Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 59 (1968)
Heft: 20

Artikel: Thermoelektrische Energieumformer
Autor: Kroms, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057426

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: 22.08.2025

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

Thermoelektrische Energieumformer

Von *A. Kroms*, Malden (USA)

621.362:537.322.11

Thermoelektrische Vorgänge sind durch unmittelbare Umwandlungen zwischen Wärme und elektrischer Energie gekennzeichnet. Energieumformer dieser Art sind bisher in einem sehr beschränkten Masse angewandt worden; sie haben sich praktisch sogar ausserhalb des Bereichs der elektrischen Energieversorgung befunden. In den letzten Jahren hat sich aber eine Forschungstätigkeit entwickelt, mit dem Ziel, die thermoelektrischen Anlagen zur Energieversorgung nutzbar zu machen. Nachstehend wird eine Übersicht über die energetischen Umwandlungen in den thermoelektrischen Anlagen gegeben. Im einzelnen werden der thermoelektrische Generator, die Wärmepumpe und die thermoelektrischen Werkstoffe behandelt.

Des phénomènes thermoélectriques sont caractérisés par la transformation directe de la chaleur en énergie électrique. Des transformateurs électriques de ce genre n'ont jusqu'à présent été appliqués que dans une mesure très restreinte; ils se situaient même pratiquement hors du domaine de l'approvisionnement en énergie électrique. Au cours de ces dernières années toutefois des recherches ont été développées dans le but d'exploiter les installations thermoélectriques en faveur de l'approvisionnement d'énergie. Les lignes qui suivent fournissent un aperçu des transformations énergétiques dans les installations thermoélectriques. L'article traite en particulier du générateur thermoélectrique, de la pompe à chaleur et des matériaux thermoélectriques.

1. Einführung

Energieerzeugungsanlagen jeder Art formen die zugeführte Rohenergie in die gewünschte Art der Nutzenergie — meistens in elektrische Energie — um. Je nach dem Charakter der Energiequelle und dem technischen Ausbau der Anlage finden hier verschiedene Vorgänge der Energieumwandlung statt (Fig. 1). Je länger die Kette der nacheinander folgenden

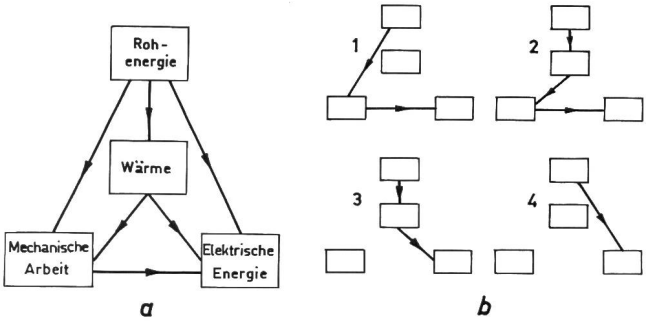


Fig. 1
Verschiedene Wege der Energieerzeugung
a Energieformen; *b* Umwandlungsprozesse in verschiedenen Energieanlagen: *1* Wasserkraftanlage; *2* Wärmekraftanlage; *3* thermoelektrische Anlage; *4* Brennstoffelement

Energieumsetzungen ist, desto verwickelter wird die Anlage, und die Verluste durch Energiezerstreuung vergrössern sich. In Wärmekraftwerken wird die Rohenergie der Energieträger (Brennstoffe, Kernenergie) zuerst in Wärmeenergie umgewandelt, diese nachher in mechanische Arbeit und schliesslich in elektrische umgesetzt. Die grössten Energieverluste entstehen bei der Umsetzung der Wärme in mechanische Energie (Fig. 2). Nach dem zweiten thermodynamischen Hauptsatz geben Wärmekraftmaschinen beträchtliche Wärmemengen niedriger Temperatur mit dem abfliessenden Wärmevermittler (Dampf, Gas) ab und liefern dadurch zwei Arten von Energie: mechanische Energie und Restwärme. Die Ausbeute an mechanischer Arbeit pro Einheit der aufgebrachten Wärmeenergie kann dadurch gesteigert werden, dass man das ausnutzbare Temperaturgefälle erhöht. Der Grenzwert des Wirkungsgrades ist durch den Carnot-Kreisprozess gegeben:

$$\eta_c = \frac{W_1 - W_2}{W_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}$$

wobei W_1 und W_2 die aufgebrachte und abgeleitete Wärme, T_1 und T_2 (^{0}K) die entsprechenden Temperaturen und $\Delta T = T_1 - T_2$ das ausgenutzte Wärmegefälle bedeuten (Fig. 3). Theoretisch kann $\eta_c = 0{,}75...0{,}80$ erreichen. Die praktischen Werte liegen aber erheblich niedriger, weil:

a) Die Kraftmaschinen nicht nach dem Carnot-Kreislauf arbeiten, wobei die Wirkungsgrade der tatsächlichen Kreisprozesse unterhalb der angegebenen η_c-Werte liegen;
b) Die zulässige Temperatur des Wärmevermittlers T_1 durch die Haltbarkeit der Werkstoffe begrenzt ist;
c) Gewisse Energiezerstreuungen bei den Energieumwandlungen unvermeidbar sind.

Aus den erwähnten Gründen beträgt der Energieumsetzungsgrad sogar in den besten Wärmekraftwerken nur 0,32...0,38. Um die Verlustquellen bei der Wärmeumsetzung in elektrische Energie zu vermindern und die Energieanlagen zu vereinfachen, versucht man die Kette der Energieumwandlungen durch Weglassen der Stufe der mechanischen Arbeit zu verkürzen. Dazu werden neue Wege der Energieerzeugung erprobt, indem man:

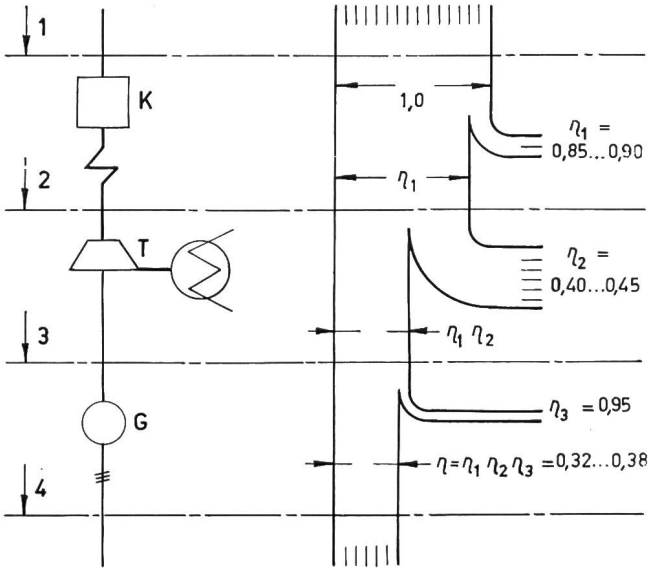


Fig. 2
Energieumwandlung in Wärmekraftanlagen
1 chemische Brennstoffenergie; *2* Wärmeenergie; *3* mechanische Arbeit; *4* elektrische Energie; *K* Kessel (Wärmeerzeuger); *T* Turbine; *G* elektrischer Generator; η_1, η_2, η_3 Teilwirkungsgrad einzelner Energieprozesse

a) Elektrische Energie aus der chemischen Energie der Brennstoffe unmittelbar erzeugt;

b) Wärmeenergie der Verbrennungs- oder Kernenergieprozesse ohne Umweg über die mechanische Arbeit in elektrische Energie umsetzt [1 bis 5] [1]).

Die Grundarten dieser Energieumwandler sind:

a) Elektrochemische Energieerzeuger oder Brennstoffelemente;

b) Thermoelektrische Energieerzeuger (Fig. 4): Thermoelemente, thermionische Umwandler, plasma- und elektrogasdynamische Anlagen.

Nachfolgend sei die einfachste Art dieser Apparate — das Thermoelement — erörtert.

2. Die thermoelektrischen Energieumwandlungen

Thermoelemente, die einfachsten Vorrichtungen für die thermoelektrische Energieumwandlung, dienen dazu:

a) Elektrische Energie aus Wärmeenergie unmittelbar zu erzeugen;

b) Ein Temperaturgefälle zu erzielen, d. h. als Wärmepumpe zu arbeiten.

Beide Aufgaben werden auf Grund einer und derselben thermoelektrischen Erscheinung erfüllt, wobei die Prozesse nur in umgekehrter Richtung verlaufen.

Die Möglichkeit der unmittelbaren Erzeugung von elektrischer Energie aus Wärme wurde zuerst von *T. Seebeck* im Jahre 1821 festgestellt. Wenn man aus zwei Leitern einen Kreis

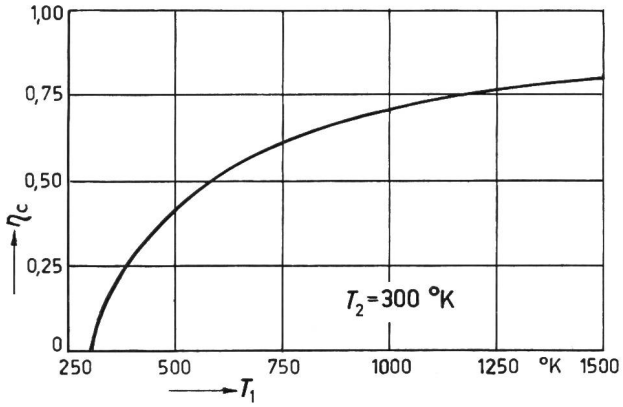


Fig. 3
Wirkungsgrad des Carnot-Kreisprozesses
η_c-Carnot-Wirkungsgrad; T_1, T_2 Temperatur der zugeführten bzw. abgeleiteten Wärme

bildet und die Verbindungen auf unterschiedlichen Temperaturen hält, entsteht zwischen den beiden Übergängen eine elektromotorische Kraft, die elektrischen Strom verursacht. Das elektrische Potential wird dadurch gebildet, dass die zugeführte Wärmeenergie die Elektronen entlang dem Temperaturgefälle bewegt (Fig. 5) [6]; dies wurde später von *Thomson* (*Lord Kelvin*) bestätigt. Die erzielbaren Spannungen hängen von dem Temperaturunterschied und den benutzten Werkstoffen ab. Die elektromotorische Kraft des aus den Werkstoffen «a» und «b» bestehenden thermoelektrischen Elements ist [7]:

$$E_{ab}(T_1, T_2) = E_a(T_1, T_2) - E_b(T_1, T_2) \qquad \text{V}$$

wobei E_a und E_b die absolute elektromotorische Kraft der beiden Werkstoffe (in bezug auf einen Messwerkstoff) und T_1 bzw. T_2 die Temperaturen der Übergänge bedeuten. Das erzielbare elektrische Potential pro Grad des Temperaturunter-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

