

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 98 (2007)
Heft: 1

Artikel: Brennstoffzellen gehen in Serie
Autor: Santner, Guido
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857398>

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: 05.04.2026

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

Brennstoffzellen gehen in Serie

Dennoch lassen kommerzielle Systeme auf sich warten

Brennstoffzellen stehen in Konkurrenz mit Verbrennungsmotoren und Batterien. Ein Dieselmotor für ein Fahrzeug oder eine Laptopbatterie sind mittlerweile so weit optimiert, dass Brennstoffzellen heute im kommerziellen Markt kaum eine Chance haben. Trotzdem hat die Technologie bestechende Vorteile – sie ist leiser und effizienter als Motoren und erreicht längere Betriebszeiten als Batterien. Die Entwickler industrialisieren nun die Brennstoffzellen, bereiten sie auf den Markt vor. Neben der Grösse und dem Preis ist insbesondere die Lebensdauer ein Knackpunkt.

Die Brennstoffzellen stehen kurz vor der kommerziellen Einführung, hört man seit einigen Jahren. Dann lässt 2005 die Sulzer-Hexis, die bis dahin wohl die am weitesten entwickelte Brennstoffzelle vorwies, den Geschäftsbereich fallen.¹⁾

Guido Santner

Der Aufwand für ein kommerzielles System sei zu hoch, die Lebensdauer des Zellstapels zu gering. Wie weit ist die Technologie also wirklich?

Tatsächlich ist die Lebensdauer eines der wesentlichen Probleme. Während es reicht, wenn eine Brennstoffzelle für ein Laptop oder eine Mondlandefähre einige 1000 Stunden arbeitet, sollte eine Heizung, wie es das Gerät der heutigen Hexis ist, mehrere Jahre in Betrieb sein. Auch ein Kraftwerk sollte mindestens 4 Jahre denselben Zellstapel einer Brennstoffzelle nutzen können – das sind 35000 Stunden.

Aggressive Ionen im Zellstapel

Die Lebensdauer einer Brennstoffzelle hängt von unerwünschten chemischen Reaktionen im Zellstapel ab. Im Kern der Brennstoffzelle, in dem Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser reagieren und dabei Strom abgeben, entstehen aggressive Ionen. Während die einen Ionen gezielt

für den Ladungstransport genutzt werden, beschädigen andere, unerwünschte Beiprodukte, die Membran. Wobei sie keine Löcher in die Membran schmelzen, sondern Moleküle der Membran chemisch besetzen und Letztere damit verstopfen. In den Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die von Hexis verwendet werden, verdampfen zudem die Metallbeschichtungen, und in der Keramik entstehen Risse.

Diese Vorgänge, die zur Degradation der Brennstoffzelle führen, also den Wirkungsgrad im Betrieb kontinuierlich verschlechtern, werden zurzeit intensiv erforscht.²⁾

Eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle von Siemens erreicht momentan eine Lebensdauer von 20000 Stunden – dies sind gut 2 Jahre. Weiter ist die Firma MTU-CFC mit einer Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle, die 30000 Stunden erreicht – 3,5 Jahre. Letztere hat zudem den Vorteil, dass die Degradation im Betrieb nur klein ist und der Wirkungsgrad erst in den letzten Monaten stark abfällt. Hier ist es nicht die Membran, die aus einer Karbonatschmelze besteht, die degradiert, sondern die Metallträger werden von den aggressiven Karbonat-Ionen angegriffen und korrodieren. Sobald dieses Metall durchgerostet ist, fällt die Zelle aus – typischerweise im gesamten Zellstapel etwa zu derselben Zeit.

