

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Schweizerische Bauzeitung |
| Herausgeber: | Verlags-AG der akademischen technischen Vereine |
| Band: | 79 (1961) |
| Heft: | 25 |
| Artikel: | Die vier wichtigsten Methoden der direkten Energie-Umwandlung |
| Autor: | Jenny, Ernst |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-65556 |

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: 24.01.2026

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

Bei der praktischen Anwendung dieser Theorie muss man sich der eingangs unter a bis e erwähnten Voraussetzungen voll bewusst bleiben. Bei stark bindigen Böden (hohe Kohäsion) kann es z. B. vorkommen, dass der Widerstand des oberen Halbraums gegen die Verformung des un-

teren nicht vernachlässigbar ist, was zur Folge hat, dass man nach obiger Theorie etwas zu grosse M_E -Werte erhält, sofern nicht ein entsprechender Reduktionsfaktor berücksichtigt wird.

Schluss folgt

Die vier wichtigsten Methoden der direkten Energie-Umwandlung

DK 621.3

Von Dr. Ernst Jenny, Baden

Schluss von S. 390

4. Brennstoffzellen

a. Die elektrochemische Stromerzeugung

Die erste Brennstoffzelle führte der englische Forscher Grove 1842 vor, indem er zeigte, dass man die Elektrolyse von Wasser umkehren kann (Bild 1, 4). Bei der Elektrolyse schickt man bekanntlich einen Strom durch eine mit Wasser gefüllte Zelle, wobei sich das Wasser in seine Bestandteile H_2 und O_2 zerlegt. Weniger bekannt ist die Tatsache, dass man umgekehrt H_2 und O_2 in eine Zelle einführen kann, wobei sie sich zu Wasser verbinden und einen elektrischen Strom abgeben.

Die wichtigsten Teile der Zelle nach Bild 1, 4 sind die Gaszuführungen, die Elektroden und der Elektrolyt. Bild 43 zeigt den physikalischen Vorgang in der H_2O_2 -Hydrox-Zelle. Die Reaktionen sollen genügend rasch ablaufen und es müssen lange Betriebszeiten möglich sein. Im folgenden wird besprochen, wie diese schwierige Aufgabe bearbeitet wurde.

Es handelt sich um eine elektrochemische Stromerzeugung, wie in einer Batterie. Im Unterschied zur Batterie verwendet die Brennstoffzelle aber konventionelle Brennstoffe (H_2 wird zu diesen gezählt), die laufend zugeführt werden. Die Verbrennungsprodukte werden ebenso laufend abgeführt. Eine Brennstoffzelle braucht sich also nicht wie eine Batterie selbst auf, sondern arbeitet — wie z. B. ein Dieselmotor —, so lange ihr Brennstoff zugeführt wird. Die Brennstoffzelle ist aber keine Wärmekraftmaschine und unterliegt nicht der Carnot-Wirkungsgradbegrenzung. Es werden Wirkungsgrade von z. B. 70 % erreicht, weshalb dieser Maschine grösstes Interesse entgegengebracht wird.

Bild 44 zeigt einen mit Brennstoffzellen betriebenen Ideen-Wagen von Chrysler. Die sog. Traumwagen der amerikanischen Autofirmen dienen zwar vor allem der Propaganda und sind nicht unbedingt technisch wegweisend. In diesem Falle werden aber in der Autoindustrie Brennstoffzellen ernsthaft als zukünftige Kraftquellen in Betracht gezogen. Die vorgesehenen Niedertemperaturzellen sind erst in Entwicklung. Tiefe Betriebstemperatur ist Voraussetzung für rasche Startfähigkeit. Wir werden sehen, dass Niedertemperaturzellen beim heutigen Stand der Entwicklung mit relativ teuren Brennstoffzellen betrieben werden müssen. Die Bedingungen niedriger Anschaffungs- und Betriebskosten können heute noch nicht erfüllt werden. Eine weitere Bedingung ist, dass Brennstoffzellen für die Traktion kompakt sein müssen. Dass dies möglich ist, konnte die Shell mit

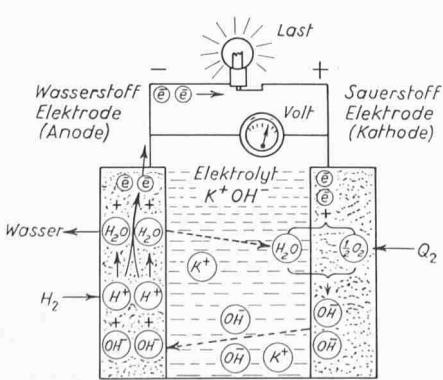


Bild 43 (links). Der elektrochemische Prozess in der H_2O_2 -Brennstoffzelle. Der von links in die Anode tretende Wasserstoff wird unter Elektronenabgabe in H^+ gespalten. Die Elektronen fließen ab, leisten in der Last Arbeit und gelangen zur Kathode, an der sie mit dem eintretenden O_2 und dem Elektrolyten zu OH^- reagieren. Die OH^- Ionen gehen

zur Anode und verbinden sich mit den dort gebildeten H^+ zu H_2O . Parallel dazu treten, speziell an der O_2 -Elektrode, gewisse Störreaktionen auf

einem vorwiegend aus Kunststoff gebauten Element zeigen [17]. Diese könnten an verschiedenen geeigneten Stellen, teilweise in den Wänden der Karosserie untergebracht werden. Zusammen mit dem Wegfall der mechanischen Transmission ergeben sich ganz neue Möglichkeiten in der Gestaltung der Automobile.

Allis-Chalmers Mfg. Co. hat einen elektrochemisch getriebenen Traktor gebaut (Bild 45). Die Zellen werden mit propanhaltigem Gas betrieben, worauf wir noch zurückkommen werden. Bild 46 zeigt den schematischen Aufbau des Traktors. Die O_2 -Druckflaschen aus Stahl machen einen Hauptanteil des Gewichtes aus. Leichtere, solide Behälter, z. B. aus mit Glasfasern verstärktem Plastik, wären günstiger. Dabei muss die Explosionsgefahr beachtet werden. Wenn man atmosphärische Luft verwenden könnte, ergäbe sich eine wesentliche Platz- und Gewichtersparnis.

