

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 90 (1999)

**Heft:** 11

**Artikel:** Tragbare Stromversorgung mit Brennstoffzellen : Entwicklung eines 12-V/25-A-Moduls mit Polymer-Elektrolyt-Membrane

**Autor:** Popelis, Ivan

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-901948>

### **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:** 20.01.2026

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

# Tragbare Stromversorgung mit Brennstoffzellen

## Entwicklung eines 12-V/25-A-Moduls mit Polymer-Elektrolyt-Membrane

Das Paul-Scherrer-Institut und die Fachhochschule Solothurn haben gemeinsam ein Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen-Modul 300 W für Wasserstoff-Luft-Betrieb entwickelt.

Die Hauptmerkmale des neuen Moduls sind: Einsatz einer kommerziellen Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und Verwendung von Luft als Oxidant anstelle von Sauerstoff.

Eine Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie eines Brennstoffs mit hohem Wirkungsgrad auf elektrochemischem Wege in elektrische Energie und Wärme um. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt je nach Typ der Brennstoffzelle 40–60%. Der wichtigste Bestandteil der Brennstoffzelle ist der Elektrolyt (Membrane), der Anode und Kathode voneinander trennt, aber die positiv geladenen H-Ionen durchlässt. In der Grenzzone Anode/Membrane reagiert Wasserstoff, und mit Hilfe des Katalysators entstehen freie Elektronen, die über einen externen Stromkreis von der Anode zur Kathode fließen. Bei der elektrochemischen Reaktion entsteht Wasser und zusätzlich wird Reaktionswärme frei.

Die wichtigsten Vorzüge einer mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle sind:

- direkte Stromerzeugung aus Brennstoff
- keine schädliche Abgasemission
- Energiewandlung erfolgt ohne bewegte Teile, daher geräuschlos mit hoher spezifischer Energiedichte und mit hohem elektrischen Wirkungsgrad

Eine Brennstoffzellenanlage besteht aus mehreren in Serie geschalteten Zellen (Stapel), der Anlagenperipherie und der Anlagensteuerung.

Anfang 1997 startete die ehemalige Ingenieurschule Grenchen-Solothurn gemeinsam mit dem Paul-Scherrer-Institut das erste Projekt «PEFC-Demoanlagen»

für Lern- und Vorführungsanwendungen» (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell). Das Ziel war die Entwicklung eines Funktionsmodells und die Herstellung von insgesamt zehn PEFC-Demoanlagen. Die Anlagen wurden Ende 1997 und Anfang 1998 an die interessierten Ingenieurschulen verteilt. Auf der Basis der so gesammelten Erfahrungen wurde das Projekt «PEFC Modul 300 W» realisiert.

### Membran-Elektroden-Einheit

Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen wurden in der Regel mit separaten Membranen und Elektroden (z.B. Nafion-Membrane und E-Tek-Elektroden) gebaut. Die chemische Vorbehandlung der Membrane und Imprägnierung der Elektroden verursachen hier einen grossen

Arbeitsaufwand. Beim Zellenzusammenbau müssen Dichtungen, Anode, Membrane, Kathode sehr genau übereinander gelegt und zusammengepresst werden. Dabei sind die Übergänge zwischen der Membrane und den Elektroden die kritischen Stellen. Um diesen heiklen Arbeitsvorgang zu automatisieren und den Arbeitsaufwand beim Zellenzusammenbau zu senken, wurden von einigen Membranherstellern die sogenannte Membran-Elektroden-Einheit (MEA) eingeführt.

