

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 16

Artikel: Der Stand der Entwicklung von Brennstoffzellen
Autor: Pohl, F.A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915721>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.03.2025

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

Der Stand der Entwicklung von Brennstoffzellen

Von F. A. Pohl

621.352.6

Die wirtschaftliche Anwendung von Brennstoffzellen konnte bis jetzt nicht realisiert werden, trotzdem sich technisch hochentwickelte Brennstoffzellenaggregate im Raumflug und auf der Erde bewährt haben. Die Gründe hierfür liegen entweder in zu hohen Kosten für Katalysatorelektroden oder in besonderen Anforderungen an den Brennstoff, die die Betriebskosten steigern. Die Kriterien für wirtschaftliche Brennstoffzellen werden behandelt und mit dem Stand der Technik verglichen.

L'utilisation économique des piles à combustible n'a pas encore pu être réalisé jusqu'à présent, bien que des agrégats de piles à combustibles ont atteint un haut degré de perfectionnement technique et furent éprouvés avec succès tant dans la navigation spatiale que sur terre. Les raisons de ce manque de rentabilité résident soit dans les frais trop élevés des électrodes catalyseurs, soit aux exigences particulières, imposées aux combustibles et qui augmentent les frais d'exploitation. L'exposé traite des critères de piles à combustibles économiques, en établissant une comparaison avec l'état actuel de la technique.

1. Einleitung

Das Gebiet der Brennstoffzellenentwicklung ist wie selten ein anderes gekennzeichnet durch optimistische Voraussagen, deren Realisierung auf sich warten lässt. Der Nobelpreisträger *Wilhelm Ostwald* [1]¹⁾ sagte schon 1894 zu diesem Thema:

«Aber dass es sich hier nicht um eine unpraktische Gelehrten-idee handelt, glaube ich allerdings annehmen zu dürfen. Denn wir haben hier in der Tat einen Fall, wo sich der Erfolg vollständig übersehen lässt, ebenso wie bei irgendwelcher mechanischer Aufgabe, und die Technik hat nur das Problem zu lösen, die billigste und beste Form zu finden, in welcher die Sache auszuführen ist.»

Dabei waren die hoffnungsvollen Voraussagen keinesfalls aus der Luft gegriffen, denn die Brennstoffzelle unterscheidet sich in einem entscheidenden Punkt von der konventionellen Energieumwandlung: in ihr gibt es keinen Verbrennungsprozess und, von einer geringen Verlustwärme abgesehen, keine Wärmeerzeugung. Damit wird ihr Wirkungsgrad nicht durch den Carnotfaktor begrenzt, und die Ursache für den Optimismus für die Brennstoffzelle war der theoretisch bis 100 % und bei entsprechender Entropieänderung darüber hinausgehende Wirkungsgrad der Umwandlung chemischer Energie in elektrische. Diese theoretischen Wirkungsgrade sind infolge Hemmung des elektro-chemischen Umwandlungsprozesses praktisch unerreichbar, und man muss erhebliche Abstriche von den früheren Hoffnungen machen. Trotzdem kann man auch heute auf Grund genauerer Kenntnis der Problematik sagen, dass die Brennstoffzelle reale Chancen als konkurrenzfähige Energiequelle hat.

Es sind in den vergangenen Jahren mehrere Beispiele bekannt geworden, in denen sich Brennstoffzellen als eine zuverlässig und einwandfrei arbeitende Energiequelle bewährt haben. In den Gemini-Raumfahrzeugen waren es 2-kW-Batterien aus 192 Einzelzellen und im Apollo-Programm [2] sind es jeweils drei unabhängige Batterien von 1,5...2 kW Leistung pro Raumschiff. Andere Anwendungen gab es in kleinen U-Booten, Gabelstaplern, Traktoren, Golfwagen, Leuchttürmen, Fernsehumsetzern usw. Im Target-Programm (Team to Advance Research for Gas Energy Transformation), welches die Versorgung von Haushalten mit elektrischer Energie durch Umwandlung der chemischen Energie

des Erdgases zum Ziele hat, werden zurzeit Aggregate von 12,5 kW Leistung gebaut [3; 4]. Ein Farmhaus in Connecticut wird als erstes praktisches Beispiel von einer solchen Batterie elektrisch voll versorgt.

