

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 60 (1969)  
**Heft:** 21

**Artikel:** Thermionische Energieumwandler  
**Autor:** Kroms, A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916185>

### 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:** 16.02.2026

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

# Thermionische Energieumwandler

Von A. Kroms, Malden (USA)

167 - 180

621.362 : 537.58

Die einfachsten thermoelektrischen Energieumformer — Thermoelemente — weisen zwei Nachteile auf: 1. Die meisten Halbleiter können sehr hohen Temperaturen nicht standhalten; 2. Die gute Wärmeleitfähigkeit der festen Werkstoffe überträgt entlang dem Temperaturgefälle grosse Wärmemengen, die sich in der Energieumsetzung nicht beteiligen und in Form von Restwärme abgeleitet werden müssen [1<sup>1</sup>]. Deshalb liegt ihr Wirkungsgrad der Energieumformung niedrig. Man versucht diesen Nachteil mittels der thermoelektrischen Geräte anderer Art — der thermionischen Umwandler — zu vermindern, indem man den Elektronenstrom innerhalb des Geräts nicht über einen festen Werkstoff, sondern über den Vakuum- oder Plasmaraum leitet. Dadurch kann das Temperaturgefälle erhöht, der Wärmeüberschuss begrenzt werden. Weiterhin werden die Grundlagen der thermionischen Energieumwandlung und die Probleme bei der Herstellung dieser Umwandler erörtert.

Les thermocouples, qui sont les plus simples des convertisseurs d'énergie, présentent deux inconvénients: La plupart des semi-conducteurs ne supportent pas des températures très élevées et, du fait de leur bonne conductibilité thermique, les matières solides transmettent, par le gradient de température, de grandes quantités de chaleur qui ne participent pas à la conversion de l'énergie et doivent être évacuées [1] <sup>1</sup>). Leur rendement de conversion d'énergie est donc faible. On cherche à réduire ces inconvénients par des appareils thermo-électriques d'un autre genre: les convertisseurs thermo-ioniques, dans lesquels le courant d'électrons est conduit non pas par une matière solide, mais par les vides ou le plasma. De ce fait, le gradient de température peut être élevé, tandis que le flux de chaleur est limité. L'auteur décrit les principes de la conversion thermo-ionique d'énergie, ainsi que les problèmes que pose la construction de ces convertisseurs.

## 1. Grundlagen

Thermoelektrische Energieumwandler arbeiten grundsätzlich wie konventionelle Wärmekraftanlagen: sie nehmen Wärmeenergie hoher Temperatur auf, verwandeln einen Teil der Wärme entlang dem Temperaturgefälle in elektrische Energie und geben die Restwärme geringerer Temperatur in die Umgebung ab. Sie unterscheiden sich von den herkömmlichen Anlagen dadurch, dass sie die Zwischenphase der mechanischen Arbeit weglassen und ohne bewegliche Bestandteile arbeiten. Dadurch kann die Betriebstemperatur erhöht und der Ausbau der Energieumformer vereinfacht werden.

Wenn man den Leitern Wärmeenergie zuführt, dann fliegen die energiereichsten Elektronen von ihrer heißen Oberfläche in die Umgebung heraus. Dieser Prozess wird thermionische Ausstrahlung genannt [2; 3; 4; 5]; er wurde 1883 von Thomas A. Edison beobachtet und später von Richardson und Dushman erforscht. Die Ausstrahlung von Elektronen ist in Vakuumrohren seit längerer Zeit angewandt worden, da aber sehr hohe Temperaturen erforderlich sind, um einen genügenden Elektronenstrom zu erzielen, wurden Apparate dieser Art noch vor kurzem nicht als Energieerzeuger betrachtet. Weder passende Werkstoffe noch Energiequellen waren dazu verfügbar.

W. Schlichter hat bereits im Jahre 1915 vorgeschlagen, den glühelektrischen Vorgang zur Energieerzeugung auszunutzen, doch war der damals erzielbare Wirkungsgrad allzu niedrig. Die Entwicklung der thermionischen Energieerzeugung ist vor einigen Jahren aufgenommen worden und nimmt allmählich an Bedeutung zu [6]. Obwohl zuerst Wirkungsgrade der Energieumsetzung von nur  $\eta \approx 1\%$  erzielt wurden, ist man inzwischen auf  $\eta = 8\ldots 15\%$  gekommen; es ist möglich, dass in Zukunft der Wirkungsgrad auf etwa 30 % gesteigert werden kann.

In thermionischen Geräten wandern die aus den erhitzten Metallen herausgetretenen Elektronen zum niedrigsten angebotenen Potential, wodurch ein Elektronenfluss, bzw. elektri-

scher Strom, erzielt und Wärmeenergie in elektrische Energie umgesetzt wird. Der Umwandler besteht aus einem Vakuum- oder Plasmabehälter und zwei Elektroden (Fig. 1). Die Emittorelektrode oder Kathode wird durch Energiezufuhr auf hohe Temperatur ( $1400\ldots 2200^{\circ}\text{C}$ ) gebracht und schleudert Elektronen heraus, die von der relativ kühlen ( $\approx 800^{\circ}\text{C}$ ) Kollektorelektrode oder Anode aufgefangen und in die äussere Leitung abgeleitet werden, wonach sie zur Kathode zurückkehren. Die Rückkehr kann nur dann erfolgen, wenn zwischen dem Innern des Kollektors und des Emitters ein Potentialunterschied besteht; dieser Unterschied stellt die Leerlaufspannung des thermionischen Umwandlers dar. Das Gerät ist also einer elektronischen Diode ähnlich, wobei aber der Emitter von einer primären Energiequelle (Brennstoff, Kernenergie o. dgl.) erhitzt wird. Wärme verwandelt sich in elektrische Energie auf gleiche Weise wie in Thermoelementen, wobei die Kathode der heißen und die Anode der kühlen Verbindung der Thermoelemente entspricht. Die festen Halb-

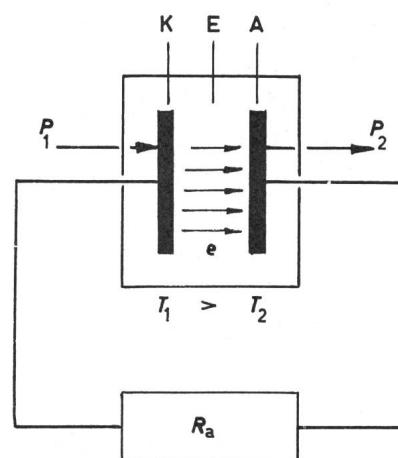


Fig. 1  
Thermionischer Energieumwandler

e Elektronenfluss; A Anode; E Plasma- oder Vakuumraum; K Kathode;  $P_1$ ,  $P_2$ , zugeführte und abgeleitete Wärmeleistung;  $R_a$  äusserer Widerstand;  $T_1$ ,  $T_2$  Elektrodentemperatur

<sup>1</sup>) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

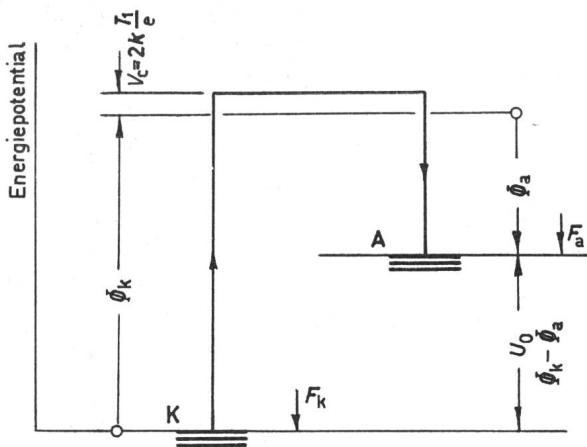


Fig. 2

**Potentialebenen der Elektronen im idealen thermionischen Umformer ohne  
Potentialsperre der Raumladung**

$e$  Elementarladung des Elektrons;  $k$  Boltzmannsche Konstante;  $F_k$  und  $F_a$  Fermi-Ebene der Kathode und Anode;  $U_0$  Ausgangsspannung;  $V_c$  Potential der kinetischen Energie der Elektronen;  $\Phi_k$  und  $\Phi_a$  Austrittspotentiale der Elektroden;  $T$  Temperatur der Kathode

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

leiter sind hier durch den Vakuumraum ersetzt worden, der als ein n-Halbleiter arbeitet. Da der Elektrodenraum ein guter Elektronen- und ein schlechter Wärmeleiter ist, entsteht zwischen den Elektroden ein intensiver Elektronen-, aber nur ein mässiger Wärmefluss. Daher können die Elektroden auf stark unterschiedlichen Temperaturen gehalten werden, und es ist möglich, grosse Temperaturunterschiede ohne übermässige Verluste durch Wärmeleitung auszunutzen. Obgleich auch Wärme zwischen den Elektroden durch Strahlung übertragen wird, ist der Wärmefluss geringer als in Thermoelementen. Die hohen Temperaturen vergrössern die spezifische Leistung und den Wirkungsgrad der Energieumwandlung; sie stellen aber technische Probleme, die vorläufig nur teilweise gelöst werden konnten.