Unsere Recherchen zeigten, dass die Beschaffung dieser Einheiten zurzeit noch sehr problematisch ist. Der Marktleader Ballard bietet die neuen Materialien gar nicht an, und einige Firmen (Dais Corporation, Dow Chemical, Dupont Fluoroproducts, Electro-Chem, Energy Partners, Fuel Cell Technologies) können oder wollen die MEA noch nicht liefern. Schliesslich hatten wir Erfolg bei der amerikanischen Firma W.L. Gore. Die Gore-MEA, Typ Primea 5xxx, basiert auf einer dünnen, porösen PTFE-Folie (Teflon), die mit perfluorierter Ionomer-Lösung (spezielles Polymer, das positiv geladene Ionen leitet) gefüllt ist. Die Elektroden werden direkt auf die Membrane aufgebracht und sind mit bedeutend weniger Katalysatormaterial (kleine

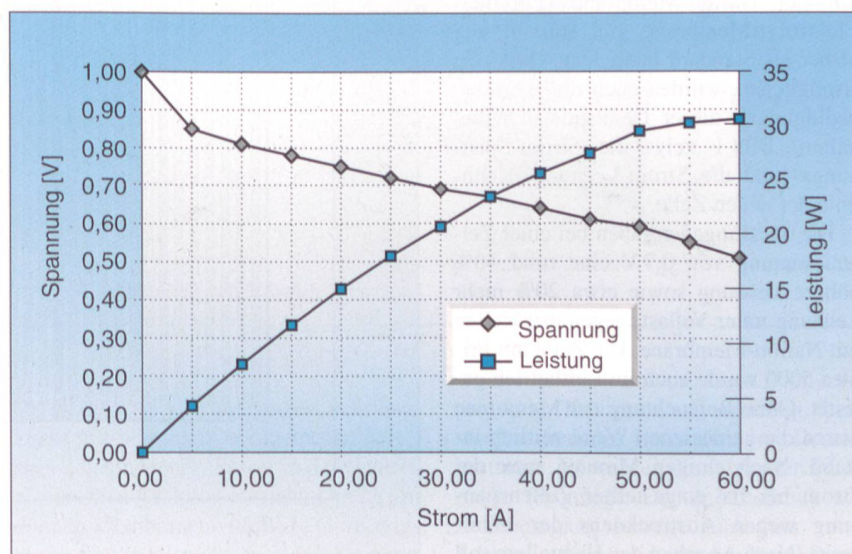


Bild 1 Kennlinien einer Brennstoffzelle mit Primea 5000 im H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Betrieb

Strom-Spannungs- und Strom-Leistungskurve der Zelle. Aktivfläche 100 cm<sup>2</sup>, Zellentemperatur 60 °C, Brenngas H<sub>2</sub> (p<sub>abs</sub> = 1,2 bar, Stöchiometrie ca. 1,1), Oxidant O<sub>2</sub> (p<sub>abs</sub> = 1,2 bar, Stöchiometrie ca. 1,3)

#### Adresse des Autors

Ivan Popelis, Dipl.-El. Ing. STH  
Fachhochschule Solothurn Nordwest-  
schweiz, Sportstrasse 2, 2540 Grenchen  
ivan.popelis@fthso.ch



