

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse

**Herausgeber:** Electrosuisse

**Band:** 95 (2004)

**Heft:** 10

**Artikel:** Die Funktionsweise der Brennstoffzelle : nichts für Laien?

**Autor:** Aeschbacher, Urs / Huber, Erich

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857946>

### **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:** 13.12.2025

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

# «Als Erstes wird der Wasserstoff an der Anode oxidiert ...»

## Die Funktionsweise der Brennstoffzelle: Nichts für Laien?

Der Megatrend zur Wasserstofftechnologie beschleunigt sich. Schon finden Grossversuche mit Brennstoffzellen-betriebenen Fahrzeugprototypen statt, mit denen auch die öffentliche Akzeptanz gefördert werden soll. Dabei wird auch die laienfreundliche Erklärung der Brennstoffzelle wichtig. Ein interdisziplinäres Autorenteam (Lernpsychologie/Physik) zeigt durch konkrete Analysen und Vorschläge auf, dass hier einiges verbessert werden kann.

■ Urs Aeschbacher und Erich Huber

### Ein häufiger Erklärungsansatz

«Als erster Schritt wird Wasserstoff einer Elektrode (Anode) zugeführt, die mit einem Katalysator aus feinverteiltem Platin beschichtet ist. Mit Hilfe des Katalysators wird das Molekül zunächst in einzelne Atome gespalten und anschliessend unter Abgabe je eines negativ geladenen Teilchens (Elektron) zu positiv geladenen Teilchen (Protonen,  $H^+$ ) ionisiert.»

Das sind die beiden Anfangssätze eines typischen, zehn Sätze langen und mit einer schematischen Zeichnung versehenen Erklärungstextes zur Funktionsweise der Brennstoffzelle. In einer kleinen Internet-Recherche, bei der wir aus dem grossen Angebot eine Zufallsstichprobe von zwanzig Erklärungstexten herausgriffen, zeigte sich: Im Anschluss an variable allgemeinere Einleitungssätze beginnt die Beschreibung der eigentlichen chemischen und physikalischen Brennstoffzellen-Prozesse bei zehn der zwanzig Texte sinngemäss identisch, eben in

dieser Weise: Als Erstes wird das Geschehen an der Anode beschrieben, bis und mit Oxidation der H-Atome zu  $H^+$ -Ionen und Abgabe der dabei überzählig gewordenen Elektronen an die Anode. Erst spä-

ter kommt das Geschehen an der Kathode und damit der Sauerstoff als Empfänger der Elektronen in den Blick (Bild 1).

Aus technischer Sicht liegt dieser am häufigsten gefundene Erklärungsansatz nahe: Er folgt dem Aufbau der Brennstoffzelle. Meistens wird ja gleichzeitig auch mit einem Schema gezeigt, dass im Kern der Brennstoffzelle Anode, Elektrolyt und Kathode als drei parallele Schichten angeordnet sind und so eine Art «Sandwich»-Struktur ergeben (siehe Abbildung 1). Und wenn entsprechend auch bei der Beschreibung schichtweise vorgegangen wird, so fängt man eben am ehesten dort an, wo auch der Input des Brennstoffs erfolgt. Aber Achtung: Aus lernpsychologischer Sicht ist das gerade der falsche Ansatz.

