Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

Band: 40 (1967)

Heft: 1

Rubrik: Funk und Draht

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: 14.07.2025

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

Funk und Draht

Beilage zum «Pionier» zur technischen Ausbildung der Übermittlungstruppen

Neuartige Stromversorgungsquellen

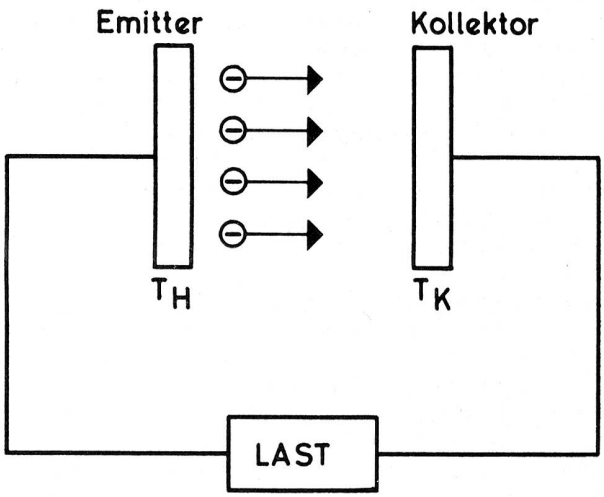
621.311.29

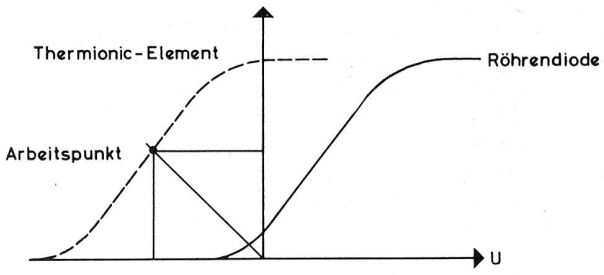
1. Allgemeines

Üblicherweise erhält man die elektrische Energie aus der chemischen Energie der Brennstoffe, wobei die Stufen der Wärmeenergie und der mechanischen Energie durchlaufen werden müssen. Diese Tatsache ist mit Energieverlusten verbunden, wobei die Umwandlung der Wärme, die durch den Carnot-Wirkungsgrad $\eta_c = T_H — T_K/T_H$ begrenzt ist, besonders ungünstig verläuft. Daher waren schon frühzeitig Bestrebungen im Gange, hier Verbesserungen zu erreichen.
Einerseits versuchte man in thermoionischen und thermoelektrischen Generatoren die Wärme und andererseits mittels elektrochemischer Brennstoffzellen sogar die chemische Energie der Brennstoffe direkt in Elektrizität umzuwandeln.
Wenn die Entwicklung dieser Geräte zunächst auch unternommen wurde, um auf wirtschaftlichere Weise Elektrizität zu erzeugen, zeigte sich doch bald, dass sich diese Energiequellen durch interessante technische Eigenschaften zusätzlich auszeichnen. Es sind dies die kompakte Bauweise, die Geräuscharmut, der Fortfall bewegter Teile, die gute Überlastbarkeit usw. Diese Eigenschaften sind bereits von den Akkumulatoren her bekannt und es sollen im folgenden diese verschiedenen Energieerzeugungsquellen, sowie auch die Motor-Generator-Aggregate miteinander verglichen werden.
Darüber hinaus wird auch die Solarzelle mit in die Betrachtungen einbezogen, da auch in ihr eine direkte Energieumwandlung (Strahlung in elektrische Energie) stattfindet und auch die Eigenschaften der Solarzelle denen der anderen Systeme ähnlich sind.
Dass diese neuen Energiequellen in der letzten Zeit so grosse Fortschritte in der Entwicklung gemacht haben, liegt hauptsächlich an der in den letzten Jahrzehnten intensiv durchgeführten Materialforschung und den dabei erhaltenen Erkenntnissen.

2. Direkte Umwandlung von Wärme in elektrische Energie

Wendet man sich als erstes der Umwandlung der Wärmeenergie zu, so kann man feststellen, dass die Sonnenenergie, die Kernenergie und die Verbrennung chemischer Stoffe als Wärmequellen ausgenutzt werden können.
Dies lässt sich erfolgreich mit dem thermoionischen Generator bewerkstelligen, in dem der Effekt der Glühemission von Elektronen aus Metallen ausgenutzt wird. Die Anwendung dieses Effektes ist bereits von der Elektronenröhre her bekannt und man wird daher einen grundsätzlich ähnlichen Aufbau auch bei thermoionischen Generatoren wählen. Ein thermoionischer Generator oder ein Thermionic-Element ist demnach eine Diode mit einer Kathode (Emitter), der die Wärmeenergie zugeführt wird, und einer kälteren Anode (Kollektor). Beide Elektroden sind über einen Lastwiderstand miteinander verbunden (Fig. 1).
Die Bedingungen, die die Anode und die Kathode zu erfüllen haben, ergeben sich aus einer Betrachtung der Strom/Spannungs-Charakteristik einer Röhrendiode (Fig. 2), die sich beim Anlegen einer äusseren Spannung ergibt. Will man diese Kennlinie zur Energieerzeugung ausnutzen, so muss man offensichtlich dafür sorgen, dass die notwendige Spannung in der Diode selbst erzeugt wird, d. h. die Kennlinie muss nach links verschoben werden. Wie dies zu erreichen ist, lässt sich übersichtlich anhand eines Energieschemas erläutern (Fig. 3). Die Elektronen im Innern des Emitters haben ein bestimmtes Potential. Sie werden thermisch angeregt und können nach Überwindung der Austrittsarbeit Φ_E aus dem Emitter austreten. Sie haben dann die potentielle Energie $e.\Phi_E$ und eine geringe kinetische Energie $2\,kT_E$. Das Elektron gelangt dann mit einer mittleren Geschwindigkeit von 10^7 cm/sec zum Kollektor. Damit das Elektron in diesen eintreten kann, muss es die Kollektor-Austrittsarbeit Φ_K überwinden und gibt dabei die Energie $e.\Phi_K$ und die kinetische Energie $2kT_E$ als Wärme ab. Den Rest $e(\Phi_E - \Phi_K)$ gibt das Elektron beim Zurückfliessen zum Emitter als elektrische Energie an den Lastwiderstand ab. Die maximal erreichbare





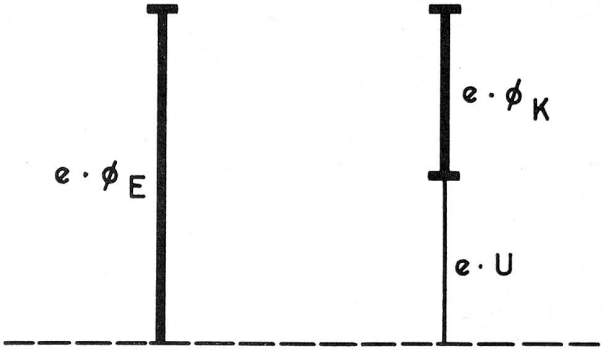


Fig. 1—3. Erläuterungen zum Thermionic-Element (Schematische Darstellung, Kennlinie, Energieschema).

Ausgangsspannung resultiert demnach aus der Differenz der beiden Austrittsarbeiten zu $U = \Phi_E - \Phi_K$. Praktisch muss also dafür gesorgt werden, dass eine genügende Differenz zwischen beiden Austrittsarbeiten vorhanden ist. Zudem sieht man, dass Φ_E grösser als Φ_K sein muss, da sonst der Strom vom Kollektor zum Emitter fliessen würde, wozu eine extreme Spannungsquelle nötig wäre (Elektronenröhre). Die Austrittsarbeiten betragen im allgemeinen einige Volt, so dass Nutzspannungen bis 1 V erreicht werden können.

Die maximale Stromdichte eines Thermionic-Elementes ergibt sich aus der Richardson-Gleichung zu

$$j = A_0 T_E^2 \exp - e\Phi_E/kT \quad (A/cm^2)$$

worin A_0 = Richardson-Konstante (120 A/cm² °K²), k = Boltzmann-Konstante ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K), T_E = Emittertemperatur (°K) und $e\Phi_E$ = die Emitteraustrittsarbeit (eV) bedeuten. Nach der Gleichung liefert ein Metall grosser Austrittsarbeit bei einer bestimmten Temperatur eine kleinere Stromdichte als ein solches mit kleinerer Austrittsarbeit. Dies ist für den Wirkungsgrad von Bedeutung. Als Beispiel ergibt ein $e\Phi_E$ = 3eV bei T_E = 1900°K eine Stromdichte von etwa 5 A/cm². Praktisch wird man jedoch nicht im Sättigungsbereich arbeiten, sondern dafür sorgen, dass der Lastwiderstand so gewählt ist, dass die maximale Leistungsfläche zur Verfügung steht. Dafür wird ein Punkt im linear ansteigenden Teil der Kennlinie gewählt (Fig. 2).

Die Leistungsdichte D eines solchen Elementes ergibt sich nach $D = j(\Phi_E - \Phi_K)$ und liegt praktisch zwischen 5—20 W/cm² bei U um 0,5...1 V. Will man grössere Ströme und Spannungen erhalten, muss man mehrere Thermionic-Elemente parallel bzw. in Reihe schalten.

Neben dem physikalischen Problem, Materialien geeigneter Austrittsarbeiten zu finden, ergibt sich ein zweites, auf Grund der Ausbildung einer Raumladungszone vor dem Emitter, die einen Stromtransport zum Kollektor verhindern würde. Man versucht dies in den Vakuum-Dioden dadurch zu unterbinden, dass man den Abstand zwischen beiden Elektroden sehr klein hält (< 0,01 mm). Diese Massnahme ist bei grösseren Einheiten praktisch nicht durchführbar. Zudem bietet auch das Abdampfen des Emitters Begrenzungen in der Lebensdauer der Diode. In den Edelgas- und Cäsium-Dioden kompensiert man die negative Raumladung durch positive Ionen, so dass die Elektronen keine elektrischen Kräfte mehr aufeinander ausüben können. Bei Edelgas-Dioden können daher Abstände von > 1 mm und bei Cäsium-Dioden (mit Cs und CsF-Dampf) solche von einigen zehntel Millimeter zugelassen werden. Die an sich besonders günstige Situation bei den Edelgas-Dioden wird aber durch die Verdampfung des Emittermaterials beeinträchtigt. Sie können daher nur bei niedriger Emittertemperatur arbeiten und haben nur eine kurze Lebensdauer. Bei der Cäsium-Diode hingegen können beide Elektroden aus dem gleichen Material sein. Bei genügend hohem Cs-Druck bildet sich auf den Elektrodenoberflächen ein Niederschlag aus positiven Cs-Ionen, die die Austrittsarbeit herabsetzen. Somit lässt sich durch Wahl des Cs-Dampfdruckes und der Elektrodentemperatur die Austrittsarbeit festlegen.