Die Energiepotentiale im thermionischen Wandler sind in Fig. 2 dargestellt [7]. Die Elektronen sind in Elektroden durch elektrostatische Bindungskräfte an das Metall gebunden. Sie können die hoherhitzte Kathode verlassen, wenn sie genügend kinetische Energie erwerben, um die Potentialbarriere der Metalloberfläche zu überwinden und die zum Herausfliegen erforderliche Austrittsarbeit  $\Phi$  (eV) verrichten zu können. Die Entweichungsenergie der Kathode  $\Phi_k$ , auch Arbeitsfunktion (work function) genannt, stellt den Energieinhalt dar, welcher nötig ist, um ein Elektron ausserhalb der Kathode hinauszuschleudern. Die Arbeitsfunktion  $\Phi$  kann entweder in Energieeinheiten (eV) oder in bezug auf die elektrische Ladungseinheit  $e$  in Potentialeinheiten ( $eV/e = V$ ) ausgedrückt werden. Weiterhin wird mit  $\Phi$  das Austrittspotential (V) bezeichnet; es hängt von dem Werkstoff ab und beträgt 2...5 (V). Je niedriger  $\Phi$  ist, um so geringer ist die Temperatur, bei der die Elektronen die Kathode verlassen können. Die in die Umgebung entwichenen Elektronen befinden sich auf einem höheren Potentialniveau als die in der Kathode verbliebenen Elektronen; dieser Potentialunterschied wird zur Erzielung des elektrischen Stromes ausgenutzt. Beim Durchlaufen der Potentialbarriere wird der grösste Teil der kinetischen Energie des Elektrons in elektrische Energie umgesetzt; die Elektronen im Elektrodenraum besitzen daher nur mässige Bewegungsenergie ( $\approx 0,2$  eV), mit der sie zum Kollektor gelangen.

Bei der Elektronenaufnahme von der kühlen Anode entsteht ein Potentialabfall, welcher dem Austrittspotential des Anodenwerkstoffes  $\Phi_a$  entspricht ( $\approx 1,5$  V). Die Anode verschluckt die Elektronen, wobei ein Teil ihrer elektrischen Energie sich wieder in kinetische Energie verwandelt und in Wärme übergeht, die dann mittels Kühlung abgeleitet wird. Um diesen Energieverlust zu vermindern, muss  $\Phi_a$  gering sein und die Anode auf einer mässigen Temperatur gehalten werden. Infolge dieses geringen Potentialabfalls befinden sich die Elektronen innerhalb der Anode auf einer höheren Potentialebene als in der Kathode. Dadurch bleibt ein Potentialüberschuss übrig, der die Elektronen durch die äussere Leitung bewegt und Nutzarbeit verrichtet. Die Potentialdifferenz

$$U = \Phi_k - \Phi_a$$

ist die Leerlaufspannung des Umformers; sie muss nach Möglichkeit vergrössert, die Verluste bei der Elektronenübergabe von der Kathode zur Anode dagegen herabgesetzt werden [8]. Die Leistung und der Wirkungsgrad der thermionischen Wandler werden von der Temperatur der Elektroden, den Elektrodenwerkstoffen und den Energieverlusten im Gerät, vorwiegend von den Strahlungsverlusten, bedingt. Von grosser Bedeutung ist die erreichbare Stromdichte, die gesteigert werden soll, um die Verluste prozentuell niedrig zu halten.

Ein vereinfachtes Diagramm der Elektronenpotentiale im thermionischen Vakuumgerät ist in Fig. 3 gezeigt [9; 10; 11]. Dabei stellt  $V_b$  die Potentialschwelle der Raumladung dar, die von den sich im Elektrodenraum befindlichen Elektronen verursacht wird. Die Raumladung erschwert das Herausfliegen der Elektronen aus der Kathode, weil die Elektronen eine Potentialbarriere von

$$V_k = \Phi_k + V_b$$

überwinden müssen. Der spezifische Elektronenfluss oder die Sättigungsstromdichte beträgt laut der Richardson-Dushman-Gleichung

$$J_s = A_0 T_1^2 e^{-V_{ke}/kT_1} \quad (\text{A/cm}^2)$$

worin

$$A_0 \approx 120 \quad (\text{A/cm}^2 \text{ } 0\text{K}^2)$$

$$T_1 \quad (0\text{K})$$

$$V_k \quad (\text{V})$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \quad (\text{As})$$

$$k = 1,380 \cdot 10^{-23} \quad (\text{J/Grad})$$

Richardson-Konstante

Temperatur des Emitters

Potentialbarriere

Elementarladung des Elektrons

Boltzmann-Konstante

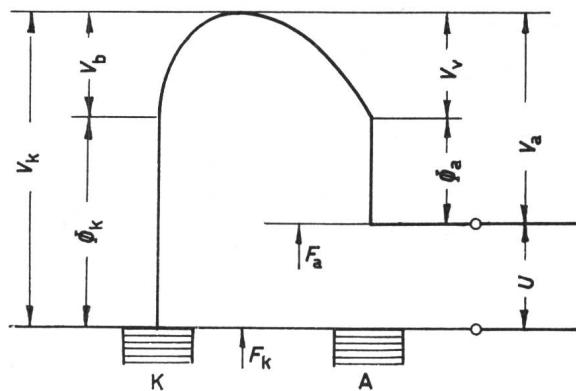


Fig. 3  
**Potentialdiagramm des thermionischen Vakuumperäts**

$F_k$  und  $F_a$  Potentialebenen der Elektroden;  $U$  Nutzpotential;

$V_b$  Raumbarriere;  $V_k$  und  $V_a$  Auf- und Abstieg des Potentials;

$V_v$  Potentialverlust im Elektrodenraum

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

Zur Erzielung hoher Stromdichte muss die Temperatur des Emitters  $T_1$  ( $^0\text{K}$ ) erhöht, die Potentialbarriere

$$V_K = \Phi_K + V_b$$

dagegen herabgesetzt, d. h. für die Kathode Werkstoffe mit mässiger Austrittsarbeit  $\Phi_K$  ausgewählt und der Einfluss der Raumladung  $V_b$  beseitigt werden.

Auch aus der Anode werden Elektronen herausgeschleudert, wodurch der sog. Rückstrom entsteht. Diese Elektronen müssen eine Potentialbarriere von  $V_a = \Phi_a + V_v$  überwinden, wobei  $V_v$  den Potentialabfall im Elektrodenraum bezeichnet. Um den Rückstrom einzuschränken, muss die Anodentemperatur niedrig sein, so dass nur eine geringe Anzahl von Elektronen soviel Energie enthält, dass sie die Potentialbarriere überspringen können.

Wenn die Temperaturdifferenz zwischen der Kathode und der Anode so gross ist, dass der Rückstrom vernachlässigt werden kann, dann wird der Strom allein durch die von der Kathode herausgehende Stromdichte bestimmt. Die Temperatur des Emitters  $T_1$  muss in der Grössenordnung von  $1500...2000\ ^0\text{C}$  liegen, um eine genügende Stromdichte und einen annehmbaren Wirkungsgrad der Energieumsetzung erreichen zu können. Da die Elektronenemission mit der Temperatur rasch zunimmt, sind die thermionischen Geräte typische Energieumwandler hoher Temperatur. Die praktische Grenze der Kathodentemperatur wird von der Hitzebeständigkeit der Werkstoffe bedingt, weil bei allzu hohen  $T_1$ -Werten die Lebensdauer der Elektrode sich durch die Werkstoffverdampfung verkürzt; die Strahlungsverluste nehmen mit der Temperatur ebenfalls rasch zu. Die praktischen Werte der Stromdichte liegen zurzeit bei  $i_s = 10...20$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ), so dass bei einer Ausgangsspannung

$$U = V_K - V_a \approx 1,0$$

die Leistungsdichte  $10...20$   $\text{W}/\text{cm}^2$  beträgt. Man hofft aber, in Zukunft wesentlich höhere spezifische Leistungen erzielen zu können.

Die wichtigsten Probleme bei der Herstellung von thermionischen Energieumwandlern sind:

1. Die Entwicklung von hitzebeständigen Elektroden; 2. Die Beseitigung der von den Elektronen gebildeten Potentialsperre, welche die erreichbare Stromdichte herabsetzt.