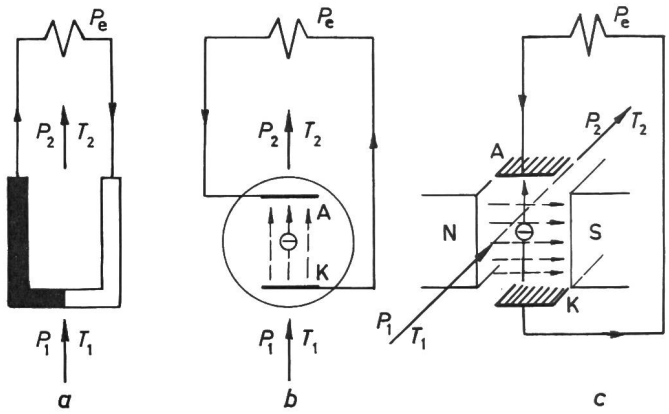


Fig. 4
Die Grundarten der thermoelektrischen Energieanlagen
a Thermoelement; *b* thermoionischer Apparat; *c* magnetohydrodynamischer Apparat; P_1, P_2 aufgebrauchte bzw. abgeleitete Wärmeleistung; P_e abgegebene elektrische Leistung; T_1, T_2 Temperatur; *K* Kathode; *A* Anode; *N*, *S* magnetische Pole

schiedes zwischen der warmen und der kühlen Verbindung wird durch den Seebeck-Koeffizienten ausgedrückt:

$$\alpha = \mathrm{d}E/\mathrm{d}T \qquad \text{V/Grad}$$

Für ein Materialpaar «a» und «b» ergibt sich:

$$\alpha_{ab} = \frac{\mathrm{d}E_{ab}}{\mathrm{d}T} = \frac{\mathrm{d}E_a}{\mathrm{d}T} - \frac{\mathrm{d}E_b}{\mathrm{d}T} = \alpha_a - \alpha_b$$

Der Seebeck-Koeffizient ist von der Betriebstemperatur abhängig, d. h. $\alpha = f(T)$. Innerhalb eines nicht allzu breiten Temperaturbereiches kann er aber annäherungsweise als konstant angenommen werden. Das thermoelektrische Potential eines Elementes beim Temperaturunterschied $\Delta T = T_1 - T_2$ beträgt dann:

$$E_s = \alpha_{ab}\,\Delta T = (\alpha_a - \alpha_b)\,\Delta T \qquad \text{V}$$

Wenn die α-Werte der beiden Werkstoffe entgegengesetzte Vorzeichen (+ und −) haben, werden ihre Zahlenwerte addiert. Die erreichbare Stromstärke des Elementes ist:

$$I = \frac{E_s}{R} = \frac{E_s}{(R_i + R_a)}$$

und die abgegebene Leistung:

$$P = I^2 R_a\,,$$

wobei R_i den inneren Widerstand des Elementes und R_a den Widerstand der äusseren Leitung bedeuten. Je nach der Art der Werkstoffe betragen die α-Werte 0,1...0,3 mV/Grad, so dass

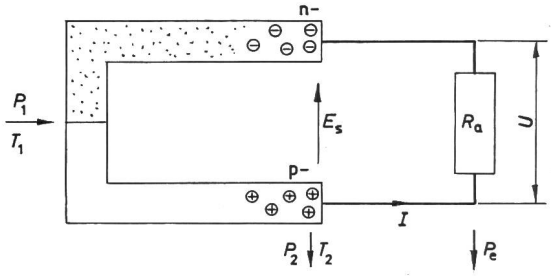


Fig. 5
Thermoelektrische Energieerzeugung (Seebeck-Effekt)
n, *p* Ladungsträger (Elektronen und «Löcher»); P_1, P_2 Wärmemenge; P_e elektrische Leistung; E_s thermoelektrisches Potential; *U* Klemmenspannung; R_a äusserer Widerstand; *I* elektrischer Strom

sogar ein Temperaturgefälle von $\Delta T = 1000^0$ eine Spannung von nur 0,1...0,3 V ergibt; dazu müssen zahlreiche Elemente in einer Reihe zusammengeschlossen werden.

Der von der thermoelektrischen Kraft verursachte elektrische Strom vermindert den Temperaturunterschied ΔT, indem er Energie von der warmen Verbindung auf die kühle überträgt. Diese Energieverschiebung, Peltier-Vorgang genannt, strebt an, die Differenzen des Potentials auszugleichen und das ganze System ins Gleichgewicht zu bringen. Der umkehrbare Energieausgleich mittels des elektrischen Stromes wird von der üblichen Wärmeleitung begleitet, wobei der Wärmestrom die grössten Energiemengen transportiert. Dieser nicht umkehrbare Wärmefluss beträgt:

$$P_q = \lambda A \frac{dT}{dl} \qquad \text{W}$$

wobei λ (W/cm Grad) die Wärmeleitfähigkeit, A (cm²) den Querschnitt und l (cm) die Länge des Wärmeleiters sind.

Der Wirkungsgrad der Energieumsetzung im thermoelektrischen Element hängt von dem Verhältnis zwischen den beiden Energieflüssen — dem Wärme- und dem elektrischen Strom — ab. Als elektrischer Generator muss das Element einen möglichst hohen Anteil an Wärme in elektrische Energie umwandeln und mittels des elektrischen Stromes übertragen. Die thermoelektrischen Werkstoffe sollen daher gute elektrische, aber geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Die wichtigsten Forderungen bei der Auswahl der thermoelektrischen Werkstoffe sind: hohe elektromotorische Kraft pro Grad Temperaturdifferenz ($\alpha >$), gute elektrische Leitfähigkeit, geringe Wärmeleitfähigkeit ($\lambda <$) und hohe Hitzebeständigkeit ($T_1 >$). Die ersten drei Forderungen werden in einem Gütegrad des Werkstoffes Z zusammengefasst [8]:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\varrho \lambda} \text{ (1/Grad)}$$

worin ϱ (Ω cm) der spezifische Widerstand ist.

Je höher der Z-Wert ist, d. h. je geringer das Produkt $\varrho\lambda$, um so besser eignet sich der Werkstoff für thermoelektrische Zwecke. Die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst den Temperaturausgleich mittels des Wärmeflusses, der elektrische Widerstand dagegen die Stromstärke bei gegebener Temperaturdifferenz bzw. elektrischer Spannung. Dies bringt gegensätzliche Forderungen mit sich, weil in den Werkstoffen niedrige Wärmeleitfähigkeit in der Regel mit hohem elektrischen Widerstand zusammenfällt. Deshalb entstehen hier schwierige Werkstoffprobleme, wobei man sich mit Kompromisslösungen begnügen muss.

Die gegenwärtigen thermoelektrischen Materialien weisen Z-Werte von $(1{,}5...2{,}8) \cdot 10^{-3}$ auf, wobei nur wenige Werkstoffe Temperaturen von $\geqq 750$ °C standhalten können. Im Laufe der letzten zehn Jahre sind aber neue thermoelektrische Werkstoffe entwickelt und die Z-Werte ungefähr verzehnfacht worden. Man hofft in Zukunft $Z \geqq 6 \cdot 10^{-3}$ zu erreichen, wodurch es möglich sein wird, den Wirkungsgrad und die spezifische Leistung (W/kg) der Thermoelemente zu erhöhen.

Da im Thermoelement der elektrische Strom durch den Temperaturunterschied verursacht wird, konnte man nach der Entdeckung *Seebecks* vermuten, dass auch ein umgekehrter thermoelektrischer Vorgang — die Bildung eines Temperaturgefälles mittels elektrischen Stromes — möglich ist. Dies wurde bald von *J. Peltier* bestätigt (1834): Wenn man den elektrischen

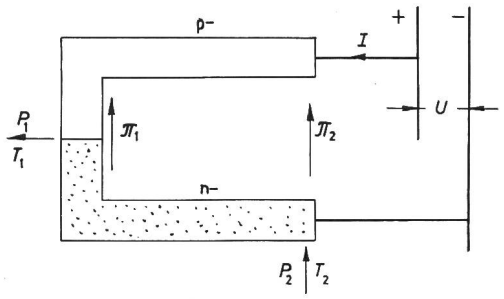


Fig. 6
Thermoelektrische Wärmepumpe (Peltier-Effekt)
I elektrischer Strom; P_1 pro Zeiteinheit abgegebene Wärme (Heizwirkung); P_2 pro Zeiteinheit aufgenommene Wärme (Kühlwirkung); T_1, T_2 Temperaturen; U Klemmenspannung; $E_p = \pi_1 - \pi_2$ Peltier-Potential

Strom durch das Thermoelement leitet, entsteht eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Verbindungen der Elementstäbe, d. h. Wärme wird an einem Übergang abgegeben, am anderen von der Umgebung absorbiert. Das Thermoelement wirkt diesmal als Wärmepumpe, weil es Wärme mittels des Elektronenstromes überträgt, wodurch die Erwärmungs- und Abkühlungswirkung gleichzeitig erzielt wird. Diese Wirkungen können, ähnlich wie in der mechanischen Wärmepumpe, entweder zur Kühlung oder zur Heizung ausgenutzt werden.

Der Peltier-Effekt zwischen den Werkstoffen «a» und «b» kann wie folgt ausgedrückt werden (Fig. 6) [9]:

$$P_p = \pi_{ab} I \qquad \text{W}$$

worin P_p die pro Zeiteinheit übertragene Wärme, I elektrischen Strom und $\pi(V)$ den Peltier-Koeffizienten oder das Peltier-Potential bedeuten. Der Koeffizient π hat die Dimension der Spannung, so dass in dem Übergang elektromotorische Kraft entsteht, welche, je nach ihrer Richtung, den Spannungsabfall in der Verbindung erhöht oder vermindert; dadurch wird eine entsprechende Energiemenge abgegeben, oder von der Umgebung aufgenommen.