Die Cäsium-Dioden sind heute besonders aussichtsreich und wie Fig. 4 zeigt, konnten mit ihr Wirkungsgrade bis nahezu an η = 20 % erhalten werden. Die Figur zeigt auch, dass η mit steigender Emittertemperatur grösser wird, wobei allerdings bei ca. 2000°K wegen der Materialprobleme (Mo) Grenzen gesetzt sind. Darüber hinaus ist es für den Wirkungsgrad wichtig, einen grossen $(\Phi_E - \Phi_K)$-Wert zu haben, wobei Φ_K möglichst klein sein sollte. Allerdings darf Φ_E nicht zu hoch sein, da dann sonst wegen der Richardson-Gleichung nur geringe Stromdichten möglich sind.

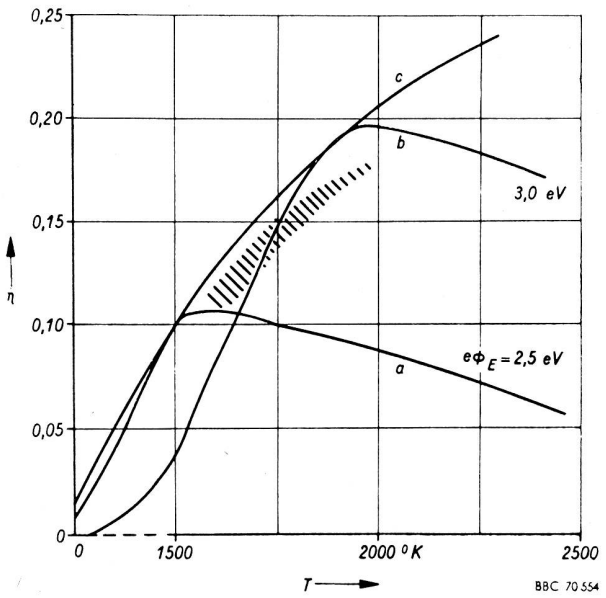


Fig. 4. Wirkungsgrad η in Abhängigkeit der Emittertemperatur T_E. a und b bei fester Emitteraustrittsarbeit e Φ_E. c bei jeweils optimaler Emitteraustrittsarbeit. Messwerte im schraffierten Bereich.

Insgesamt ergibt sich der Wirkungsgrad für eine Cäsium-Diode zu

$$\eta = \frac{I(\Phi_E - \Phi_K) - IV_p - I^2 \rho_z{}^a}{I\left(\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}\right) + F\varepsilon K T_E{}^4 + \frac{\kappa_z}{a}(T_E - T_K) - \frac{1}{2} I^2 \rho_z{}^a}$$

worin V_p = Spannungsabfall im Plasma, ρ_z und K_z = spezifische Werte der Zuleitungen (Ωcm) bzw. (W/cm°K), a = e/q der Zuleitungen, ε = Strahlungsemission des Emitters, K = Stefan-Boltzmann-Konstante $5{,}75 \cdot 10^{-12}$ (W/cm² °K⁴), F = Emitterfläche.

Als Elektrodenmaterial kommen nur Hochtemperaturmetalle in Frage, die eine gute elektrische Wärmeleitfähigkeit, sowie Beständigkeit gegen Cäsium aufweisen. Vorteilhaft hat sich dabei z. B. Mo (auch Ta, Nb) erwiesen, das zur Herabsetzung der Verdampfung mit Wolfram oder Rhenium überzogen ist. Letztere haben eine sehr geringe Abdampfrate (für 0,1 mm bei 2000°K : Mo = $8 \cdot 10^3$ h, dagegen W = > 10^8 h, Rh = $4 \cdot 10^7$ h), so dass Lebensdauern von > 1 Jahr erreicht werden sollten.

Den grundsätzlichen Aufbau eines zylindrischen Thermionic-Elements, wie es für nucleare und Verbrennungsheizung geeignet ist, zeigt Fig. 5, während in Fig. 6 die Photographie eines gebauten Elementes wiedergegeben ist.

Zum Entwicklungsstand dieser Energiequelle lässt sich sagen, dass sie sich noch im Versuchsstadium befindet. Ein-

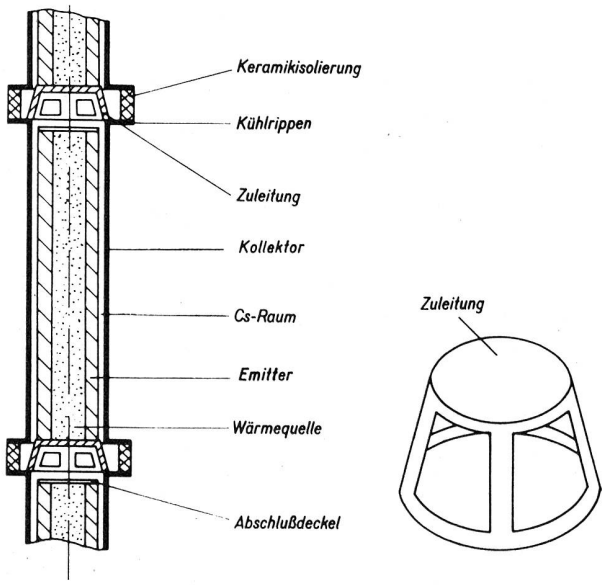


Fig. 5. Grundsätzlicher Aufbau eines nuklear beheizten, zylindrischen Thermionic-Elementes.

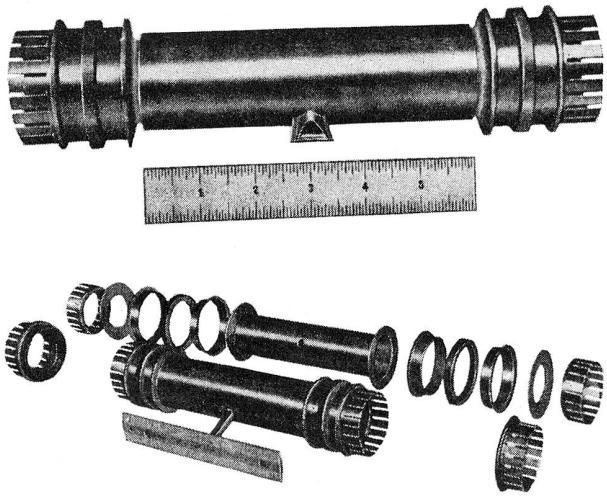


Fig. 6. Photographie eines Thermionic-Elementes. Mo- bzw. Ta-Emitter. 350 A, 2 V, 700 W, $\eta = 8{,}7\ \%$.

zelne Dioden mit $T_E = 1800...2100°K$, $T_K = 1000...1100°K$, Cs $\sim$ 1 Torr, U = 0,5...1 V, D = 15—20 W/cm², $\eta \sim 20\ \%$, Leistung 200...300 W, Lebensdauer $\sim$ 1 Jahr und 0,5...5 kg/kW sind gebaut. Nucleare und Verbrennungsheizung als Wärmequelle wurden erprobt, sowie auch die Ausnutzung der Sonnenwärme durch Einbau der Thermionic-Elemente in die Brennpunkte von Hohlspiegeln demonstriert. In den USA werden Einheiten bis in den MW-Bereich geplant.

Eine andere Möglichkeit, die Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umzuwandeln, liefert der thermoelektrische Generator. In ihm wird der sogenannte Seebeck-Effekt (1882) ausgenutzt, der darin besteht, dass zwischen den Enden eines Leiters eine Potentialdifferenz auftritt, wenn zwischen diesen eine Temperaturdifferenz besteht:

$$dU = \alpha \cdot dT .$$

Das Auftreten dieser Thermospannung wird bekannterweise heute für Temperaturmessungen ausgenutzt, indem zwei Drähte unterschiedlichen Materials an einem Ende verlötet werden und zwischen diesen und den freien Enden eine Temperaturdifferenz ($\Delta T = T_H - T_K$) erzeugt wird. Die Thermospannung ist dann bei konstantem T_K der Temperatur T_H proportional. Für eine Energieumwandlung würde man diesen 3-Leiterkreis zweckmässig so ausbilden, wie dies in Fig. 7 angedeutet ist. Am oberen Ende wird Wärme zugeführt, so dass zum unteren Ende eine Temperaturdifferenz auftritt. Die Potentialdifferenz zwischen den beiden Schenkelenden kommt nun dadurch zustande, dass die Ladungsträger, z. B. Elektronen am wärmeren Ende eine höhere Geschwindigkeit erhalten. Deswegen diffundieren mehr Elektronen vom heissen zum kalten Ende, wie umgekehrt. Am kalten Ende häufen sich

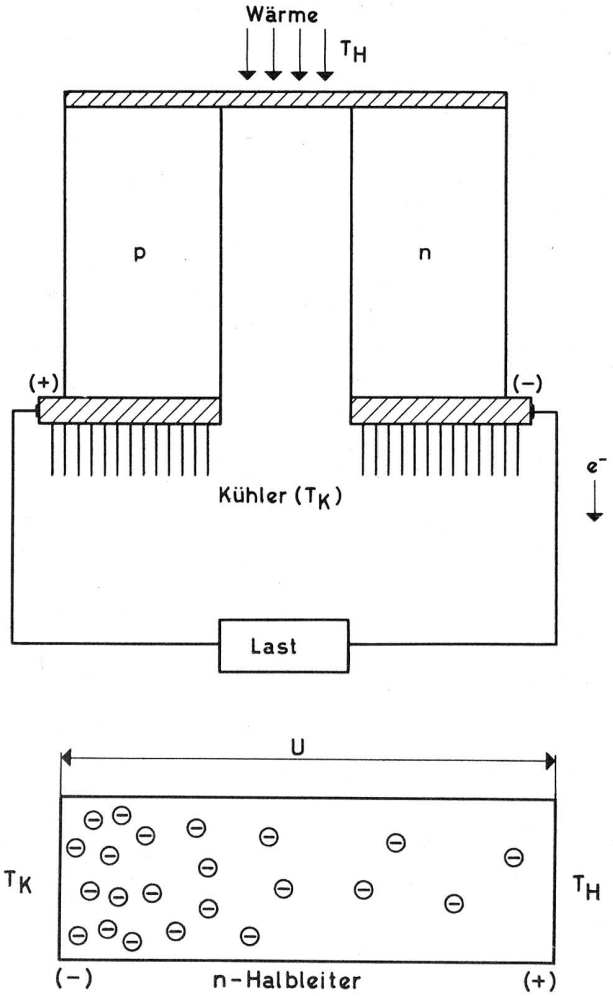


Fig. 7—8. Erläuterungen zum thermoelektrischen Generator (Schematische Darstellung, Entstehung der Thermospannung).

negative Ladungen an und es kommt zur Ausbildung einer Potentialdifferenz (Fig. 8). Das sich ebenfalls aufbauende Feld führt schliesslich zu einem Gleichgewichtszustand, bei dem die Temperaturdifferenz eine entsprechende Potentialdifferenz aufrechterhält.