Die Potentialbarriere der Raumladung kann durch Veränderung des Elektrodenabstandes (bis 0,03 mm) oder durch Schaffung von positiven Ladungen (Ionen) in dem Elektrodenraum herabgesetzt werden. Die Verringerung des Elektronenabstandes bringt technische Schwierigkeiten mit sich; ausserdem wird die mögliche Leistung und der Wirkungsgrad begrenzt. Bessere Erfolge sind durch die Neutralisierung der Raumladung mittels der positiven Ionen erzielbar; dadurch erhält man Plasmageräte, in welchen die Barriere der Raumladung wesentlich vermindert ist oder vollständig wegfällt [12]. Die positiven Ionen werden in einem Gas erzielt, welches ein niedriges Ionisationspotential aufweist; dazu wird vorwiegend Caesiumgas verwendet, wobei die Caesiumatome sich an der Oberfläche der heissen Kathode, an einer besonderen dritten Elektrode oder im Elektrodenraum durch die Zusammenstösse mit den energiereichen Elektronen ionisieren.

## 2. Wirkungsgrad der Energieumsetzung

Die Wärmeenergie wird in thermionischen Geräten mittels der thermischen Ausstrahlung der Elektronen in elektrische

Energie umgesetzt. Obwohl der Wandler grundsätzlich sehr einfach ist, sind die dabei ablaufenden Prozesse kompliziert, wobei die erzielbaren Ergebnisse von dem Ausbau und der Betriebsweise des Gerätes in hohem Masse beeinflusst werden

Der Wirkungsgrad der thermischen Umwandler wird, ähnlich wie bei den Thermoelementen, durch den Wirkungsgrad des Carnot-Kreisprozesses nach oben begrenzt, da auch hier Wärme bei einem konstanten Temperaturgefälle

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

in elektrische Energie umgesetzt wird. Die praktischen Wirkungsgrade liegen wesentlich niedriger als die theoretischen Werte, da verschiedene, recht erhebliche, Verluste nicht vermeidbar sind; besonders hohe Verluste werden von der Strahlung der Wärme aus der heissen Kathode verursacht. Die Nutzleistung des Wandlers beträgt (s. Fig. 3):

$$P_e = [(\Phi_K + V_b) - (\Phi_a + V_v)] I = (V_K - V_a) I$$

worin  $V_b$  die Raumbarriere,  $V_v$  den Potentialverlust im Elektrodenraum und  $I$  die Stromstärke bedeuten.

Die aufgebrachte Wärmeenergie ist:

$$P_1 = \left( V_K + \frac{2k T_1}{e} \right) I + P_s + P_r$$

Hier ist  $k$  die Boltzmannsche Konstante,  $T_1$  die KathodenTemperatur und  $e$  die Elementarladung des Elektrons. Das erste Glied der Gleichung gibt die Wärmeleistung an, welche zur Emission von Elektronen aufgebracht wird, wobei  $2kT_1/e$  das Potential der kinetischen Energie der Elektronen ausdrückt;  $P_s$  bezeichnet den Leistungsverlust durch die Strahlung und  $P_r$  durch den Ohmschen Widerstand in Zuleitungen.

Wenn man das Glied der kinetischen Energie und  $P_r$  weglässt, dann ist:

$$P_1 \approx V_K I + P_s$$

Der Wirkungsgrad der Energieumformung beträgt dann:

$$\eta = \frac{P_e}{P_1} = \frac{V_K - V_a}{V_K + \frac{P_s}{I}}$$

Der Wirkungsgrad wird also von mehreren Faktoren —  $\Phi_K$ ,  $\Phi_a$ ,  $T_1$ ,  $P_s$  und  $I$  — beeinflusst. Da die spezifischen Strahlungsverluste  $P_s/I$  von der Elektronenausbeute abhängig sind, stellt die erreichbare Stromdichte  $J$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) eine wichtige Einflussgrösse dar. Die erwähnten Faktoren sollen hier einzeln behandelt werden.

*2.1 Das Austrittspotential der Kathode  $\Phi_K$*  beeinflusst die erzielbare Spannung die Elektronenausbeute bzw. die Stromstärke. Je höher  $\Phi_K$  ist, um so schwieriger ist es für die Elektronen aus der Kathode herauszufliegen, wodurch sich die Stromdichte ( $J$ ) vermindert. Ein höheres Austrittspotential ergibt also grössere Ausgangsspannung und geringere Stromdichte. Der Einfluss des  $\Phi_K$  auf den Wirkungsgrad ist komplizierter, weil diese Auswirkung sich je nach den Betriebsverhältnissen verschieden äussert. Bei grösseren  $\Phi_K$ -Werten nimmt der Wirkungsgrad vorerst zu, aber nach dem Erreichen eines Bestwerts beginnt er abzunehmen. Kathoden mit hohen  $\Phi_K$ -Werten benötigen hohe Betriebstemperaturen und müssen sehr hitzebeständig sein. Für  $T_1 = 2000\ ^0\text{K}$  ist das optimale Austrittspotential  $\approx 3,0$  V. Die Hochtemperaturmetalle, wie z. B. W, Ta u. a., weisen aber  $\Phi_K \geq 4$  V auf. Man versucht ihre  $\Phi_K$ -Werte durch Zugabe anderer Werkstoffe (Cs, Ba) zu vermindern; so erhält man folgende Werte [10; 13]:

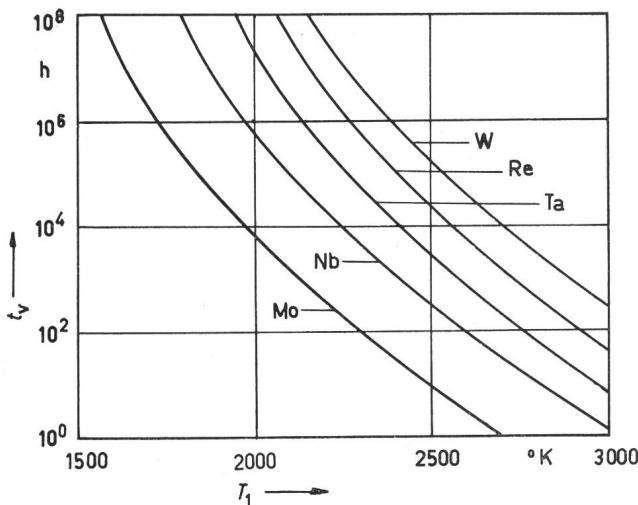


Fig. 4  
Verdampfung von Elektrodenwerkstoffen

Zeitspanne, in der eine 0,1 mm dicke Schicht der Elektrodenoberfläche verdampft  
 $t_v$  Abdampfzeit;  $T_1$  Elektrodentemperatur

Ba auf W  $\Phi_K = 1,70$  V bei  $t_1 = 1000 \dots 1200$  °C  
Cs auf W  $\Phi_K = 1,70$  V bei  $t_1 = 1400 \dots 1600$  °C

Wenn der Elektrodenraum zur Neutralisierung der Raumladung mit Caesiumdampf gefüllt wird, dann bildet sich auf den Elektroden Cs-Niederschlag; durch Veränderung des Dampfdrucks und der Emittertemperatur kann die Menge des Niederschlags beeinflusst und dadurch das optimale Austrittspotential  $\Phi_K$  erreicht werden. Leider fangen einige Werkstoffe zu verdampfen an, bevor die besten  $\eta$ -Werte erreicht werden. Wenn die Kathode mit  $\Phi_K = 2,5$  V bis  $T_1 = 1700$  °K erhitzt wird, dann könnte bei  $\Phi_a = 1,1$  der ideale Wirkungsgrad von  $\eta \approx 0,30$  erreicht werden; die Strahlungsverluste setzen aber die praktischen Werte des Wirkungsgrades erheblich herab.

Die Herstellung der hitzebeständigen Elektroden mit geringen  $\Phi_K$ -Werten ist eine wichtige Aufgabe in der Entwicklung der thermionischen Energieumformer. Die Haltbarkeit der Kathode kann durch das Verhältnis  $K = Q/G$  (As/g) ausgedrückt werden, wobei  $Q$  (As) die emittierte Gesamtladung und  $G$  (g) die verdampfte Materialmenge bedeuten. In einer Gas- oder Dampfatmosphäre verläuft die Abdampfung der Kathode langsamer. Die Erhöhung der Lebensdauer und auch die Möglichkeit, Apparate grosser Leistung zu bauen, werden von der Schaffung geeigneter Werkstoffe abhängig sein (Fig. 4) [14; 15].

Die Emittoren für die Umformer, welche in dem Kernreaktor untergebracht werden sollen, müssen aus Mo oder Nb hergestellt werden, weil die hitzebeständigen Werkstoffe — W und Re — einen grossen Einfangsquerschnitt für die langsame Neutronen aufweisen und die Neutronenbilanz des Reaktors verschlechtern. Dadurch werden die anwendbaren Temperaturen und der Wirkungsgrad der Energieumsetzung begrenzt. Die Mo-Elektroden können zur Verlängerung ihrer Lebensdauer mit einem dünnen Überzug aus einem Metall höherer Haltbarkeit bedeckt werden. Die W- und Re-Elektroden könnten in den schnellen Brutreaktoren verwendet werden. Es ist wahrscheinlich, dass in den Brutreaktoren der zweiten Entwicklungsphase thermoelektrische Umwandler eingebaut werden.