Der Koeffizient π ist temperaturabhängig. Deshalb stellt die Peltier-Polarität die eigentliche Ursache des thermoelektrischen Vorgangs dar, weil die Differenz:

$$E_s = \alpha (T_1 - T_2) = \pi_1 - \pi_2$$

bei einem Temperaturunterschied $T_1 - T_2$ die elektromotorische Kraft bzw. die thermoelektrische Spannung verursacht. Dabei fällt die Polarität der Peltier-Spannung an der heissen Verbindung mit der Richtung des thermoelektrischen Stromes zusammen, so dass hier eine Abkühlung stattfindet. An der kalten Verbindung dagegen fliesst der Strom der Peltier-Spannung entgegen, wodurch hier eine Erwärmung hervorgerufen wird. Die Seebeck- und Peltier-Erscheinungen sind nur verschiedene Ausdrücke eines und desselben physikalischen Vorganges, bei dem sich Umwandlungen zwischen der Wärme- und der elektrischen Energie vollziehen.

In den elektrischen Leitern findet man noch einen dritten Vorgang: den Thomson-Effekt. *W. Thomson* stellte 1854 fest, dass ein Potentialunterschied auch zwischen zwei Punkten eines Leiters, welcher aus einem einzigen Werkstoff gebildet ist, entsteht, wenn die Temperatur an den betreffenden Punkten verschieden ist. Dieses Potential lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$E_T = \int \sigma_T \cdot \Delta T$$

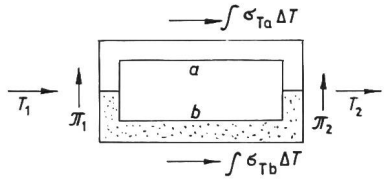


Fig. 7
Zusammenhang zwischen den Seebeck-, Peltier- und dem Thomson-Effekt
Bezeichnungen siehe im Text

darin bedeutet σ_T (V/Grad) den Thomson-Koeffizienten; er ist eine Funktion des Werkstoffes und der Temperatur, wobei die Richtung des Potentials von der Art des Werkstoffes abhängt.

Alle drei erwähnten thermoelektrischen Erscheinungen sind physikalisch miteinander verbunden, wobei die Seebeck-Erscheinung nur die Folge des Peltier- und Thomson-Effektes ist (Fig. 7). Die elektromotorische Kraft im geschlossenen Kreis ist dann:

$$E_s = \pi_{1ab} - \pi_{2ab} + \int (\sigma_{Ta} - \sigma_{Tb})\, \Delta T$$

und die entsprechende Menge der absorbierten Wärmeenergie beträgt:

$$P_s = E_s I \quad \text{W}$$

falls man die Auswirkungen der nicht umkehrbaren Wärmeentwicklung $I^2 R$ und der Wärmeleitung nicht berücksichtigt. Wenn man auch den Thomson-Effekt nicht beachtet, dann ist:

$$E_s = \alpha (T_1 - T_2) = \pi_1 - \pi_2$$

woraus

$$\pi = \alpha T$$

3. Der thermoelektrische Generator

Im thermoelektrischen Generator wird die zugeführte Wärme von dem erregten Strom an der heissen Verbindung absorbiert, an der kalten dagegen abgegeben, d. h. die Stromrichtung fällt an dem warmen Übergang mit der Peltier-Polarität zusammen. Die Aufgabe des Apparates ist, die dem warmen Übergang von einer äusseren Quelle zugeführte Wärmeenergie in elektrische Energie umzuwandeln und ins äussere Netz abzugeben (Fig. 8).

Das Thermoelement ist grundsätzlich eine Wärmekraftmaschine, wobei Wärme bei konstanter Temperatur zugeleitet wird. Die Energieumwandlung wird durch den Wirkungsgrad des Carnot-Kreisprozesses begrenzt, weshalb das Thermoelement ein möglichst hohes Temperaturgefälle ausnutzen muss. Der Wirkungsgrad der Energieumsetzung beträgt:

$$\eta_s = \frac{P_e}{P_1} = \eta_c \eta_t$$

Darin bedeuten P_e (W) die abgegebene elektrische Leistung, P_1 (W) die aufgebrachte Wärme, $\eta_c = \Delta T / T_1$ den thermischen Wirkungsgrad des Carnot-Zyklus und η_t den Umformungs-Wirkungsgrad des Elementes. Der Umformungsgrad η_t ist eine Funktion der Temperatur und der Werkstoffparameter Z; je höher die Z-Werte, um so besser ist der Wirkungsgrad η_t.

Die abgegebene elektrische Leistung des Elementes ist

$$P_e = I^2 R_a$$

wobei $I = E_s/R$, $E_s = \alpha \Delta T$ und $R = R_i + R_a = R_i (1 + R_a/R_i) = R_i (1 + a)$ sind. Nach Einsetzen ergibt sich hieraus:

$$P_e = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2 \cdot a}{R_i \cdot (1 + a)^2}$$

Hier ist $R_i = R_1 + R_2 = (\varrho_1/F_1 + \varrho_2/F_2)\, l$ und bei $F_1 = F_2$ (mm²) $R_i = (\varrho_1 + \varrho_2)\, l/F$. Bei $R_i = R_a$ oder $a = 1$ ergibt sich:

$$P_e = \frac{E_s^2}{4 R_i}$$

Dies stellt die höchstmögliche Nutzarbeit dar.

Die Bilanz der Wärmeleistungen am warmen Übergang setzt sich wie folgt zusammen:

$$P_1 = P_p + P_q - P_j \qquad \text{(W)}$$

worin P_p die durch den Peltier-Effekt absorbierte, P_q die durch die Wärmeleitung abgeführte und P_j die durch die Ohmische Erhitzung pro Zeiteinheit zugeleitete Wärme (pro Verbindung) bedeuten. Die spezifischen Energiemengen können wie folgt ausgedrückt werden:

$$P_p = \pi_1 I = \alpha T_1 I = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T \cdot T_1}{R_i (1 + a)}$$

$$P_q = K_i (T_1 - T_2) = K_i \cdot \Delta T, \text{ wobei } K_i = (\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2) \frac{1}{l}$$

und

$$P_j = \frac{1}{2} I^2 R_i = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{2 R_i (1 + a)^2}$$

Bei den zurzeit vorhandenen Werkstoffen wird der weitaus grösste Teil der zugeführten Wärme durch die Wärmeleitung abgeführt, ohne sich im Vorgang der Energieumwandlung zu beteiligen. Deshalb kann man angenähert $P_1 \approx P_q$ setzen und den Wirkungsgrad wie folgt ausdrücken:

$$\eta_s = \frac{P_e}{P_1} = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T \cdot a}{R_i K_i (1 + a)^2}$$

Man sieht, dass die η_s-Werte von dem Verhältnis $a = R_a/R_i$ beeinflusst werden. Aus dem Ausdruck $d\eta_s/da = 0$ ergibt sich der optimale Wert $a_0 = 1{,}0$ oder $R_a = R_j$, und daraus der Höchstwert des Wirkungsgrades

$$\eta_{s0} = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T}{4 K_i R_i}$$

Nach Einsetzen von $\eta_c = \dfrac{\Delta T}{T_1}$ oder $\Delta T = T_1 \eta_c$ erhält man schliesslich:

$$\eta_{s0} = \eta_c \cdot \frac{\alpha^2 T_1}{4 K_i R_i} = \eta_c \eta_t$$

Der Umformungsgrad η_t zeigt, wie nahe der tatsächliche Vorgang an den Carnot-Kreislauf herankommen kann; er

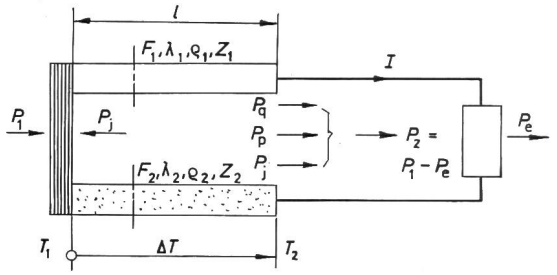


Fig. 8
Die ideale Energiebilanz des thermoelektrischen Generators (ohne Strahlungsverluste)
Bezeichnungen siehe im Text

wird auch Gütegrad des Elementes («figure of merit») genannt und manchmal mit M bezeichnet; dann ist:

$$\eta_{s0} = \eta_c M$$

Die M-Werte werden von den Werkstoffeigenschaften (α, ϱ, λ) und den Abmessungen der Elementstäbe bedingt. Wenn die Betriebstemperatur und die Werkstoffe ausgewählt worden sind, müssen die Ausmasse so festgelegt werden, dass das Produkt $K_i R_i$ den niedrigsten Wert erreicht. Die mathematischen Umformungen ergeben hier das optimale Verhältnis:

$$\left|\frac{F_1}{F_2}\right|_0 = \sqrt{\frac{\varrho_1 \lambda_2}{\varrho_2 \lambda_1}}$$

woraus

$$|K_i R_i|_0 = (\sqrt{\varrho_1 \lambda_1} + \sqrt{\varrho_2 \lambda_2})^2$$

und der maximale Wert des Gütegrades:

$$M_0 = \frac{\alpha^2 T_1}{4\,|K_i R_i|_0}$$

Bezeichnet man für ein Werkstoffpaar (1 und 2):

$$\frac{\alpha^2}{|K_i R_i|} = \frac{\alpha^2}{(\sqrt{\varrho_1 \lambda_1} + \sqrt{\varrho_2 \lambda_2})^2} = Z_{12}$$

dann nimmt M_0 folgende Form an:

$$M_0 = \frac{Z_{12} T_1}{4}$$

Für einen einzigen Werkstoff erhält man (in bezug auf einen Messwerkstoff):

$$M_0 = \frac{\alpha_1^2 T_1}{4 \lambda_1 \varrho_1} = \frac{Z_1 T_1}{4}$$

Die zurzeit verfügbaren thermoelektrischen Werkstoffe weisen $M_0 = 0{,}5...0{,}7$ auf. Zur Erzielung einer besseren Energieumwandlung werden M_0-Werte von $\geqq 1{,}5$ angestrebt.