Bei allen diesen Anwendungen haben die Brennstoffzellen die in sie gestellten technischen Erwartungen weitgehend erfüllt. Sie waren aber unwirtschaftlich, und es erhebt sich die Frage, welche Bedingungen eine wirtschaftliche und konkurrenzfähig einsetzbare Brennstoffzelle erfüllen müsste und in welchen Punkten der heutige Stand der Technik diese Bedingungen noch nicht erfüllt.

2. Kriterien der wirtschaftlichen Anwendung von Brennstoffzellen

Je nach geplanter Anwendung von Brennstoffzellen treten verschiedenartige Bedingungen in den Vordergrund, und zur Beurteilung der Konkurrenzfähigkeit gehört meist ein Vergleich mannigfaltiger Eigenschaften. Wenn man von der grossen Zahl möglicher spezieller Anwendungen absieht und nur die grundsätzlichen Bedingungen für eine wirtschaftliche Anwendung von Brennstoffzellen auf breiterer Basis betrachtet, verbleiben die folgenden vier Kriterien:

niedrige Investitionskosten,
hohe Lebensdauer,
handelsüblicher, billiger Brennstoff,
möglichst hoher Wirkungsgrad.

Eine auf dem Energiemarkt konkurrenzfähige Brennstoffzelle müsste demnach aus preiswertem Material in möglichst einfacher Fertigung herstellbar sein und mit billigem Brennstoff und Luftsauerstoff bei gutem Wirkungsgrad mehrere Jahre lang betrieben werden können. Eine Brennstoffzelle, die die genannten Bedingungen voll erfüllt, ist bisher in keinem der technisch weit entwickelten Programme realisiert worden. Zunächst seien die genannten vier grundsätzlichen Forderungen näher betrachtet.

2.1 Kapitalaufwand für Brennstoffzelle

In Niedertemperatur-Brennstoffzellen braucht man katalytisch wirksame Elektroden, um die Geschwindigkeit der Elektrodenvorgänge und damit die Leistung genügend zu erhöhen. Es gibt nur eine begrenzte Zahl von Stoffen, die elektrisch leitend und katalytisch wirksam sind. Die bekann-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

testen und am meisten verwendeten Elektrokatalysatoren sind Platin, Silber und Nickel. Diese metallischen Katalysatoren müssen eine besondere Struktur mit möglichst grosser spezifischer Oberfläche haben. Daher kommen zu dem Preis des Metalles noch Herstellungskosten.

Bei Verwendung von Edelmetallen stellen die Katalysatorkosten je nach Beladungsdichte der Elektroden einen erheblichen bis überwiegenden Teil des notwendigen Kapitalaufwandes dar. Bei Silber und Nickel sind die Kosten dem Preis der Metalle entsprechend niedriger. Die gesamten Investitionskosten für das Brennstoffzellenaggregat umfassen ausser den Katalysatorkosten noch die Herstellungskosten, einschliesslich der dabei benötigten sonstigen Materialien für Brennstoffzelle und Hilfseinrichtungen (Elektrolytpumpen, Wärmetauscher, Regeleinrichtungen usw.).

Bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen sind Katalysatoren nicht erforderlich, doch werden hier an die thermische Beständigkeit und Korrosionsfestigkeit der verwendeten Werkstoffe besonders hohe Anforderungen gestellt, wenn eine ausreichende Lebensdauer gewährleistet sein soll.

2.2 Lebensdauer von Brennstoffzellen

Kapitalkosten und Lebensdauer sind für die wirtschaftliche Anwendung von Brennstoffzellen von grosser Bedeutung, da sie über Amortisation und Verzinsung in die Energieerzeugungskosten eingehen. Hohe Lebensdauer senkt die Energieerzeugungskosten. Bei der Entwicklung einer konkurrenzfähigen Brennstoffzelle müssen daher alle Faktoren, die die Lebensdauer beeinflussen, beachtet werden. Die wichtigsten sind:

- Veränderung der Struktur des Katalysators, wobei die hochaktive, wenig geordnete Struktur durch Rekristallisation in eine weniger aktive, mehr geordnete Struktur übergeht.
- Vergiftung des Katalysators durch irreversibel adsorbierte Stoffe, zum Beispiel Schwefelwasserstoff oder Kohlenmonoxid.
- Abscheidungen in den feinen Elektrodenporen und damit irreversible Veränderung der Elektrodenvorgänge. Schädigung oder Zerstörung durch Korrosion.