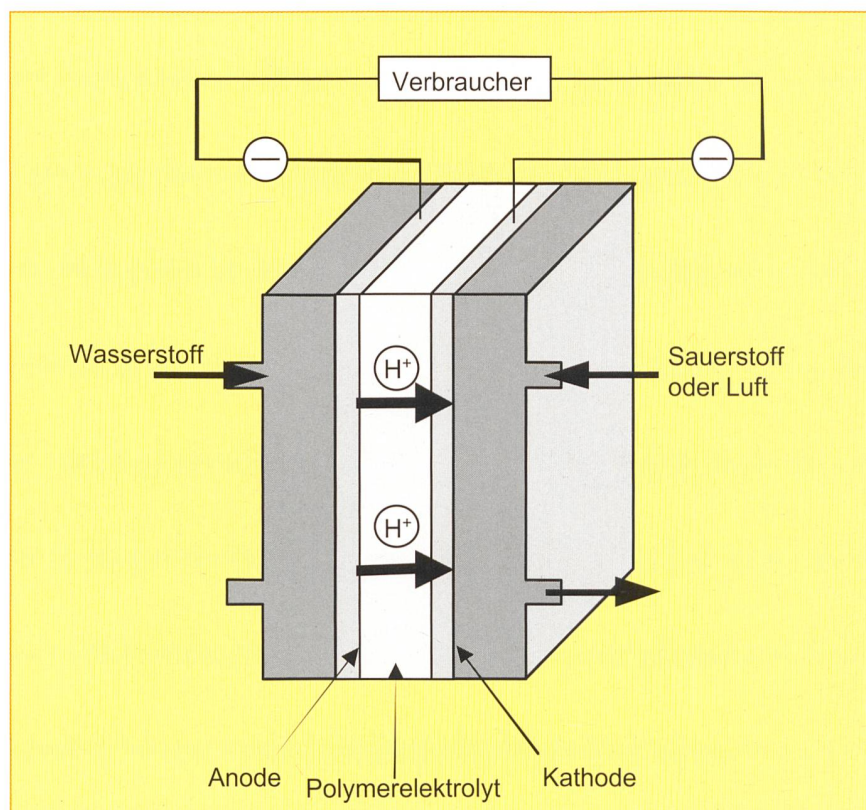


Bild 1 Eine übliche, relativ technikahe Darstellung der Brennstoffzelle: Die (von links) zugeführten Wasserstoffmoleküle werden an der Anode zu positiv geladenen Wasserstoffionen oxidiert, d.h., sie geben Elektronen ab. Die Wasserstoffionen ( $H^+$ ) wandern durch die ionendurchlässige mittlere Elektrolytschicht nach rechts zur Kathode. An der Kathode (rechts) reagieren die Wasserstoffionen mit dem von rechts zugeführten Sauerstoff und den zugeführten Elektronen zu Wasser. Werden Anode und Kathode durch einen elektrischen Leiter und einen Verbraucher miteinander verbunden, fliessen die Elektronen als elektrischer Strom (oben) von der Anode zur Kathode (die Darstellung betrifft den PEM-Typ. Bild und Legende lehnen sich an ein im Internet mehrfach gefundenes Muster an).

Adresse der Autoren  
Dr. Urs Aeschbacher, Erich Huber  
DemoEx GmbH  
Via Lavizzari 2  
6600 Locarno