Verschiedene Brennstoffzellentypen

Die Degradation hängt also vom Typ Brennstoffzelle ab. Eine der heute am meisten verbreiteten Brennstoffzellen, die für Automobile oder Laptops genutzt



Bild 1 Brennstoffzellenanlage in der Hafencity in Hamburg (kleines Gebäude im Vordergrund)

Brennstoffzellen

wird, ist die PEM-Brennstoffzelle. PEM steht für Proton Exchange Membrane. Eine Plastikmembran (aus Polymer) in der Mitte des Aufbaus lässt nur Wasserstoffkerne, also Protonen, oder Wasserstoffionen durch. Wasserstoff (H_2) auf der Anodenseite wird durch Katalysatoren in einzelne Atome getrennt. Der positiv geladene Kern des Wasserstoffatoms kann die Plastikmembran durchdringen und verbindet sich mit dem Sauerstoff auf der anderen Seite (Kathode) zu Wasser. Das Elektron hingegen muss aussen herum – der Strom fließt (Bild 2). Diese Brennstoffzellen werden in der Raumfahrt, in U-Booten oder Fahrzeugen verwendet. Die Lebensdauer erreicht rund 5000

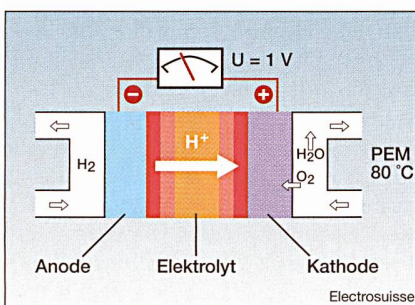


Bild 2 Funktionsprinzip der PEM-Brennstoffzelle

Stunden, was für solche Anwendungen reicht. Angenehm sind die tiefen Temperaturen von 60–80 °C. So können die Brennstoffzellen ohne aufwendige Isolation in Fahrzeuge eingebaut werden. Aufgrund der kleinen Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft ist die Kühlung der Brennstoffzelle trotzdem eine Herausforderung – oft hat es kaum Platz für die Kühler/Radiatoren im Auto.

Für grössere, stationäre Anlagen ist die PEM-Brennstoffzelle weniger gut geeignet. Denn die Abwärme ist zu kalt, um sie mit Wärmekopplern zu entnehmen – dies verringert den Gesamtwirkungsgrad. Zudem kann bei den tiefen Temperaturen Erdgas oder Methanol nicht direkt reformiert, also in Wasserstoff umgewandelt werden. PEM-Brennstoffzellen werden deshalb mit reinem Wasserstoff betrieben – der nicht überall verfügbar ist.

Erdgas verbrennen

Hochtemperatur-Brennstoffzellen verbrennen dagegen auch Erdgas – generell jedes Gas, das einen hohen Anteil Methan (CH_4) enthält, also auch Biogas aus vergärten Abfällen. Durch die hohen Temperaturen und die Zugabe von Wasserdampf (H_2O) wird das Methan in Wasserstoff (H_2) und Kohlendioxid (CO_2) umgewandelt, noch vor dem eigentlichen

Verbrennungsprozess. Die Solid Oxid Fuel Cell (SOFC) arbeitet bei 800 bis 1000 °C. Die Membran ist hier nicht aus Plastik, sondern aus einem Keramikoxid. Wobei die Experten nicht mehr von einer Membran sprechen, sondern vom Elektrolyten. Dieser lässt nur negative Sauerstoffionen hindurch. Statt dem Kern des Wasserstoffatoms geht also der doppelt negativ geladene Kern eines Sauerstoffatoms durch den Elektrolyten (Bild 3). Auf der Seite des Wasserstoffs (Anode) verbindet sich dieser zu Wasser (das hier gleich wieder genutzt wird, um das Methan in Wasserstoff umzuwandeln). Als Abgas bleibt CO_2 . Ein Problem bei der Entwicklung dieser Brennstoffzellen ist die hohe Temperatur – geeignete Materialien sind nur schwer zu finden.

Ein Vorteil der Hochtemperatur-Brennstoffzelle ist, dass sie keinen Kühlkreis benötigt. Die Hitze entweicht über die heissen Abgase. Zudem verbraucht die Reformation des Methans Energie und kühlt so die Anodenseite. Die Wärme der Zelle wird durch die Luftzufuhr auf der Kathodenseite reguliert.