Verwendet man als Schenkel in der Anordnung (Fig. 7) Metalle, so ist die sich in jedem Schenkel ausbildende differentielle Thermokraft nur gering ($\alpha \sim 1...10 \mu V/^\circ C$) und wird auf Grund der Tatsache, dass die Spannungen in beiden Schenkeln entgegen gerichtet sind, noch verkleinert:

$$U = (\alpha_1 - \alpha_2)\,\Delta T\,.$$

Deswegen sind Metalle als Thermoschenkel für Elemente zur Energieumwandlung nicht geeignet. Dies geht auch aus den Betrachtungen über den Wirkungsgrad einer thermoelektrischen Anordnung hervor, von dem man zeigen kann, dass er durch die Bedingung

$$\eta = \frac{T_H - T_K}{T_H} \cdot M$$

gegeben ist. Entsprechend dem Faktor M wird also der Carnotwirkungsgrad verschlechtert. Ohne im einzelnen darauf einzugehen, wie sich M zusammensetzt, sei festgestellt, dass M im wesentlichen durch die Grösse $z = \alpha^2\sigma/K$ (Grad^{-1}) bestimmt ist. z wird als Effektivität oder Güteziffer bezeichnet und ergibt sich aus den Daten (α, σ, K) *) der verwendeten Thermoelektrika. Aus Fig. 9 geht ihre Bedeutung für den Wirkungsgrad klar hervor. Man erkennt schliesslich auch ohne weiteres, dass Metalle wegen der kleinen Thermokräfte und der grossen Wärmeleitfähigkeit ungeeignete Materialien sind. Als besonders vorteilhafte Materialien haben sich nun die in den letzten zwanzig Jahren mehr und mehr an Bedeutung gewinnenden Halbleiter erwiesen. Diese Materialien haben bei einer ausreichenden elektrischen Leitfähigkeit ($10^3 Ohm^{-1}cm^{-1}$) eine kleine Wärmeleitfähigkeit ($K \sim 1 \cdot 10^{-2}$ W/cm°K) und weisen differentielle Thermokräfte von $\alpha = 200...1000\ \mu V/^\circ C$ auf. Darüber hinaus bieten die Halbleiter aber noch deswegen einen besonderen Vorteil, weil bei ihnen als Folge einer geeigneten Dotierung die Elektrizitätsleitung durch Elektronen (n-Typ) oder durch positive Ladungsträger bzw. Löcher (p-Typ) erfolgen kann. Dies hat eine entscheidende Konsequenz, wenn man als Thermoschenkel in der in Fig. 7 gezeigten Anordnung einen n- und p-Halbleiter kombiniert. Die Thermokräfte in beiden Schenkeln sind dann nicht mehr entgegengerichtet, sondern sie addieren sich:

$$U = (\alpha_p - \alpha_n)\,\Delta T\,.$$

Neben diesen, das z bestimmenden Eigenschaften, müssen die Materialien natürlich auch bei höherer Temperatur stabil sein, denn nur dann lassen sich genügend grosse Wirkungsgrade und Leistungsdichten erhalten. Zudem sollte die Effektivität nach Möglichkeit nur wenig temperaturabhängig sein, da sonst wegen des Temperaturgradienten der Schenkel, diese aus Segmenten verschiedener Materialien bestehen müssen, die bei den jeweiligen Temperaturen eine optimale Effektivität aufweisen.

Unter den vielen geeigneten Materialien haben das Bleitellurid und Silizium/Germanium-Legierungen (55 % Si) augenblicklich die grösste Bedeutung beim Bau thermoelektrischer Generatoren erlangt.

Die Grundeinheit zum Bau der Generatoren ist eine Anordnung, die der in Fig. 7 ähnlich ist. Ein p- und ein n-Schenkel, je etwa 6×6×6 mm, werden mit einer Brücke aus Wolfram, Silizium oder ähnlichem in Graphitformen verlötet. Unten wird ebenfalls eine Metallfolie anlegiert, die später mit einem Kühler verbunden wird und die auch als Stromableiter dient. Bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T \sim 600^\circ C$ ($T_H\ \Delta\ 1000^\circ C$) ergibt sich dabei im Falle Ge/Si-Thermoelemente eine Leerlaufspannung von ca. 0,5 V, die sich bei Belastung entsprechend der Kennlinie in Fig. 10 ändert. Praktische Betriebs-

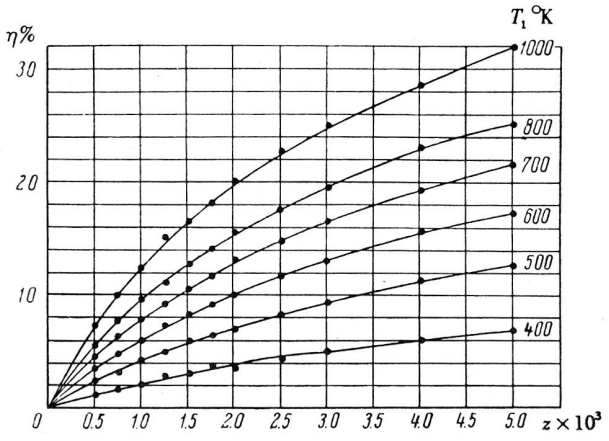


Fig. 9. Wirkungsgrad η (%) eines thermoelektrischen Generators in Abhängigkeit der Effektivität z (Grad^{-1}). Parameter: obere Temperatur T_H (°K). (Die kalte Seite mit T_K = 300°C wird konstant gehalten.)

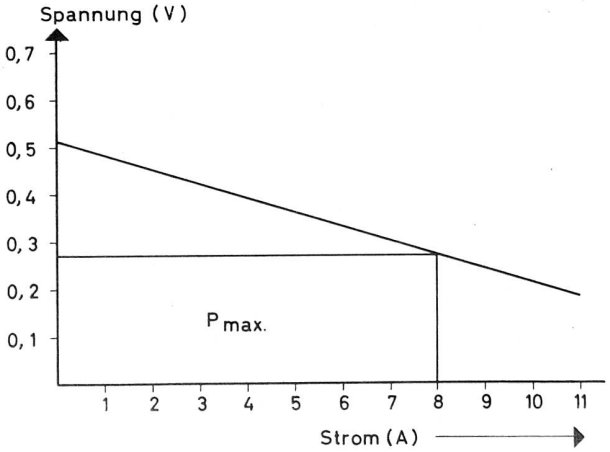


Fig. 10. Strom/Spannungs-Kennlinie eines thermoelektrischen Generators.

*) α = differentielle Thermokraft ($\mu V/^\circ C$); σ = elektrische Leitfähigkeit ($Ohm^{-1}cm^{-1}$), K = Wärmeleitfähigkeit (W/cm°K).

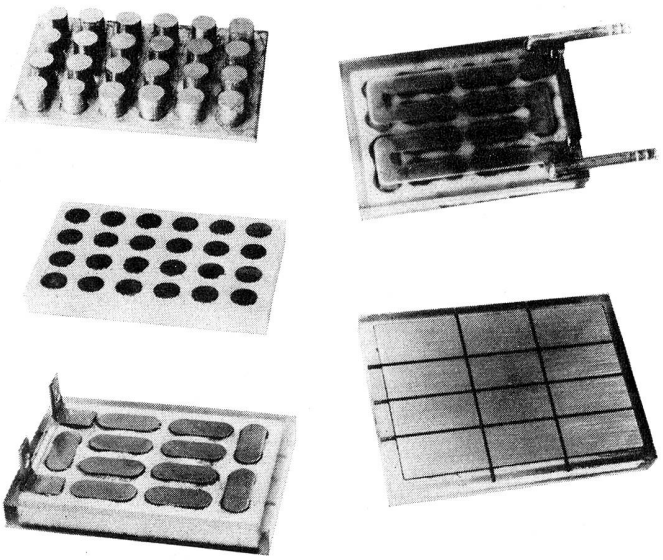


Fig. 11. Fertigungsschritte beim Zusammenbau einer Batterie aus Thermoschenkeln (Brown, Boveri).

daten sind 0,25 V bei 8—9 A, womit Leistungsvolumen von 13 dm^3/kW und Leistungsgewichte von ca. 44 kg/kW erreicht werden können.
Um zu verwendbaren Strömen und Gleichspannungen zu kommen ist es deshalb nötig, mehrere solcher Schenkelpaare parallel und in Reihe zu schalten. Man gelangt so zu Batterien (Fig. 11), die beliebig zum Bau von Generatoren verwendet werden können. Der Aufbau eines solchen Generators geht schematisch aus Fig. 12 hervor. Als Wärmequelle wird die Ölverbrennung angewendet. Fig. 13 schliesslich zeigt die Photographie eines 2 kW-Aggregates. Eine auf dem gleichen Prinzip arbeitende 5 W-Einheit ist in Fig. 14 zu sehen. Sie liefert max. 12 V bei 3 A, arbeitet mit einem Wirkungsgrad von ca. 5 % bei $T_H \sim 500°C$. (Generator allein $\eta \sim 9$ %). Als Wärmequelle dient ein Propangasbrenner ($\eta \sim 60...70$ %). Der Generator ist zur Speisung von Blinkfeuern der Küstenwache eingesetzt.
Auch die Sonnenwärme lässt sich mit Hilfe thermoelektrischer Generatoren ausnutzen. Praktisch wurde dies mit einem einstufigen Generator demonstriert, der sich im Brennpunkt eines Hohlspiegels ($\sim$ 2,5 m ϕ) befand und 50 Watt (72 Thermo-

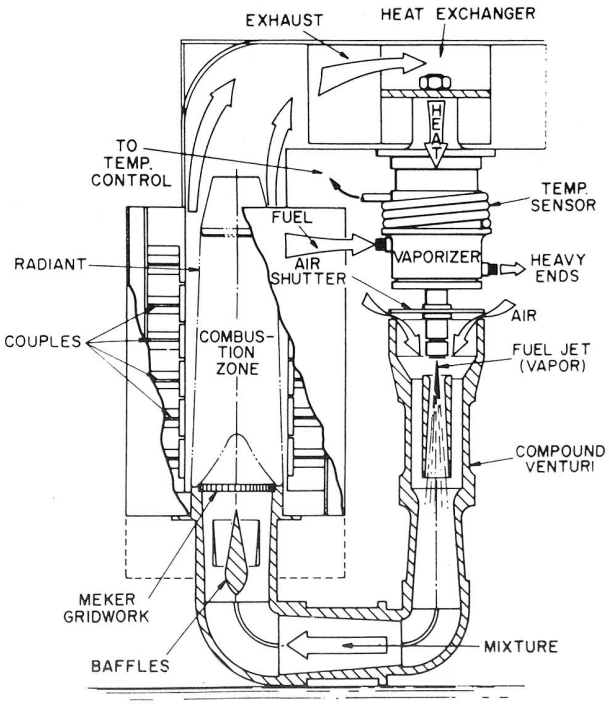


Fig. 12. Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators mit Verbrennungsheizung. Die Thermoschenkel sind um die zylindrische Verbrennungskammer angeordnet.