Allgemein bekannt geworden ist die englische Bacon-Zelle. Vor etwas über einem Jahr berichteten alle Tageszeitungen von ihrer Entwicklung. In einem Falle wurde dabei behauptet, dass durch die Reaktion von H_2 und O_2 genügend Hitze entwickelt werde, um eine Spannung zwischen den Elektroden zu erzeugen. Das Wesen der Zellen besteht aber gerade darin, dass möglichst keine Wärme erzeugt, sondern chemische Energie direkt in elektrische Arbeit umgewandelt wird. Es ist somit berechtigt, die Thermodynamik der Brennstoffzelle etwas näher zu betrachten.

b. Zur Thermodynamik der Brennstoffzellen

Es ist wenig bekannt, dass Prof. Dr. A. Stodola in seinem Buche «Die Dampf- und Gasturbinen», 5. Auflage, ein Kapitel über «Elektrizität aus Kohle und die Gasketten» aufgenommen hat, wo die Theorie der Brennstoffzellen behandelt ist. Er weist auch auf die Pionierarbeit hin, die Bauer und Mitarbeiter in Zürich auf diesem Gebiete geleistet haben.

Die massgebenden Gleichungen sind sehr einfach abzuleiten aus dem 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$(21) \Delta A = \sum dQ + H_1 - H_2$$

$$(22) \sum \frac{dQ}{T} = S_2 - S_1 - \sum d_i S$$

Dabei bedeuten: $+\Delta A$ die abgegebene Arbeit; $+dQ$ die dem System bei der Temperatur T zugeführte Wärme; H_1 , H_2 und S_1 , S_2 die totalen Enthalpien (einschliesslich Reaktionsenthalpien) und die Entropie der zu- bzw. abgeführten Betriebsmittel; $d_i S$ die Entropiezunahme wegen irreversiblen Vorgängen.

Eine Brennstoffzelle arbeitet bei konstanter Temperatur, weshalb sich der zweite Hauptsatz (22) wie folgt schreiben lässt:

$$(22a) \sum dQ = T(S_2 - S_1) - T \sum d_i S$$

Die Summation von (21) und (22a) ergibt die Gleichung der gewinnbaren Arbeit:

$$(23) \Delta A = H_1 - H_2 - T(S_1 - S_2) - T \sum d_i S = \\ = \Delta G - T \sum d_i S$$

($G = H - TS$ ist die freie Enthalpie)

Für den üblichen Fall, dass die Reaktion bei konstantem Druck abläuft, entsprechen die ersten zwei Glieder dem Heizwert ΔH bei p und T . Es ist üblich, mit dem Heizwert zu rechnen, obwohl dieser nicht konstant ist, im Gegensatz zur chemischen Reaktionsenergie E_0 (= ΔH bei $0^\circ K$).

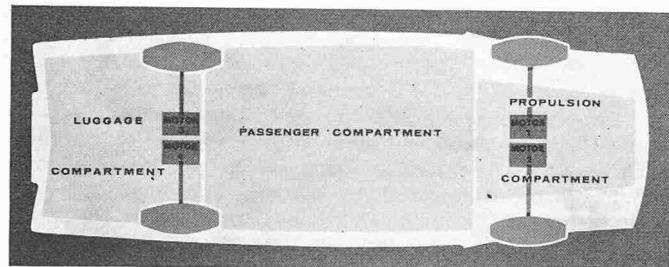
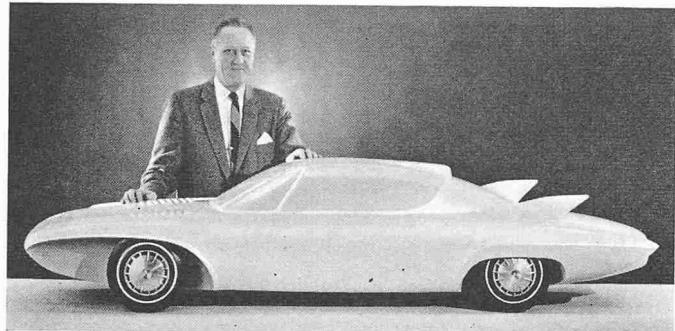


Bild 44. De Soto Projekt «Cella 1». Der Verbrennungsmotor ist durch Brennstoffzellen ersetzt. Jedes Rad wird von einem eigenen hochtourigen Elektromotor angetrieben. Beim Bremsen und Bergabfahren wirken diese als Generatoren, und die Energie wird in Hochleistungsakkumulatoren gespeichert. Neben sehr ruhigem Lauf und günstigem Drehmomentverlauf wären vor allem die sauberen, ungiftigen, geruchlosen Abgase ein grosser Vorteil.

$$(23a) \Delta A = \Delta H - T(S_1 - S_2) - T \sum d_i S$$

Wenn alle Vorgänge reversibel sind, d. h. wenn keine ohmschen Verluste, keine Wärmeleitung, usw. auftritt, so ist das letzte Glied 0.

Der Wirkungsgrad η bezogen auf den Heizwert ΔH ergibt sich somit aus:

$$(24) \quad \eta = \frac{\Delta H - T(S_1 - S_2) - T \sum d_i S}{\Delta H}$$

Im reversiblen Falle

$$(24a) \quad \eta_{rev} = 1 - \frac{T}{\Delta H} (S_1 - S_2)$$

Wenn pro Molekül Brennstoff z Elektronen frei werden, so fliesst bei der Umsetzung von 1 kg-Mol. Brennstoff die Elektrizitätsmenge zF , wobei $F = 9,65 \cdot 10^7$ As die Faraday-Konstante bedeutet. Beträgt die Nutzspannung U , so wird die Energie $\Delta A = zFU$ abgegeben. Setzt man diesen Ausdruck in (23a) ein, so folgt

$$(25) \quad U = \frac{\Delta H - T(S_1 - S_2) - T \sum d_i S}{zF}$$

$$(25a) \quad U_{rev} = \frac{\Delta H - T(S_1 - S_2)}{zF}$$

$$(25b) \quad \frac{\eta}{\eta_{rev}} = \frac{U}{U_{rev}}$$

Für die Reaktion $C + O_2 = CO_2$ ist $S_1 - S_2 \approx 0$. Im reversiblen Falle wäre damit $\eta = 1$. Man ist heute überzeugt, dass eine Zelle mit fester Kohle als Brennstoff nicht realisiert werden kann. Damit fällt auch die Reaktion $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$ aus, bei der $S_1 < S_2$ und η grösser 1 wäre, wobei nach (22a) Wärme aus der Umgebung aufgenommen und in Arbeit verwandelt würde.