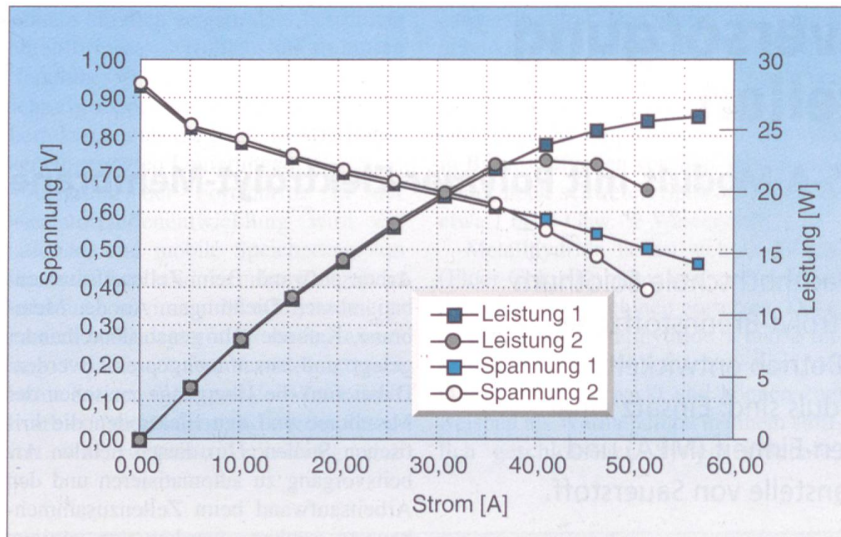


Bild 2 Zelle mit Primea 5510, H<sub>2</sub>/Luft-Betrieb

Strom-Spannungs- und Strom-Leistungskurven der Zelle. Aktivfläche 100 cm<sup>2</sup>, Zelltemperatur 60 °C, Brenngas H<sub>2</sub> (p<sub>abs</sub> = 1,1 bar, Stöchiometrie ca. 1,1), Oxidant Luft  
Luftstrom: 2 l/min (Messung 1) bzw. 1 l/min (Messung 2)

Platin-Partikel) als die E-Tek-Elektroden beladen. Ausserdem sind die Elektroden symmetrisch, das heisst, Anode und Kathode können vertauscht werden.

Das erste Muster, das wir erhalten haben, war Primea 5000 (Membrandicke 40 µm, MEA-Dicke rund 55 µm). Die Gore-MEA kann leider nicht direkt zwischen die Bipolarplatten eingelegt werden, weil die Elektrodenschicht sehr dünn und empfindlich ist. Zum Schutz und zur Gasverteilung ist hier ein Makrodiffusor notwendig. Wir haben das Toray-Papier eingesetzt. Für die ersten Tests haben wir die Bipolarplatten von unserer 1997 entwickelten PEFC-Demoanlage verwendet. Um einen direkten Vergleich mit der Nafion-Membrane (Polymer-Elektrolyt-Membrane von Dupont, die bisher als Standard betrachtet wurde) zu ermöglichen, wurden auch die Betriebsbedingungen dieser Demoanlage beibehalten. Bild 1 zeigt die Strom-Spannungs- und die Strom-Leistungs-Kennlinie der neuen Zelle.

Die Messungen ergaben bei einer Zellenspannung von 0,7 V eine rund 40% höhere Leistung sowie etwa 20% mehr Leistung unter Vollast, gegenüber Zellen mit Nafion-Membrane. Die Zelle mit Primea 5000 wurde auch im Luftbetrieb getestet. Ohne Befeuchtung der Membrane waren die gemessenen Werte zeitlich instabil. Nach einigen Minuten sank der Strom bei fix eingestellter Zellenspannung wegen Austrocknens der Membrane. Nach Angaben des Herstellers soll dieses Problem beim neuen Typ Primea 5510 mit 25 µm dicker Membrane weitgehend behoben worden sein. Das hat

sich bei unserem zweiten Muster bestätigt. Die Messungen (Bild 2) wurden bei unterschiedlichem Luftstrom (1 bzw. 2 l/min) durchgeführt.

Die Resultate bestätigten eine stabile Leistung der Zelle auch ohne Luftbefeuchtung. Mit einem Luftstrom von

1 l/min lieferte die Zelle Strom bis zu 40 A und mit 2 l/min über 50 A.

## Auslegung der Gaszuführung

Die Bipolarplatten der PEFC-Demoanlage von 1997 wurden für Sauerstoffbetrieb konzipiert. Die Abmessungen und das Material der Bipolarplatten haben sich bewährt und wurden übernommen, jedoch musste man das Flussfeld für den Luftbetrieb optimieren. Die Anforderungen für den Luftbetrieb unterscheiden sich hauptsächlich in zwei Punkten. Erstens muss die Durchflussmenge wegen des nur 20prozentigen Sauerstoffgehalts der Luft mehr als verfünffacht werden. Zweitens ist eine bessere Vermischung der Luft mit dem Wasserstoff notwendig, da sonst viel Sauerstoff ungenutzt verloren ginge und die Luftmenge noch erhöht werden müsste.