Diese Einflüsse auf die Lebensdauer stehen meist mit natürlichen Eigenschaften der Materialien im Zusammenhang. Es gibt Stoffe, die zur Rekristallisation neigen, oder Metalle, die auf Grund chemischer Affinität mit gewissen Stoffen irreversibel reagieren und auf diese Weise «vergiftet» werden. Man muss entscheiden, ob ein bestimmter Stoff für die gestellte Aufgabe in der Gesamtheit seiner Eigenschaften geeignet ist. Nur sehr selten gelingt es, Eigenschaften den Anforderungen entsprechend zu verändern.

2.3 Billiger Brennstoff

Die für Brennstoffzellen bisher verwendeten Brennstoffe sind Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Ammoniak, Hydrazin, Wasserstoff und eine Reihe anderer, die für eine wirtschaftliche Anwendung nicht in Frage kommen.

Kohlenwasserstoffe können nur bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen direkt eingesetzt werden, da sie bei niedrigeren Temperaturen auch mit den besten bekannten Katalysatoren zu träge reagieren. Durch Wasserdampfspaltung (Konvertierung) entsteht aus Kohlenwasserstoffen Wasserstoff, der in Brennstoffzellen relativ ungehemmt umgesetzt wird. Daneben werden Kohlendioxid und Kohlenmonoxid gebildet.

Auch Alkohole reagieren in Niedertemperaturzellen nur langsam, und es gelang bisher nur, mit Platin befriedigende Stromdichten zu erreichen. Bei der Umsetzung entsteht Kohlendioxid, das mit alkalischen Elektrolyten zu Bikarbonaten und Karbonaten reagiert und den Elektrolyten verbraucht. Dies ist ein kennzeichnendes Problem aller Brennstoffzellen mit alkalischen Elektrolyten. Kohlendioxid muss aus den Betriebsstoffen solcher Brennstoffzellen vorher restlos entfernt werden, was die Energieerzeugungskosten erheblich steigert.

Ammoniak und Hydrazin liefern bei der Zersetzung Wasserstoff und lassen sich in Brennstoffzellen gut umsetzen. Die Brennstoffkosten liegen beim Ammoniak bereits deutlich über den Kosten von Kohlenwasserstoffen und Alkoholen (siehe Tabelle I), doch ergibt sich hier der Vorteil, dass kein Kohlendioxid entsteht. Der gleiche Vorteil des Hydrazins für alkalische Brennstoffzellen wird durch seinen hohen Preis entwertet. Für einen wirtschaftlichen Einsatz käme Hydrazin erst in Frage, wenn es gelänge, seinen Preis auf ein Zehntel zu senken.

Wasserstoff lässt sich, wie schon erwähnt, sehr leicht umsetzen. Als Gas ist es jedoch unhandlich und erfordert im Verhältnis zu seinem Gewicht einen sehr hohen Ballast an Transportbehältern (Stahlflaschen). In der für alkalische Brennstoffzellen geforderten Reinheit ist er ausserdem relativ teuer und kommt für eine wirtschaftliche Anwendung nicht in Betracht.

2.4 Wirkungsgrad von Brennstoffzellen

Der hohe theoretische Wirkungsgrad von Brennstoffzellen wird beim praktischen Betrieb durch verschiedenartige Polarisationserscheinungen erheblich erniedrigt. Der von der Belastung abhängige reale Wirkungsgrad von Wasserstoff-

Kennzahlen für Brennstoffe

Tabelle I

Brennstoff	Dichte g/cm ³	Unterer Heizwert kcal/kg	Energiedichte kWh/kg	Energiegewicht kg/kWh	Preis DM/kg	Wirkungsgrad %	Energiepreis ¹⁾ DM/kWh
Dieselöl	0,85...0,88	≈ 10 000	≈ 11,6	≈ 0,086	0,10	30	0,030
Motorbenzin	0,72...0,75	≈ 10 000	≈ 11,6	≈ 0,086	0,15	30	0,043
Methan	0,00066	11 930	13,9	0,072	0,50	30	0,120
Methanol	0,79	4 665	5,4	0,185	0,40	30	0,247
Propan, flüssig	0,50	11 070	12,9	0,078	1,00	30	0,260
Ammoniak	0,68	4 400	5,1	0,196	1,40	40	0,685
Wasserstoff, 250 atü	0,021	28 570	33,2	0,030	15,00	50	0,904
Hydrazin, 65%	1,03	2 500	2,9	0,345	6,00	50	4,128

¹⁾ Ohne Kapitalkosten für die Brennstoffzelle und ohne Betriebskosten bei dem angegebenen Wirkungsgrad.