Bei den Gasen kann Methan, CH_4 , theoretisch $\eta = 1$ erreichen, weil die Reaktion $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ ohne Entropieänderung abläuft. Bei den wichtigen Gasen H_2 und CO ist aber $S_1 > S_2$ und somit selbst im reversiblen Falle $\eta < 1$. Nach Gl. (22a) wird also mindestens die Wärme



Bild 45. Allis-Chalmers Versuchstraktor. Er ist mit 1008 Brennstoffzellen ausgerüstet, die dort eingebaut sind, wo sich üblicherweise der Verbrennungsmotor befindet. Man beachte die Gaszufuhr-Leitungen und die elektrischen Anschlüsse. Es sind immer so viele Zellen in Serie geschaltet, dass sich ungefähr 60 V Gleichspannung ergibt. Der Motor von 20 PS treibt die Hinterachse an. Mit dem Kontroller kann die Geschwindigkeit reguliert und auf elektrische Bremsung geschaltet werden. Man bemerkt hinter dem Führersitz die Druckflasche für das Brenngas (das Propan enthält), links unten das Ende einer Sauerstoff-Flasche

$T(S_2 - S_1)$ an die Umgebung abgegeben. Dieses Glied wächst mit der Temperatur stark an, so dass η und U mit der Temperatur fallen. Die Tabelle 1 soll dies durch Zahlenwerte klar machen. Statt den üblichen Angaben in kcal sind die Werte in Joule (J) eingetragen (1 kcal = 4186,8 J). Für die Behandlung von Maschinen zur direkten Energieumwandlung, wo mechanische, thermische und elektrische Größen vorkommen, befriedigt nur das MKSA-System.

Für die Reaktion $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$ ergeben sich ähnliche Werte. Man wird somit H_2 - und CO -Zellen mit möglichst tiefer Temperatur betreiben. Der Hochtemperaturbetrieb ist aber nicht so schlecht, wie man aus der Tabelle schliessen könnte. Die bei hoher Temperatur abgegebene Wärme ist ja noch ausnutzbar (bei $2000^\circ K$ Betriebs- und $293^\circ K$ Umgebungstemperatur ist $\eta_{Carnot} 85\%$). Bei höherer Temperatur kann man auch die Wärme infolge der Irreversibilitäten noch ausnutzen. Selbstverständlich muss man dann die Brennstoffe durch die Abgase möglichst weitgehend vorwärmen. Die Anlage wird aber kompliziert. — Die Spannung von etwa 1 V ist typisch für alle in Frage kommenden Reaktionen.

Im folgenden soll nun gezeigt werden, unter welchen Bedingungen eine kalte Verbrennung — mit den verlockend hohen Wirkungsgraden — abläuft.

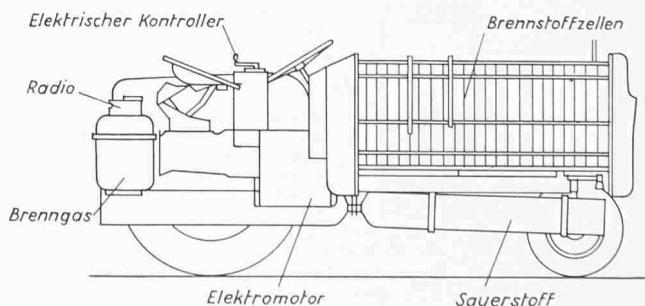


Bild 46. Schematische Darstellung des elektrochemisch angetriebenen Allis-Chalmers Traktors. Der Radio wurde eingebaut, um den ruhigen Lauf des Antriebs zu demonstrieren. Selbst beim Pflügen unter Vollast konnte man den Sendungen mühelos zu hören.

Tabelle 1. Zahlenwerte für die Reaktion $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ gasförmig
bei verschiedenen Temperaturen T und $z = 2$

| T °K | E_o 10 ⁷ J/kg Mol | ΔH 10 ⁷ J/kg Mol | ΔS kJ/kg Mol° | $\Delta H-T(S_1-S_2)$ 10 ⁷ J/kg Mol | $\eta_{rev.}^*)$ | $U_{rev.}$ Volt |
|-----------|-----------------------------------|--|--------------------------|---|------------------|--------------------|
| 400 | — 23,8940 | 24,30 | 47,7 | 22,395 | 0,92 | 1,16 |
| 500 | — 23,8940 | 24,39 | 49,66 | 21,91 | 0,9 | 1,135 |
| 1000 | — 23,8940 | 24,79 | 55,27 | 19,26 | 0,78 | 1,0 |
| 2000 | — 23,8940 | 25,17 | 58,12 | 13,55 | 0,54 | 0,7 |

*) Die Werte wurden berechnet nach Circular 500 (Selected Values of Chemical Thermo-dynamic Properties) 1952, und Circular 564 (Tables of Thermal Properties of Gases) 1955, US. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards. Sie beziehen sich auf den unteren Heizwert.

c. Probleme beim Bau einer Zelle

Die wichtigsten zu erfüllenden Bedingungen bestehen darin, dass die Reaktionen an den Elektroden rasch ablaufen, und dass keine störende Nebenreaktionen vorkommen. Dies wird erreicht durch gut reagierende Gase, grosse Oberflächen (z. B. poröse Elektroden), Katalysatoren, hohe Temperaturen, hohen Druck und durch das Redox-Prinzip. Mit zunehmendem Druck und höher werdender Temperatur nehmen die Schwierigkeiten wegen Undichtheiten und Korrosionen zu; also besteht auch hier der Wunsch, mit tiefer Temperatur arbeiten zu können; wir kommen darauf noch zurück.

Vorerst soll das Problem grosser reagierender Oberflächen und die katalytische Wirkung der Elektroden besprochen werden. Die Elektrodenentwicklung ist nämlich die wichtigste und schwierigste Aufgabe. Seit der Entdeckung des Prinzips verging rund ein Jahrhundert, bis man leistungsfähige Elektroden herstellen konnte. In [15] gibt Justi eine gute Darstellung dieser Aufgabe; Bild 47 zeigt das Wesentliche.

Um grosse Stromstärken zu erzielen, sind pro cm² etwa 200 000 Poren mit richtigem Durchmesser erforderlich. Die Oberflächen müssen zudem stark katalytisch wirken, wobei für H₂-Elektroden Raney-Ni am aktivsten ist. Justi beschreibt die Herstellung geeigneter Doppelskelett-Katalysator-(DSK-)Elektroden mit einem Poresystem, wie es in Bild 47 dargestellt ist. Dieses ist glücklicherweise insofern stabil, als sich die Menisken bei Druckschwankungen an Stellen verschieben, an denen die Gleichgewichtsporen den richtigen Durchmesser haben. Es kommt die Bedingung dazu, dass der elektrische Widerstand klein sein soll; die Elektronen müssen ungestört abfließen können. Dasselbe gilt für die Reaktionsprodukte. Die Materialien sollen nicht korrodieren.