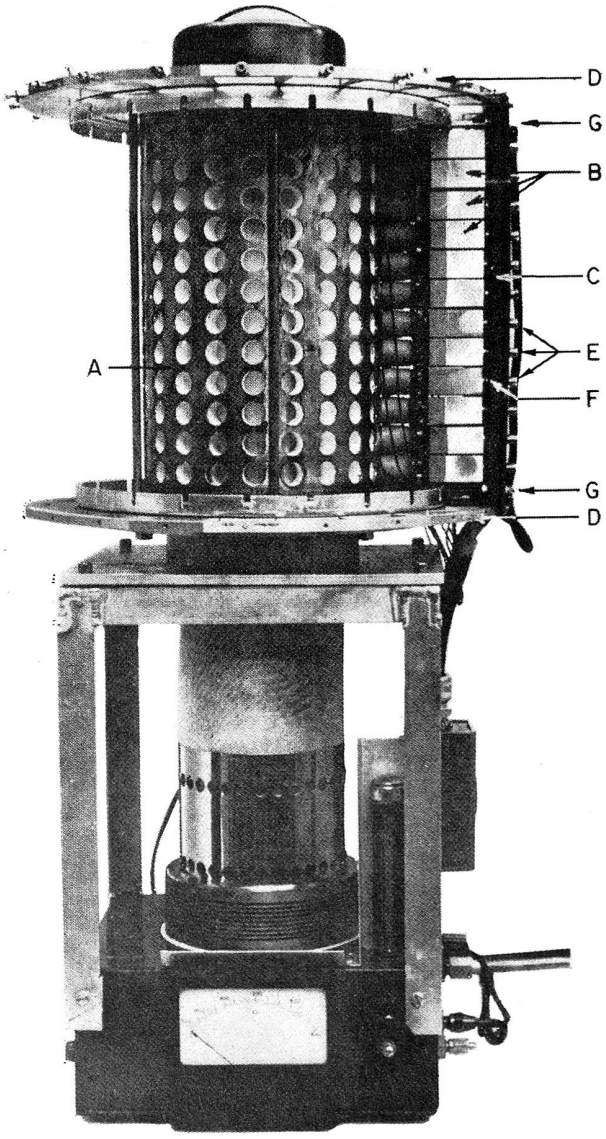


Fig. 13. Teilweise zusammengebauter thermoelektrischer Generator für eine Leistung ca. 2 kW (Du Pont).

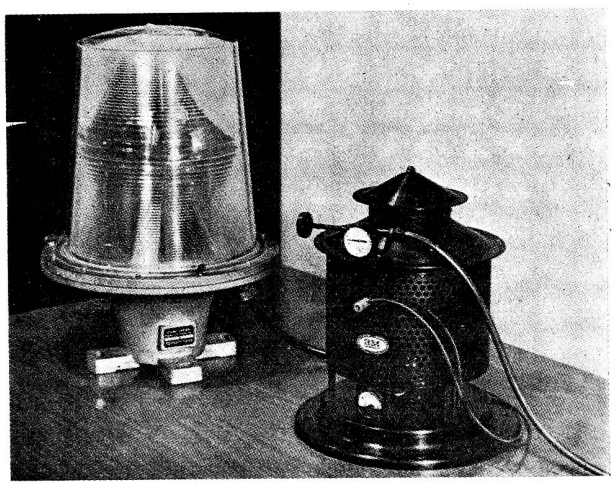


Fig. 14. Thermoelektrischer Generator (ohne Tank und Regeleinrichtung für Brennstoff) für die Stromversorgung einer Leuchtboje. Max. 12 V, 3 A. Durchschnittliche Leistung 5 W. $\eta = 2{,}4\,\%$ (Minnesota Mining & Manufacturing Comp.).

paare, $T_H = 450°C$) leistete. Er soll den Motor einer Wasserpumpe treiben und zur Landbewässerung usw. in abgelegenen Gegenden dienen.

Eine andere Wärmequelle, die sich insbesondere in der Raketen- und Satelliten-Technik, zur Speisung thermoelektrischer Generatoren praktisch bewährt hat, ist der Einsatz radioaktiver Elemente. Fig. 15 zeigt als Beispiel einen solchen 4 Watt Generator (SNAP 3) der mit Po-210 geheizt wird. Er hat einen Durchmesser von ca. 11 cm und eine Höhe von ca. 14 cm (~ 1,5 dm³). Sein Leistungsvolumen und Gewicht sind 385 dm³/kW bzw. 570 kg/kW. Ähnliche Generatoren (SNAP 10 A) mit Leistungen bis 500 W wurden ebenfalls gebaut und sind im Einsatz.

Der grösste bisher gebaute Generator hat eine Leistung von 5 kW.

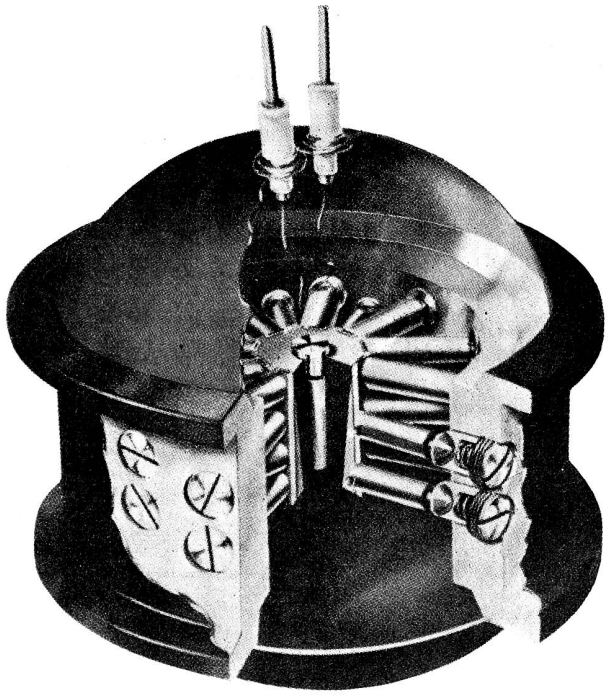


Fig. 15. Thermoelektrischer Generator. SNAP 4, 4 W. Po—210 PbTe, 350 mV/h auf Oberfläche. $T_H = 720°F$, $T_K = 175°F$. $\eta = 5\,\%$ (The Martin Comp.).

3. Direkte Umwandlung von Strahlung in elektrische Energie

Es war bereits gesagt worden, dass es möglich ist, den Teil der Sonnenenergie, der als Wärme zur Verfügung steht, im Thermionic-Element und im thermoelektrischen Generator auszunutzen.

Eine andere Möglichkeit, die Sonnenenergie in elektrische Energie umzuwandeln, ist durch die Solarzellen gegeben. Um den dies bewirkenden Mechanismus zu verstehen, muss man von den Eigenschaften eines Halbleitermaterials, z. B. Silizium ausgehen. Es ist bekannt, dass man durch Dotieren sogenanntes n- und p-Silizium erzeugen kann. Diese unterscheiden sich dadurch, dass im n-Si Elektronen als Ladungsträger den Leitungsmechanismus beschreiben, während dies im p-Si die sogenannten Löcher besorgen. Hat man in einem Stück Silizium einen Übergang von einem n- in ein p-Gebiet, so spricht man von einem pn-Übergang. Ein solches Si-Plättchen mit

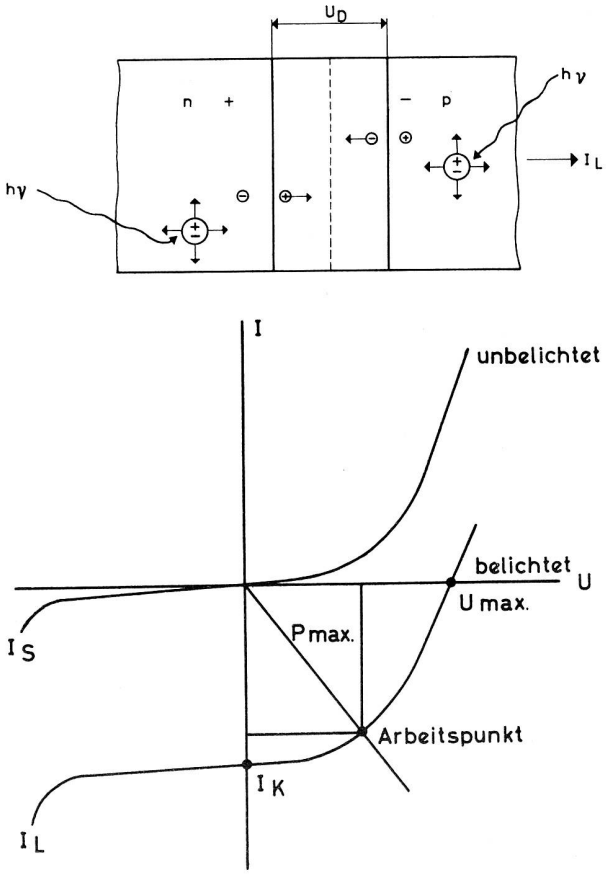


Fig. 16—17. Belichteter pn-Übergang (Schematische Darstellung, Kennlinie).

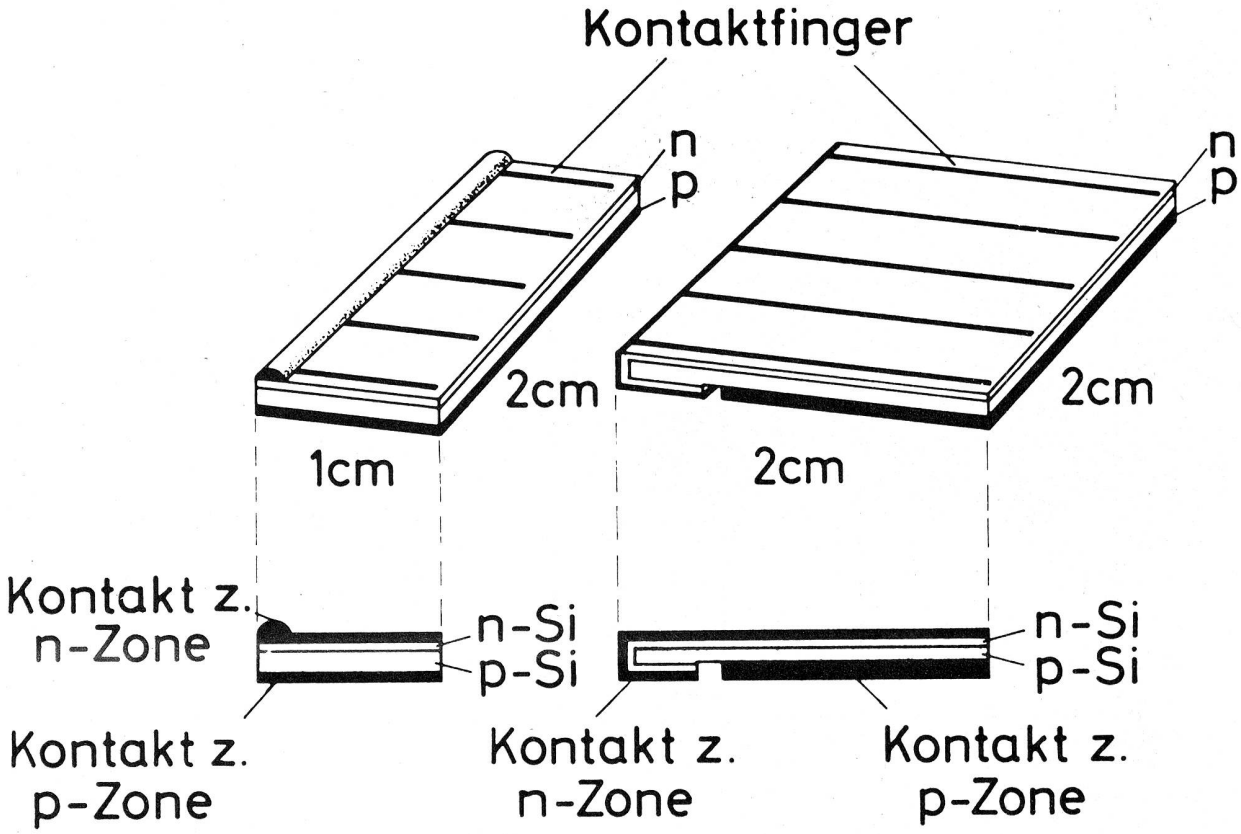


Fig. 18. Schematischer Aufbau einer Solarzelle mit ein- und zweiseitiger Kontaktierung.

einem pn-Übergang im Innern ist als Si-Gleichrichter oder Diode allgemein bekannt.