2.2 Beim Eintritt in die Anode «fallen» die Elektronen entlang der Potentialbarriere, und der entsprechende Energieverlust wird in Form von Wärmeenergie abgeleitet. Um den Potentialverlust einzuschränken, müssen die Anoden aus Werkstoffen mit niedrigen  $\Phi_a$ -Werten hergestellt werden. Einige Werkstoffe der Anode sind: Ba0/Sr0 auf Ni ( $\Phi_a \approx 1,0$ ), Cs auf Ag0 ( $\Phi_a = 0,75$ ), Cs auf Wo ( $\Phi_a = 0,71$ ). Der Gegenstrom von Elektronen, der durch die niedrige Austrittsarbeits der Anode gefördert wird, kann durch die Kühlung der Anode verminder werden.

Das Austrittspotential  $\Phi$  der Werkstoffe erhöht sich mit dem Temperaturanstieg. Wenn die Temperaturdifferenz der Elektroden genügend gross ist, können beide Elektroden auch aus gleichem Werkstoff hergestellt werden. Da der Kathodenwerkstoff bei hohen Temperaturen verdampft und sich auf die relativ kühle Anode niederschlägt, ändern sich die Eigenschaften der Anode in diesem Falle nicht, so dass den Elektroden eine längere Lebensdauer gesichert wird.

2.3 Der Einfluss der Temperatur auf den Wirkungsgrad äussert sich durch mehrere Faktoren. Mit steigender Temperatur nimmt die Elektronenemission oder die Stromdichte  $J$  zu, wodurch die spezifische Leistung und der Wirkungsgrad sich verbessern. Gleichzeitig erhöhen sich aber die Strahlungsverluste, welche den Wirkungsgrad nachteilig beeinflussen. Die Strahlungswärme der heissen Kathode, die vorwiegend von der Anode aufgenommen wird, kann annähernd wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{P_s}{F} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \quad (\text{W/cm}^2)$$

wo  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-12}$  (W/cm<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>) die Stephan-Boltzmann-Konstante,  $T_1$  und  $T_2$  (°K) die Temperaturen der Elektroden,  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  die Strahlungskoeffizienten und  $F(\text{cm}^2)$  die Oberfläche der Kathode und der Anode bedeuten. Einige errechnete  $\eta$ -Kurven sind in Fig. 5 angeführt worden, wobei unten die Potentialwerte  $V_K$  angegeben sind, bei denen die angedeuteten Stromdichten  $J$  erzielbar sind [9]. Die besten  $\eta$ -Werte

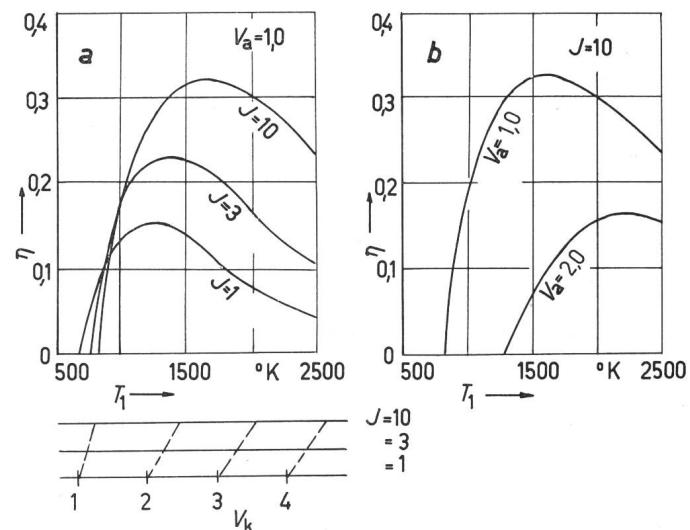


Fig. 5  
Wirkungsgradkurven  
(errechnete Werte)

a bei verschiedener Stromdichte  $J$ ; b bei verschiedener Austrittsarbeits der Anode  
 $V_K$  Potentialanstieg bei der Kathode;  $V_a$  Potentialabfall bei der Anode;  
 $\eta$  Wirkungsgrad  
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1...3

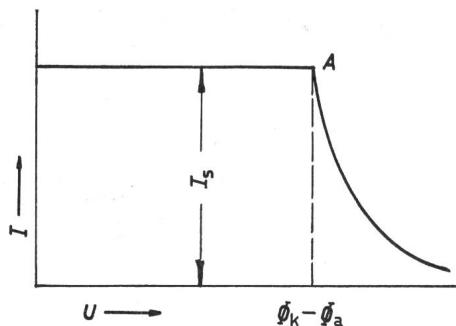


Fig. 6

**Strom-Spannungskennlinie des Vakuum-Apparates**

A Betriebspunkt mit bestem Wirkungsgrad;  $I$  Strom;  $I_s$  Sättigungsstrom;  $U$  Ausgangsspannung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2

können innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs erzielt werden; bei höherer Stromdichte liegt die optimale Temperatur höher, weil die grössere elektrische Leistung den Einfluss der Strahlungsverluste herabsetzt. In Fig. 5b ist der Einfluss des Austrittspotentials der Anode  $\Phi_a$  gezeigt; bei  $t_1 = 1500^{\circ}\text{C}$ ,  $J = 10 \text{ A/cm}^2$  und  $\Phi_a = 1 \text{ V}$  wäre es theoretisch möglich,  $\eta \geq 0,30$  zu erzielen; bei  $\Phi_a = 2$  vermindert sich der  $\eta$ -Wert bis auf  $\approx 0,15$ .

Der sehr hohen Temperaturen wegen spielen die Strahlungsverluste eine wichtige Rolle. Man versucht sie durch Bedecken der Kathode mit einem Rückstrahler zu verringern. Die Strahlung erlaubt es nicht, die Kathodentemperatur allzu hoch zu steigern, wodurch aber die Lebensdauer der Kathode verlängert wird.

**2.4 Die erzielbare Stromdichte** beeinflusst die spezifische Leistung und den Wirkungsgrad der thermionischen Umformer. Man sieht in Fig. 5, dass, je grösser  $J$  ist, desto höher die Wirkungsgradkurven liegen. Die theoretische Stromspannungskennlinie des Vakuumeräts ist in Fig. 6 dargestellt. Der Umformer arbeitet mit bestem Wirkungsgrad, wenn der äussere Widerstand

$$R_a = R_{a0} = \frac{\Phi_k - \Phi_a}{I_s} \quad (\Omega)$$

beträgt, wobei  $I_s$  die Sättigungsstromstärke ist, welche durch die Elektronenemission der Kathode bedingt wird. Bei  $R_a < R_{a0}$  ist  $I \approx I_s = \text{konst}$ , weil der Strom den Sättigungswert  $I_s$  nicht überschreiten kann. In diesem Lastbereich arbeitet das Gerät wie ein Generator unveränderlicher Stromstärke. Bei  $R_a > R_{a0}$  gehen die Stromstärke, die Leistung und der Wirkungsgrad zurück.

Erhebliche Verluste entstehen in Plasma-Geräten auch bei der Elektronenbewegung durch den gasgefüllten Elektrodenraum. Dieser Leistungsbetrag kann aber die Ionisierung des Raumfüllers (Cs-Dämpfe o. a.) hervorrufen, wodurch sich die Stromstärke und die Leistung des Gerätes vergrössern. Das Stromspannungsdiagramm eines Plasmagerätes bei verschiedenen Emittertemperaturen ist in Fig. 7 gezeigt, wobei die Temperatur des Kollektors  $T_2$  optimiert worden ist [15].

**3. Neutralisierung der Raumladung**

Die erzielbare Stromstärke wird von der Raumladung zwischen den Elektroden begrenzt, weil gemäss Gleichung

$$J = A_0 T_1^2 e^{-(\Phi_k + V_b)e/kT_1}$$

die Potentialbarriere  $V_b$  das Herausfliegen der Elektronen verhindert. Dies war schon bei den Elektronenröhren bekannt,

wo man den Elektronenstrom mittels äusserer Spannung und dritter Elektrode regelt.

Die Potentialsperre kann in thermionischen Geräten auf verschiedene Weise herabgesetzt werden [11; 16]:

- a) Der Abstand zwischen den Elektroden wird verkürzt;
- b) Es werden positive Ionen im Elektrodenraum erzeugt;
- c) Die Elektronen werden mittels eines elektrischen oder magnetischen Feldes bewegt.