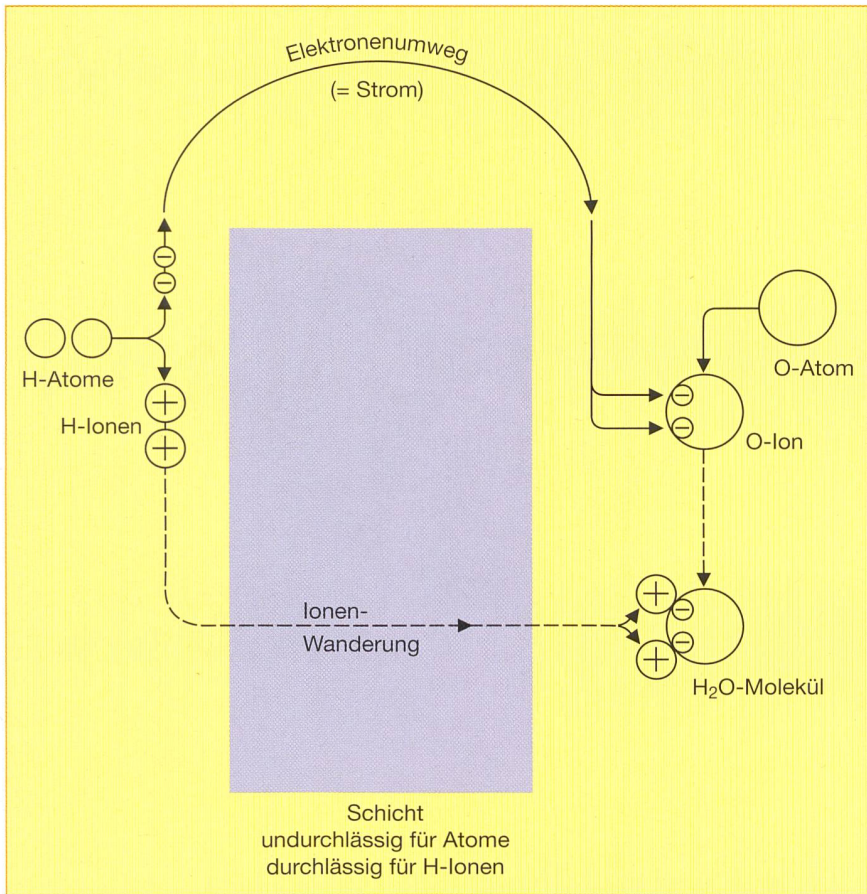


Bild 2 Eine abstraktere, auf den Redoxprozess zentrierte Darstellung der Brennstoffzelle (PEM-Typ): Die negativ geladenen Elektronen der Wasserstoffatome (H, links im Bild) «zieht es» zu den Sauerstoffatomen (O, rechts) hinüber (und zwar deshalb, weil sie dort tiefer und stabiler ins Atom eingebunden werden). Da die H-Atome und die O-Atome durch die mittlere Trennschicht voneinander ferngehalten werden, nehmen die Elektronen den Umweg «aussen herum». Sie durchfliessen als «Strom» eine elektrisch leitende Verbindung und können unterwegs z.B. in einem Elektromotor Arbeit leisten (oben, von links nach rechts). Durch den Wechsel der Elektronen werden die H-Atome (links) zu positiv geladenen Ionen, und die O-Atome (rechts) zu negativ geladenen Ionen. Diese können nun zusammenfinden und sich zu Wassermolekülen vereinigen, denn die Trennschicht lässt Wasserstoff in ionisierter Form durch (unten, von links nach rechts).

### Lernpsychologische Analyse

Gemäss der modernen Psychologie der Textverarbeitung kommt dem Textanfang entscheidende strategische Bedeutung für die Steuerung des gesamten Lese- und Verstehensprozesses zu (vgl. Kintsch, 1998). Also: Was macht der Laie mit diesem Textanfang? Was macht dieser Textanfang mit dem Laien?

Durch diesen Anfang empfängt der Laie sofort die stillschweigende Regieanweisung: «Versuche nicht, zu verstehen!» Bereits unter einer «Anode» kann der Durchschnittsleser sich nichts Genaues vorstellen (und daran ändert sogar ein gymnasialer Unterricht über elektrochemische Prozesse kaum viel, wie uns von erfahrener fachdidaktischer Seite bestätigt wurde). Und spätestens nach den zitierten Anfangssätzen ist dem Laien eines klar: Über das «Warum» der Elektronenbewegung wird er im Unklaren bleiben. Alles, was er versuchen kann, ist,

anhand des Textes wenigstens in der beigefügten schematischen Zeichnung den Fluss der Elektronen und Ionen zu verfolgen. Die «Erklärung» reduziert sich so zu einer Art Legende für die Abbildung (vgl. das Beispiel in Bild 1). Das bringt ihm aber bezüglich des Flusses der Elektronen keine grössere Erkenntnis, als dass sie eben von der linken, mit «Anode» beschrifteten zur rechten, mit «Kathode» beschrifteten Seite fliessen. Das Warum bleibt ihm ein Rätsel. Muss er – zum Beispiel als Schüler – die Sache dennoch lernen, wird er auf oberflächliches Auswendiglernen «umschalten» (müssen).

### (Um-)Zentrierung auf den Redoxprozess

Der angesprochene, hier auch für das Laien-Verstehen entscheidende Zusammenhang ist natürlich derjenige zwischen der «Red-» und der «Ox-»-Seite des Re-

dox-Prozesses. Die Oxidation des Wasserstoffs an der Anode (die H-Atome geben ihre Elektronen ab und werden dabei zu positiv geladenen H<sup>+</sup>-Ionen) und die Reduktion des Sauerstoffs an der Kathode (die O-Atome nehmen die Elektronen auf und werden dabei zu negativ geladenen O<sup>-</sup>-Ionen) müssen in ihrer gegenseitigen Verschränkung betrachtet werden, wenn man irgendetwas über das Warum verstehen will: Die Ursache des Elektronenübertritts besteht ja in einem Energiegefälle zwischen den beiden Bindungszuständen: Durch den Übertritt kann das Elektron von einem relativ höheren Energieniveau (distanzierte, «wacklige» Einbindung im Wasserstoffatom) auf ein niedrigeres Energieniveau (tiefere, stabilere Einbindung im Sauerstoffatom) «hinunterfallen», wobei diese Energiedifferenz frei wird. In der Brennstoffzelle geschieht dieses «Hinunterfallen» der Elektronen vom Wasserstoff zum Sauerstoff nun nicht in direktem Kontakt der beiden Gase (das ergäbe eine explosionsartige Verbrennung, die so genannte Knallgasreaktion), sondern auf dem Umweg über eine elektrisch leitende (eben Elektronen-leitende) Verbindung. Auf diesem Umweg kann die frei werdende «Fall-Energie» in elektrischen Apparaten genutzt werden.