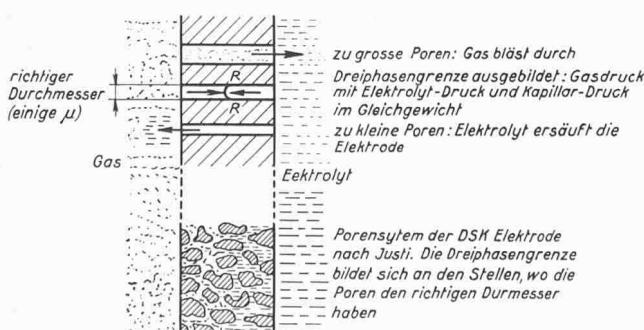


Bild 47. Gas-Diffusions-Elektrode für eine Brennstoffzelle mit flüssigem Elektrolyt. Eine Reaktion tritt nur dort auf, wo Gas, Elektrolyt und katalytische Wirkung des Elektrodenmaterials gleichzeitig zusammen kommen, also in jeder Pore längs einer Linie R am Umfang, die der Meniskus des Elektrolyten mit der Porenwand bildet. Um genügend Stromstärke zu erzielen, müssen sehr viele Poren vorhanden sein. Die Poredurchmesser müssen sehr gleichmäßig sein, da sich nur dann eine stabile Dreiphasengrenze ausbildet.

Nach einer amerikanischen Zusammenstellung arbeiten etwa 30 Firmen und 20 Hochschulen auf diesem Gebiet. Alle grossen Firmen entwickeln Brennstoffzellen und alle Armee-Stellen geben jährlich grosse Entwicklungsbeiträge dafür aus. In USA werden für diese Arbeiten jährlich 40 Millionen Dollar aufgewendet.

d. Die wichtigsten Entwicklungsrichtungen

Um einen Ueberblick über die vielen Entwicklungen zu geben, scheint eine Unterteilung nach dem verarbeiteten Brennstoff zweckmässig (Bild 48).

Die Hydrox-Zellen sind am weitesten entwickelt, da die H₂-O₂-Reaktion am leichtesten zu beherrschen ist. Sie läuft auch bei tiefer Temperatur rasch ab. Es entsteht das angehme Verbrennungsprodukt Wasser, und der Elektrolyt wird nicht aufgebraucht. Der hohe Preis von H₂ hat aber Brennstoffkosten pro kWh zur Folge, die etwa viermal grösser sind als bei konventionellen Kraftwerken. Zur Elektrizitätserzeugung in grösserer Masse müssen daher flüssige oder gasförmige Kohlenwasserstoffe verbrannt werden. Mit Erdgaszellen könnte sehr billige Elektrizität erzeugt werden.

Man unterscheidet Zellen mit *tiefer und solche mit hoher Betriebstemperatur*. Die H₂-Zellen können mit tiefer Temperatur betrieben werden. Die meisten dieser Zellen verwenden wässrige Elektrolyte.

Die bereits erwähnte Bacon-Zelle hat poröse Ni-Elektroden. Die Poredurchmesser sind abgestuft (16 μ auf Elektrolytseite, 32 μ auf Gasseite), um unempfindlicher gegen Betriebsdruckschwankungen zu sein; trotzdem muss der Druck auf 0,1 % genau reguliert werden. Die Zelle arbeitet wegen des nicht sehr stark aktiven Elektrodenmaterials unter hohem Druck und bei 200° C. Sie erreichte die bisher höchsten Leistungen (Tabelle 2). Zum Vergleich sei bemerkt, dass eine Starterbatterie nur 15—25 mA/cm² abgibt. Es wurden Dauerauf läufe von über 1000 Stunden durchgeführt; die Gase müssen rein sein.

Mit zunehmender Stromstärke sinken Nutzspannung und Wirkungsgrad. Dies ist eine Folge des ohmschen Spannungsabfallen in den Elektroden und im Elektrolyten sowie zunehmender Polarisation. Ein wichtiges Kennzeichen ist die enorme Ueberlastbarkeit der Brennstoffzelle. Wählt man z. B. 250 mA/cm², 0,805 V, $\eta = 0,63$ als Normalbetriebspunkt, so bleibt eine Ueberlastbarkeit von über 100 %.

Die Versuchsanlage von Bacon umfasste eine umfangreiche Kontrollapparatur zur genaueren Dosierung der Gaszuführung und zur Druckkontrolle. Die kreisförmigen Zellen mussten wegen dem hohen Druck durch schwere Deckel und Zuganker zusammengepresst werden.

Die Zelle der Union Carbide Corp. weist imprägnierte poröse Kohle-Elektroden (Anode: Pt., Pd; Kathode: Co-Oxyd, Pt, Ag) auf. Sie arbeitet bei tiefer Temperatur und geringem Ueberdruck. Dies waren daher bis vor kurzem die einzigen Zellen im praktischen Einsatz. Sie leisten guten Dienst in den «Silent-Sentry»-Radargeräten der amerikanischen Armee. Damit der Elektrolyt die Poren nicht füllt, ist eine dünne (1 Molekül dicke) Schicht von Paraffin aufgetragen. Diese lässt nur Ionen und individuelle Wassermoleküle durchtreten. Die Elektroden sind konzentrisch angeordnet. Der Wirkungsgrad ist auch hoch, aber die Leistungsdichte ist tiefer; sie beträgt nur 100 mA/cm² dauernd und 250 mA/cm² kurzzeitig. Alle derartigen Angaben sind als Orientierung über die Grössenordnung aufzufassen. Die Werte ändern sich dauernd, da die Entwicklung rasch fortschreitet.

Justi erreicht dank seinen hochaktiven Elektroden schon bei tiefen Temperaturen Stromstärken, die denjenigen von Bacon kaum nachstehen.

Während die drei letztgenannten Zellen ganz ähnlich sind, arbeitet die Niedrach-Zelle der General Electric Co.