Wir haben Versuche mit drei verschiedenen Varianten des Multi-Meander-Flussfelds durchgeführt:

- sieben Kanäle mit rillenförmigem Kanalboden in fünf Sequenzen nacheinander im Mischkanal zusammengeführt
- fünf Kanäle mit glattem Kanalboden in sieben Sequenzen nacheinander im Mischkanal zusammengeführt

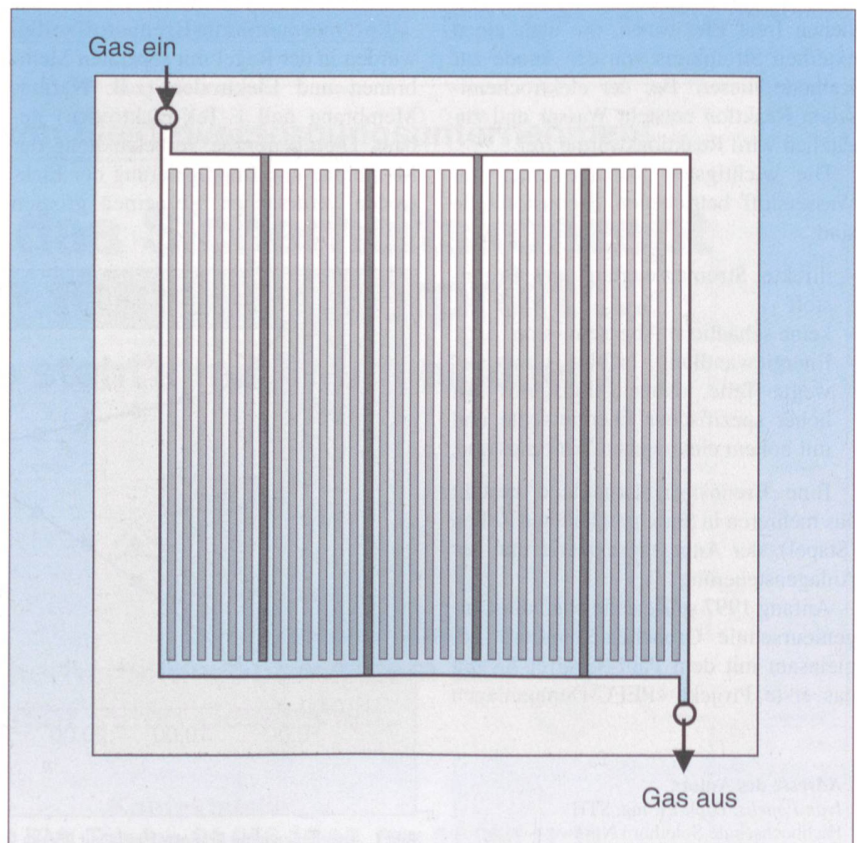


Bild 3 Flussfeld (Multi-Meander-Design). Sieben Kanäle in fünf Sequenzen werden nacheinander in Mischkanälen zusammengeführt.



- sieben Kanäle mit glattem Kanalboden, gemeinsamer Mischkanal nur am Anfang und Ende des Flussfeldes.
- Die besten Resultate erhielten wir mit der letzten Variante (Bild 3).

### Druckluftbereitstellung mit Kleinkompressor

Die Berechnungen und Versuche mit der Gore-MEA beim Luftbetrieb zeigten, dass eine Zelle rund 1 l/min Luft braucht, um eine Leistung von 15 W (Zellenspannung ca. 0,6 V) zu erzeugen. Bei 20 Zellen, die für die geplante Leistung von 300 W benötigt werden, braucht man dann 20 l/min. Der Überdruck am Zelleingang muss nur den Durchflusswiderstand von den Zuleitungen und vom Flussfeld kompensieren, was bei unserem Flussfelddesign einem Überdruck von etwa 0,1 bar entspricht.

Kompressoren mit Luftstrom von 20 l/min sind auf dem Markt erhältlich, aber die benötigte Leistungsaufnahme (ca. 50 W) ist für unsere Anwendung zu gross. Da die Speisung des Kompressors von der Stapelleistung (300 W) abgezweigt wird, würde der Kompressorantrieb über 16% der Gesamtleistung verbrauchen. Daher versuchten wir einen eigenen Kompressor zu bauen. Mit einem kombinierten und angepassten Aggregat, einer Mini-Membranpumpe von KNF Neuberger und einem Maxon-Motor, erreichten wir akzeptable Werte: Luftstrom >20 l/min bei 1,1 bar<sub>abs</sub>, Leistungsaufnahme <20 W, Arbeitsspannung 24 V.