Das heisst nun beileibe nicht, dass in einer laienfreundlichen Erklärung der Brennstoffzelle die chemische Redox-Begrifflichkeit vorkommen müsse. Wohl aber das Prinzip! Und das könnte durchaus «hemsärmlich» vermittelt werden, zum Beispiel so: Elektronen sind «viel lieber» beim Sauerstoff-Atom als beim Wasserstoff-Atom (weil sie beim Sauerstoff besser ins Atom eingebettet werden), und darum wechseln sie energisch, wenn sich irgendein Weg dazu eröffnet. Damit käme ein «Brennstoffzellen-Aha!» durchaus in Laien-Reichweite. Gerade dieser entscheidende (Redox-) Zusammenhang gerät aber aus dem Blick, wenn man, statt die Wasserstoff- und die Sauerstoffseite gemeinsam in ihrem Konkurrenzverhältnis zu betrachten, in zeitlicher Staffelung zuerst das Geschehen an der Anode für sich und dann das Geschehen an der Kathode je für sich betrachtet.

Und die beim Redoxvorgang entstandenen H<sup>+</sup>-Ionen und O<sup>-</sup>-Ionen? Sie ziehen sich wegen ihrer entgegengesetzten Ladung an. Und hier wird die Doppelfunktion der mittleren Schicht des Brennstoffzellen-«Sandwichs» wichtig: Einerseits trennt sie Wasserstoff und Sauerstoff voneinander, solange diese noch gasförmig sind. Damit verhindert sie die Knallgasreaktion, d.h. den direkten stür-

mischen Elektronenübertritt bei direktem Kontakt der beiden Gase, und zwingt die Elektronen zum Umweg über den äusseren Leiter. Andererseits ist sie selektiv durchlässig für bestimmte Ionen (darum heisst sie «Elektrolyt»-Schicht) und ermöglicht damit das Zusammenkommen der Wasserstoff- und Sauerstoffionen, die sich dann zu den (sehr stabilen, weil polaren)  $H_2O$ -Wassermolekülen verbinden. Je nach Typ der Brennstoffzelle lässt diese Mittelschicht die  $H^+$ -Ionen durch (die dann mit den wartenden  $O^-$ -Ionen zusammen Wasser bilden) oder sie lässt die  $O^-$ -Ionen durch (die dann mit den wartenden  $H^+$ -Ionen auf der anderen Seite Wasser bilden usw.). Bild 2 ist unser Versuch, die für das ursächliche Verstehen des Elektronenflusses wichtigen Zusammenhänge so knapp wie möglich im Bild darzustellen. (Für Laien Augen müsste und könnte dieses gedankliche Schema grafisch attraktiver gestaltet werden!)

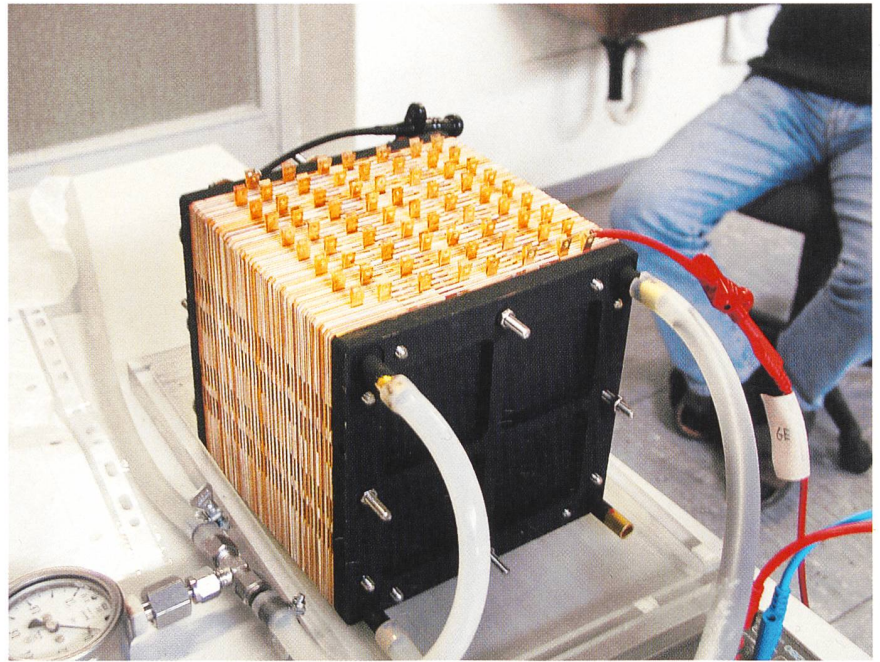


Bild 3 Brennstoffzelle (Foto Forschungszentrum Jülich).