Falls der Abstand zwischen den Elektroden kleiner als die freie Weglänge der Elektronen im Elektrodenraum gehalten wird, dann können die meisten aus dem Emitter herausgetretenen Elektronen die Anode ohne gaskinetische Stöße und merkbaren Potentialverlust erreichen. Dies erfordert hohe Emittertemperaturen ( $\approx 2000^{\circ}\text{K}$ ), weil sonst die freie Weglänge der Elektronen allzu kurz ist. Die Einhaltung sehr kleiner Elektrodenabstände ( $\approx 0,05 \text{ mm}$ ) ist aber fertigungstechnisch schwierig, wobei es kaum möglich ist, einen hohen Temperaturunterschied zwischen den Elektroden aufrechtzuerhalten. Die zurzeit wirksamste Massnahme zur Beseitigung der Potentialbarriere ist deshalb die Neutralisierung der negativen Raumladung mittels positiver Ionen. Dann entsteht im Elektrodenraum neutrales Plasma, welches aus Elektronen, positiven Ionen und neutralen Atomen besteht; es weist eine hohe elektrische, aber nur geringe Wärmeleitfähigkeit auf. Da Ionen infolge ihrer grösseren Masse sich im elektrischen Felde langsamer als Elektronen bewegen, wird zur Neutralisierung eines Elektronenfluxes von  $i_e$  ein Ionenflux von nur

$$i_i = i_e \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$$

benötigt, wobei  $m_e$  und  $m_i$  die Massen der Elektronen bzw. Ionen bedeuten.

Ein günstiger Ionenlieferer ist Caesium, das sich an heißen Metallocberflächen ionisiert, wenn die Austrittsarbeit der Werkstoffe grösser als die Ionisierungsarbeit von Caesium (3,9 V) ist. Beim Caesiumdampf ist

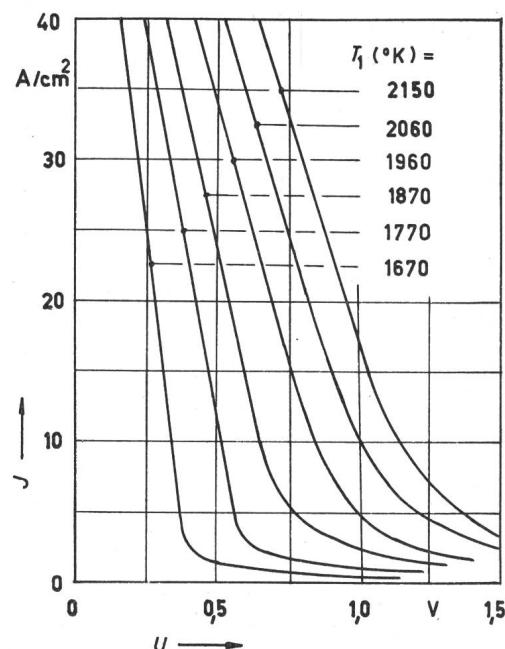


Fig. 7  
**Strom-Spannungskennlinien einer Plasma-Diode**

*Elektrodenwerkstoffe:* Kathode: W, Anode: Nb,  
*J* Stromdichte;  $T_1$  Temperatur der Kathode;  $U$  Ausgangsspannung

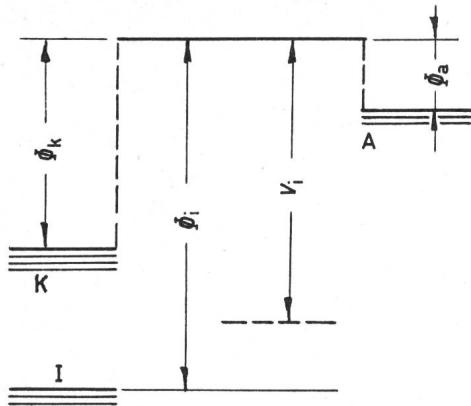


Fig. 8

**Theoretische Potentialebenen in der Plasma-Triode**

I Ionisationselektrode;  $V_i$  Potential der Kontaktionisation;  $\phi_i$  Austrittspotential der Ionisationselektrode

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

$$i_i = i_e \sqrt{\frac{0,000\ 55}{132,9}} = \frac{i_e}{500}$$

weshalb die Anzahl der benötigten Ionen so gering ist, dass sie den Nettostrom nur unwesentlich vermindern. Der Cs-Druck muss so hoch gehalten werden, dass die Ionenausbeute ungefähr  $I_i = I_s/500$  beträgt, wobei  $I_s$  den Sättigungsstrom bedeutet. Bei einem höheren Druck nimmt der innere Widerstand und der Potentialverlust im Plasmaraum zu.

Der Elektrodenraum der meisten zurzeit betriebenen thermionischen Geräte ist mit Caesiumdampf gefüllt, wodurch nicht bloss die Potentialbarriere beseitigt, sondern auch das Austrittspotential der Elektroden geregelt werden kann. Die relativ kühle Anode absorbiert die Cs-Atome, wonach ihre Arbeitsfunktion  $\phi_a$  sich vermindert. Bei genügendem Dampfdruck bilden sich die Cs-Niederschläge auch auf dem heißen Emitter; dadurch kann  $\phi_K$  von  $\approx 4,5$  V bis zu einem Bestwert von  $\phi_K = 2,5 \dots 3,0$  V gebracht werden. Die mit Cs bedeckten Emittoren weisen eine lange Lebensdauer auf und geben einen ziemlich unveränderlichen Elektronenstrom innerhalb weiter Temperaturgrenzen ab. Das Erreichen der optimalen  $\phi$ -Werte erfordert aber einen erheblich höheren Cs-Dampfdruck ( $3 \dots 10$  Torr) als die Neutralisierung der Raumladung. Die Steigerung des Dampfdrucks erhöht die Elektronenemission, bzw. die Stromstärke, vermindert dagegen die Ausgangsspannung, wobei auch der Spannungsabfall innerhalb des Elektrodenraums infolge der Elektronenstreuung sich vergrößert; deshalb muss der Elektrodenabstand kurz gehalten werden ( $< 1,0$  mm).

Die Ionen können durch die Kontakt- oder Raumionisierung wie auch durch  $\gamma$ -Strahlung ermittelt werden.

Im ersten Fall kann man zur Ionisierung die erhitzte Oberfläche eines Metalls, welches eine hohe Austrittsarbeit aufweist, verwenden. Das Metall verschluckt die Elektronen des ionisierten Gases, wodurch im Elektrodenraum positive Ionen verbleiben. Auch die heiße Kathode kann positive Ionen erzeugen, wenn ihr  $\phi_K$ -Wert die Ionisationsenergie des Gases übertrifft. Bei den Wolfram- und Tantalemittoren, deren Austrittspotential rd. 4,0 V beträgt, tritt die Kontaktionisation des Caesiums am Emitter ein. Kathoden mit so hohen  $\phi_K$ -Werten müssen aber auf einer sehr hohen Temperaturebene gehalten werden, wodurch ihre Lebensdauer sich verkürzt und die Strahlungsverluste sich vergrößern. Wenn die Kathode einen

mässigen  $\phi_K$ -Wert aufweist, dann wird im Elektrodenbehälter ein besonderer Ionenerzeuger, d. h. eine dritte Elektrode untergebracht. Dadurch verwandelt sich die Diode in eine Triode, wobei man mittels der Hilfselektrode die Ionenkonzentration steuern und dadurch besser beherrschen kann. Die Potentialverhältnisse bei dieser Anordnung sind in Fig. 8 dargestellt. Da die dritte Elektrode keine Elektronen liefern muss, kann sie auf einem niedrigeren Temperaturniveau als die Kathode gehalten werden. Die Kathode muss in diesem Falle wegen der Abwesenheit der Raumbarriere keine allzu hohe Austrittsarbeit verrichten, und wenn ihr Austrittspotential kleiner als das Cs-Ionisierungspotential ist, dann kann sie Caesiumdämpfe nicht ionisieren. Die negativen und positiven Ladungsträger diffundieren im Elektrodenraum miteinander und bilden synthetisches Plasma; Umformer dieser Art werden Plasmaapparate genannt. Die Triode erlaubt es, auch Wechselstrom zu erzeugen, indem man die Ionenausbeute periodisch verändert; dies kann mit einer auf die Hilfselektrode geführten Steuerspannung erzielt werden [8].