### Bestimmung der Betriebsparameter

#### Wasserstoff-Arbeitsdruck und Überschuss

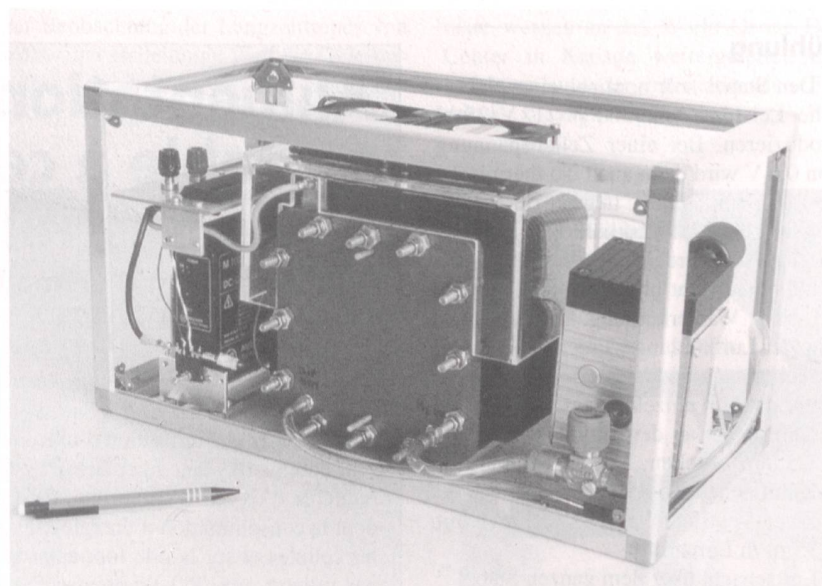
Die Wasserstoffversorgung der PEFC-Demoanlagen von 1997 hat sich gut bewährt. Weil die Anforderungen an die Wasserstoffzufuhr sich bei Luftbetrieb nicht ändern, haben wir dieses Prinzip übernommen. Der Arbeitsdruck am Zelleingang beträgt 1,1 bar<sub>abs</sub> und bleibt für jede Durchflussmenge konstant. Die Stöchiometrie bei Nominalleistung wird durch die Einstellung des Überschusses (Drosselventil am Stapelausgang) bestimmt und beträgt 1,1 bis 1,3.

#### Luft-Arbeitsdruck und Überschuss

Im Luftbetrieb muss man mit viel grösserem Überschuss arbeiten als beim Sauerstoffbetrieb, weil die Ausnützung des Sauerstoffes aus der Luft wegen der höheren Strömungsgeschwindigkeit unvollständig ist. Andererseits steigt bei grossem Luftdurchfluss ohne Befeuchtung