Schmelzkarbonatzellen bei 650 °C

Einfacher ist es mit den Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen, auf Englisch Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC). Diese arbeiten bei 650 °C. Das reicht, um Methan in Wasserstoff umzuwandeln, braucht aber keine teuren Materialien. Die Membran, respektive der Elektrolyt, besteht aus einer Schmelze von Alkali-karbonat, also einer Verbindung von CO_3 -

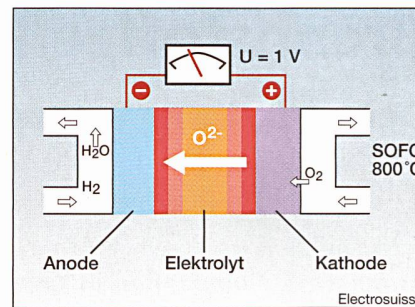


Bild 3 Funktionsprinzip der Hochtemperatur-Brennstoffzelle

Molekülen mit Natrium (Na), Kalium (K) oder Lithium (Li). Die beweglichen Ionen, die durch den Elektrolyten gehen, sind hier die negativ geladenen Karbonat-Ionen (CO_3). Diese entstehen auf der Kathodenseite aus CO_2 und Sauerstoff. Wie bei der SOFC-Brennstoffzelle wird auf der Anodenseite das Methan (CH_4) mit Wasserdampf in Wasserstoff (H_2) und CO_2 umgewandelt. Das CO_2 wird nun nach dem ersten Durchgang durch den Zellstapel von der Anodenseite auf die Kathodenseite geblasen, kommt hier mit Sauerstoff aus der Luft zusammen und bildet die Karbonat-Ionen (CO_3 , siehe Bild 4).

In einem Brennstoffzellensystem werden mehrere solche Zellen gestapelt (Bild 5). Beim MCFC-System der MTU wird in diesen Stapel von unten her Methan und Wasserdampf hineingeblasen. Durch feine Kanäle wird das Gas vertikal durch die Anode geführt. Oben leiten mehrere Ventilatoren das Gas mit dem CO_2 zur Seite des Stapels um, wo es horizontal zusammen mit Sauerstoff aus der Luft

Typ	Elektrolyt	Temperatur	Wirkungsgrad	Brennstoff	Anwendung
AFC	Kalilauge	80 °C	60–70 %	H_2 (reinst) O_2 (reinst)	Raumfahrt (Apollo, Spaceshuttle), Militär
PEMFC	Protonenleitende Membran	60–80 °C	50–68 %	H_2 Luft, O_2	Fahrzeuge, Raumfahrt (Gemini), Militär (U-Boote), Kraftwerke, Batterieersatz
DMFC	Protonenleitende Membran	80–130 °C	20–30 %	Methanol Luft, O_2	Fahrzeuge, Batterieersatz
PAFC	Phosphorsäure	200 °C	55 %	H_2 Luft, O_2	Kraftwerke
MCFC	Alkali-karbonat	650 °C	65 %	Erdgas, Biogas, H_2 Luft, O_2	Kraftwerke
SOFC	Keramikoxyd	700–1000 °C	60–65 %	Erdgas, Biogas, H_2 Luft, O_2	Kraftwerke, Haushalte, Bordstromversorgungen, mobile Systeme

Verschiedene Brennstoffzellen-Technologien [1]

