenen Kühlblockes mit den zugehörigen Wärmetauschern ist bei Verwendung der Druckverbindung auf einen möglichst geringen thermischen Parallelwiderstand zu achten. Der thermische Parallelwiderstand bei einer Druckverbindung ist nur dann praktisch Null, wenn zwei Blöcke über ihre Warmseiten mit in der Mitte liegendem z. B. wasserdurchflossenem Wärmetauscher verspannt werden. Hiebei liegt zwischen den Enden der Spannelemente keine Temperaturdifferenz. Bei der in der Praxis jedoch meist verwendeten Verspannung der Warm- mit der Kaltseite des Blockes sind Verluste von ca. 10 % zu berücksichtigen. Für die bei den Anwendungen diskutierten Beispiele wurde ein verspanntes Aggregat mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 60 °C zu Grunde gelegt ($T_w = 40$ °C). Die zugehörigen Werte für die Blockeffektivität als Funktion der Kaltstellentemperatur sind in Tabelle I wieder-gegeben.

Fig. 5 zeigt als Beispiel für einen warm-kalt verspannten Block ein Aggregat, bei welchem auf der warmen Seite die Wärmeabfuhr durch einen Rippenwärmetauscher mit Lufteigenkonvektion erfolgt. Zwei dieser Aggregate sind in dem Ther-

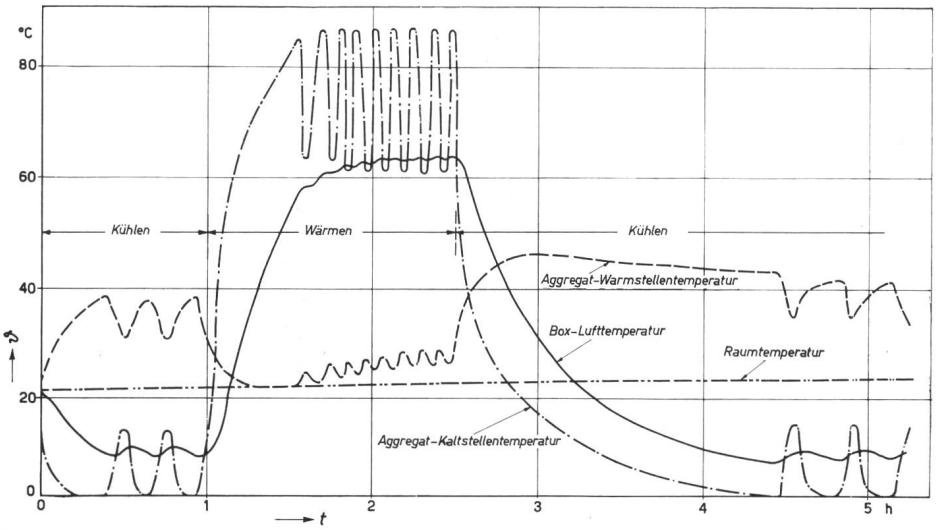


Fig. 7
Temperaturverlauf im Thermofach
ϑ Temperatur; t Zeit

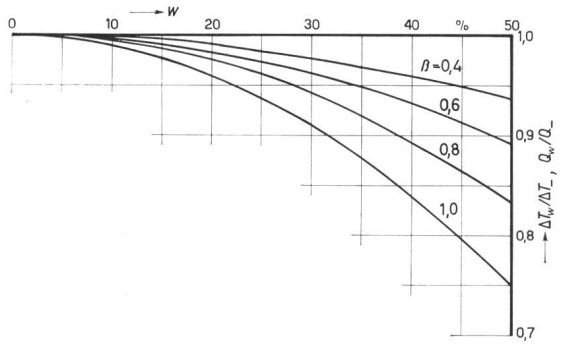


Fig. 8

Einfluss der Stromwelligkeit auf die maximale Kälteleistung und maximale Temperaturdifferenz bei Peltieraggregaten

Q_w Kälteleistung bei welligem Gleichstrom; ΔT_w Temperaturdifferenz bei welligem Gleichstrom; $\beta = J/J_{max}$; J Betriebsstrom; w Welligkeit des Gleichstromes

mofach von Fig. 6 eingebaut. Dieses Thermofach dient wahlweise zum Kühl- oder Warmhalten und wird entweder auf eine Temperatur von 6 °C oder 63 °C geregelt. Der Wärmebetrieb erfolgt durch Umpolen der Stromrichtung des Peltierspeisestromes. In Fig. 7 sind der Temperaturverlauf der Luft innerhalb der Aluminium-Innenzelle sowie die Temperaturen der Warm- und Kaltseiten der Aggregate während des Kühl-

Blockeffektivität als Funktion der Kaltstellentemperatur bei warm — kalt verspannten Aggregaten