Bei Emittertemperaturen  $T_1 < 2000$  °K werden in Dioden Caesiumione nur teilweise durch Kontakt-, vorwiegend dagegen durch Raumionisierung erzielt. Die Potentialverteilung innerhalb des Elektrodenraums bei dieser Betriebsweise (englisch «ignited mode») zeigt Fig. 9. Im Elektrodenraum entsteht durch Anhäufung von positiven Ionen eine Potentialsenke  $V_e$ , welche die Elektronen beschleunigt und ihnen so viel kinetische Energie erteilt, dass sie in Zusammenstössen mit den im Raum vorhandenen Cs-Atomen Ionen erzeugen. Der Preis für die Raumionisierung ist der Potentialabfall zwischen den Elektroden  $V_v$ . Elektrodenwerkstoffe, welche Cs-Dämpfe gut absorbieren, ermöglichen es, mit niedrigen Dampfdrücken zu arbeiten und diesen Potentialverlust  $V_v$  zu verringern. Dadurch kann auch der Elektrodenabstand vergrössert und die technischen Schwierigkeiten in der Herstellung von Geräten erleichtert werden. Ein anderer Weg ist, das Austrittspotential der Anode  $\phi_a$  zu verringern; gute Ergebnisse sind dabei mit Ni-Anoden erzielt worden, wenn sie mit einem dünnen Cs-Niederschlag bedeckt sind. Ähnliche Erfolge können mit einem Bariumzusatz erreicht werden, wobei Ba einen geringeren elektrischen Widerstand als Cs besitzt. Da Barium eine hohe Ionisierungsarbeit aufweist, wird zur Ionenerzeugung Cs-Dampf benötigt, doch reicht hier ein geringerer Dampfdruck aus, weshalb die Plasmaverluste niedriger als in einer reinen Caesiumdiode sind.

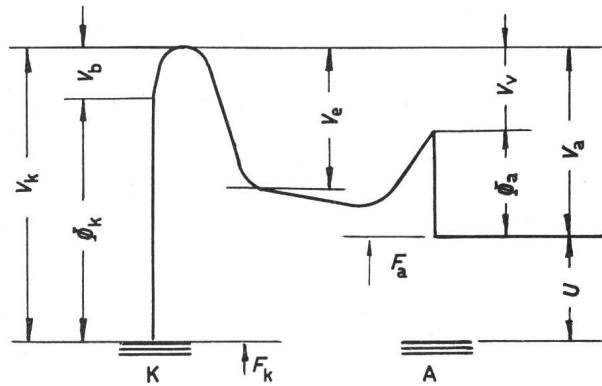


Fig. 9

**Potentialdiagramm der Plasma-Diode**

$U$  Ausgangsspannung;  $V_b$  Potentialbarriere am Emitter;  $V_e$  Potentialsenke;  $V_v$  Potentialverlust im Plasmaraum

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2 und 3

Die Caesiumdämpfe verbessern die Ergebnisse der thermionischen Apparate auf verschiedene Weise:

- Sie erlauben es, eine höhere Stromdichte  $J$  bei mässiger Kathodentemperatur zu erreichen;
- Das Austrittspotential der Kathode wird durch die Caesiumniederschläge herabgesetzt (von 4,5 V auf 2,5...3,0 V), wodurch die Betriebstemperatur vermindert werden kann;
- Die Caesiumniederschläge vermindern auch das Austrittspotential der relativ kühlen Anode  $\Phi_a$ , weshalb der innere Potentialverlust des Elementes zurückgeht.

Als Nachteile der Caesiumdämpfe müssen folgende Erscheinungen angeführt werden:

- Sie sind chemisch aggressiv und verursachen Korrosionen;
- Eine Erhöhung der Ausgangsspannung ( $V_K - V_a$ ) durch Auswahl der Anodenwerkstoffe mit geringen  $\Phi_a$ -Werten ist nur begrenzt möglich, weil das auf der Anode kondensierte Caesium ihre Austrittsarbeit bestimmt.

Man kann den Elektrodenraum auch mit Edelgasen füllen, die einen geringen elektrischen Widerstand aufweisen. Da aber diese Gase eine hohe Ionisierungsarbeit verrichten, müssen die Ionen in einer Hilfsentladung erzeugt werden. Die Austrittsarbeit der Elektroden wird von den Edelgasen nicht beeinflusst, weshalb für die Kathode Werkstoffe mit geringem Austrittspotential ausgewählt werden müssen. Da die betreffenden Werkstoffe hohen Temperaturen nicht standhalten können ( $T_1 \leq 1700 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ), muss auch die Anode niedrige  $\Phi_a$ -Werte aufweisen. Die Niederschläge des Emitterwerkstoffes auf dem Kollektor vermindern die Ausgangsspannung, besonders weil zwischen den Elektroden ein verhältnismässig geringer Temperaturunterschied herrscht. Versuche mit edelgasgefüllten Umformern werden fortgesetzt.

Wenn die Wärmeenergie aus Kernreaktoren stammt, dann kann Gasplasma mittels der Ionisierungswirkung der  $\gamma$ -Strahlung von kernenergetischen Vorgängen erzielt werden.

#### 4. Anwendung von thermionischen Umformern

Das Anwendungsgebiet jeder Energieanlage wird durch ihre energetischen, technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften bedingt. Die Aussichten der thermoelektrischen Geräte hängen von den erreichbaren Leistungen, dem Wirkungsgrad, der Betriebssicherheit und nicht zuletzt von den Kosten ab. Da thermionische Apparate Energieumformer von hohen Temperaturen sind, werden die grössten Schwierigkeiten von den Betriebsbedingungen der Kathode verursacht. Bei der Ausnutzung von Brennstoffwärme muss der Kathodenwerkstoff Temperaturen von  $\geq 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bei der Anwesenheit von Sauerstoff und Verbrennungsprodukten standhalten. Die Erfolge hängen hier von den metallurgischen Errungenschaften ab, wobei es vorteilhaft ist, die Kathodentemperatur innerhalb mässiger Grenzen zu halten. Genügende Werte der spezifischen Leistung und des Wirkungsgrades können aber nur bei der Kathodentemperatur von

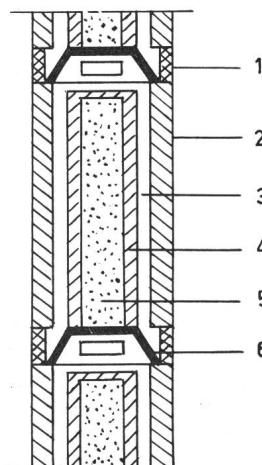


Fig. 10  
Thermionische Elemente im Kernreaktor  
(in Serie geschaltet)  
1 keramische Isolation; 2 Anode;  
3 Caesiumraum; 4 Kathode; 5 Energieträger (Uranverbindungen); 6 Zwischen-

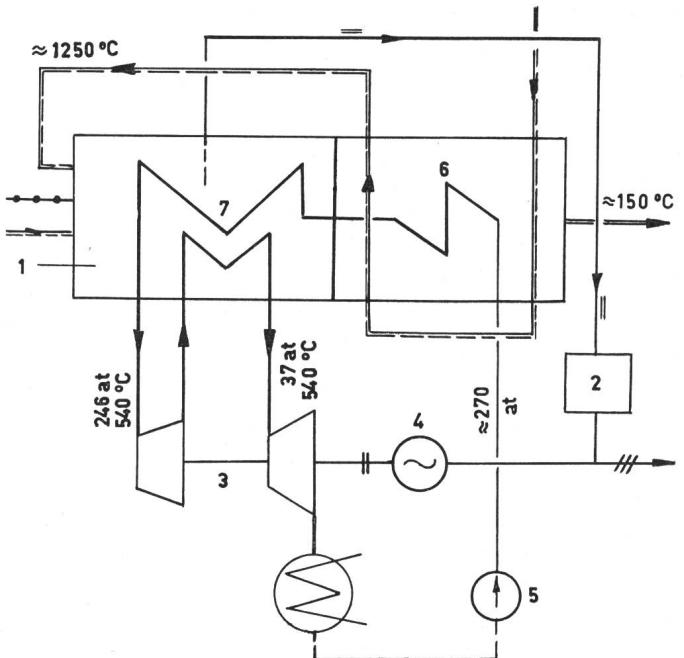


Fig. 11  
Thermionische Vorschaltanlage im Brennstoffkraftwerk

— Dampf    —— Luft    —— Abgase  
1 Feuerraum mit thermionischen Elementen; 2 elektrischer Umformer;  
3 Dampfturbine; 4 Drehstromgenerator; 5 Speisepumpe; 6 Verdampfer und Luftheritzer

$> 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  erzielt werden. Typische Betriebsangaben einer Caesiumdiode sind [14]:

Temperatur der Kathode	$T_1$	= 1800...2100 $\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatur der Anode	$T_2$	= 900...1200 $\text{ }^{\circ}\text{K}$
Ausgangsspannung	$U$	= 0,5...1,0 V
Leistungsdichte	$P_e/F$	= 10...20 W/cm <sup>2</sup>
Leistung	$P_e$	= 200...300 W
Wirkungsgrad	$\eta$	= 0,15...0,20
Lebensdauer		≈ 1 Jahr

Für grössere Leistungen werden mehrere Dioden in Serie geschaltet, wodurch sich auch die Ausgangsspannung des Apparats erhöht.