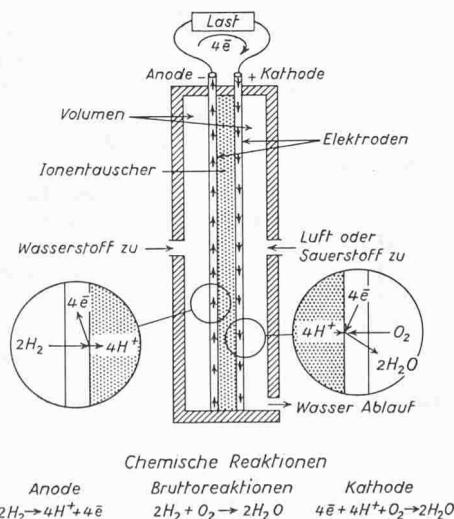
| Brennstoff → | H_2 Knallgas (Hydrox)-Zellen $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$ | C - Verbindungen | | |
|---|---|--|--|--|
| Elektrolyt ↓ wässrig z.B. KOH | Tiefe Betriebstemperatur (bis 200°C) | | | |
| | Bacon 200°C 40bar bis 680mA/cm² | Union Carbide 50°C 1-5bar 100mA/cm² dauernd 250mA/cm² kurz | Justi 50°C ~ 1bar bis 500mA/cm² 700 (bei 80°C) | |
| | | | Justi unter 100°C Brennstoff und Elektrolyt gemischt Alkohol - O₂: 20mA/cm² dauernd 70mA/cm² kurz Benzin, Dieselöl: Erste Versuche mit Seife als Lösungsvermittler | |
| | | | Allis-Chalmers (H₂-Propan) - O₂ 21mA/cm² bei Traktorvollast | |
| | Redox-Zelle ev. regenerativ z.B.: General-Electric 40mA/cm² | | | |
| Jonen-Austauscher Membran | General-Electric (Niedrach) max. 50mA/cm² | | | |
| | Hochtemperatur-Zellen 500-900°C | | | |
| Geschmolzenes Salz (Na, K-CO₃) in poröser Matrix (MgO) oder als Flüssigkeit | zum Vergleich: Starterbatterie 15-25mA/cm² | | Innerer Crackprozess z.B.: Univ. Amsterdam 700°C bis 70mA/cm² | |
| | | | Verbindung mit Wassergas Generator (Gorin) | |

Bild 48. Uebersicht über die Brennstoff-Zellen

nach einem anderen Prinzip. Es wird kein flüssiger Elektrolyt verwendet und damit das Dreiphasen-Reaktionsproblem umgangen. Als saurer Elektrolyt ist eine Ionentauscher-Membran vorgesehen, die nur H⁺-Ionen durchtreten lässt.

Wie Bild 49 zeigt, verläuft der Prozess anders als bei alkalischen Elektrolyten. Vor allem wird jetzt das Wasser an der O₂ (oder Luft)-Elektrode gebildet und tropft dort ab. Das Entfernen des Wassers macht also keine Schwierigkeit. Man steht hier am Anfang einer neuen Entwicklung. Heute dürften diese Zellen noch teuer sein. Sie sind aber besonders einfach und robust (Bild 50). Die charakteristischen Betriebsgrößen gehen aus Tabelle 3 hervor.

Bild 49. Knallgaszelle von General Electric mit Ionentauscher Membran. H₂ und O₂ werden auf entgegengesetzten Seiten mit Umgebungsdruck und -Temperatur zugeführt. Die Pt-Elektroden liegen links und rechts an der Elektrolyt-Polymer-Membran. Der Reaktionsverlauf ist eingetragen. Als Bruttoreaktion entsteht Wasser, das rechts abtropft, und es wird elektrische Arbeit geleistet. Die Bilder 49 bis 52 wurden freundlicherweise von der General Electric Co. zur Verfügung gestellt.



Die spezifische Stromdichte ist relativ gering. Jede Zelle ist aber nur 3 bis 6 mm dick und aus leichtem Material, so dass doch gute Leistungen pro Volumen und Gewicht möglich sind.

Tabelle 2. Messergebnisse der Bacon-Zelle bei 200°C, 40 bar

| Stromdichte mA/cm² | U Volt | $U / U_{rev.}$ | η (Gl. 4) *) |
|-----------------------|-----------|----------------|-------------------|
| 10 | 1,02 | 0,86 | 0,8 |
| 100 | 0,905 | 0,76 | 0,71 |
| 250 | 0,805 | 0,68 | 0,63 |
| 500 | 0,677 | 0,57 | 0,53 |
| 680 | 0,585 | 0,49 | 0,46 |

*) H₂O gasförmig, also auf den unteren Heizwert bezogen.

Tabelle 3. Ergebnisse aus dem Jahre 1960 mit Membran-Brennstoff-Zellen der General Electric Co.

| J mA/cm² | U Volt | H ₂ -Verbrauch kg/kWh | $\eta^a)$ | $\eta^b)$ | Leistungs- gewicht W/kg *) | Leistungs- volumen kW/m³ *) |
|-------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 1,07 | — | — | — | — | — |
| 10 | 0,93 | 0,0388 | 0,77 | 0,65 | 15,4 | 9,55 |
| 20 | 0,86 | 0,0418 | 0,71 | 0,60 | 34,4 | 21,20 |
| 30 | 0,76 | 0,0475 | 0,63 | 0,53 | 45,6 | 27,9 |
| 40 | 0,62 | 0,06 | 0,50 | 0,42 | 53,7 | 31,4 |
| 49 | 0,45 | — | — | — | 53,1 | 30,4 |

*) Zellen allein, ohne Gasbehälter und Leitungen; a) bezogen auf den unteren Heizwert; b) bezogen auf den oberen Heizwert.



Bild 50. Demonstrationsmodell einer GE-Membran-Brennstoffzelle nach Bild 49. Man erkennt die Wassertropfen, die sich an der O₂-Elektrode abscheiden. Die Elektrolyt-Membran ist nur 0,6 mm dick und weist eine Fläche von 11,4 cm² auf. Bei thermischem Wirkungsgrad (bezogen auf den oberen Heizwert) von 62 % werden 0,9 V · 0,03 A = 0,027 W abgegeben. Die Zelle trieb den kleinen Elektromotor während 100 Tagen

Vergleiche zwischen Zellen sind schwierig zu machen, da die Literaturangaben stark streuen. Um aber doch einen Anhaltspunkt zu vermitteln, sei mitgeteilt, dass die Zellen von Bacon (ohne die schweren Deckel und Zuganker) etwa 300 kW/m³ und 16 W/kg aufweisen, während Justi für seine Zellen 175 kW/m³ und 50 W/kg erwartet [13]. Die Zelle der General Electric Co. ist also hinsichtlich Gewicht interessant, und die amerikanische Armee hat sie daher beauftragt, eine tragbare Stromquelle zu entwickeln. Es handelt sich um eine Anwendung von Hydroxzellern, die auch für uns von Interesse ist. Sie soll daher anhand der Bilder 51 und 52 beschrieben werden.

Der Sauerstoff wird der Luft entnommen, der Wasserstoff als Metallhydrid aufbewahrt. Es lässt sich nämlich pro kg folgende Energie speichern: H₂ und O₂ in Flaschen 220 Wh, H₂ in Flasche, O₂ aus Luft 440 Wh, H₂ in Metallhydrid, O₂ aus Luft 620 Wh. Die ganze Einheit ist sehr solid und schlagunempfindlich. Sie widersteht heissem Klima und frostiger Kälte und kann von -55 °C bis +70 °C Temperatur betrieben werden. Der Unterhalt ist gering, da keine Pumpen, kein schwerer Kontrollapparat, kein flüssiger Elektrolyt und keine hohen Temperaturen notwendig sind. Der Wirkungsgrad ist 50 % bei Vollast.