Betrachtet man nun die Verhältnisse an einem pn-Übergang, so stellt man fest, dass sich im Gleichgewichtszustand dort eine Potentialdifferenz aufgebaut hat (Fig. 16). Dies kommt daher, dass auf Grund des Konzentrationsgefälles bewegliche Ladungsträger vom p- ins n-Gebiet und umgekehrt diffundieren, wo diese jeweils mit den Elektronen bzw. Löchern rekombinieren. Daher wird die p-Seite des Übergangs negativ und die n-Seite positiv geladen (Bereich 0,05 µ). Das sich aufbauende Feld (eU_D) verhindert schliesslich eine weitere Diffusion. Die entstehende Potentialdifferenz wird als Diffusionsspannung U_D bezeichnet. Die Höhe der Diffusionsspannung ist vom Material und von der Dotierung abhängig und immer kleiner als die Breite der Verbotenen Zone (1,1 eV bei Silizium).

Werden jetzt durch Licht geeigneter Energie (h) Ladungsträger im Halbleiter erzeugt, so werden die, die sich im Bereich einer Diffusionslänge *) vom pn-Übergang befinden eingefangen und auf Grund des Feldes die Elektronen in das n-Gebiet und die Löcher in das p-Gebiet abgesaugt. Dieser Fluss von Ladungsträgern entspricht einem elektrischen Strom.

Die Strom/Spannungs-Kennlinie einer solchen Solarzelle ergibt sich aus der Diodenkennlinie

$$I = I_S - I_S \exp(e U_D / k T)$$

(I_S = Sperrstrom), wenn man berücksichtigt, dass durch die Belichtung ein zusätzlicher Photostrom I_L erzeugt wird

$$I = I_L + I_S - I_S \exp(e U_D / k T).$$

Im Falle der Solarzelle, wo keine Spannung von aussen angelegt wird, ist I = 0 und die maximale Photospannung U_{max} ergibt sich zu

$$U_{max} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right).$$

Diese Gleichung liefert eine Kennlinie entsprechend Fig. 17 und der Teil der Kennlinie im 4. Quadranten ist für die Energieerzeugung verwendbar. Das Rechteck mit der grössten Fläche innerhalb der Kennlinie gibt dabei die Strom-Spannungs-Bedingungen für die maximale Leistung an.

Zur praktischen Herstellung von Si-Photozellen geht man z. B. von p-Si-Plättchen mit 2×2×0,05 cm aus, in die man durch Diffusion (z. B. mit P) den pn-Übergang erzeugt. Die Diffusion muss dabei so gelenkt werden, dass sich der pn-Übergang weniger als 1 µ tief unterhalb der Oberfläche ausbildet und

*) Die Weglänge, die ein Ladungsträger zurücklegt bis er rekombiniert (10^{-2}...10^{-3} cm). $L_n = \sqrt{D_n/P_n}$ v = Rekombinationskoeffizient. Steht mit der Lebensdauer der Ladungsträger in folgender Beziehung: $\tau_n = l/v\, p_p$.

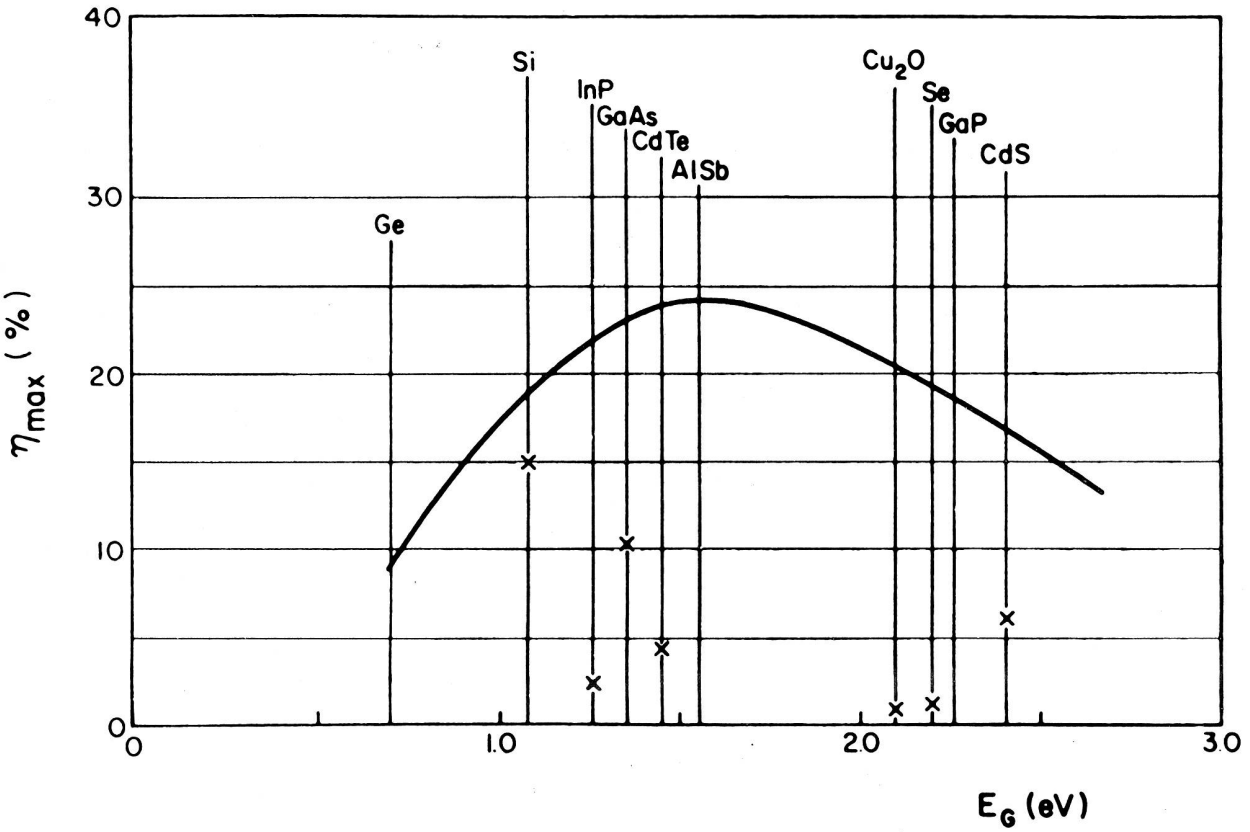


Fig. 19. Maximaler Wirkungsgrad der Umwandlung der Sonnenenergie in Abhängigkeit von der Breite der verbotenen Zone. Annahme: Ideales Verhalten des pn-Überganges. Mit x wurden die bis heute erreichten Wirkungsgrade gekennzeichnet.

dass durch die Temperaturbehandlung die Diffusionslänge der Ladungsträger nicht wesentlich herabgesetzt wird (Fig. 18) (Lebensdauer ca. 3—15 µs; Diffusionslänge 50...150 µ).

Ein besonderes Problem stellen bei dieser geringen Diffusionstiefe die Kontaktwiderstände und die inneren Widerstände dar. Letztere versucht man dadurch zu verringern, dass man ein Kontaktnetz über die gesamte Fläche anbringt. Dabei muss man jedoch berücksichtigen, dass man die effektive Fläche, also die, die der Bestrahlung zugänglich ist, dabei verkleinert (15 %). Weitere Probleme, die beim Bau von Solarzellen berücksichtigt werden müssen, sind die Verringerung der Reflexion und der Volumenrekombination. Schliesslich muss auch das Spektrum der Strahlenquelle berücksichtigt werden; wobei zu bedenken ist, dass im Falle des Si Wellenlängen $<0{,}8$ µ in Oberflächennähe absorbiert werden, während Wellenlängen $> 0{,}8$ µ grössere Eindringtiefen haben (bis 100 µ). So sind praktisch Wellenlängen von 0,35...1,1 µ zur Erzeugung von Ladungsträgern geeignet, ein Bereich, in den der grösste Teil des Sonnenlichtes (ca. 0,3...1,6 µ auf der Erde) fällt. Damit steht eine Leistung von ca. 100 mW/cm² auf der Erde und 140 mW/cm² im Weltraum zur Verfügung.

Typische Werte für Si-Zellen mit 2 cm² Fläche sind 30 mW, wobei Kurzschlußströme von ca. 70 mA und Leerlaufspannungen von 0,56 V gemessen wurden. Diese Werte entsprechen einem Wirkungsgrad von ca. 12 %. 15 % werden heute erreicht. Die theoretische Grenze liegt bei ca. 20 % und wie Fig. 19 zeigt, wäre durch die Wahl anderer Materialien ein noch grösserer Wirkungsgrad möglich.

Neben Si hat inzwischen das GaAs als einkristalline Solarzellen in der Raumfahrt und beim Einsatz bei höheren Temperaturen besondere Bedeutung gefunden. Dies hat mit der anderen spektralen Verteilung des Sonnenlichtes im Weltraum und der Tatsache zu tun, dass die Ausgangsleistung bei Si-Solarzellen oberhalb 30°C stark abnimmt (Fig. 20).

Wie die anderen Energiequellen liefern auch die Solarzellen kleine Gleichspannungen, so dass für die Anwendungen Serie- und Parallelschaltungen vorgenommen werden müssen. Fig. 21 zeigt einzelne Solarzellen ($U_0 = 0{,}6$ V; $I_K = 0{,}11$ A; Betrieb 0,45 V und 0,075 A). Eingesetzt werden solche Zellen z. B. zur Versorgung von Trägerstrom-Fernsprechanlagen. Eine solche Anlage (Fig. 22) benötigt z. B. 432 Zellen die 10 W bei 22 V liefern und 96 NiCd-Akkumulatoren aufladen. Fig. 23 zeigt ein Sonnenzellen-Paddel wie es für die Stromversorgung von Satelliten eingesetzt wird.