Die thermionischen Anlagen können grundsätzlich jede Wärmequelle hoher Temperatur ausnutzen. Da sie aber auf eine konzentrierte Energiequelle angewiesen sind, um die Kathode auf eine hohe Temperatur zu bringen, sind sie zur Verwertung von Kernenergie besonders geeignet. Dabei kann die Kathode den Kernenergieträger umhüllen, so dass sie gleichzeitig als Energieträger und Energieumwandler dient. Die energieliefernden Kathoden, bestehend aus UO<sub>2</sub>, UC, UC<sub>2</sub> u. a., mit einer Wolframhülle, sind für Temperaturen bis 1800  $\text{ }^{\circ}\text{C}$  anwendbar. Umformer dieser Art sind für besondere Zwecke, z. B. für Raumschiffe, geeignet, doch ist ihre Anwendung auch in Kernkraftwerken zu erwarten. Die Anordnung des thermionischen Umformers für Kernenergie ist in Fig. 10 schematisch dargestellt. Der Kernenergieträger befindet sich innerhalb einer zylindrischen Kathode, die von der gekühlten Anode umgeben ist. Mehrere Elemente können hintereinander angeordnet und zur Spannungserhöhung in Serie geschaltet werden. Sie bilden dann einen Brennstoffstab des Reaktors, wobei jeder Stab ein gemeinsames Caesiumgefäß besitzt.

Das Temperaturniveau der thermionischen Anlagen liegt so hoch, dass die Restwärme von der Anode bei  $\geq 500^{\circ}\text{C}$  abgeleitet wird. Deshalb sind die thermionischen Umwandler zur Vorschaltstufe eines gekuppelten Energieerzeugers brauchbar, wobei die Restwärme in einer nachgeschalteten herkömmlichen Wärmekraftanlage verwertet wird. Durch die stufenweise Ausnutzung der Wärmeenergie könnte der Wirkungsgrad der Energieumsetzung Zahlenwerte von  $\eta = 0,50$  erreichen. Wenn z. B. der thermionische Umwandler 20 % der Kernenergie in elektrische Energie umsetzen würde und die Restwärme in der Dampfkraftanlage mit  $\eta_2 = 0,35$  ausgenutzt wäre, dann würde der gesamte Wirkungsgrad  $\eta = 0,20 + 0,80 \cdot 0,35 = 0,48$  betragen. Bei einem Wirkungsgrad der thermionischen Geräte von  $\eta_1 = 0,30$  könnten sie auch allein, ohne Nachschaltanlagen, zur Energieerzeugung dienen, wodurch sich die Ausrüstung vereinfachen würde. Dies wäre bei Kleinanlagen vorteilhaft, weil der Wirkungsgrad der thermoelektrischen Wandler von ihrer Leistung nur unwesentlich beeinflusst wird.

Zur Ausnutzung der Kernenergie können die thermionischen Umformer entweder im Reaktorkern oder ausserhalb des Reaktors, im primären Kreislauf des Wärmevertretlers (Gas, flüssige Metalle), untergebracht werden [17; 18].

Die Anordnung des thermionischen Umformers im Reaktorkern kann eine kompakte Bauweise und einen guten Wirkungsgrad der Energieumsetzung ergeben, weil es möglich wird, hohe Temperaturen der Kathode zu erzielen. Der Ausbau des Reaktorkerns wird aber komplizierter, wobei die zusätzlichen thermoelektrischen Werkstoffe den Verlauf der Kernreaktionen nachteilig beeinflussen. Der hohen Wärmeleistungsdichte wegen ( $\approx 50 \text{ W/cm}^2$ ) muss der Energieträger eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, um die Schmelztemperatur innerhalb der Brennstoffstäbe nicht zu übersteigen. Die Wärmeableitung kann entweder durch metallische Zusätze (Mo o. a.) oder durch Aufteilung des Energieträgers in mehrere dünne Stäbe gefördert werden. Die Kompliziertheit der Anlage muss durch die erzielbare Wirkungsgradverbesserung gerechtfertigt werden. Die thermionische Energieumwandlung soll daher mit einem Wirkungsgrad von mindestens 0,10...0,15 erfolgen. Die innerhalb des Reaktors untergebrach-

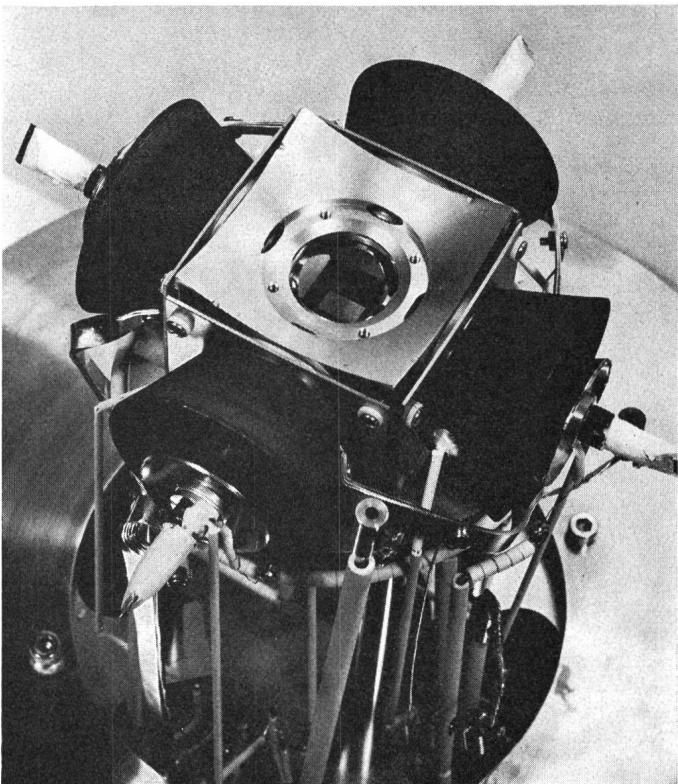


Fig. 13  
Anordnung von vier Umwandlern um eine gemeinsame Energiequelle

ten thermionischen Elemente müssen eine hohe Betriebssicherheit aufweisen, weil ihre Auswechselung umständlich ist. Versuche mit thermionischen Elementen kleiner Leistung werden in Kernreaktoren durchgeführt; die Geräte haben aber nur kurze Zeit gearbeitet, und da die Beanspruchung der Werkstoffe hoch ist, sind hier noch manche werktechnische, konstruktive und betriebliche Probleme zu lösen.

Wenn der thermionische Umformer in den Kühlmittelkreis des Reaktors eingeschlossen wird, stellt er gleichzeitig den Wärmeaustauscher dar, wobei die Restwärme der Anode mittels eines zweiten Kreislaufs in einer nachgeschalteten Kraftmaschine verwertet werden kann. Bei dieser Schaltung werden die kernenergetischen Prozesse nicht beeinträchtigt. Es ist jedoch nicht möglich, so hohe Temperaturgefälle als im ersten Falle zu verwerten. Erhebliche Wärmeverluste sind nicht vermeidbar. Da die thermionischen Umwandler sehr hohe Temperaturen benötigen, ist es schwierig, Kernreaktoren für solche Temperaturen herzustellen. Das Temperaturniveau kann gesenkt werden, wenn man Elektroden mit niedrigem Austrittspotential benutzt. Im primären Kreis könnten flüssige Metalle als Wärmevertreter dienen. Man erwägt, zum Wärmetransport auch Wärmerohre (heat pipes) anzuwenden, in denen zur Wärmeübertragung die Verdampfung und Konensation eines Wärmevertretlers ausgenutzt wird [19].