### Didaktische Wegleitung

Einige Merkmale sollen diese Analyse resümieren und teilweise weiterführen:

- Die Fachausdrücke «Anode» und «Kathode» generieren bei Laien nicht Verständnis, sondern bloss «ehrfürchtige» Resignation und allenfalls Verwirrung. Das gilt ähnlich für andere Fachausdrücke wie «Oxidation», «Reduktion», «Redoxprozess», «Katalysator» usw. Also weg damit (jedenfalls im Haupttext und vor allem am Anfang)!
- Die Erklärung der Brennstoffzelle sollte nicht «schichtweise» erfolgen, indem man dem Schichtaufbau der Zelle folgt. Also nicht zuerst das Geschehen an der Anode beschreiben, um erst nachher zu Elektrolyt- und Kathodenschicht fortzuschreiten!
- Ins gedankliche Zentrum (und daher aus lernstrategischen Gründen an den Textanfang) gehört der Redox-Zusammenhang (allerdings ohne diesen fachlichen Namen), also die gegenseitige «Verzahnung» der Abläufe an der Anode und an der Kathode! Die Details der letzteren kommen erst nachher, wenn überhaupt.
- Abbildungen (inklusive komputeranimierte Bilder) wirken keineswegs immer als Verständnishilfen; sie können stattdessen auch die Verwirrung steigern (vgl. Lewalter, 1997; Schnotz & Bannert, 2003). Im Falle der Brennstoffzelle gilt auch für bildliche Darstellungen: Nähe zum technischen

Aufbau der Brennstoffzelle erschwert dem Laien das Verständnis des Prinzips. Daher empfehlen wir, neben einer relativ techniknahen Skizze in der Art von Bild 1 (wie wir sie in unserer Stichprobe bei mehreren Erklärungen der PEM-Brennstoffzelle gefunden haben) eine zweite Skizze in der Art von Bild 2 beizufügen, die eher ein abstraktes Fluss- und Übersichtsdiagramm der gedanklichen Schritte darstellt. Je prägnanter dort sowohl die einzelnen gedanklichen Schritte oder «Operationen» (H-Oxidation und O-Reduktion, Elektronenwanderung und Ionenwanderung usw.) erscheinen, und je übersichtlicher gleichzeitig deren Ort und Funktion im Gesamtzusammenhang dargestellt wird, desto besser unterstützt

eine solche Skizze das prinzipielle Verstehen der Brennstoffzelle (vgl. Aebli, 1998; Aeschbacher, 1994), welches das technikbezogene Lernen begleiten sollte.

### Literatur

- Aebli, H. (1998): Zwölf Grundformen des Lehrens. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Aeschbacher, U. (1994): Verstehen als operatorische Beweglichkeit und Einsicht. In K. Reusser & M. Reusser-Weyeneth (Hrsg.). Verstehen. Psychologischer Prozess und didaktische Aufgabe. Bern: Huber.
- Kintsch, W. (1998): Comprehension. Cambridge: University Press.
- Lewalter, D. (1997): Lernen mit Bildern und Animationen. Münster: Waxmann.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003): Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13, 141-156.

«Pour commencer, l'hydrogène est oxydée par l'anode ...»

## Fonctionnement de la pile à combustible: pas pour les profanes ?

La tendance vers la technologie à base d'hydrogène s'accélère. Des véhicules prototypes fonctionnant avec des piles à combustible font déjà l'objet d'essais. Ces derniers doivent favoriser l'acceptation de ces véhicules par le grand public. Il faudra également fournir des explications de manière à ce que les profanes puissent aussi comprendre ce qu'est une pile à combustible. Une équipe d'auteurs interdisciplinaires (psychologie d'apprentissage/physique) montre par des analyses et des propositions concrètes que certains points peuvent être améliorés.