### Kompakte Energiequelle

- Zellaufbau: Aktivfläche 100 cm<sup>2</sup>, Masse 128×128×5,4 mm<sup>3</sup>
- MEA: Gore Primea 5510, Membranendicke 25 µm, MEA-Dicke ca. 40 µm
- Makrodiffusor: Carbon-Papier Toray imprägniert
- Dichtung: Teflon-Folie, Dicke 150 µm
- Bipolarplatte/Unipolarplatte: Elektrographit gasdicht, Dicke = 5 mm, Gas-Flow-field mit Multi-Meander-Struktur, Kühlrippe Aluminiumblech 1,5 mm, aktive Kühlfläche rund 220 cm<sup>2</sup>
- Stapelaufbau: 20 Zellen, Masse (mit Kühlrippen) 200×150×150 mm<sup>3</sup>, Gewicht ca. 7 kg
- Stromabnehmer: vergoldete Kupferplatten 1,5 mm dick
- Endplatten: eloxierte Aluplatten 15 mm dick mit 4 Nippel für PE-Schläuche, Ø<sub>int</sub> = 5 mm
- Kompressor: Mini-Membranpumpe von KNF mit Maxon-Motor
- Arbeitsdruck: 1,10 bis 1,15 bar<sub>abs</sub>
- Luftstrom: 15 bis 20 l/min
- Motorspannung: 14 bis 24 V
- Leistungsaufnahme: 14 bis 19 W
- Kühlung: 2 Ventilatoren 12 V/0,22 A mit Thermostat
- Luftstrom: 2×85 m<sup>3</sup>/h
- Leistungsaufnahme: 3 bis 5,5 W
- Temperatur beim Ein-/Aussschalten: 55/50 °C
- Elektronikeinheit: Stromversorgung für Kompressor und Ventilatoren: DC/DC-Wandler Melcher
- Messung von Spannung und Strom des Stapels: Digitalanzeigen Metronic
- Startvorrichtung mit Hilfsenergiequelle: Steuerschaltung für den Startvorgang, Batterie 12 V/0,8 Ah
- Gehäuse: universelles Alu-Profil-Chassis Unibox von Jaeger, Masse 450×250×250 mm<sup>3</sup>, Modulgewicht total rund 12 kg



PEFC-Modul 300 W für H<sub>2</sub>/Luft-Betrieb

die Gefahr der Membranenaustrocknung. Diese gilt besonders bei kleinem Zellenstrom, wenn wenig Wasser in der elektrochemischen Reaktion entsteht. Die 25 µm dünnen Membranen von W.L. Gore zeigten in dieser Hinsicht auch bei kleinerer Leistung (0,1 A/cm<sup>2</sup>) ein sehr gutes Verhalten. Der Arbeitsdruck wurde hauptsächlich durch die Parameter des Kom-

pressors (Kompromiss zwischen Leistungsaufnahme, Luftstrom und Druck) bestimmt. Es wurden die folgenden Parameter festgelegt: Der Arbeitsdruck am Zelleingang beträgt auch hier rund 1,1 bar<sub>abs</sub> und wird durch den Durchflusswiderstand der Zuleitungen und des Flussfeldes bestimmt (Luftausgang aus dem Stapel ist frei). Die Stöchiometrie



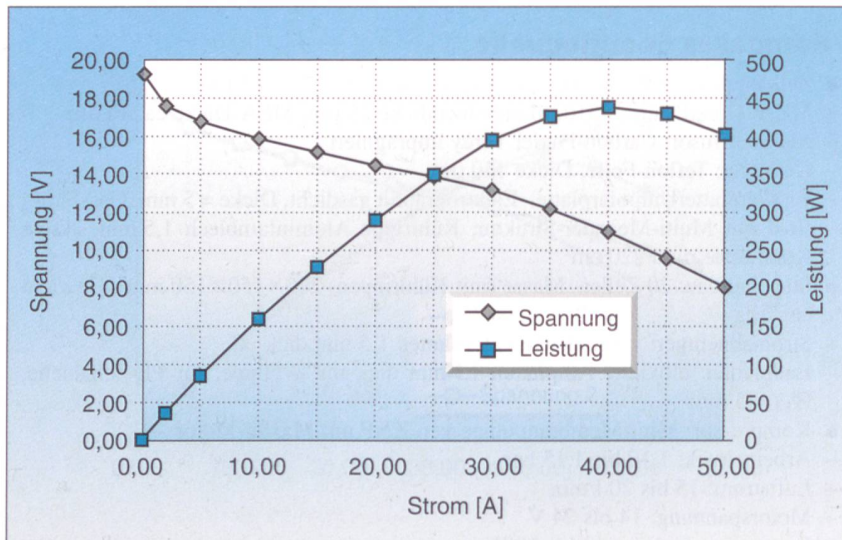


Bild 4 Stapel aus 20 Zellen mit Primea 5510

Strom-Spannungs- und Strom-Leistungskurve des Stapels. Brenngas  $H_2$  ( $p_{abs} = 1,1$  bar, Stöchiometrie ca. 1,2), Oxidant Luft ( $p_{abs} = 1,1$  bar, Stöchiometrie ca. 2,5 bei 25 A), Stapeltemperatur  $67^\circ C$

bei Nominalleistung beläuft sich auf 2,5. Die Luftmenge wird bei Nominallast durch die Kompressorleistung und bei Teillast durch die Einstellung der Speisepannung des Kompressormotors (14 bis 24 V) bestimmt.