Da die Kosten solcher Anlagen sehr hoch sind, >1 000 000.— Fr./kW für komplette Anlagen und einen grossen Flächenbedarf haben (ca. 10 m²/kW), verdienen neuere Entwicklungen besonderer Erwähnung. Dieses sind die sogenannten Dünn-

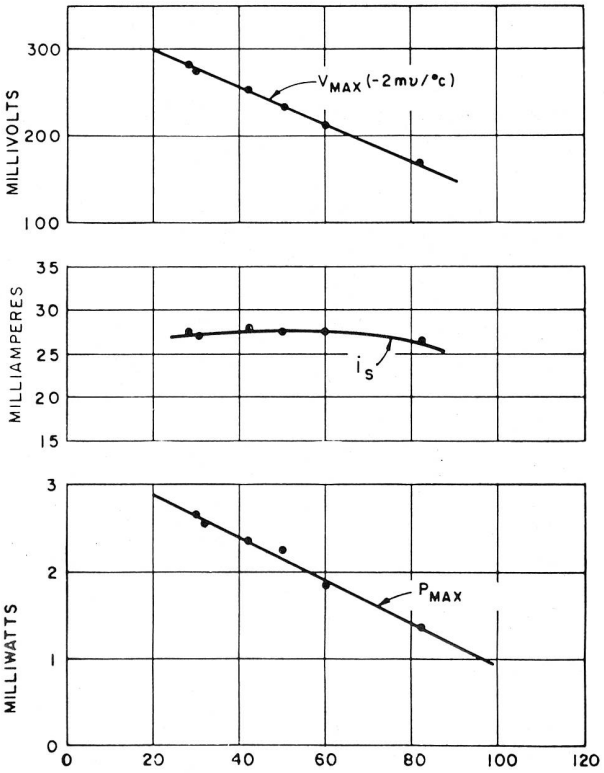


Fig. 20. Temperaturabhängigkeit von Strom, Spannung und Leistung einer Si-Photozelle (RCA).

schicht-Photozellen, bei denen polykristallines Halbleitermaterial, z. B. CdS, verwendet wird, das auf geeignete Träger, z. B. auf Kunststoffbasis, aufgedampft wird. Wenn auch die erwarteten Wirkungsgrade bei nur ca. 5 % liegen werden, bieten solche Zellen jedoch die Möglichkeit einer enormen Preiserniedrigung.

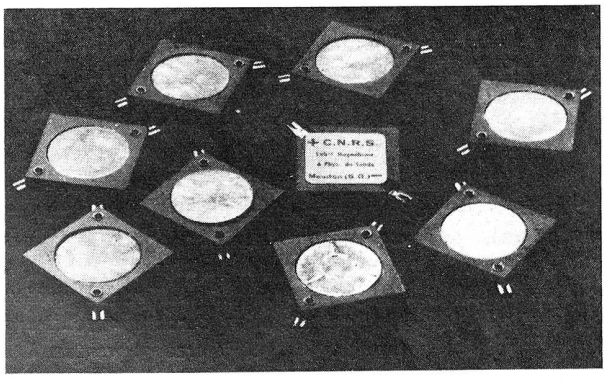


Fig. 21. Sonnenzellen des Centre National de la Recherche Scientifique. pn = 0,5 μ (P-dotiert), 3 cm², 0,45 V und 75 mA, $\eta \sim 12\,\%$. $U_0 = 0{,}6$ V, $I_S = 0{,}11$ A.

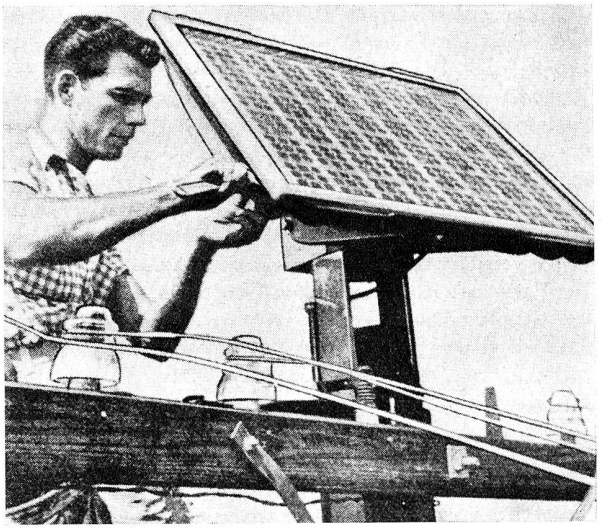


Fig. 22. Sonnenbatterie mit 432 Si-Solarzellen. 10 W, 22 V. Einsatz zur Stromversorgung einer Trägerstrom-Fernsprechanlage. 96 NiCd-Zellen als Speicher.

4. Direkte Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie

Diese Energieumwandlung gelingt in der Brennstoffzelle, deren Mechanismus man verstehen kann, wenn man den Ablauf einer chemischen Reaktion in einzelnen Schritten verfolgt. Es ist bekannt, dass bei der Oxydation des Wasserstoffes Wasser gebildet und Wärme (Q) frei wird:

$$H_2 + 1/2\,O_2 \longrightarrow H_2O + Q\,.$$

Diese Bruttoreaktion setzt sich dabei aus folgenden Teilschritten zusammen.

Oxydation	$H_2 \longrightarrow 2\,H^+ + 2\,e^-$
Elektronenübergang	$\downarrow$
Reduktion	$2\,e^- + 1/2\,O_2 \longrightarrow O^{2-}$
Zusammentreten der Ionen	$2\,H^+ + O^{2-} \longrightarrow H_2O$

und man erkennt daraus, dass man sich für die Energieumwandlung den Elektronenübergang nutzbar machen muss. Man

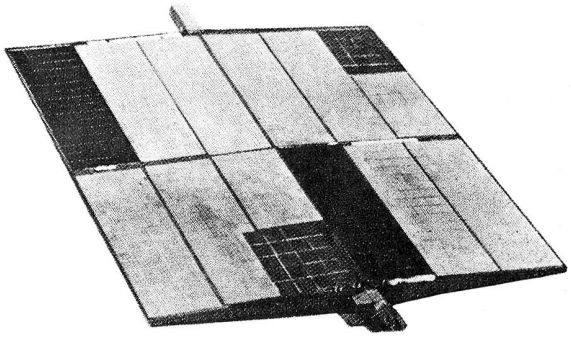
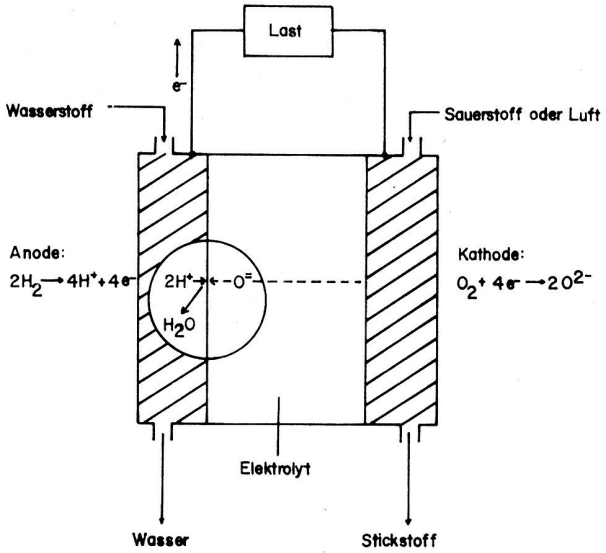


Fig. 23. Solarzellen-Paddel zur Stromversorgung von Satelliten.

sieht auch gleichzeitig wie eine Brennstoffzelle aufgebaut sein muss (Fig. 24). Es sind zwei örtlich getrennte Elektroden erforderlich, an denen die Oxydation (Anode) und Reduktion (Kathode) ablaufen kann. Die Elektroden werden mit einem elektronischen Leiter verbunden, um den Elektronenübergang zu ermöglichen. In dem Leiter liegt eine Last, in der die Elektronen beim Durchfliessen Arbeit leisten. Schliesslich ist zwischen den Elektroden ein Medium (Elektrolyt) vorzusehen, in dem Ionen, aber keine Elektronen, wandern können, die dann im angeführten Beispiel zu Wasser zusammentreten.
Die Typen aller Brennstoffzellen entsprechen dieser grundsätzlichen Anordnung, sie unterscheiden sich im wesentlichen nur in der Art und Ausführung der Elektroden und des Elektrolyten sowie der Betriebstemperatur.
Zwei Dinge sind für eine Anwendung zunächst von Interesse, nämlich der Strom und die Spannung. Von letzterer weiss man, dass es sich um eine Gleichspannung von ca. 1 V handelt. Was den Strom angeht, so sieht man auf Grund der chemischen Teilreaktionen, dass dieser allein durch den Materialumsatz pro Flächeneinheit der Elektrode gegeben ist. Es ist daher nötig Elektroden zu verwenden, die bezogen auf ihre makroskopische Geometrie eine möglichst grosse innere Oberfläche aufweisen. So erhält man dann Stromdichten, die über 100 mA/cm² betragen können.
Damit erkennt man auch das erste technologische Problem zum Bau von Elektroden, nämlich die Herstellung der porösen Struktur. Dieses Problem wird noch erschwert durch die Forderung, dass die Ionisierung der Reaktionsstoffe möglichst ungehemmt vonstatten gehen soll. D. h. man braucht Katalysatoren (Edelmetalle, aktives Nickel), mit denen die innere Oberfläche der Elektrode imprägniert sein muss.
All diese Forderungen lassen sich nicht völlig erfüllen. So kommt es, dass die Reaktionen und der Antransport der Stoffe gehemmt werden. Die Folge ist eine mit zunehmender Belastung eintretende Erniedrigung des Wirkungsgrades der Umwandlung. Die Brennstoffzelle hat demzufolge eine fallende Kennlinie (Fig. 25).
Die genannten technologischen Probleme, sowie auch solche der Korrosion, Vergiftung der Katalysatoren und des Elektrolyten, der Bautechnik usw. sind zu lösen, wenn man als Brennstoff Wasserstoff verwendet. Dieser Brennstoff aber weist gerade noch auf zwei weitere Probleme hin, die befriedigend gelöst sein müssen, wenn die Anwendung der Brennstoffzellen interessant werden soll: die Speicherbarkeit des Brennstoffes und sein Preis. Diese Forderungen besagen, dass Kohlenwasserstoffe als Brennstoffe eingesetzt werden müssen.
Ausgerechnet die Kohlenwasserstoffe aber sind infolge kinetischer Hemmungen besonders schwierig an den Elektroden umzusetzen. Daher existieren heute noch keine brauchbaren Brennstoffzellen, die einen Kohlenwasserstoff direkt bei niedriger Temperatur (<100°C) umsetzen können. Diese Lage wird sich auch in den nächsten 10 Jahren kaum ändern.
Man versucht nun, die Schwierigkeit zunächst auf drei Wegen zu überwinden: a) Es werden Brennstoffzellen gebaut, die bei Temperaturen von 500...1000°C arbeiten und die wegen dieser hohen Temperatur KW-Stoffe direkt umzusetzen vermögen. Bautechnische und Korrosionsprobleme sind bei solchen Zellen natürlich viel grösser, b) der KW-Stoff wird zunächst in einem Reformer (500...700°C) in Wasserstoff umgewandelt und gelangt dann in die Brennstoffzelle. Dadurch vergrössert sich Volumen, Gewicht und Preis der Brennstoffzelle. c) Man verwendet reaktivere Kohlenwasserstoffe oder andere Verbindungen (z. B. Methanol, Hydrazin). Damit wird die Forderung der guten Speicherfähigkeit erfüllt und der Preis des Brennstoffes wenigstens teilweise erniedrigt, ohne dass zusätzlich besondere technologische Schwierigkeiten in Kauf genommen werden müssen.
Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt den Stand der Entwicklung, so lässt sich feststellen, dass nur diejenigen Brennstoffzellen, die Wasserstoff, Methanol bzw. Kohlenwasserstoffe, die vorher in einem Reformer umgewandelt werden, als Brennstoffe verwenden, soweit entwickelt sind, dass praktische Anwendungen vorgesehen werden können. Solche Zellen haben sich allerdings auch schon bewährt. Es wurden Aggregate bis zu 10 kW gebaut, wobei durch Serieschaltung im allgemeinen Spannungen bis 100 V erzeugt werden. Die Leistungsgewichte und Volumen betragen in den günstigsten Fällen 20...30 kg/kW bzw. dm³/kW, wobei sich die Werte um den Faktor zwei erhöhen, wenn man ein funktionsfähiges Aggregat betrachtet.