Viele dieser Zellen können umgekehrt betrieben werden; dann zerlegen sie Wasser durch Elektrolyse. Auf diese Art kann man Energie speichern. Ein Atomkraftwerk würde z. B. dauernd auf Vollast laufen und Ueberschussenergie mit Zellen chemisch speichern. Während Lastspitzen würden die Zellen dann wieder elektrische Energie abgeben. Der Wirkungsgrad ist etwas tiefer als bei Pumpspeicherwerken, die bei uns eher in Frage kommen, wo genügend Wasser und hohe Gefäße vorhanden sind.

In der Hoffnung, auch bei tiefer Temperatur grosse Stromdichten zu erreichen und unreine Gase verwenden zu können, sind die Redox-Zellen erdacht worden (Bild 48). In

der Zelle reagieren besonders geeignete, möglicherweise teure Reduktions-Oxydations-Mittel, die in den Regeneratoren durch Brennstoff und Luft regeneriert werden. Erst die weitere Entwicklung wird zeigen, ob diese Idee Erfolg verspricht.

Es ist auch in Betracht gezogen worden, die *Regeneration* thermisch durchzuführen, wobei aber die Carnot-Wirkungsgradbegrenzung besteht. Auch Regenerationsvorgänge mit Lichtquanten und γ -Strahlen werden untersucht.

In den meisten Veröffentlichungen werden Zellen für C-Verbindungen mit Hochtemperaturzellen gleichgesetzt, da bis vor kurzem die Kohlenwasserstoffe nur bei Temperaturen über 500 °C genügend rasch reagierten. Da ein wässriger Elektrolyt dabei verdampfen würde, verwendet man geschmolzene Salze als Flüssigkeit oder in halbfüssigem Zustand in einer porösen Matrix.

In der Anode muss ein sehr komplizierter Prozess erfolgen: Der Brennstoff wird zu CO und H gebrannt, worauf diese Gase zu CO₂ und H₂O oxydieren. An sehr vielen Orten werden solche Hochtemperaturzellen entwickelt. Die längsten Betriebszeiten erreichte man an der Universität von Amsterdam bei gutem Wirkungsgrad, aber nicht sehr hohen Stromstärken. Von anderen Stellen wurden Dauerstromdichten von 140 mA/cm² gemeldet [17], und im Sonde Place Research Institute (Dorking, England) gelang ein Betrieb mit Petroleum. Es sind noch keine Hochtemperaturzellen betriebsreif.

Gorin hat vorgeschlagen [15], [16], die Zellen mit H₂ und CO aus einem Wassergenerator zu speisen. Das in den Zellen gebildete Wasser geht in den Generator. Elegant wird daher die nach Gl. (22a) abzuführende Wärme in der endothermen Reaktion im Generator ausgenutzt. Die Gesamtreaktion der Anlage ist C + Luft = Abgase + Elektrizität, also genau wie in einem Dampfkraftwerk. Da aber der Umweg über Wärme nicht gemacht wird, kann man möglicherweise höhere Wirkungsgrade erzielen. Bis zur praktischen Verwirklichung solcher Anlagen ist aber noch ein weiter Weg.

Aus neueren Veröffentlichungen geht hervor, dass auch Tieftemperaturzellen mit kohlenhaltigen Brennstoffen betrieben werden. Bei den von einer deutschen Forschungsgemeinschaft unter Prof. Justi untersuchten Zellen wird Brennstoff und Elektrolyt gemischt. Alkohol-O₂-Zellen funktionieren sehr befriedigend. Benzin und Dieselöl erfordern Zusätze, um eine Reaktion zu erzielen. Auf die Allis-Chalmers-Zellen ist bereits hingewiesen worden. Sie arbeiten bei tiefer Temperatur. Die Brenngasszammensetzung wurde nicht bekanntgegeben. Man weiß daher nicht genau, wo diese Zelle einzuordnen ist. Bei Traktorvollast war die Stromdichte 21 mA/cm².

Sollte ein Teil dieser Entwicklungen erfolgreich sein, so müssten zuerst Gasmotoren und Gasturbinen, später möglicherweise auch Diesel- und Benzimotoren auf gewissen Gebieten den neuen Maschinen weichen. Jede Zelle erzeugt etwa 1 V Gleichstrom. Durch Serieschaltung können bestensfalls etwa 700 V erreicht werden. Somit erscheint eine Anwendung in der Elektrochemie und in Aluminiumwerken sowie in der Traktion am aussichtsreichsten. Für Grosskraftwerke werden die heutigen Maschinen in absehbarer Zeit jedoch nicht verdrängt.

Für Verkehrsmittel kommen Hochtemperatur-Elemente wegen der Startschwierigkeiten nicht in Frage. Diese Zellen müssen aufgeheizt werden, bevor ihnen Strom entnommen werden kann. Niemand wird aber bereit sein, den «Motor» seines Autos vor der Abfahrt z. B. mit einer Lötlampe auf die richtige Temperatur zu bringen.

Bei ortsgebundenen Anlagen hingegen fällt dieser Nachteil weniger ins Gewicht. Man glaubt daher, dass es in etwa fünf Jahren möglich sein wird, Hochtemperaturzellen zu den gleichen Gestehungskosten wie kleine dieselelektrische Generatoren zu bauen und sie z. B. zur Stromversorgung abgelegener Siedlungen einzusetzen zu können [17]. Für Elektrizitätserzeugung in Kraftwerken würde man beim derzeitigen Entwicklungsstand teurere Brennstoffe benötigen, als sie bisher üblich waren. Es besteht die Möglichkeit, z. B. mit dem



Bild 51. GE-Modell AE 12 Brennstoffzellen «Power Pack». Das Gewicht beträgt 14 kg einschließlich einem Brennstoffkanister, der oben, unter dem gelochten Blech, angeschlossen wird. Der mehrmals brauchbare Kanister enthält Brennstoff für 14 Volllast-Stunden: 200 W bei 22 bis 28 V. Die untere Ecke ist herausgeschnitten und man sieht einige der dreissig Zellen von 11" x 11", die horizontal übereinander geschachtelt sind.

Shell Pressure Oil Gasification Process, Heizöle vorgängig in Wasserstoff und Kohlenmonoxid aufzuspalten und dann mit diesen Brennstoffen die Zellen zu betreiben.