Tabelle I

T_0 [°K]	210	220	230	240	250	260	270	280
Z^* [10^{-3}/°K]	1,50	1,64	1,76	1,84	1,90	1,84	1,80	1,70

und Wärmebetriebes mit zugehöriger Umschaltphase wiedergegeben. Die Temperaturregelung erfolgt durch Ein- und Ausschalten des Speisestromes. Wie wichtig die Frage der Temperaturwechselbeständigkeit ist, erkennt man deutlich bei dieser Anwendung. Während des Umschaltens tritt innerhalb einer halben Stunde eine Temperaturänderung um ca. 85 °C auf. Dieser in der Amplitude hohe Temperaturwechsel tritt nur während des Umschaltens auf. Im Regelbetrieb während der Wärmeperiode treten dagegen in der Frequenz höhere (10 Wechsel pro Stunde), in der Amplitude kleinere (25 °C) Temperaturwechsel auf. Die Aggregate wurden daher vor dem Einbau auf ihre Temperaturwechselbeständigkeit hin überprüft. Bei einer Amplitude von 40 °C und einer Frequenz von 20 Wechseln in der Stunde traten nach 100 000 Temperaturzyklen keine Änderungen am Aggregat auf.

Beim Betrieb von Peltierkühlgeräten ist der Frage der Welligkeit des Speisestromes Rechnung zu tragen. Fig. 8 zeigt den Einfluss der Stromwelligkeit sowohl auf die erzielbare maximale Temperaturdifferenz als auch auf die maximal erreichbare Kühlleistung. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass bei Betrieb mit maximaler Stromstärke ($\beta = 1$) der Einfluss der Stromwelligkeit etwa doppelt so gross ist, als wenn man das Aggregat mit nur etwa 60 % des maximal möglichen Betriebsstromes betreibt. Dementsprechend kann in Kühlgeräten die Welligkeit etwa 20 % betragen, sofern der Wärmetauscher so dimensioniert ist, dass der optimale Betriebsstrom bei etwa $\beta = 0{,}6$ liegt.

Eine andere interessante Anwendung des Peltieraggregates ist die Bauelementekühlung bei tiefen Temperaturen von z. B. −40 ... −60 °C. Hiebei werden die Peltieraggregate in der Kaskadenschaltung betrieben. Bei einem zweistufigen Aufbau ist zu berücksichtigen, dass, wenn die zweite Stufe als die kälteste bezeichnet wird, die Kühlleistung der ersten Stufe so bemessen sein muss, dass sie nicht nur in der Lage ist, die Kühlleistung der zweiten, sondern auch deren Anschlussleistung aufzunehmen. Bei zweistufigen Kaskaden ist das Verhältnis der Kühlleistung der zweiten Stufe zur Kühlleistung der ersten die bestimmende Grösse für die maximal erzielbare Temperaturabsenkung. Nur bei einem Verhältnis 1 : ∞ erzielt man als maximale Temperaturabsenkung die Summe der Temperaturabsenkungen jeder einzelnen Stufe. Die maximale Betriebsstromstärke der Kaskade hängt ebenfalls vom Verhältnis der Kühlleistungen der einzelnen Stufen ab. Die maximale Betriebsstromstärke der Einzelstufen darf ebenfalls nur bei einem Verhältnis der Kühlleistungen von 1 : ∞ eingestellt werden. Bei einem in der Praxis meistüblichen Verhältnis von 1 : 4 ist sowohl die maximale Betriebsstromstärke als auch die maximale Temperaturabsenkung der Kaskade kleiner. Welche Leistungsverhältnisse sinnvoll sind und ob eine Kaskade überhaupt notwendig ist, hängt von der geforderten Kälteleistung bei vorgegebener Temperaturabsenkung ab und ist in Fig. 9 für ein ein- und zweistufiges Aggregat mit insgesamt 10 Blöcken wiedergegeben.

Bei der Aufstellung des Diagrammes in Fig. 9 wurden die in Tab. I zusammengefassten Effektivitäten, eine Stromwelligkeit von 10 % und eine Betriebsstromstärke von $\beta = 0{,}6$ zu Grunde gelegt. Als Beispiel für dieses Diagramm seien folgende Anwendungen diskutiert:

a) Kühlung eines Sekundärelektronenvervielfachers, Kälteleistung praktisch Null, Temperaturabsenkung auf $T_k = -43$ °C, Luftkühlung bei Raumtemperaturen von 25 °C. Für die