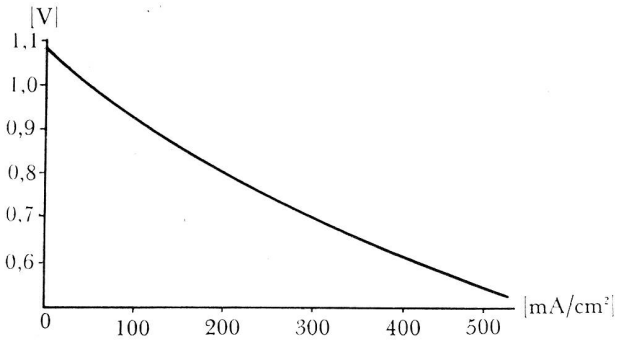


Fig. 24—25. Erläuterungen zur Brennstoffzelle (Schematische Darstellung des Aufbaues, Kennlinie).

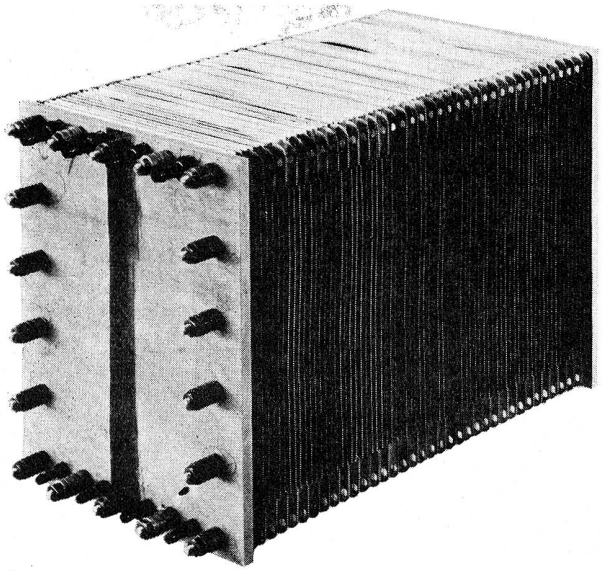


Fig. 26. Brennstoffzellenbatterie 400 W (Brown, Boveri).

Für die Anwendung einer Brennstoffzelle ist es schliesslich wichtig zu wissen, dass sie ein Leistungsaggregat ist. Sie wird demnach durch die Leistung (W, kW) charakterisiert und entspricht so weitgehend einem Motor-Generator-Aggregat. Der Brennstoff wird in die Betrachtungen nicht miteinbezogen. Andererseits lässt sich in der Brennstoffzelle auch die günstige Möglichkeit der Energiespeicherung durch chemische Energieträger ausnutzen. In diesen Fällen sind Leistungsteil (eigentliche Brennstoffzelle) und Speicher als Einheit anzusehen. Das Aggregat wird dann durch die Energiegrösse (Wh, kWh) definiert und entspricht weitgehend einem Akkumulator.
Es war bereits gesagt, dass Brennstoffzellen eine Gleichspannung von < 1 V liefern. Die Ströme typischer Zellgrössen (~ 400 cm^2 Elektrode) betragen dabei 40 A. Man wird also viele Zellen zu Batterien in Serie zusammenbauen (Figur 26). Berücksichtigt man nun aber das, was über den Brennstoff gesagt wurde, dass Wasser entsteht und damit entfernt

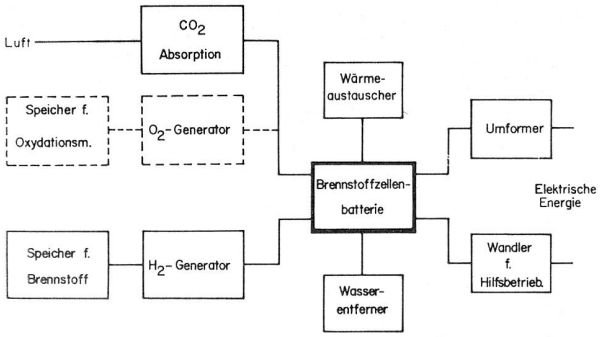


Fig. 27. Schematische Darstellung eines H_2/O_2-Brennstoffzellenaggregates mit allem Zubehör.

werden muss, dass schliesslich auf Grund der Kennlinie eine mit der Belastung stark schwankende Spannung zu erwarten ist und dass Wärme etwa in der gleichen Grössenordnung wie elektrische Energie in der Zelle anfällt, so erkennt man, dass dieser Zelle noch ein umfangreiches Zubehör mitgegeben werden muss (Fig. 27). Dies zeigt auch deutlich ein von Shell gebautes 4 kW-Aggregat, das 170 V liefert und einen Gesamtwirkungsgrad von 27 % aufweist (Fig. 28).
Dieses umfangreiche Zubehör kann man dann vermeiden, wenn man mit Zellen kleinerer Leistung arbeitet, und bei ihnen den eigentlichen Leistungsteil mit dem Brennstoffspeicher kombiniert. Diese Zellen entsprechen den Akkumulatoren. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie lange Zeit (z. B. 7000 h) wartungsfrei Leistung abgeben. Brennstoffzellenbatterien mit 20...30 Watt haben sich zur Speisung von Fernsehumsetzern (Fig. 29), von Bojen, Telephon-Relais-Stationen usw. bewährt und werden demnächst wohl als erste Brennstoffzellen zum Verkauf gelangen.

5. Vergleich der verschiedenen Stromquellen

Ein Vergleich der neuen Stromquellen mit den konventionellen bietet insbesondere deswegen Schwierigkeiten, weil je nach Anwendung die Leistung, der Energieinhalt bzw. die Betriebszeit verschieden sind. Diese Daten aber beeinflussen Grösse und Gewicht der Stromquellen wesentlich. Darüber hinaus ist es nicht bei jeder Anwendung möglich einen beliebigen Brennstoff zu verwenden, wobei besonders an nucleare Energie zu denken ist. Letzteren wird man bei terrestrischen Anwendungen immer dann einsetzen, wenn grosse Leistungen benötigt werden, so dass der Aufwand für die Strahlungsabschirmung vernachlässigt werden kann. Braucht diese nicht berücksichtigt zu werden, so sind der nuclear beheizte thermoionische und thermoelektrische Generator jeder anderen Energiequelle mit Energiegewichten von $< 0{,}05$ kg/kW bei 500 h Betriebszeit überlegen. Dies gilt auch für die Solarzelle, wenn sie so eingesetzt ist, dass sie kontinuierlich betrieben werden kann. Diese genannten Forderungen sind im allgemeinen jedoch nur im Weltraum erfüllt, so dass diese drei Energiequellen als bevorzugt für Anwendungen in der unbemannten Raumfahrt anzusehen sind. Alle drei Energiequellen stehen dabei nicht unmittelbar in Konkurrenz, man wird vielmehr für Leistung < 100 W vorwiegend in Solarzelle einsetzen, der thermoelektrische Generator wird bis höchstens 1...10 kW interessant sein, während sich für grössere Leistungen vermutlich allein der thermoionische Generator bewähren wird.
Geht man zu terrestrischen Anwendungen über, so kann man die Solarzelle aus den vergleichenden Betrachtungen herausnehmen. Der heute noch hohe Preis von $>1\,000\,000$.— Fr./KW und die Wetter- und Tageszeitabhängigkeit der Funktion werden nur einen beschränkten Einsatz dieser Energiequelle zulassen. Sie hat zudem nur dort einen Sinn, wo lange Zeit wartungsfrei Energie benötigt wird.
Betrachtet man die in Frage stehenden Stromquellen als Leistungsaggregat, so geht aus den mit Vorbehalt zu betrachtenden Daten der Tabelle 1 hervor, dass gegenwärtig nur die Brennstoffzelle günstiger als das Motor-Generator-Aggregat ist. Dazu kommen noch die Vorteile der Geräuscharmut und der weniger guten IR-Wahrnehmbarkeit, was insbeson-

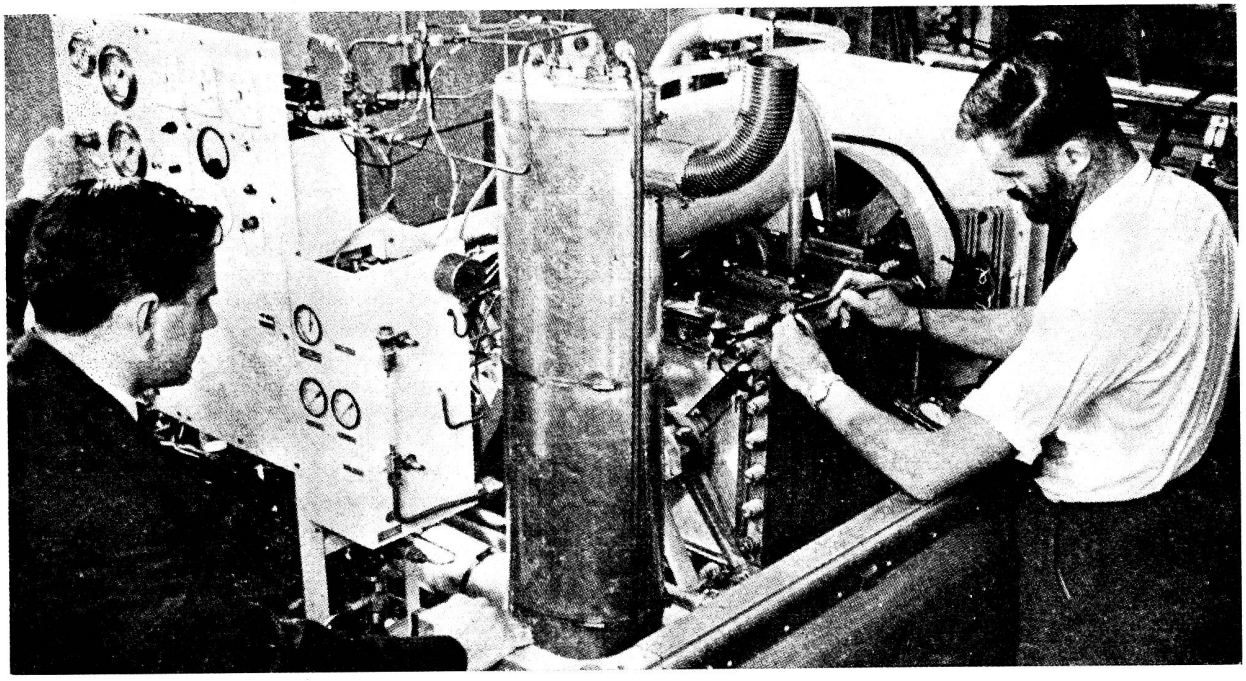


Fig. 28. Brennstoffzellenaggregat für 4 kW der Fa. Shell. Als Brennstoff dient Methanol.