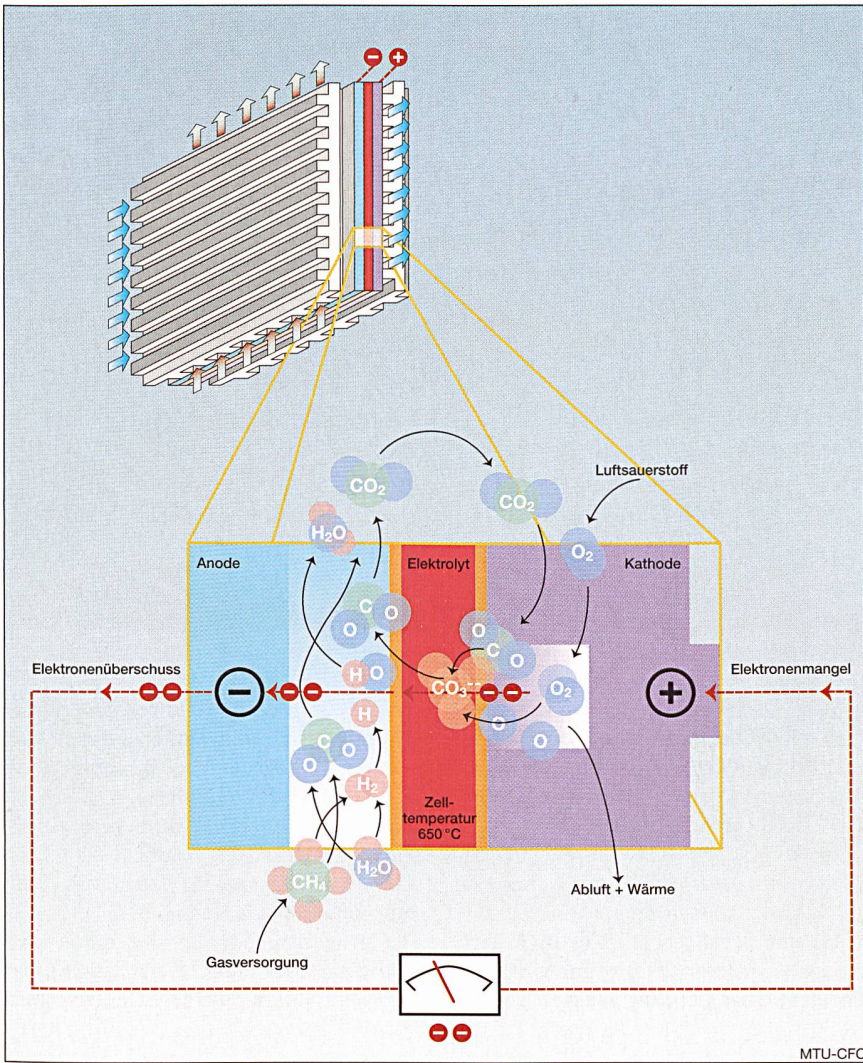


Bild 4 Funktionsprinzip der Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle

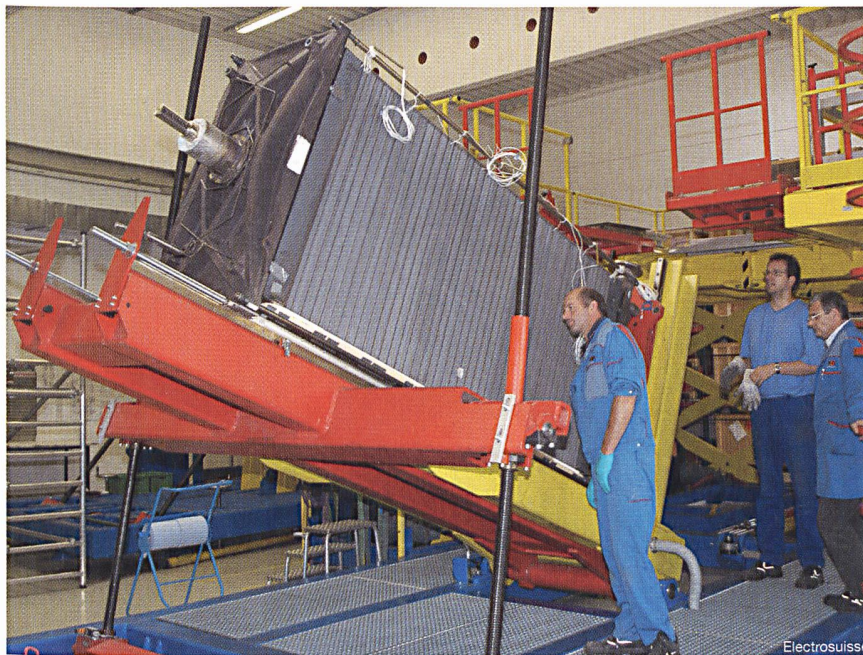


Bild 5 Fertigung des Brennstoffzellenstapels bei der MTU in München
Die einzelnen Zellen werden zuerst aufeinandergeschichtet und fixiert. Dann wird der Stapel abgelegt – in die Lage, wie er im System eingebaut wird.

nochmals durch den Stapel strömt, jetzt auf der Kathodenseite. Die Anode besteht also aus vertikalen Röhren im Sandwich des Zellstapels, die Kathode aus horizontalen Röhren.