Ein präziserer Annäherungswert des Wirkungsgrades ergibt sich, wenn man den Peltier-Energiefluss berücksichtigt, d. h. wenn man $P_1 \approx P_q + P_p$ setzt. Dann wird $\eta_{s\,max}$ beim optimalen Verhältnis $R_a/R_i = a_{10} = \sqrt{1 + 4 M_0}$ erreicht:

$$\eta'_{s0} = \eta_c \frac{a_{10} - 1}{a_{10} + 1} = \eta_c \eta'_t$$

Wenn man schliesslich die ganze Energiebilanz berücksichtigt, d. h. $P_1 = P_q + P_p - P_j$ einsetzt, ergibt sich folgender Ausdruck für den Höchstwert des Wirkungsgrades:

$$\eta_s'' = \eta_c \frac{a_{02} - 1}{a_{02} + \frac{T_2}{T_1}} = \eta_c \eta_t''$$

wobei

$$a_{02} \approx \sqrt{1 + Z_{12} \frac{T_1 + T_2}{2}}$$

ist.

Bei kleineren Temperaturdifferenzen kann $T_1 \approx T_2 = T$ gesetzt werden; daraus folgt der Gütegrad des Elementes:

$$\eta_t'' \approx \frac{\sqrt{1 + Z_{12} T} - 1}{\sqrt{1 + Z_{12} T} + 1}$$

Der letzte Wert, bei $Z_{12} = Z_1$, wird zur Kennzeichnung der thermoelektrischen Werkstoffe benutzt. Die η_t- und η_{s0}-Werte je nach dem Gütegrad M_0 sind für verschiedene Temperaturen

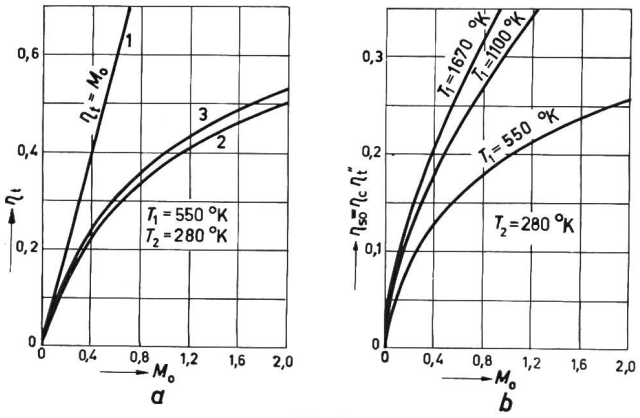


Fig. 9
Der ideale Wirkungsgrad der thermoelektrischen Generatoren
a Umformungsgrad η_t: *1* erste Annäherung ($P_1 \approx P_q$); *2* zweite Annäherung ($P_1 \approx P_q + P_p$); *3* die präzisen Werte.
b Gesamtwirkungsgrad $\eta_{s0} = \eta_c\ \eta_t''$ (entsprechend Kurve 3)

in Fig. 9 angegeben [9]. Daraus ersieht man den grossen Einfluss der Temperatur, weshalb man bestrebt ist hitzebeständige Werkstoffe mit günstigen Z-Werten zu entwickeln. Nimmt man, z. B., $Z_{12} = 2 \cdot 10^{-3}$, $T_1 = 1000$ und $T_2 = 280$ °K an, dann ist $M_0 = 0{,}5$ und aus Fig. 9 ergibt sich der optimale Wirkungsgrad $\eta_{s0} \approx 0{,}20$; wenn der Werkstoff einer Temperatur von $T_1 = 2000$ °K standhalten könnte, dann würde $M_0 = 1{,}0$ und $\eta_s \geqq 0{,}30$. Die tatsächlichen Werte des Wirkungsgrades liegen erheblich niedriger, weil erstens ein so hoher Temperaturunterschied nicht erreicht werden kann, und zweitens, erhebliche Strahlungs- und Abgasverluste (bei Brennern) nicht zu vermeiden sind. Dabei darf auch der Widerstand der Verbindungsglieder bei den Übergängen zwischen den Elementstäben nicht ausser Acht gelassen werden; der geringen elektromotorischen Kräfte wegen können Widerstände der Verbindungen die Energiebilanz der thermoelektrischen Batterie bedeutend verschlechtern.

Ein Vergleich und die Zusammensetzung der Wirkungsgrade der konventionellen Wärmekraftanlagen und der Thermoelemente sind in Tabelle I zusammengestellt.

Wirkungsgrade der Energieumsetzung

Tabelle I

Anlage	Thermodynamischer Prozess η_c	Elektrischer Generator η_t	Gesamtwirkungsgrad η_s
Wärmekraftanlage	0,40...0,45	=0,95	0,38...0,43[1])
Thermoelement:			
mit verfügbaren Werkstoffen	0,60...0,70	0,10...0,20	0,06...0,14
angestrebte Werte	0,80	0,30...0,40	0,24...0,30

[1]) ohne Verluste im Wärmeerzeuger (Kesselanlage).

Für ein Wärmekraftwerk ist es sehr wichtig, dass der Wirkungsgrad des thermodynamischen Kreisprozesses gesteigert werden kann. Bei Thermoelementen muss dagegen die grösste Beachtung dem Umformungs-Wirkungsgrad η_t im Werkstoff gewidmet werden. Zurzeit liegen die η_t-Werte noch so niedrig, dass in dieser Richtung viel Forschungsarbeit geleistet werden muss. Die besten vorläufig verfügbaren Werkstoffe können bei Temperaturen bis rund 800 °C betrieben werden; sie weisen einen Gütegrad von $Z = 2 \cdot 10^{-3}$ (1/Grad) auf und ermöglichen einen Wirkungsgrad von nur $\eta_s = 0{,}10$ zu erzielen. Man hofft in zehn Jahren den Wirkungsgrad auf $\eta_s \approx 0{,}15$ steigern zu

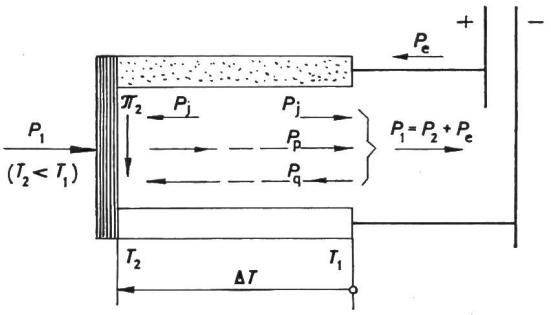


Fig. 10
Ideale Energiebilanz der thermoelektrischen Wärmepumpe
Bezeichnungen siehe im Text

können. Falls geeignete Werkstoffe für $\approx$ 1000 °C entwickelt werden könnten, dann würde es möglich sein, $\eta_s \approx 0{,}25$ zu erreichen; hier steht aber noch ein langer Entwicklungsweg bevor.

4. Die thermoelektrische Wärmepumpe

Die thermoelektrische Kette wirkt als Wärmepumpe, wenn der von aussen zugeleitete elektrische Strom den kalten Übergang abkühlt und dem warmen Wärme abgibt. Das Thermoelement kann dabei entweder als Kühl- oder Heizanlage dienen (Fig. 10). Im ersten Fall wird der Leistungskennwert der Anlage als Verhältnis:

$$\varepsilon_k = \frac{P_2}{P_e}$$

im zweiten als:

$$\varepsilon_h = \frac{P_1}{P_e} = \frac{(P_2 + P_e)}{P_e} = \varepsilon_k + 1$$

ausgedrückt, worin P_e die zugeführte elektrische Leistung, P_2 die an der kalten Verbindung absorbierte Wärmeleistung und $P_1 = P_e + P_2$ die an der warmen Verbindung pro Zeiteinheit abgegebene Wärme bedeuten. Die Leistungswerte P_1 und P_2 setzen sich wie folgt zusammen (s. Fig. 10):

$$P_1 = P_p + P_j - P_q$$

und

$$P_2 = P_p - P_j - P_q$$

Der Spannungsabfall entlang dem Element ist:

$$U_e = U - E_s = U - \alpha \Delta T$$

und die Stromstärke

$$I = \frac{U_e}{R_i}.$$

Die aufzubringende elektrische Leistung ist:

$$P_e = U I = \frac{U \cdot U_e}{R_i} = \frac{U(U - E_s)}{R_i}$$

Bei den verfügbaren Werkstoffen und dem geringen Temperaturunterschied ΔT ist die elektromotorische Kraft E_s niedrig, weshalb in erster Annäherung $U_e \approx U$; woraus $P_e \approx U^2/R_i$.

In der Wärmepumpe fällt die Stromrichtung mit der Peltier-Polarität an der kalten Verbindung zusammen, weshalb die Wärme von der Umgebung absorbiert und zur warmen Verbindung übertragen wird. Diese spezifische Wärmemenge beträgt (bei $U_e \approx U$):

$$P_p = \pi_2 I = \frac{\alpha T_2 U}{R_i}$$

Die Ohmische Wärme verteilt sich auf beide Übergänge:

$$P_j = \frac{I^2 R_i}{2} = \frac{U^2}{2 R_i}$$

Der unerwünschte Wärmetransport mittels der Wärmeleitung:

$$P_q = K_i \cdot \Delta T$$

Der Leistungskennwert des thermoelektrischen Kühlelementes lautet dann:

$$\varepsilon_k = \frac{P_2}{P_e} = \frac{P_p - P_j - P_q}{P_e} = \frac{\alpha T_2}{U} - \frac{1}{2} - \frac{K_i R_i \cdot \Delta T}{U^2}$$

Aus der Gleichung $d\varepsilon_k/dU = 0$ ergibt sich der optimale Wert der Spannung:

$$U_0 = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{2 M_0}$$

Nach Einsetzen des U_0-Wertes erhält man den maximalen Leistungskennwert der Wärmepumpe:

$$\varepsilon_{k0} = \frac{T_2 M_0}{\Delta T} - \frac{1}{2}$$

und

$$\varepsilon_{h0} = \frac{T_2 M_0}{\Delta T} + \frac{1}{2}$$

Die Leistungskennwerte können als Produkt zweier Kennzahlen — der Carnot-Kennzahl $\varepsilon_c = \frac{T_2}{\Delta T}$ und des Umformungsgrades der Werkstoffe ε_t — ausgedrückt werden:

$$\varepsilon_{k0} \text{ bzw. } \varepsilon_{h0} = \varepsilon_c \left(M_0 \mp \frac{\Delta T}{2 T_2}\right)$$

Mit präzisen Werten der Energiebilanz ($E_s > 0$) erhält man nach mathematischen Umformungen:

$$\varepsilon'_{k0} \text{ bzw. } \varepsilon'_{h0} = \varepsilon_c \frac{a_0 \mp \frac{T_1}{T_2}}{a_0 + 1} = \varepsilon_c \, \varepsilon'_{t0}$$

worin

$$a_0 = \sqrt{1 + 2 M_0 \frac{T_1 + T_2}{T_2}}$$

Die präzise Formel muss bei hohen M_0-Werten angewandt werden, weil sonst die angenäherten Ausdrücke grosse Fehler ergeben.