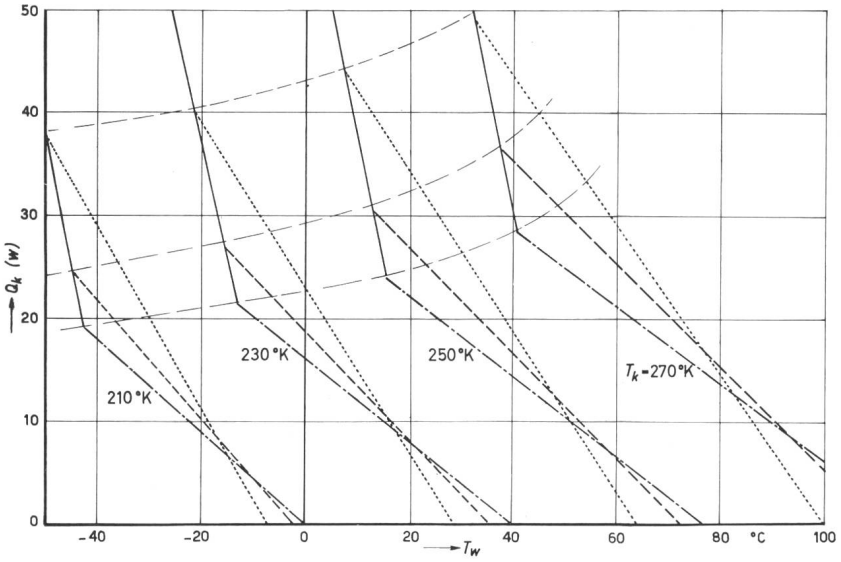


Fig. 9

Kälteleistung von ein- und zweistufigen Aggregaten bei Einbau von 10 Blöcken

Λ Wärmeleitwert des Aggregates

..... $\Lambda_1/\Lambda_2 = 2$ — — — $\Lambda_1/\Lambda_2 = 3$

—·—·— $\Lambda_1/\Lambda_2 = 4$ ——— einstufig

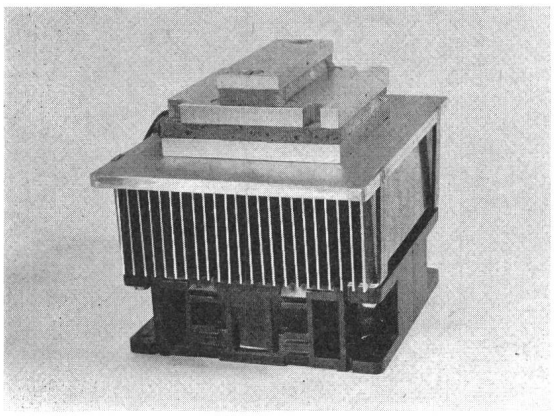


Fig. 10

Zweistufiges Peltieraggregat ($A_2/A_1 = 1:3$) für den Einbau in einen Sekundärelektronenvervielfacher

Wärmeabfuhr auf der Warmseite mittels Rippen-Wärmetauscher und Lüfter

Realisierung dieser Forderungen wird eine Kaskade 1 : 3 benötigt, wobei der Wärmetauscher die Warmstellentemperatur auf maximal 35 °C begrenzen muss. Da praktisch keine Kälteleistung gefordert wird, genügt ein Aufbau mit insgesamt vier Blöcken, wovon ein Block die zweite Stufe bildet. Der Aufbau der Kaskade mit Wärmetauscher und Lüfter ist in Fig. 10 wiedergegeben. Die Kaskade liefert bei einer Warmstellentemperatur von 35 °C eine Kaltstellentemperatur von −42 °C und stimmt damit gut mit den aus dem Diagramm in Fig. 9 wiedergegebenen Werten überein.

b) Bei der Temperaturkonstanthaltung auf −43 °C in einer Kühlbox wird eine Kälteleistung von ca. 12 W gefordert. Für die Wärmeabfuhr steht eine Wasserkühlung mit Frischwasser von etwa 12 °C zur Verfügung. Zur Realisierung dieser Forderung wird eine Kaskade 1 : 4 benötigt, wobei die Warmstellen-Temperatur auf + 15 °C begrenzt werden muss. Die notwendigen 10 Peltierblöcke teilen sich in 2 Blöcke für die zweite Stufe und 8 Blöcke für die erste Stufe auf. Das Aggregat mit angebauter Wasserkühlung ist in Fig. 11 wiedergegeben.

Literatur

[1] *W. Schirp:* Thermoelektrische Kühlung. Internat. Z. Elektrowärme 22(1964)6, S. 205...214.

[2] *H. Müller:* Bemessung und Aufbau von Peltieraggregaten. Kältetechnik 15(1963)5, S. 137...143.

[3] *W. Hänlein:* Halbleiter-Kühlelemente. Bull. SEV 55(1964)4, S. 142...149.