Zelle = Anode Kathode	Elektrolyt	Brennstoff	Kapitalkaufwand DM/kW	Spez. Leistung mW/cm ²	Leistungs- gewicht ohne Zusatzgeräte kg/kW	Lebensdauer h	Energie- erzeugung- kosten ¹⁾ DM/kWh
Hochtemperaturzellen		Kohlenwasser- stoffe	1000...1500	200...300	40...60	8 000	0,20
Niedertemperaturzellen		Konv. Kohlen- wasserstoffe	3000...7000	100...200	30...40	10 000	0,50
Platin Platin	sauer						
Wolframcarbid Kohle	sauer	Konv. Kohlen- wasserstoffe	1000...2000	25...50	40...60	50 000	0,15
Platin Palladium	alkalisch	Methanol	4000...8000	25...50	30...50	10 000	5,—
Nickel Silber	alkalisch	reiner Wasserstoff	1000...2000	100...250	20...40	30 000	4,—
Nickel Silber	alkalisch	Hydrazin	1000...2000	50...100	10...20	20 000	10,—

¹⁾ Richtwerte bei Vollast und Dauerbetrieb (8000 h/a), einschliesslich Kapital-, Betriebs- und Energieumwandlungskosten.

Sauerstoff-Brennstoffzellen liegt in der Regel zwischen 0,7 und 0,25. Bei Verwendung von konvertierten Kohlenwasserstoffen wird der Gesamtwirkungsgrad durch den Wirkungsgrad der Konvertierung auf Werte zwischen 0,5 und 0,15 vermindert. Bei teuren Brennstoffen, wie zum Beispiel reinen Gasen oder Hydrazin, hat ein hoher Wirkungsgrad grosse Bedeutung, da er die Energieumwandlungskosten senkt. Bei einem billigen, ungereinigten Brennstoff spielt dagegen die Höhe des Wirkungsgrades nur eine untergeordnete Rolle.

3. Stand der Technik und Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen

Wenn man die perfekten Brennstoffzellen des Apollo-Programmes, des Target-Projektes oder der Teec-Einheiten (Total Energy and Environmental Conditioning) betrachtet und mit dem bisher Gesagten vergleicht, dann zeigt sich, dass ein hoher Stand der Technik nicht gleichbedeutend mit einer wirtschaftlichen Anwendbarkeit von Brennstoffzellen ist.

Im Target-Projekt wird Erdgas, das in den Vereinigten Staaten von Amerika billig ist, als Brennstoff verwendet. Um die Schwierigkeiten mit Kohlendioxid zu vermeiden, verwendet man einen sauren Elektrolyten und Platin als Katalysator, da unter den Metallkatalysatoren nur Edelmetalle in Säuren beständig sind. Platin hat sehr gute katalytische Eigenschaften, doch ist es kostspielig und auf der Erde nur in beschränktem Masse vorhanden. Das bewirkt trotz der geringen Betriebskosten mit Erdgas und Luftsauerstoff hohe Energieerzeugungskosten. In Europa ist das Erdgas wesentlich teurer und gemeinsam mit Platinbrennstoffzellen noch weniger wirtschaftlich als in den USA.

Bei den ebenfalls sehr weit ausgereiften Brennstoffzellen mit alkalischen Elektrolyten ist man wegen der Empfindlichkeit gegen Kohlendioxid gezwungen, kohlendioxidfreie Brennstoffe und Oxydationsmittel, das heisst hochgereinigten Wasserstoff und Sauerstoff, zu verwenden. Dadurch werden die Energieumwandlungskosten sehr hoch, und es besteht wenig Aussicht, diese an sich billige Brennstoffzellenart