Die ε_{k0}- und ε_{h0}-Werte sind in Fig. 11 angegeben. Daraus ersieht man, dass die Güte der Anlagen auch bei der Wärmepumpe von den Betriebstemperaturen (T_1, T_2, bzw. ΔT) und dem Umwandlungsgrad des angewandten Werkstoffpaars (M_0) bedingt wird. Je grösser M_0 und je kleiner ΔT, um so

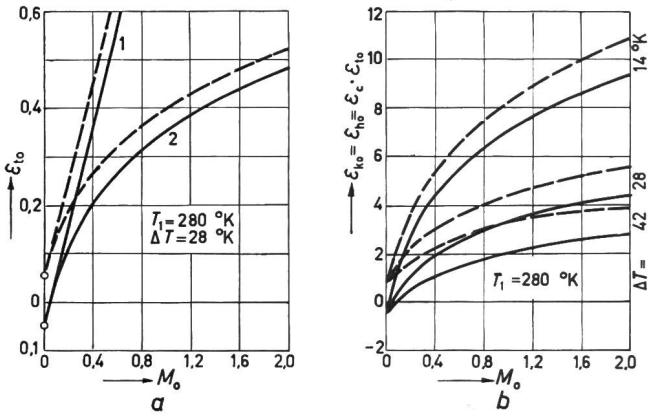


Fig. 11
Ideale Leistungskennziffer von thermoelektrischen Wärmepumpen
a Umformungsgrad ε_{t0}; *1* Annäherung ($U_e \approx U$); *2* präzise Werte;
b Leistungskennziffer $\varepsilon_{k0} = \varepsilon_c \, \varepsilon_{t0}$ (entsprechend den Kurven 2)
—— Kühlwirkung; — — — Heizwirkung

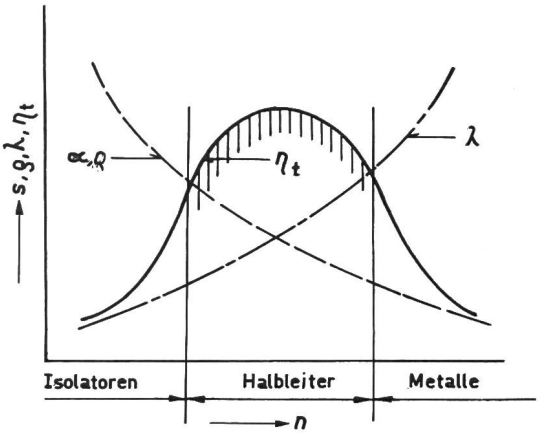


Fig. 12
Werkstoffe für thermoelektrische Apparate
n Dichte der Ladungsträger (Elektronen pro 1 cm³); α Seebeck-Koeffizient; λ Wärmeleitfähigkeit; ϱ Ohmscher Widerstandskoeffizient; η_t Umformungs-Wirkungsgrad

höhere Leistungskennwerte können erreicht werden. So erhält man bei $\Delta T = 28\ ^0C$ und $M_0 = 0{,}5$ aus Fig. 11b die ideale Leistungsziffer der Kühlanlage $\varepsilon_{k0} \approx 2$; bei $M_0 = 1{,}0$ ist dagegen $\varepsilon_{k0} \approx 3$ erzielbar. Ähnlich wie bei den Energieerzeugern, liegen auch hier die praktisch erreichbaren Werte niedriger.

5. Thermoelektrische Werkstoffe

Vor kurzem kamen Thermoelemente nur für Mess- und Kontrollzwecke in Betracht. Es wurde sogar angenommen, dass die Anwendungsmöglichkeiten schon erschöpft sind. Ihre Verwertung zur Energieerzeugung war mit zwei Nachteilen verbunden:

a) Die erzielbaren Spannungen und die Leistungsdichte waren gering;
b) Der Wirkungsgrad der Energieumsetzung lag niedrig.

Die grossen Erfolge der elektrischen Geräte, die auf Grund der elektromagnetischen Induktion arbeiten, haben dazu beigetragen, dass der Thermoelektrizität wenig Interesse entgegengebracht wurde. Letzthin sind aber Forschungen auf diesem Gebiet aufgenommen worden, wobei die Werkstofffrage im Vordergrund steht. Die Erfolge in der Herstellung von Halbleitern haben gewisse Möglichkeiten geschaffen, brauchbare thermoelektrische Umformer zu entwickeln [10].

Die Eignung der Werkstoffe für thermoelektrische Zwecke wird durch die Anzahl der Ladungsträger (freier Elektronen) und ihre Beweglichkeit bedingt. Dazu wurden vorerst Metalle benutzt. Obgleich sie die grösste Anzahl an freien Elektronen haben, weisen sie beträchtliche Nachteile auf:

a) Infolge allzu hoher Beweglichkeit der Elektronen können nur sehr niedrige Spannungen und Leistungen erzielt werden;
b) Metalle sind sehr gute Wärmeleiter, so dass ein guter Wirkungsgrad der Energieumsetzung nicht erreicht werden kann.

Isolatoren weisen dagegen einen Mangel an beweglichen Elektronen auf, weshalb auch sie zu diesem Zweck nicht geeignet sind. Die erwähnten Nachteile der Werkstoffe haben die Verwendung der Thermoelemente begrenzt. Dies hat zur Anwendung von Halbleitern geführt, die eine mittlere Stellung zwischen den Metallen und Isolatoren einnehmen. Sie ermöglichen es, die Leistungsdichte und den Wirkungsgrad von Thermoelementen bedeutend zu verbessern.

Man unterscheidet zwei Typen von Halbleitern:

a) Negative Halbleiter (n-), mit einem Überschuss an Elektronen;
b) Positive Halbleiter (p-), mit einem gewissen Mangel an Elektronen.

Der Mangel an Elektronen verursacht die sog. «Löcher», die als positive Ladungsträger angesehen werden. Die zugeführte Wärme verschiebt im n-Stoff die freien Elektronen, im p-Stoff dagegen die «Löcher» entlang dem Temperaturgefälle, wodurch sich die elektromotorischen Kräfte der beiden Stäbe in einer (p+n)-Kombination summieren (s. Fig. 5).

Die gewünschten thermoelektrischen Eigenschaften der Halbleiter werden dadurch erzielt, dass man dem Grundstoff kleine Mengen von Elementen hinzusetzt, deren Atome mehr oder weniger Elektronen im äusseren Elektronenkreis als der Grundstoff haben («Impfung»); dadurch entsteht entweder ein Mangel oder ein Überschuss an Elektronen. Die Halbleiter haben rund 10^{19} Ladungsträger pro 1 cm³; Metalle enthalten $\geqq 10^{22}$, Isolatoren dagegen nur $\leqq 10^{10}$ Ladungsträger/cm³ (Fig. 12). Bei hoher Temperatur nimmt die Anzahl der Ladungsträger zu, weil mehr Elektronen so viel Energie enthalten, dass sie sich von den Atomen befreien und das sog. Leitungsband verstärken können. Wenn die Anzahl der befreiten Elektronen sich der Zahl der vorhandenen Atome nähert, dann weist der Werkstoff die Eigenschaften eines Leiters auf.

Die thermoelektrischen Kennwerte verändern sich also mit der Temperatur. Die meisten Halbleiter sind nur innerhalb eines begrenzten Temperaturbereiches brauchbar (Fig. 13) [11]. Einige Werkstoffe, die bei einem Temperaturniveau gute Eigenschaften aufweisen, können sich im anderen Temperaturbereich als unbrauchbar erweisen. Während bei den Kühlanlagen die Temperaturunterschiede gering sind ($\approx$ 50 °C), kommen bei der Energieerzeugung Differenzen von 400...500 °C und mehr vor. In solchen Fällen müssen die Thermoelemente aus mehreren Werkstoffen zusammengesetzt werden.

Die Halbleiter weisen ungefähr zehnfach höhere Werte des Seebeck-Koeffizienten α als Metalle auf. Obgleich bei ihnen auch das Produkt $\varrho\lambda$ grösser als bei den Metallen ist, wächst doch der Parameter $Z = \alpha^2/\varrho\lambda$ mit dem Quadrat von α, weshalb man mit den Halbleitern eine wesentliche Verbesserung gegenüber den Metallen erreichen kann. Die erzielbaren Wirkungsgrade für einige Werkstoffe sind in Fig. 14 angegeben [8; 12]. Die praktischen η_s-Werte liegen niedriger, weil eine beträchtliche Wärmezerstreuung nicht vermeidbar ist. Die bisher erreichten η_s-Werte sind meistens unterhalb 8...10 %. Man erwartet aber, dass die Werkstoff-Forschung neue Materialien

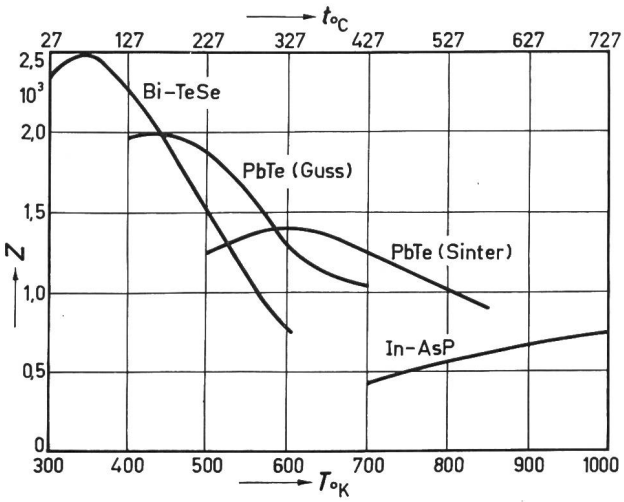


Fig. 13
Z-Werte einiger n-Halbleiter
Z Gütegrad der Werkstoffe; t Betriebstemperatur

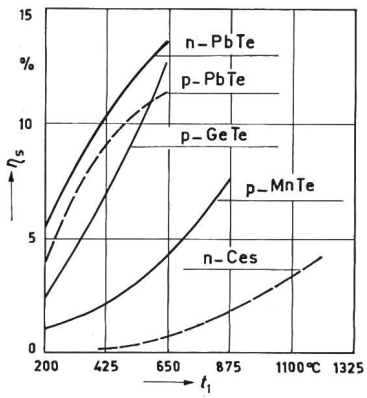


Fig. 14
Erzielbare Wirkungsgrade η_s je nach Betriebstemperatur
t_1 Betriebstemperatur; η_s Wirkungsgrad

bringen wird, die höhere Wirkungsgrade der Energieumsetzung ermöglichen werden.