[4] *J. Rupprecht* und *R. G. Maier:* Neuere Untersuchungen an halbleitenden Mischkristallen unter besonderer Berücksichtigung von Zustandsdiagrammen. Physica Status solidi 8(1965)1, S. 3...39.

[5] *R. R. Heiker* and *R. W. Ure:* Thermoelectricity, Science and Engineering. Interscience, New York / London 1961.

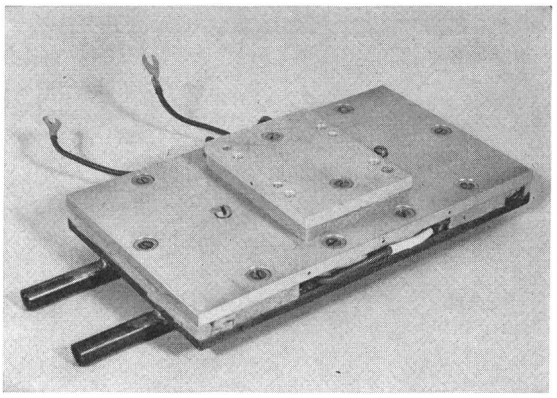


Fig. 11

Zweistufiges Peltieraggregat mit Wasserkühlung auf der warmen Seite

($A_2/A_1 = 2:8$)

Adresse der Autoren:

Dr. *H. Müller* und *Dr. J. Rupprecht*, Entwicklungslaboratorium der Siemens-Schuckertwerke AG., Postfach 325, D-8520 Erlangen 2.

Auswirkungen der modernen Transformatorbauweise auf die Transformator-Schaltüberspannungen

Von *R. Thaler*, Aarau

621.314.254

Im Verlaufe der vergangenen 10 Jahre haben verschiedene Eigenschaften der Grosstransformatoren Änderungen erfahren, die sich beim unbelasteten Ausschalten derselben günstig auf die Höhe der auftretenden Überspannungen auswirken. So konnten die Leerlaufströme durch Anwendung von Magnetkernen aus kornorientiertem Blech und durch eine Bauweise mit kleinst möglichen Luftspalten auf Werte bis 0,4 % und weniger gesenkt werden. Ebenfalls gesunken ist das Volumen pro MVA. Diese Verbesserungen ergeben eine Verkleinerung der beim Ausschalten von leerlaufenden Transformatoren maximal möglichen Überspannungen um ungefähr den Faktor 3. Damit bleibt der Überspannungsfaktor bei Transformatoren mit Nennspannungen von 110 kV und mehr auch dann unterhalb gefährlicher Grössen, wenn der volle Scheitelwert des symmetrischen Magnetisierungsstromes abgerissen wird. Es erübrigt sich also, beim Schalter Widerstände vorzusehen, um die Transformatorschaltüberspannungen weiter zu dämpfen. Vereinfachung und Vereinheitlichung der Leistungsschalter sind die Vorteile einer solchen Lösung.

Au cours des 10 dernières années écoulées, certaines caractéristiques des grands transformateurs ont subi des modifications ayant eu une heureuse répercussion sur la grandeur des surtensions engendrées par le déclenchement de ces transformateurs en marche à vide. Par l'utilisation de noyaux magnétiques faits de tôles à grains orientés et par la réalisation d'entrefers aussi petits que possibles, les valeurs des courants à vide sont tombées à 0,4 % et moins. Le volume par MVA a lui aussi diminué. Ces améliorations réduisent d'un facteur voisin de 3 les surtensions maximales possibles produites par le déclenchement de transformateurs en marche à vide. Ainsi, donc, pour les transformateurs à tensions nominales de 110 kV et plus, le facteur de surtension reste inférieur à une valeur dangereuse, ceci même lorsque le courant magnétisant symétrique est arraché à sa pleine valeur de crête. Ces résultats permettent de supprimer les résistances équipant les disjoncteurs et destinées à amortir les surtensions des transformateurs. Une telle solution a l'avantage de simplifier les disjoncteurs et en favorise leur standardisation.

1. Veranlassung zur Untersuchung

Die Grösse der beim Ausschalten von leerlaufenden Transformatoren auftretenden maximalen Überspannungen hängt von drei Haupteinflüssen ab: dem Transformator, dem Schalter und der Netzdisposition. Im Verlaufe der letzten Jahre haben sich vor allem die massgebenden Eigenschaften von Transformatoren geändert. Dies führte zu einer erneuten Prüfung der Fragen des Schutzes von Anlageteilen gegen Transformator-Schaltüberspannungen.

2. Zusammenhänge der massgebenden Einflussgrössen

In einer früheren Arbeit [1][1]) ist theoretisch und praktisch untersucht worden, welche Einflüsse für die Grösse der Über-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.