### Kühlung

Der Stapel soll nominal eine elektrische Leistung von 300 W (12 V/25 A) produzieren. Bei einer Zellenspannung von 0,6 V wird dann auch die thermische Leistung um 300 W liegen. Bei dieser Leistung ist eine Luftkühlung noch gut möglich. Ausserdem sind bei der Luftkühlung Gewicht und Kosten kleiner als bei einer Wasserkühlung. Die Bestandteile der Luftkühlung wurden anhand von Berechnungen und Versuchen entworfen. Sie besteht im einzelnen aus:

- Kühlrippen an den Bipolarplatten aus 1,5 mm dicken Aluminiumplatten, Kühlfläche total  $4800 \text{ cm}^2$
  - Zwei Ventilatoren (12 V/0,22 A) mit  $85 \text{ m}^3/\text{h}$  Luftstrom
  - Luftschacht über dem ganzen Stapel
- Wir haben mittlerweile drei PEFC-Module 300 W gebaut. Ein Gerät wurde

der Einev Yverdon und ein der SI Lausanne für Versuche beim Einsatz in leichten Elektrobooten zur Verfügung gestellt (siehe Bulletin 25/1998, S.41). Bild 4 zeigt die Strom-Spannungs- und die Strom-Leistungs-Kennlinie eines Stapels mit 20 Zellen.

### Schlussbemerkung

Die Projekte, «PEFC-Demoanlagen für Lern- und Vorführungsanwendungen» und «PEFC-Modul 300 W  $H_2$ /Luft», die vom Paul-Scherrer-Institut zusammen mit der Fachhochschule Solothurn bearbeitet wurden, brachten der FHSO die benötigte Fachkompetenz in der Brennstoffzellen-Technologie. Die praktischen Erfahrungen, die bei dieser Zusammenarbeit gesammelt wurden, ermöglichen es jetzt der FHSO, eigenes Zellen- und Stapeldesign sowie kleine PEFC-Anlagen selbst zu bauen.

Die bisherigen Arbeiten und das vorhandene Interesse seitens der Schulen und der Industrie zeigen, dass auch PEFC mit kleinerer Leistung als Bleiakku-Ersatz in den mobilen und dezentralen Stromversorgungen in absehbarer Zukunft gute Chancen auf dem Markt erhalten werden.

\*

Der Autor dankt herzlich für die finanzielle Unterstützung vom Bundesamt für Energie und Herrn Akinori Tsukada vom Paul-Scherrer-Institut (Allgemeine Energieforschung, Elektrochemie) für seinen grossen Einsatz bei Entwicklung und Zusammenbau des BZ-Stapels.

## Alimentation électrique portable à cellules à combustibles

### Développement d'un module 12 V / 25 A à membrane électrolytique polymère

L'Institut Paul Scherrer et l'haute école spécialisée de Soleure ont développé ensemble un module de cellule électrochimique à électrolyte polymère de 300 W pour exploitation à hydrogène et à l'air. Les principales caractéristiques du nouveau module: utilisation d'une unité à membrane-électrode du commerce et de l'air comme oxydant à la place d'oxygène. En service à l'air, on peut se passer de bouteille d'oxygène comprimé. Cela nécessite en revanche un petit compresseur dont la consommation d'énergie est couverte par la pile. Les résultats mesurés sur les cellules et sur la pile font apparaître des réserves considérables de puissance par rapport aux 300 W prévus. Pour une puissance plus élevée cependant, le refroidissement par air devrait être remplacé par un refroidissement par eau.