Ein wichtiger Kennwert jeder Energieanlage ist die *Leistungsdichte* (W/cm², cm³ oder kg). Aus der Formel der elektrischen Leistung:

$$P_e = \frac{E_s^2\, a}{R_i\,(1+a)^2}$$

bei $R_a/R_i = a = 1{,}0$, $\varrho_1 = \varrho_2 = \varrho$
oder $R_i = 2\,\varrho\, l/A$

ergibt sich die spezifische Leistung:

$$\frac{P_e}{A} = \frac{E_s^2}{8\,\varrho\, l} = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{8\,\varrho\, l} = \frac{Z\lambda \cdot \Delta T^2}{8\, l}$$

Die thermoelektrischen Stoffe müssen hohe α- und niedrige ϱ-Werte aufweisen und hohen Temperaturen standhalten können. Bei $\alpha = 0{,}4$ (mV/Grad), $T = 500$ (°K), $\varrho = 0{,}002$ (Ωcm) und einer Länge der Stäbe von 0,5 (cm) ergibt sich $P_e/A = 5$ (W/cm²). Die Länge der Elementstäbe soll nach Möglichkeit vermindert werden; dann ist es aber schwierig, die erstrebte Temperaturdifferenz aufrecht zu erhalten, d. h. die grossen Mengen der Restwärme abzuleiten.

Mit der Leistungsdichte ist die Kostenfrage verknüpft. Thermoelektrische Apparate werden sich nur dann verbreiten können, wenn sie in der Lage sind, mit den konventionellen Energieumformern zu wetteifern. Dazu müssen billige thermoelektrische Werkstoffe entwickelt werden.

Für Apparate mässiger Temperaturen können zurzeit folgende Werkstoffe in Betracht gezogen werden:

Bi_2Te_3, mit Sb oder Se	$Z \approx 4 \cdot 10^{-3}$ (1/Grad)
Pb Te mit Ag oder Se Zn Sb Ge Te, mit Bi	$Z \approx 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ (1/Grad)

Bei Temperaturen $\geqq 900$ °C kommen *MnTe, CeS* oder *GeSi* in Frage, doch weisen sie geringere Z-Werte auf ($\approx 1{,}0 \cdot 10^{-3}$).

Die idealen Werte des Umformungs-Wirkungsgrades laut Formel:

$$\eta_t'' = \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + 1}$$

sind für einige Halbleiter in Fig. 15 angegeben [13]. Die besten Werte im Temperaturbereich $T = 300...1000$ °K betragen $\eta_t'' = 0{,}18...0{,}20$. Nach Einsetzen des Carnot-Wirkungsgrades ergibt sich der gesamte Wirkungsgrad zu $\eta_{s0} \leqq 0{,}12$. Zur Erzielung höherer η_{s0}-Werte werden Werkstoffe mit höheren Z-Werten ($\geqq 5 \cdot 10^{-3}$) benötigt. Ob hier rasche Erfolge zu erwarten sind, lässt sich vorläufig nicht sagen. Die praktischen η_s-Werte der Thermoelemente liegen beträchtlich niedriger als diese idealen Zahlenwerte; dies ist teilweise auf die geringe Leistung der Versuchsapparate zurückzuführen.

Zwei wichtige thermoelektrische Werkstoffe sind PbTe und GeSi. Die PbTe-Legierung ist das am meisten angewandte Material; es weist gute energetische Eigenschaften auf. Seine Nachteile sind niedrige mechanische Festigkeit, grosse thermische Ausdehnung und hoher Preis. GeSi ist erst vor kurzem entdeckt worden. Präzise Angaben über seine Eigenschaften fehlen noch. Die Wärmeleitfähigkeit des GeSi ist etwa dreimal höher als die des PbTe (Tabelle II). Dieser Nachteil wird aber durch die hohen α^2/ϱ-Werte und einen weiten Bereich der zulässigen Betriebstemperaturen ausgeglichen. Der GeSi-Werkstoff hat gute mechanische Eigenschaften, ist aber ebenfalls teuer.

Einige Eigenschaften von PbTe und GeSi

Tabelle II

Eigenschaft	PbTe	GeSi
Zulässige Temperatur °C	≈ 600	≈ 870
Kennwert Z (bei 870...270 °C)	$0{,}6 \cdot 10^{-3}$	$0{,}97 \cdot 10^{-3}$
Wärmeleitfähigkeit λ (W/cm Grad)	0,016	0,05
α^2/ϱ (W/cm Grad²)	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$

Die maximale spezifische Leistung, bei einer Länge des Elementes von $l = 0{,}5$ cm, ist (Fig. 16) [14]:

$$\frac{P_e}{A} = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{4\,\varrho}$$

Bei grossen ΔT-Werten kann theoretisch eine ziemlich hohe Leistungsdichte erreicht werden. Es ist aber praktisch schwierig, hohe Temperaturunterschiede bei kurzen Elementstäben auf-

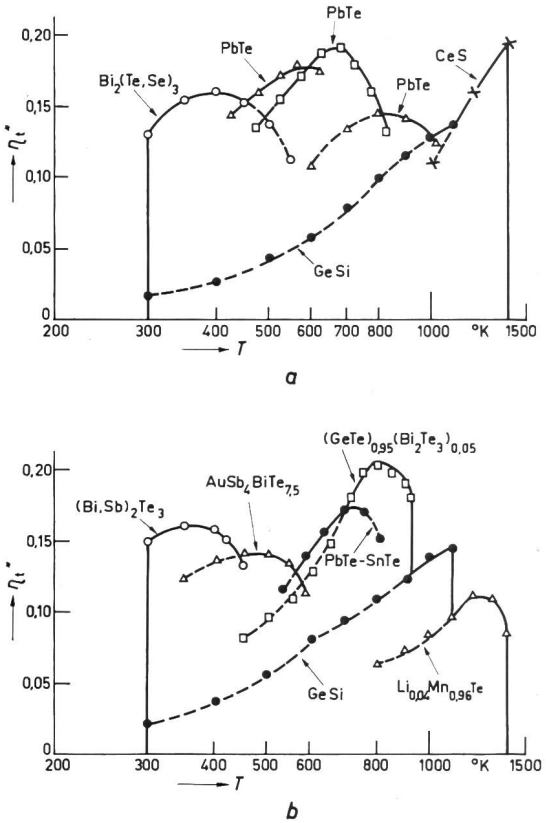


Fig. 15
Idealer Umformungsgrad einiger thermoelektrischer Werkstoffe
a n-Typ-Halbleiter; *b* p-Typ-Halbleiter
T Betriebstemperatur; η_t'' Umformungswirkungsgrad

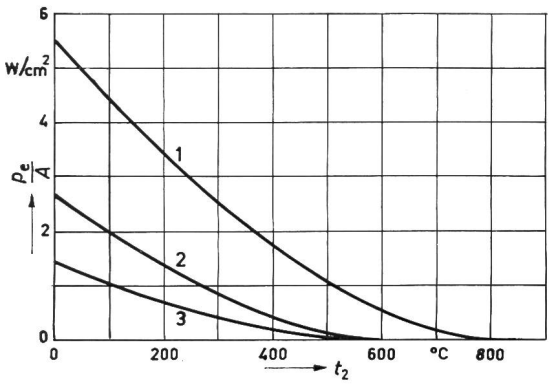


Fig. 16
Spezifische Leistung P_e/A (W/cm²) von PbTe- und GeSi-Halbleitern
1 GeSi, bei $t_1 = 870$ °C; *2* GeSi, bei $t_1 = 600$ °C; *3* PbTe, bei $t_1 = 600$ °C

recht zu erhalten, weil dann allzu grosse Wärmemengen aus der kleinen Oberfläche der kühlen Verbindung abgeleitet werden müssen.

Die thermoelektrischen Werkstoffe werden mittels verschiedener Verfahren — Giessen, Pulverpressung, Kritallwachsen u. a. — erzeugt. Forderungen bezüglich der Reinheit sind nicht so hoch wie bei den Transistormaterialien. Bei hohen Betriebstemperaturen (> 300 °C) muss die Oberfläche der meisten Stoffe gegen Oxydation geschützt werden. Die Menge der hinzugefügten Ladungsträger hängt von der Anwendung der Apparate ab. Wenn man eine hohe elektromotorische Kraft benötigt, wird der Anteil der Ladungsträger klein gehalten, wenn dagegen die spezifische Leistung ausschlaggebend ist, dann muss die Zugabe von Ladungsträgern erhöht werden.

Man versucht die thermoelektrischen Stoffe nicht allein durch ihre chemische Zusammensetzung, sondern auch mit anderen Mitteln zu verbessern. So kann man die *Z*-Werte mittels eines magnetischen Querfeldes erhöhen, weil es den Elektronenfluss fördert; dies tritt besonders bei niedrigen Temperaturen in Erscheinung. Versuche mit einer PbSi-Legierung haben bei $T = 100$ °K und einem magnetischen Querfeld von 1 kG Werte des Parameters Z von $8{,}6 \cdot 10^{-3}$ ergeben. Versuche in dieser Richtung werden fortgesetzt.