Vollständigkeitshalber müssen noch die Zellen erwähnt werden, die nicht-konventionelle Brennstoffe verarbeiten. An einigen Orten werden regenerative Lithium-Wasserstoff-Zellen ($\text{Li} + \frac{1}{2} \text{H}_2 \rightarrow \text{Li H}$) ausprobiert. Weiter gibt es eine Kategorie von Zellen mit aufbrauchbaren Elektroden. Sie sind durch den laufenden Verbrauch von Material gekennzeichnet, das gleichzeitig als Elektrode und Brennstoff wirkt; dieses Material wird kontinuierlich nachgeschoben. Eine derartige Zelle der Union Carbide Corp. gründet sich auf die Gesamtreaktion $4\text{Na} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Na OH}$. Als laufend konsumierte Anode dient flüssiges Natrium-Amalgam. Der Sauerstoff tritt durch eine aktivierte, poröse Kohle-Kathode ein. Dem Elektrolyten, einer Salzlösung, muss dauernd neues Wasser zugesetzt werden.

Das Neueste sind biochemische Brennstoffzellen («Business Week», May 6, 1961). Bei ihnen werden Bakterien als Katalysatoren eingesetzt. Als Brennstoff dienen organische Substanzen, die unter Einwirkung der Bakterien zersetzt werden. Die Zersetzungswärme wird direkt in Elektrizität umgewandelt. Man sieht, dass die Forscher immer wieder neue Wege der direkten Energiekonversion entdecken.

Ein Hauptimpuls für die behandelten Maschinen ging von der Raumfahrt und der Waffenentwicklung aus. Dort interessiert beispielsweise das mitzunehmende Gewicht von Maschine plus Brennstoff, wenn ohne Auftanken lange gefahren werden muss (Bild 53).

Schon für mehr als zehn Stunden Betriebsdauer sind die besten Batterien der Brennstoffzelle unterlegen. Nach etwa einer Woche wurde übrigens auch der Dieselmotor überholt, der zwar leichter als Brennstoffzellen wäre, aber wegen dem geringeren Wirkungsgrad mehr Brennstoff verbraucht. Nach



Bild 52. Die GE-Brennstoffzellen-Generatoren eignen sich zum Einsatz in Frontnähe, da sie lautlos sind, keinen Rauch und wenig Wärme entwickeln. Im Bild liefern sie Strom für ein Übermittlungs- und Beobachtungsgerät. Eine Einheit von 14 kg (gemäß Bild 51) leistet das selbe wie ein Benzinmotor-Generator von 23 kg oder gewöhnliche Batterien von insgesamt 36 kg. Pro weitere 14 Stunden benötigt man nur je einen weiteren Brennstoffkanister von 2,7 kg. Für eine Woche reichen also 32 kg Brennstoff aus, verglichen mit fast einer halben Tonne gewöhnlicher Batterien. Leichte Stromquellen geben der Truppe erhöhte Beweglichkeit.

etwa einem Monat geht der beschriebene Isotopen-Halbleiter-Generator in Führung. Der thermionische Isotopen-Reaktor wäre möglicherweise noch besser. Bei intermittierendem Betrieb und wegen den gefährlichen Strahlen kommen Brennstoffzellen trotzdem hier noch in Frage. Für Betriebszeiten von über einem Jahr sind die Sonnenzellen immer am leichtesten. Für abgelegene Gegenden auf der Erde, wo Sauerstoff

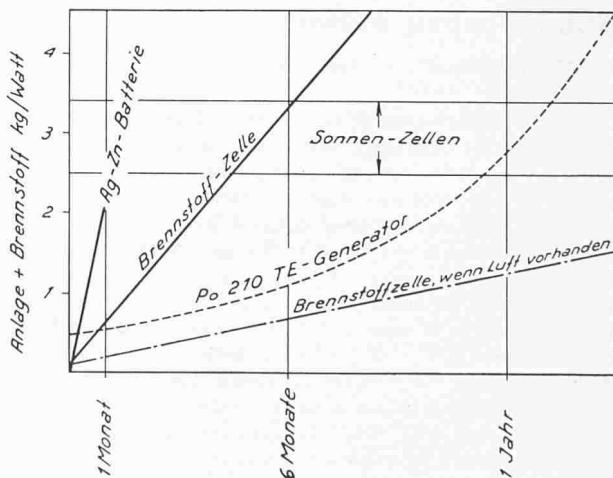


Bild 53. Vergleich verschiedener Stromerzeugungs-Methoden. Bei Anwendungen, wo nur nach langer Zeit oder überhaupt nie (Satellit) aufgetankt werden kann, ist meist folgende Aufgabe zu lösen: die notwendige Leistung soll während der verlangten Zeit mit dem kleinsten Anlage-Gewicht (einschließlich Brennstoff) erzeugt werden.

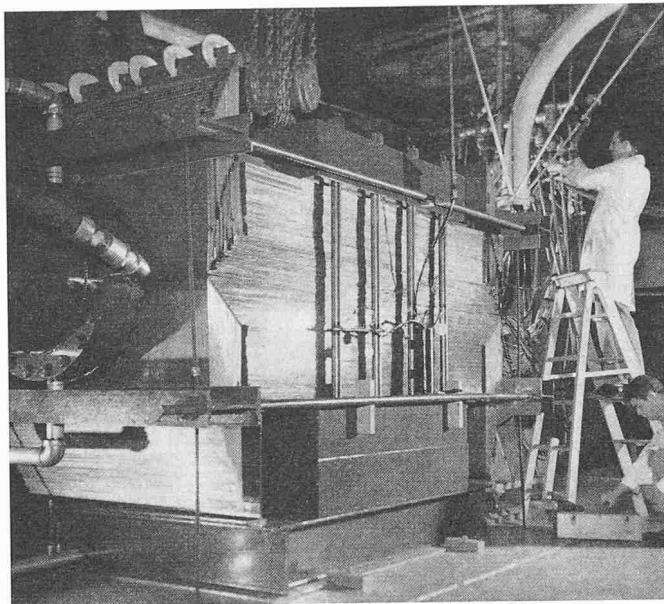


Bild 42 a. (Nachtrag zum Abschnitt 3. Der MHD-Generator, H. 23, S. 390; die Bildunterlage ist uns erst später zugestellt worden). Diese neue Versuchsanlage der Avco-Everett Research Laboratories dient der Erforschung der Konstruktionsprobleme, die zur Verwirklichung des MHD-Prinzips zu lösen sind. Dieser grösste und sehr fortschrittliche magnetohydrodynamische Versuchs-Generator gab bereits 205 kW elektrische Leistung ab; das Endziel ist rd. 500 kW. Der Magnet erregt ein vertikales Feld von 34 000 Gauss und enthält 20 t Kupfer und 23 t Eisen. Er umschliesst, wie das grosse Rohr links zeigt, den eigentlichen Versuchskanal für das 3000° K heisse Plasma

vorhanden ist, wären die Brennstoffzellen bis zwei Jahre geeignet.