Man beabsichtigt, die thermionischen Umwandler auch als eine Vorschaltstufe in brennstoffgefeuerten Dampfkraftwerken anzuwenden (Fig. 11) [20]. Der Dampf für die nachgeschaltete Dampfturbine kann mit Abgasen des thermionischen Blocks erzeugt werden. Die thermionischen Elemente müssen aus hitzebeständigen Emittoren (W mit Silizium-Karbid-Überzug) und dampfgekühlten Kollektoren bestehen; sie könnten ungefähr 20 % der gesamten elektrischen Leistung der Kraftanlage

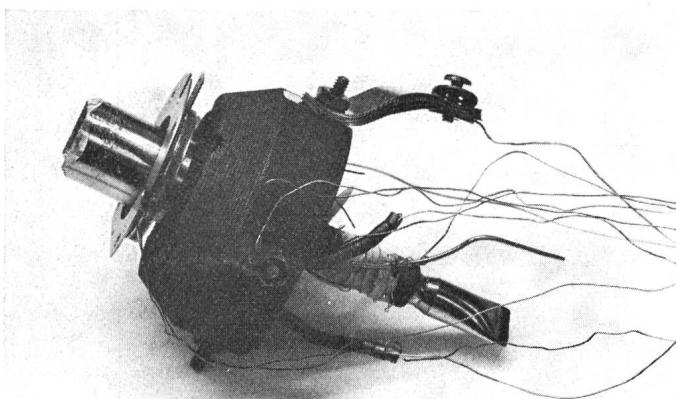


Fig. 12

#### Elektrodengehäuse eines thermionischen Umwandlers

Emitter und Kollektor befinden sich in der links gerichteten Spitze; der konische Körper ist Wärmeableiter, während der Caesiumbehälter aus der rechten Seite herausragt

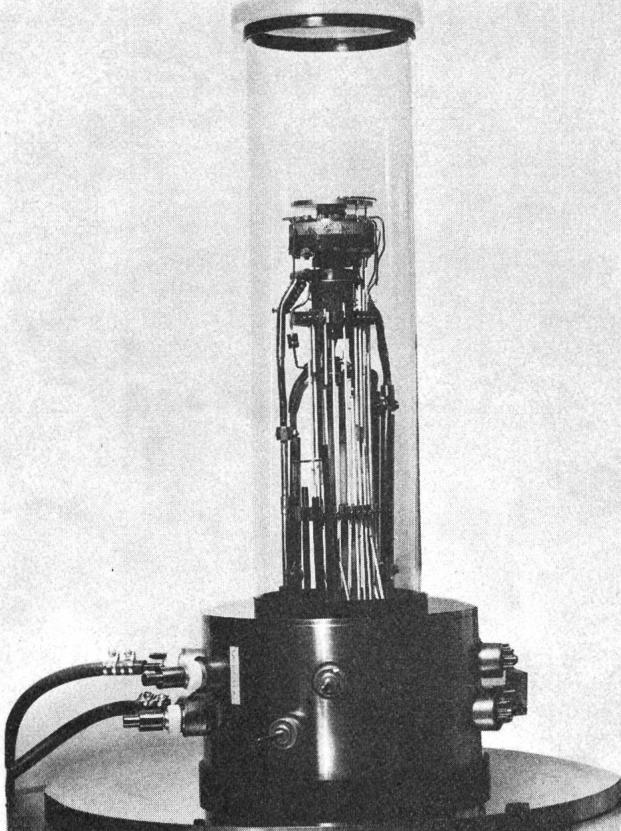


Fig. 14  
**Zusammengebautes thermionisches Versuchsgerät**  
Der Elektrodenraum befindet sich an der Spitze des Gerätes

abgeben. Im Auftrag der Kohlenforschungsabteilung des amerikanischen Ministeriums des Innern werden Probleme der thermionischen Vorschaltanlagen für Kraftwerke mit Leistungen bis 1000 MW untersucht. Man erwägt, eine 10-kW-Versuchsanlage zu bauen und nachher die thermionische Ausstattung in einem bestehenden Dampfkraftwerk unterzubringen, um ihre Tauglichkeit in grossem Maßstab zu prüfen. Es wird geplant, die thermionischen Dioden in Blöcken zusammenzubauen und in Feuerraumwänden anzutragen. Man hofft, den thermischen Wirkungsgrad der Kraftanlagen dadurch bis auf 50 % bringen zu können.

Vorläufig kommen die thermionischen Apparate meistens als Energieerzeuger für besondere Zwecke, z. B. für Raumschiffe u. a., in Frage; in Raumfahrzeugen bieten sie ein günstiges Leistungsgewicht ( $\leq 1 \text{ kg/kW}$ ) und können entweder Kern- oder Strahlungsenergie der Sonne ausnutzen. Fig. 12 zeigt das Elektrodengehäuse eines thermionischen Geräts mit konkavem Emittor. Fig. 13 veranschaulicht die Anordnung von vier solchen Geräten um einen gemeinsamen Brennpunkt, in welchem die Energiequelle (radioaktives Isotop, konzentrierte Sonnenenergie) untergebracht wird und die herumliegenden Emittoren erhitzt. Ein anderer zusammengebauter Umformer ist aus Fig. 14 ersichtlich.

Versuche mit thermionischen Umformern sind im Bereich kleiner Leistungen (100...1000 W) durchgeführt worden. Die erreichten Werte der Leistungsdichte von 10...20 W/cm<sup>2</sup> und des Wirkungsgrades ( $\approx 15 \%$ ) sind noch zu gering, um mit der konventionellen Ausrüstung der Wärmekraftanlagen wett-

eifern zu können. Theoretisch ist es möglich,  $\eta = 0,30$  bei einer spezifischen Leistung von  $\geq 40 \text{ W/cm}^2$  zu erreichen, doch muss man dabei eine kurze Lebensdauer der Kathode in Kauf nehmen. Es ist schwierig, Geräte mit genügend grossen Wirkungsgrad und ausreichender Lebensdauer zu bauen, weil die thermische Beanspruchung der Werkstoffe sehr gross ist. Forschungsarbeiten werden mit verschiedenen Typen der thermionischen Elemente — Dioden, Trioden, Edelgaselementen u. a. — durchgeführt. Weitere Versuche sind dahin gerichtet, die Austrittsarbeit der Kathode zu verringern und die Leistungsfähigkeit des Plasmas zu verbessern. Man hofft, durch Zugabe von Edelgasen im Elektrodenraum das Temperaturniveau zu verringern und die Leistungsdichte zu steigern.

Nach einer gewissen Entwicklungsperiode werden die thermionischen Umformer voraussichtlich in Kupplung mit nachgeschalteten herkömmlichen Wärmekraftanlagen auch zur Energieerzeugung in grossen Anlagen eingesetzt werden. Zurzeit mangelt es noch an praktischen Erfahrungen mit Generatoren grosser Leistung. Auf eine grosstechnische Anwendung von Anlagen dieser Art muss noch gewartet werden. Erfolge hierbei hängen von der Lösung der Werkstoffprobleme ab; dies kann ein breiteres Anwendungsfeld für die thermionischen Energieumformer eröffnen.

### Literatur

- [1] A. Kroms: Thermoelektrische Energieumformer. Bull. SEV 59(1968)20, S. 953...963.
- [2] E. U. Condon and H. Odishaw: Handbook of physics. New York, McGraw-Hill, 1958.
- [3] J. Kaye and J. A. Welsh: Direct conversion of heat to electricity. New York, London, John Wiley, 1960.
- [4] H. M. Ogle: Direct conversion. Power Engineering 65(1961)1, p. 57...66.
- [5] R. E. Henderson: Energetics 7: The comprehensive view. Mechanical Engineering 88(1966)12, p. 34...40.
- [6] I. Fells: Electricity from heat. International Science and Technology —(1962)3, p. 15...27.
- [7] B. S. Leo: The thermionic energy converter — a promising heat engine. Power Engineering 65(1961)5, p. 49...51.
- [8] J. Kramář: Probleme der thermoionischen Umwandlung der Wärmeenergie in elektrische Energie. Energietechnik 13(1963)10, S. 474...477.
- [9] C. V. Wilson: The thermionic converter. ASME-paper 59-SA-23. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1959.
- [10] K. G. Hernquist: Thermionic converters. Nucleonics 17(1969)7, p. 49...53.
- [11] J. M. Houston: Energetics 4: Thermionic power. Mechanical Engineering 88(1966)9, p. 56...59.
- [12] L. Rothhardt: Plasmaphysikalische Methoden moderner Energieumwandlung. Die Technik 17(1962)9, S. 624...629.
- [13] Four advanced power generators pose hot materials problems. Materials in Design Engineering 51(1960)6, p. 134...138.
- [14] R. Langpap: Direkte Umwandlung von Kernenergie in elektrische Energie mit Thermionic-Elementen. Wärme 72(1965)1, S. 1...9.
- [15] D. G. Fink and J. H. Carroll: Standard handbook for electrical engineers. 10th edition, New York, McGraw-Hill, 1968.
- [16] G. W. Wilson: Energy conversion processes. A progress report on developments in three methods: thermoelectric, thermionic, photovoltaic. Machine Design 32(1960)17, p. 189...192.
- [17] K. Meyer: Methoden zur direkten Umwandlung der Kernspaltungsenergie in Elektroenergie. Energietechnik 12(1962)11, S. 496...503.
- [18] R. C. Howard: Thermionic topping for nuclear plant seen. Electr. Wld. 158(1962)4, p. 38...40.
- [19] K. T. Feldman and G. Whiting: The heat pipe. Mechanical Engineering 89(1967)2, p. 30...33.
- [20] J. F. Engelberger: When diodes and a conventional steam cycle are combined: Thermionic topping may yield substantial savings. Power 111(1967)11, p. 86...87.
- [21] L. W. Perry: Application potentials for thermoelectrics and thermionics. Machine Design 36(1964)4, p. 196...200.

### Adresse des Autors:

A. Kroms, 30 Rockland Avenue, Malden, Mass. 02148, USA.