6. Thermoelektrische Apparate

6.1 Energieerzeuger

Ein thermoelektrischer Energieerzeuger kann Wärmequellen verschiedener Art — Brennstoff, Kernenergie, Sonnenstrahlung u. a. — ausbeuten [15]. Die nicht umgewandelte Wärme wird aus der kühlen Verbindung mittels Wasser oder Luft abgeleitet. Um das ausnutzbare Temperaturgefälle zu erhöhen,

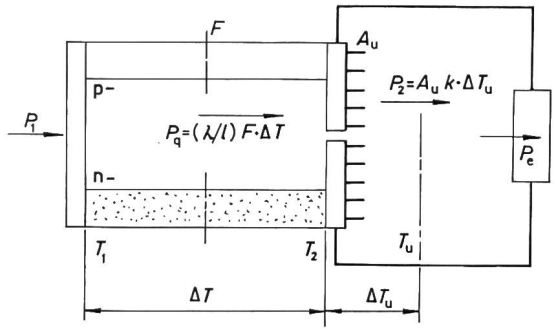


Fig. 17
Wärmeableitung im thermoelektrischen Generator
Bezeichnungen siehe im Text

muss die kalte Verbindung auf einem möglichst niedrigen Temperaturniveau gehalten werden. Bei grossen Wärmeströmen bringt dies Schwierigkeiten mit sich. Die Kühlverhältnisse sind in Fig. 17 dargestellt worden. Nimmt man annäherungsweise $P_1 \approx P_2 = P$ an, dann ist:

$$P = A \frac{\lambda}{l} \Delta T = A_u k \cdot \Delta T_u$$

worin A und A_u (cm²) die Querschnitt- und Wärmeabfuhrflächen bezeichnen. Daraus ergibt sich der benötigte Koeffizient der Wärmeabgabe an das Kühlmittel:

$$k = \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{A}{A_u} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T_u} \quad \text{(W/cm}^2\text{ Grad)}$$

Bei $\Delta T \gg T_u$ müssen hohe k-Werte erzielt werden. Dies erhöht den Energieverbrauch der Kühlpumpe oder des Luftgebläses, wodurch sich die abzugebende Nutzleistung der Anlage vermindert. Man kann auch die Kühlfläche A_u vergrössern, indem man sie mit Rippen versieht. Dadurch wird die Anlage vergrössert, doch ist es möglich T_2 niedriger zu halten, wodurch sich der Wirkungsgrad und die spezifische Leistung erhöhen.

Nimmt man $\lambda = 0{,}05$ (W/cm Grad), $\Delta T/\Delta T_u = 16$, $A/A_u = 1{,}0$ und $l = 1$ cm an, dann ist $k = 0{,}8$ (W/cm² Grad)

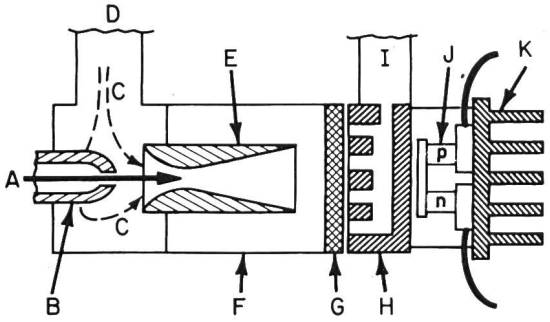


Fig. 18
Thermoelektrischer Generator mit katalytischer Verbrennung
A, *B* Gaszufuhr und Düse; *C*, *D* Luftzufuhr; *E*, *F* Mischkammer; *G* Katalytgitter; *H* Heizplatte; *I* Abgasableitung; *J* Thermoelement; *K* Kühlplatte

oder ≈ 34 (kcal/m² h Grad). Bei $l = 0{,}5$ cm erhält man zweifach höhere Werte. Da es schwierig ist so hohe k-Werte zu erzielen, muss die Kühlfläche A_u vergrössert werden [13].

Der Wirkungsgrad der bisher hergestellten thermoelektrischen Generatoren ist niedrig, $\eta_s \approx 5\%$; man hofft später $\eta_s = 0{,}12...0{,}15$ und noch höhere Werte zu erzielen. Vorläufig wird die Anwendung der Thermoelemente auf Anlagen für besondere Aufgaben begrenzt. In der elektrischen Energieerzeugung könnten sie als Vorschaltstufe dienen, deren Abwärme in einer nachgeschalteten Wärmekraftanlage verwertet wird. Dann treten Forderungen bezüglich des Wirkungsgrades gewissermassen zurück, doch sind dazu Werkstoffe für 800...1100 °C erforderlich. Hier könnten Fe-, Ni-, Co- und Mn-Legierungen in Frage kommen, doch sind diesbezüglich keine schnellen Erfolgen zu erwarten.

Die energetischen Nachteile der Thermoelemente — niedriger Wirkungsgrad und geringe Leistungsdichte — werden durch ihre einfache Bauart, lange Lebensdauer und eine Betriebsweise, die fast keiner Wartung bedarf, gewissermassen ausgewogen. Dies ist besonders im Bereich geringer Leistungen der Fall. Die thermoelektrischen Energieerzeuger sind bisher

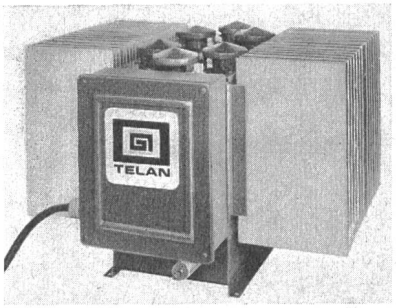


Fig. 19
Ansicht eines thermoelektrischen Generators
der auf dem Prinzip von Fig. 18 beruht

für Versuchszwecke und zur Energielieferung in besonderen Umständen (militärische Zwecke, Raumschiffahrt) hergestellt worden. Ihre Leistungen sind gering, 10...500 W. Diese Kleinanlagen sind einfach, betriebssicher, leicht und arbeiten ohne Lärm. Die Wärmeenergie kann mittels Öl- oder Gasbrenner erzeugt werden. So kann z. B. ein thermoelektrischer Generator auf eine Petroleumlampe aufgesetzt werden und elektrische Energie (rund 10 W) zum Betrieb eines Rundfunkempfängers liefern; in diesem Falle kommt es auf einen hohen Wirkungsgrad nicht an.

Den grundsätzlichen Ausbau eines thermoelektrischen Generators, der mit katalytischer Verbrennung arbeitet, zeigt Fig. 18. Der Generator verwertet Propan- oder Butangas, wobei die Betriebstemperatur bei 300...350 °C liegt; die niedrige Oxydationstemperatur erlaubt es, für das Brennergehäuse konventionelle Metalle zu verwenden. Das Äussere und das Innere des Geräts, einschliesslich der elektrischen Hilfsapparate, zeigt Fig. 19. Die Leistung einzelner Elemente beträgt bis 12 W.

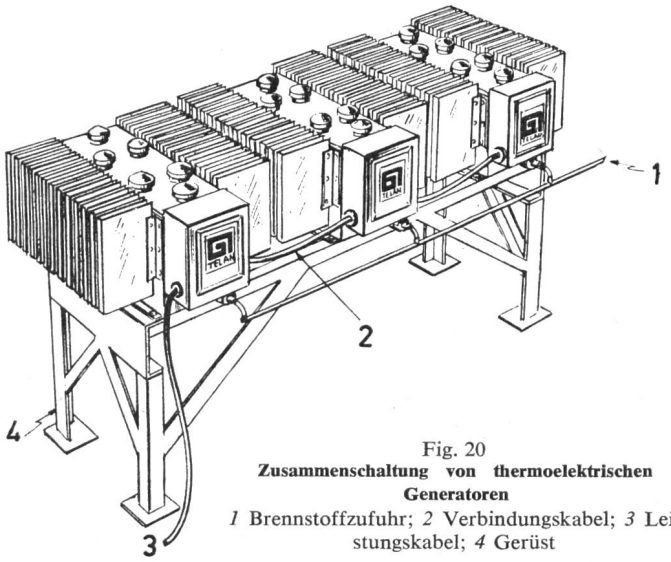


Fig. 20
Zusammenschaltung von thermoelektrischen Generatoren
1 Brennstoffzufuhr; *2* Verbindungskabel; *3* Leistungskabel; *4* Gerüst

Durch Serie- und Parallelschaltungen mehrerer Elemente werden Generatoren für Spannungen 12...24 V und Leistungen bis 300 W zusammengestellt (Fig. 20).

Eine mögliche Anordnung eines thermoelektrischen Generators mittlerer Leistung ist in Fig. 21 dargestellt [16]. Die Anlage besteht aus einem Luftgebläse, Brenner und thermoelektrischem Energieumwandler. Die Rauchgase strömen durch einen Gaszug, der von Thermoelementen umgeben ist. Die kalten Übergänge werden mittels eines Wassermantels gekühlt. Die Abgase können auch in einer Gasturbine zum Antrieb des Luftgebläses ausgenutzt werden. Wenn man einen Teilstrom der Abgase in den Brenner zurückführt, können der Wirkungsgrad erhöht und das Temperaturniveau geregelt werden. Da die Abgase den Gaszug mit einer hohen Temperatur verlassen, muss ihre Wärme für Heizzwecke oder zur konventionellen Krafterzeugung ausgenutzt werden. In diesem Fall stellt der thermoelektrische Energieerzeuger eine Vorschaltanlage dar. Praktische Ausführungen grösserer Energieerzeugungsanlagen liegen aber noch nicht vor. Es scheint, dass in naher Zukunft die elektrische Leistung der thermoelektrischen Generatoren einige kW nicht überschreiten wird.