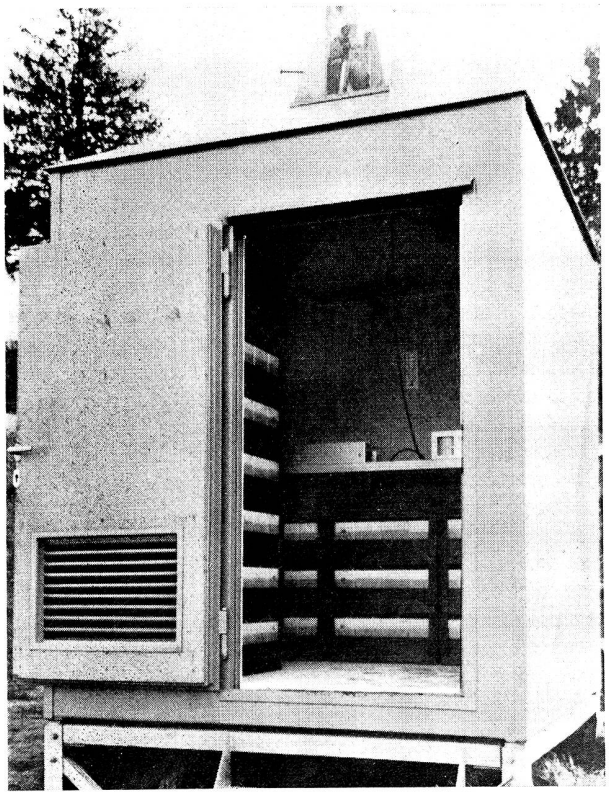


Fig. 29. Methanol-Luft-Brennstoffzellenbatterie zur Speisung eines Fernsehfüllsenders beim Südwestfunk Baden-Baden. 20 W, 28 ±0,2 V (Brown, Boveri).

dere in militärischer Hinsicht von Interesse ist. Auch Fig. 30 zeigt die rein volumenmässige Gleichwertigkeit der Brennstoffzelle. Zwar scheint der Akkumulator noch günstiger zu sein. Dies ist jedoch nicht der Fall, wenn berücksichtigt wird, dass der Akkumulator zum Aufladen mit einer Stromquelle verbunden werden muss, wenn nicht ein Netz am Einsatzort zur Verfügung steht. Vom Thermionic-Element lassen sich die fehlenden Daten heute noch nicht abschätzen. Man kann aber sagen, dass eine Anwendung nur im Bereich höherer Leistungen zu suchen ist und dass auf jeden Fall — wie auch beim thermoelektrischen Generator — ein Nachteil in der notwendigen Aufheizzeit (10 bis 15 Minuten) besteht. Dazu ist für militärische Zwecke die IR-Wahrnehmbarkeit zu berücksichtigen.

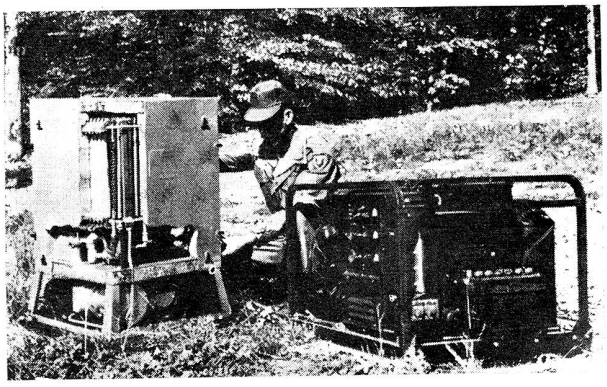


Fig. 30. 5-kW-Brennstoffzellenaggregat und Motor-Generator-Aggregat (Energy Conversion Lab., USA-Army).

Stromquelle	Leistungsbereich (kW)	Batterie kg/kW	Batterie dm3/kW	Aggregat kg/kW	Aggregat dm3/kW	Preis Fr./kW
Akkumulator (auf 1-h-Betrieb bezogen)	< 500	—	—	40	25	300.—
Motor-Generator	0,2...500	—	—	50...100	60...300	200...400
Thermionic-Element	> 50	3	0,5	?	?	?
Thermoelektr. Generator	< 10	44	13	100	300	130 000*
Brennstoffzelle	< 500	20	11	60	70	12 000*
Solarzelle	< 0,1	5...20	—	10 100	?	1 000 000*

Tab. 1. Vergleich verschiedener Energieerzeugungsquellen. (Die mit * versehenen Preise sind roh geschätzt und basieren nicht auf einer Fertigung.) **

Diese Aussagen gelten solange, wie längere Betriebszeiten nicht in Betracht gezogen werden. Ist dies der Fall und setzt man wieder voraus, dass ein chemischer Energieträger verwendet wird, so verändert sich die Situation, wie dies aus Tab. 2 zu entnehmen ist. Der Vorteil der Brennstoffzelle als Langzeitenergiequelle geht daraus klar hervor. Nach 6—10 h ist sie und der thermoelektrische Generator selbst einem Akkumulator überlegen. Neben diesen gewichtsmässigen Vorteilen ist auch das einfachere und schnelle Wiederladen dieser beiden Stromquellen, das nur im Auffüllen des Tankes besteht, sehr attraktiv. Gerade das Verhalten im Bereich von 6—10 Betriebsstunden versucht man im Einsatz der Brennstoffzelle als tragbare Energiequelle auszunutzen. Eine 200-Watt-Einheit zur Speisung von Funkgeräten zeigt Fig. 31, während in Fig. 32 eine Brennstoffzelle mit H_2-Generator zu sehen ist, die unter Verwendung von Dieselölen einige kW leistet.

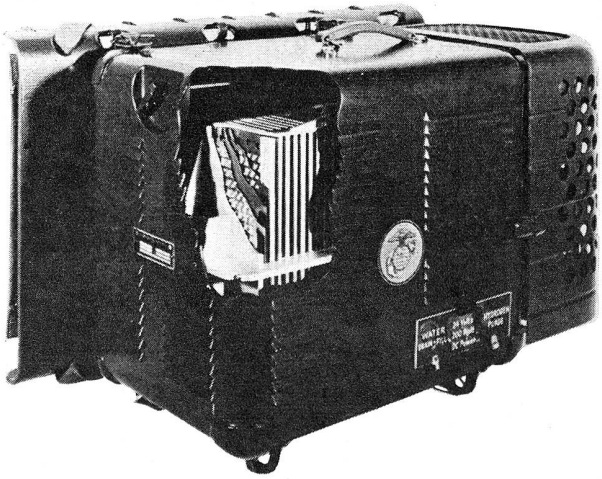


Fig. 31. Tragbare Ionenaustauscher-Brennstoffzellenbatterie für 200 W, 24 V (General Electric).

** Zu ab. 1: Thermionic-Generator mit nuklearer Heizung auf der Basis

100 kW berechnet:	ohne Abschirmung	4,52 kg/kW
	mit Abschirmung	500 kg/kW
		210 dm³/kW

Solarzelle bei 10% = 9 kg/kW bei 100 mW/cm² auf der Erde.
40 kg/kW bei 135 mW/cm² im Weltraum.

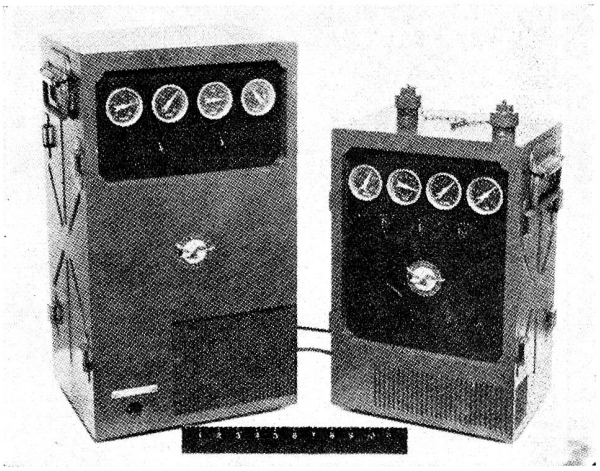


Fig. 32. 500-W-Brennstoffzellenaggregat (32 V). KW-Stoff als Energieträger. Gewicht jeder Einheit ca. 20 kg. Volumen ca. je 30 dm³ (United Aircraft).

Stromquelle	Leistungsbereich (kW)	Energiegewicht (kg/kW) bei < 1 h	6...10 h	Betriebszeit 5000 h
Akkumulator	< 500	40	~ 40	~ 40
Motor-Generator	< 500	50...100	7...14	—
Thermoelektrischer Generator	< 0,1	100	21	3...7
	0,1...< 10	—	—	—
Brennstoffzelle	< 0,1	—	—	3...4
	0,1...< 500	60	6	< 0,5

Tab. 2. Energiegewichte verschiedener Stromquellen bei verschiedenen Betriebszeiten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass von den nichtkonventionellen Energieerzeugungsaggregaten die Brennstoffzelle besonders aussichtsreich ist. Sie ist insbesondere dort einzusetzen, wo sich heute das Motor-Generator-Aggregat bewährt. Teilweise stellt sich auch eine Konkurrenz zum Akkumulator dar. Als Langzeitenergiequelle bieten beide, der thermoelektrische Generator und die Brennstoffzelle, ganz neue Möglichkeiten. Der thermoionische Generator ist noch nicht so weit entwickelt, dass ein praktischer Einsatz heute ins Auge gefasst werden konnte.

Krieg im Aether

Die nächsten Vorlesungen an der ETH, zu welchen Mitglieder des EVU und Leser des «Pionier» freundlich eingeladen sind, finden wie folgt statt:

Zeit: Jeweils von 17.15 bis 18.30 Uhr

Ort: Eidg. Technische Hochschule, Zürich, Physikergebäude 22 C

11. Januar 1967
Vollelektronische Vermittlungstechnik nach dem Zeitmultiplexverfahren
(Dipl. Ing. EPUL P. G. Fontolliet, Albiswerk AG, Zürich)

25. Januar 1967
Neuere Methoden der Synthese einer Vielzahl genauer Frequenzen
(Dipl. Ing. ETH Carlo Corbella, Zellweger AG, Uster)