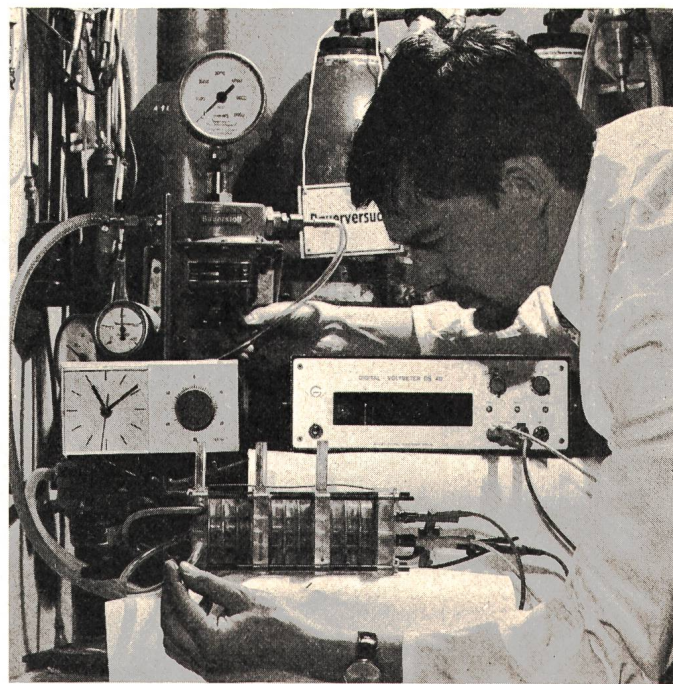


Fig. 1
Neuzelliges Labormodell einer Brennstoffzellen-Batterie mit Wolframcarbid/Kohle-Elektroden

die seit Herbst 1968 mit reinen und ungereinigten Betriebsstoffen ohne Leistungsabfall im Dauerbetrieb arbeitet. Als Belastung sind die Uhr und ein Widerstand angeschlossen

wirtschaftlich zu betreiben. Bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen werden Kohlenwasserstoffe direkt umgesetzt. Wirkungsgrad und spezifische Leistung sind daher hoch und die Energieumwandlungskosten gering. Auch der geringe Kapitalkaufwand für die Brennstoffzelle spricht für eine wirtschaftliche Anwendbarkeit. Wegen der hohen Betriebstemperatur sind diese Brennstoffzellen für einen stationären Dauerbetrieb prädestiniert. Dass sie trotz langjähriger Entwicklungsarbeiten technisch noch nicht ausgereift sind, liegt in lebensdauerbegrenzenden Erscheinungen: mangelnde

Temperaturwechselbeständigkeit und ungenügende Korrosionsfestigkeit der Elektroden unter Betriebsbedingungen.

Die edelmetalfreie Brennstoffzelle mit saurem Elektrolyten, die seit 1964 entwickelt wird [5; 6], ist in ihrem Entwicklungsstand die jüngste Brennstoffzellenart. Es zeichnet sich jedoch bereits deutlich ab, dass sie mit Abstand wirtschaftlicher sein wird als andere Niedertemperaturzellen. Die in ihr verwendeten Katalysatoren Wolframcarbid [7] und Kohle [8] sind gegen Kohlenmonoxid und Schwefelwasserstoff unempfindlich. Konvertierte Kohlenwasserstoffe und Luft können daher ohne Reinigung den Zellen direkt zugeleitet werden. Sie beeinflussen weder die Elektroden noch den sauren Elektrolyten [9]. Dadurch sind die Energieumwandlungskosten gering. Die Katalysatoren sind preiswert, so dass auch bei hoher Beladung der Elektroden mit Katalysator nur mässige Kosten entstehen. Infolge des hohen Schmelzpunktes neigen diese Stoffe nicht zur Rekristallisation und haben eine sehr hohe Lebensdauer. Eine Alterung konnte im Laufe der jahrelangen Untersuchungen weder bei Dauerbetrieb noch bei der Lagerung festgestellt werden. Eine Laborbatterie (Fig. 1) ist seit über 30 000 h in unverändertem Dauerbetrieb. Die wesentliche Aufgabe dieses Projektes besteht in der technologischen Entwicklung einer einfach herstellbaren, leistungsfähigen Brennstoffzelle. Hier gibt es noch Probleme technischer Art, nachdem die grundsätzlichen Fragen gelöst werden konnten. Der Prototyp einer konkurrenzfähig einsetzbaren Wolframcarbid/Kohle-Brennstoffzelle soll bis Ende 1973 erstellt werden und wird voraussichtlich aus Modulen etwa nach Fig. 2 zusammengesetzt sein.

In Tabelle II sind Daten der wichtigsten Brennstoffzellenarten zusammengestellt, wobei Kapitalaufwand, Lebensdauer und Energieerzeugungskosten als Richtwerte aufzufassen sind. Die grossen Differenzen der Energieerzeugungskosten zum Energiepreis in Tabelle I beruhen zum Teil auf hohen Kapitalkosten für die Brennstoffzellen beziehungsweise hohen Betriebs- und Energieumwandlungskosten. So stellt bei der alkalischen Methanolzelle neben den Kapitalkosten ein hoher Verbrauch an Elektrolyt durch Karbonatisierung und bei der Hydrazinzelle das Oxydationsmittel Wasserstoffperoxid einen hohen Kostenfaktor dar. Bei entsprechend höherer Lebensdauer wäre die Hochtemperaturzelle neben der Wolframcarbid/Kohle-Zelle am wirtschaftlichsten.