Pilotanlage in Hamburg

Um Materialspannungen bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen zu vermeiden, werden diese möglichst durchgehend betrieben, ohne Unterbruch. Sie eignen sich deshalb in erster Linie als Kleinkraftwerk – sei es für ein Einfamilienhaus wie das SOFC-System von Hexis mit 1 kW elektrischer und 2 kW thermischer Leistung oder für einen Gewerbebetrieb wie das MCFC-System von MTU mit einer elektrischen Leistung von rund 200 kW und 180 kW thermischer Leistung.

So lief in der Uniklinik von Magdeburg von 2002 bis 2006 eine MTU-Brennstoffzelle als Pilotprojekt. Die Abwärme wurde zum Sterilisieren der chirurgischen Geräte verwendet. Eine weitere Brennstoffzelle von MTU ist in Hamburg in der Fernwärmezentrale der Hafencity installiert (Bild 1).³⁾ Auch hier als Demonstrationsprojekt, gefördert vom Zukunfts-Investitions-Programm (ZIP) des deutschen Bundeswirtschaftsministeriums. Denn neben der Wärmeleistung der erdgasgefeuerten Fernwärmanlagen von 360 MW sind die knapp 400 kW der Brennstoffzelle (elektrisch und thermisch) klein. Der Betreiber, die Firma Vattenfall Europe Hamburg AG, will mit der Brennstoffzelle Erfahrungen sammeln. «Die Energieerzeugungskosten sind noch zu hoch», sagt Heino Gödecke, zuständig für den Betrieb des Heizwerkes in der Hafencity, «das Interesse der Bevölkerung ist aber gross.»

Die Brennstoffzelle in der Hafencity ist in einem eigenen Gebäude untergebracht. Der Zellstapel in einem Metallzylinder und der Schrank zur Aufberei-

MTU-CFC Solutions

Die Firma MTU-CFC ist 1996 aus der Messerschmidt-Bölkow-Blohm (MBB) hervorgegangen. Deren Brennstoffzellenaktivitäten gingen an den Motorenhersteller MTU in Friedrichshafen über und damit an die DaimlerChrysler. Diese wiederum verkaufte im März 2006 die Off-Highway-Sparte an die schwedische Finanzierungsgesellschaft EQT. Die verschiedenen Gesellschaften der Sparte sind nun in der Tognum-Gruppe zusammengefasst.

Brennstoffzellen

der Zelle zurückzuführen», sagt Frei. Die heutige Zelle sei optimiert auf einen hohen Wirkungsgrad im stationären Betrieb und nicht auf schnelle Laständerungen. Der Wasserstoff sollte auf der ganzen Anodenseite vorhanden sein, darf aber nicht auf die Kathodenseite geblasen werden. Das System muss also so geregelt werden, dass am Ende der Anode der ganze Wasserstoff verbrannt ist. Zwischen der Anode und der Kathode ist ein Katalysator, der den überflüssigen Wasserstoff verbrennt. Würde dieser zum Beispiel grösser dimensioniert, wären schnellere Laständerungen möglich, der Wirkungsgrad aber kurzfristig schlechter.

Serienfertigung beginnt

MTU industrialisiert zurzeit ihre Fertigung von Brennstoffzellen: In einer Halle von 10000 Quadratmetern baut sie in Ottobrunn bei München eine Serienfertigung auf (Bild 9). Zugleich werden die Zellstapel optimiert, mit dem Ziel einer Lebensdauer von mindestens 40000 Stunden, also 4,5 Jahren. Insofern könnte man von einem kommerziellen System sprechen. Betrachtet man aber die Grösse des Systems inklusive der zusätzlichen Behälter für die Prozessgase, die es für das Starten und Stoppen der Anlage braucht, ist die Brennstoffzelle um Faktoren grösser als Dieselgeneratoren oder Gasturbinen, mit denen sie konkurriert. Auch wird die Anlage kontinuierlich von München aus überwacht; ein eigenständiger Betrieb, entweder mit eigenen Technikern oder ganz ohne Überwachung, ist noch zu riskant. Insofern muss man bei zukünftigen Anlagen ebenfalls von Feldtestprojekten sprechen – wenn auch mit mittlerweile ausgereiften Systemen.