Die Leistungsdichte der thermoelektrischen Energieerzeuger beträgt 5...20 W/kg. Für Geräte der nächsten Ent-

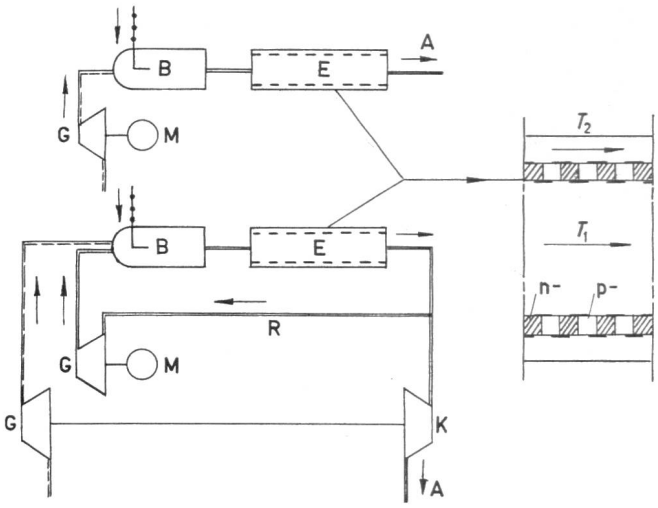


Fig. 21
Schema eines thermoelektrischen Energieerzeugers mittlerer Leistung
Schaltungen ohne und mit Gebläseturbine
=== -Luft; ═══ -Gas; ←→ -Brennstoff
B Brenner; *E* thermoelektrische Batterie; *G* Gebläse; *K* Gasturbine; *M* Antriebsmotor; *R* Gasrückführung; T_1, T_2 Temperatur; *A* Abgase für Heizzwecke oder Krafterzeugung

wicklungsstufe sieht man 100...200 W/kg oder noch höhere Werte vor. Dadurch könnte man die Abmessungen, das Gewicht und die Kosten der Apparate vermindern, doch müssen dafür bessere thermoelektrische Werkstoffe entwickelt werden.

6.2 Wärmepumpen

Die thermoelektrischen Kühlanlagen werden voraussichtlich früher als Energieerzeuger mit einer weitgehenden praktischen Anwendung rechnen können. Kühlanlagen geringer Leistung sind schon auf dem Markt [17; 18]; sie können an jedem Platz bequem untergebracht werden und ermöglichen es, die Kühlgeräte zu dezentralisieren, weil sie wenig Raum einnehmen und an geeigneten Stellen angeordnet werden können. In Fig. 22 ist der grundsätzliche Aufbau eines Kühlers für die Produktion von Eis dargestellt. Als Werkstoff dient hier eine BiTe-Legie-

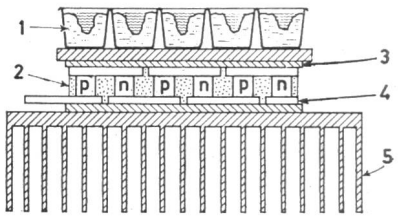


Fig. 22
Thermoelektrischer Kühler für Eisproduktion
1 Eis; *2* Thermoelement; *3* elektrische Isolation; *4* Stromanschluss; *5* Kühlrippen

rung mit $Z = 2{,}8 \cdot 10^{-3}$. Der Apparat kann täglich etwa 15 kg Eis erzeugen.

Thermoelektrische Raumkühler sind noch zu kostspielig und kommen nur in besonderen Umständen in Frage. Man erwartet aber, dass ihre Herstellungskosten zurückgehen und sie sich in Neubauten verbreiten werden. Gegenüber den herkömmlichen Kühlapparaten weisen sie mehrere Vorzüge — geringe Abmessungen, einfache Installation und Bedienung u. a. — auf. Die thermoelektrischen Geräte können auch zur Wasserkühlung angewandt werden. Man erwägt hier kombinierte Anlagen, wobei ein Übergang der Thermoelemente das Trinkwasser kühlt, der andere aber das Haushaltwasser erwärmt. Wärmepumpen können auch zur Wasserdestillation eingesetzt werden; dabei wird die Kondensationswärme entlang den Elementstäben zur Verdampfung zurückgepumpt, so dass ein geschlossener Wärmekreis entsteht und die Anlage ohne Kühlwasser arbeitet.

Es ist möglich, dass die thermoelektrischen Kühlanlagen grosse Umwandlungen auf dem Gebiet der Haushaltgeräte hervorrufen werden. Dazu müssen aber die M_0- und ε_k-Werte wesentlich verbessert werden. Die Elektrizitätswirtschaft sollte dieser Entwicklung grosses Interesse entgegenbringen, weil sie den Haushaltsbedarf an elektrischem Strom beträchtlich steigern kann.

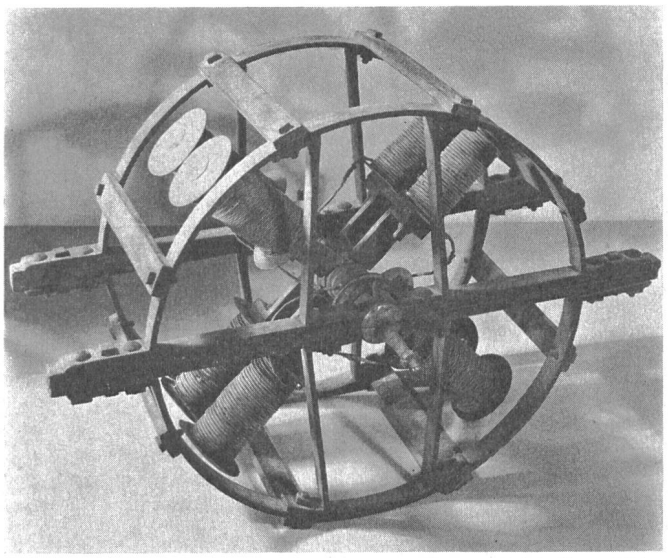
Literatur

[1] *J. Kaye* and *J. A. Welsh:* Direct conversion of heat to electricity. New York/London, John Wiley, 1960.
[2] *R. R. Heikes* and *R. W. Ure:* Thermoelectricity, science and engineering. New York/London, Interscience, 1961.
[3] *Federal Power Commission:* New Methods of Power Generation. National Power Survey, Report Nr. 8. Washington 1963.
[4] *O. Bryhni:* Nichtmechanische Erzeugung elektrischer Energie. Atom und Strom 7(1961)5/6, S. 33...40.
[5] *A. Kroms:* Neue Wege der Energieerzeugung. Energie 12(1960), S. 533...538, 13(1961), S. 11...16.
[6] *H. M. Ogle:* Direct conversion. Power Engineering 65(1961)1, S. 57...66.
[7] *E. U. Condon* and *H. Odishaw:* Handbook of physic. New York, McGraw-Hill, 1958.
[8] *I. Fells:* Electricity from heat. International Science and Technology –(1962)3, S. 15...27.
[9] *R. P. Benedict:* Thermoelectric effects. Electrical Manufacturing 65(1960)2, S. 103...118.
[10] *J. J. O'Connor:* New interest in thermoelectrics. Power 104(1960)1, S. 57...60.
[11] *G. M. Wilson:* Energy conversion processes. A progress report on developments in three methods: thermoelectric, thermionic, photovoltaic. Machine Design 32(18. 8. 1960), S. 189...192.
[12] *R. D. Carlton:* Thermoelectric materials today. Materials in Design Engineering 55(1962)1, S. 79...82.
[13] *J. W. Perry:* Application potentials for thermoelectrics and thermionics. Machine Design 36(13. 2. 1964), S. 196...200.
[14] *H. J. Bredt:* Thermoelectric power generation. Power Engineering 67(1963)2, S. 64...66, Nr. 3, S. 56...58, Nr. 4, S. 56...59.
[15] *K. Meyer:* Methoden zur direkten Umwandlung der Kernspaltungsenergie in Elektroenergie. Energietechnik 12(1962), S. 496...503.
[16] *B. W. Swanson:* Designing a thermoelectric generator. Power 105(1961)2, S. 85...87.
[17] First thermoelectric cooler. Materials in Design Engineering 55(1962)5, S. 13.
[18] *P. Lefferts:* Thermoelectric cooling. State-of-the-art review and guide to practical application. Machine Design 37(7. 1. 1965), S. 118...123.

Adresse des Autors:
Dipl.-Ing. *A. Kroms,* 30 Rockland Avenue, Malden, Mass., USA.

EIN BLICK ZURÜCK

Der Elektromotor von Manueli, 1855



Deutsches Museum München

Schon bald nach der Entdeckung des Elektromagnetismus machte man Versuche, diesen zur Erzeugung von Bewegung zu benutzen. Die ersten sichtbaren Erfolge hatte *Ernst Moritz von Jakobi,* der 1834, und in verbesserter Form 1838 mit einem von einem Elektromotor angetriebenen Boot, Fahrten auf der Newa unternahm. Als Stromquelle diente eine galvanische Batterie. Es folgten nun eine ganze Reihe von mehr oder weniger brauchbaren Konstruktionen, die jedoch in der Regel nur für Demonstrationen in physikalischen Kabinetten verwendet wurden. Man dachte jedoch ernsthaft daran, mit Batterien betriebene Motoren als Antrieb für Werkzeugmaschinen im Handwerk und Kleingewerbe, ja sogar für Lokomotiven, einzusetzen. Sie sollten dem Kleinbetrieb *das* werden, was die Dampfmaschine für die Industrie war. So entstanden in den 40er Jahren des vorigen Jahrhunderts und später Elektromotoren, die einen durchaus technischen Charakter aufwiesen, wie von *Froment* in Frankreich, von *Page* in Amerika, oder (wie der abgebildete) von *Manueli* in Italien. Der Betrieb erfolgte in einfacher Weise durch magnetische Anziehung, indem man durch eine geeignete Schaltvorrichtung Elektromagnete kurzzeitig von dem Strom einer galvanischen Batterie durchfliessen liess.

Der Gedanke, einen Elektromotor als Antrieb zu verwenden, war zu verlockend, im Handwerk etwa für Drehbänke oder Bohrmaschinen, die ja nicht im Dauerbetrieb laufen. Den Elektromotor konnte man leicht ausser Betrieb setzen, bei der Dampfmaschine dagegen musste der Kessel weitergeheizt werden, wenn man die Maschine kurzfristig stillsetzte. Ausserdem bedurfte der Dampfkessel einer ständigen Überwachung, und seine Aufstellung war wegen der Explosionsgefahr an eine Reihe von Auflagen gebunden. Kein Wunder, dass man sich vom Elektromotor viel erhoffte. Aber der Betrieb eines von Batterien gespeisten Elektromotors war viel zu teuer. Trotzdem machte man weiterhin erfolglose Versuche, bis der Gasmotor in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts der Helfer des Handwerks wurde. Um die Jahrhundertwende musste er im Handwerk schliesslich wieder dem Elektromotor weichen, der aber diesmal von einer zentralen Station über ein Netz mit Energie versorgt wurde.

A. Wissner