Sonnenzellen sind Si-Zellen, die die Energie der Sonnenstrahlen mit 10 bis 14 % Wirkungsgrad in Elektrizität umwandeln. Sie sind teuer und kommen nur für Spezialanwendungen in Frage. Die in Bild 53 angegebenen Werte gelten für nicht orientierte Zellen. Für immer gegen die Sonne gerichtete Zellen wären die Werte günstiger. Das Problem der Orientierung ist aber nicht einfach und erfordert zusätzlichen Aufwand.

Zum Abschluss möchte ich allen, die mich beim Zusammenstellen der vorliegenden Arbeit unterstützt haben, meinen besten Dank aussprechen: Der AG. Brown, Boveri & Cie., speziell Dr. C. Seippel, für die Anregung, diesen Problem-

kreis zu studieren, und für die Erlaubnis zur Veröffentlichung; meinen Kollegen Dr. H. G. Plust, L. S. Dzung, Dr. H. U. Nabholz, Dr. B. Bürgel und R. Risch für ihre Anregungen und Korrekturen; sowie allen, die mir Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Kaye, J. A. Welsh: Direct Conversion of Heat to Electricity. New York, 1960, John Wiley & Sons.
- [2] R. Plank: Handbuch der Kältetechnik, Band 3, S. 52–81. Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1959, Springer-Verlag.
- [3] A. F. Joffe: Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling, London, 1957, Infosearch Ltd.
- [4] E. Justi: Die physikalischen Grundlagen und werkstoffkundlichen Fortschritte der Peltier-Kühlung. «Kältetechnik», 12. Jahrg. (1960), Heft 5, S. 126–132.
- [5] A. Käch: Zur Frage des Wirkungsgrades thermoelektrischer Generatoren. «E. T. Z.», Bd. 78 (1957), Heft 5, S. 182–187.
- [6] P. Sporn, A. Kantrowitz: Magnetohydrodynamics — Future Power Process? «Power», November 1959, S. 62–65.
- [7] L. P. Harris, J. D. Cobine: The Significance of the Hall Effect for Three MHD-Generator Configurations. «ASME Annual Meeting», New York, Nov. 29, 1960, Paper 60-WA-329.
- [8] P. H. Rose, R. F. Probstein, C. Mac Adams: Turbulent heat transfer through a highly cooled, partially dissociated boundary layer. «J. Aero-Space Sciences», Dec. 1958, S. 751–760.
- [9] S. Way: Magnetohydrodynamic Generator; Power from High-Temperature Gas. «Westinghouse Engineer», July 1960, S. 105–107.
S. Way, et al. Experiments with MHD Power Generation. «ASME Annual Meeting», New York, Nov. 29, 1960, Paper 60-WA-328.
- [10] B. C. Lindley: Large Scale Power by Direct Conversion. «Engineering», 22. April 1960, S. 568–569.
- [11] M. W. Thring: Potential Heat in Fuel: Direct Conversion to Electricity. «J. of the Inst. of Fuel», Juni 1960, S. 294–299.
- [12] R. J. Rosa: Experimental Magnetohydrodynamic Power Generator. «J. Appl. Phys.», April 1960, S. 735–736.
R. J. Rosa: Physical Principles of Magnetohydrodynamic Power Generation. «The Physics of Fluids», Vol. 4, Nr. 2, Febr. 1961, S. 182–194.
- [13] A. Käch: «Archiv der Elektrischen Uebertragung» 1961, S. 40–43.
- [14] Second Symposium on the Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics. 9. u. 10. April 1961, Philadelphia, Pa, U. S. A.
- [15] E. Justi, U. A. Winsel: Elektrochemische Energieerzeugung durch indirekte Brennstoffelemente. «Die Naturwissenschaften», 47. Jahrg., Heft 13 (Erstes Juli-Heft) 1960, S. 289–300.
- [16] W. Kongro: Die unmittelbare Gewinnung von Elektrizität aus Brennstoffen. «MTZ» Jahrg. 22, 1961, Heft 1, S. 11–17.
- [17] H. G. Plust: Elektrizität aus Brennstoffelementen. «Neue Zürcher Zeitung», 15. März 1961, Blatt 13.

Wohnungsbau sozial?

Von Claude Paillard, dipl. Arch., Zürich

Nicht mehr durch Kirche, Rathaus oder Schloss wird die heutige Stadt bestimmt, sondern überwiegend durch Lage, Gruppierung und Gestalt der Vielzahl übriger Bauten. Für das Wohl des Stadtbewohners entscheidend wirken sich vor allem die gegebenen Wohnmöglichkeiten aus. Winterthur hat sich immer wieder tatkräftig für den Wohnungsbau eingesetzt, sei es mit direkter Beteiligung der Stadt, sei es durch die Förderung privater oder gemischtwirtschaftlicher Unternehmen. Den regelmässigen Lesern der Bauzeitung wird der kürzlich vom Stadtrat durchgeführte Wettbewerb für eine Wohnbebauung im Grüzenfeld (SBZ 1961, Heft 19, S. 317) in frischer Erinnerung sein, und wir freuen uns, dass ein Mitverfasser des erstprämiierten Projekts zu unserer Festpublikation die folgenden Darlegungen beisteuert. K. Ch.

Nachfolgend einige Gedankengänge, die im Laufe der Beschäftigung mit der Wettbewerbsaufgabe entwickelt wurden. Diese Stellungnahme erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit, sie ist lediglich der Versuch eines Architekten, seine Ansichten, welche von denen der szepterführen-

den «Grossen» öfters wesentlich abweichen, zu rechtfertigen.

In der Tat sind die Ansichten über «sozialen Wohnungsbau» verschieden. Oft versteht man darunter den billigsten Wohnungsbau, wobei sich dies je nach Einstellung auf die bauliche Ausführung oder auf den Mietzins bezieht. Der Ausdruck gewinnt an Bedeutung, wenn er zum Qualitätsbegriff wird: Wohnungen und Wohnquartiere, welche auch minderbemittelten Familien ein würdiges, sinnvolles Wohnen ermöglichen. Eine unmittelbare Folge unserer Hochkonjunktur ist die Hebung des Wohnstandards in allen Kreisen der Bevölkerung. Uns Architekten fällt die Aufgabe zu, diese Entwicklung so zu beeinflussen, dass das «Wohnen» eine Intensivierung erfahren kann.

Es sei nicht bestritten, dass auch hier der wirtschaftlichen Komponente primäre Bedeutung zufällt. Wenn in der Folge der Versuch unternommen wird, den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Mietzins und Wohnungsplanung zu erfassen, so erfolgt dies, um dem Vorwurf, der Architekt sei unrealistisch, entschlossen entgegenzutreten. Wohnungsplanung ist im besten Sinne eine Rationalisierungsaufgabe.

DK 711.582.2