Frei sagt dazu, dass die Prozessgase, die heute noch notwendig sind, in Zu-



Bild 9 MTU-CFC startet die Serienproduktion von Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen in einer 10000-m²-Halle in Ottobrunn bei München

kunft wegfallen werden. Heute werde die Zelle beim Start in ein künstliches Gleichgewicht gesetzt und bei einem Not-Aus mit Stickstoff geflutet. Man könnte aber beim Abschalten auch einfach alle Zu- und Abführungen schliessen, worauf in kürzester Zeit nur noch inerte Gase in der Brennstoffzelle wären.

«Der Zellstapel, die eigentliche Brennstoffzelle, ist schon weit entwickelt. Die Peripherie kann aber noch optimiert werden», sagt Frei. Dabei höre er immer wieder den Vergleich mit der Entwicklung von Computern. Aber so weit lasse sich die Brennstoffzelle nicht verkleinern, denn die Wärme muss irgendwie abgeführt werden. «Hätte sich der Verbrennungsmotor ähnlich wie die Computer entwickelt, hätte heute ein Automotor in

einer Zündholzschachtel Platz. Energie beansprucht einfach mehr Raum als Informationen!»

Referenz

[1] Michael Stanislawski: Verdampfung von Werkstoffen beim Betrieb von Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC), Dissertation Technische Hochschule Aachen, 2006

Angaben zum Autor

Guido Santner, dipl. El.-Ing. ETH, ist Redaktor des Bulletins SEV/VSE.
Electrosuisse, 8320 Fehraltorf,
guido.santner@electrosuisse.ch

¹⁾ Ein Investor hat die Brennstoffzellensparte von Sulzer übernommen. Diese hat heute den Namen Hexis und entwickelt das System mit kleinerem Budget weiter.

²⁾ Genau genommen gibt es nicht einen einzigen Mechanismus, der zur Degradation der Brennstoffzelle führt. Es sind mehrere Effekte, die auch vom Typ Brennstoffzelle abhängen. Oft wird nicht die Membran oder der Elektrolyt beschädigt, sondern die Trägermetalle (z.B. bei MCFC-Brennstoffzellen) oder die Katalysatoren.

³⁾ Weltweit wurden bisher 35 MCFC-Brennstoffzellen der Firma MTU installiert.

Résumé

Fabrication en série des piles à combustible

Et pourtant, les systèmes commerciaux se font attendre. Les piles à combustible sont en concurrence avec les moteurs à combustion interne et les batteries. Un moteur de véhicule Diesel, une batterie d'ordinateur portable sont désormais optimisés à tel point que les piles à combustible n'ont guère de chance sur le marché. Néanmoins, cette technologie offre des avantages évidents – elle est plus silencieuse et plus efficace que les moteurs et atteint des durées de service plus longues que les batteries. Maintenant, les concepteurs industrialisent et préparent les piles à combustible pour le marché. Outre la taille et le prix, c'est surtout la durée de vie utile qui représente un point délicat.

EASYLOC Ortungssystem

Zur Bestimmung der Lage und Tiefe von Kabeltrassen und Rohrleitungen

- Vermeiden Sie Kabelschäden
Messen Sie Ihre Leitung einfach und sicher ein
- Automatische Tiefenmessung per Knopfdruck auch ohne Sender
- 33 kHz – daher auch kompatibel zu anderen Ortungssystemen
- Grosses Display mit einfacher Menüführung

INTERSTAR AG, alte Steinhäuserstrasse 19, 6330 Cham

Tel. 041 741 84 42, Fax 041 741 84 66, info@interstar.ch, www.interstar.ch