Damit sind die wesentlichen Anforderungen an Brennstoffzellen und der Vergleich der wichtigsten Brennstoffzellenentwicklungen mit diesen Kriterien kurz dargestellt. Die nahe Zukunft wird zeigen müssen, welches Entwicklungsprogramm die notwendigen Bedingungen für einen wirtschaftlichen Einsatz von Brennstoffzellen zu erfüllen vermag. Ein

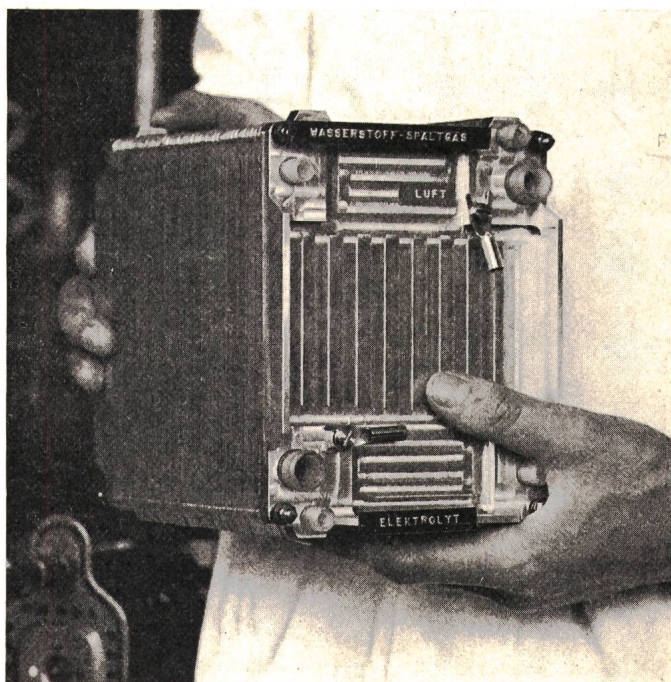


Fig. 2

Brennstoffzellen-Modul

aus 40 Zellen mit bipolaren Wolframcarbid/Kohle-Elektroden von je 150 cm² aktiver Oberfläche; 100...120 W Leistung bei 20...24 V Spannung

über mehrere Jahre in die Zukunft reichender grösserer Entwicklungsaufwand ohne deutlich sichtbare Erfolgchancen für einen wirtschaftlichen Einsatz ist bei der Brennstoffzelle kaum noch vertretbar.

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden zum Teil mit Mitteln des Deutschen Bundesministers für Bildung und Wissenschaft gefördert.

Literatur

- [1] W. Ostwald: Die wissenschaftliche Elektrochemie der Gegenwart und die technische Zukunft. Ztschr. Elektrotechnik und Elektrochemie 1(1894)3, S. 81...84 und Nr. 4, S. 122...125.
- [2] Stromversorgung bei Apollo XI. Chemie Ingenieur Technik 41(1969)15, S. A 1085...A 1088.
- [3] R. J. Bender: The fuel cell: Commercial in the 70's? Power 115(1971)4, p. 60...61.
- [4] Fuel cell moves into field-test stage. Electr. Wld. 176(1971)2, p. 81.
- [5] F. A. Pohl and H. Böhm: Wolframcarbid, ein neuer Elektrokatalysator für Brennstoffzellen. Comptes rendus des journées internationales d'étude des piles à combustible 3(1969), p. 180...182.
- [6] H. Böhm and F. A. Pohl: Die katalytische Aktivität von Wolframcarbid bei der Oxydation von Wasserstoff. Comptes rendus des journées internationales d'étude des piles à combustible 3(1969), p. 183...196.
- [7] H. Böhm: Adsorption und anodische Oxydation von Wasserstoff an Wolframcarbid. Electrochimica Acta 15(1970)-, S. 1273...1280.
- [8] H. Böhm: Sauerstoffelektroden für elektrochemische Zellen. Wiss. Ber. AEG-Telefunken 43(1970)3/4, S. 241...245.
- [9] F. A. Pohl and H. Böhm: Brennstoffzellen für ungereinigte Spaltgase. Erdöl und Kohle 23(1970)5, S. 301...303.

Adresse des Autors:

Prof. Dr.-Ing. F. A. Pohl, AEG-Forschungsinstitut, Goldsteinstrasse 235, D-6 Frankfurt/Main.