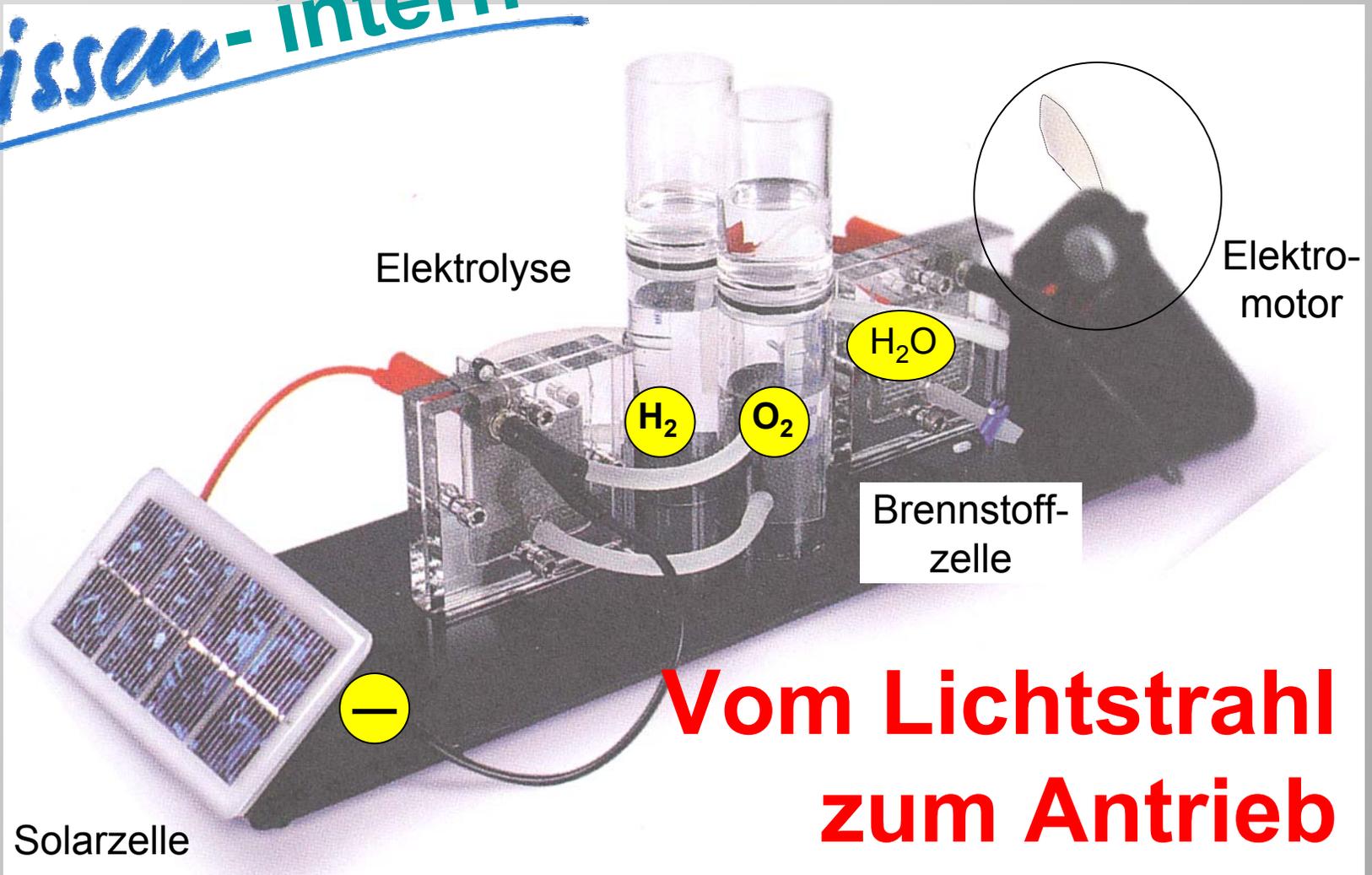


# Brennstoffzelle & Wasserstofftechnik

*Wissen - intern*



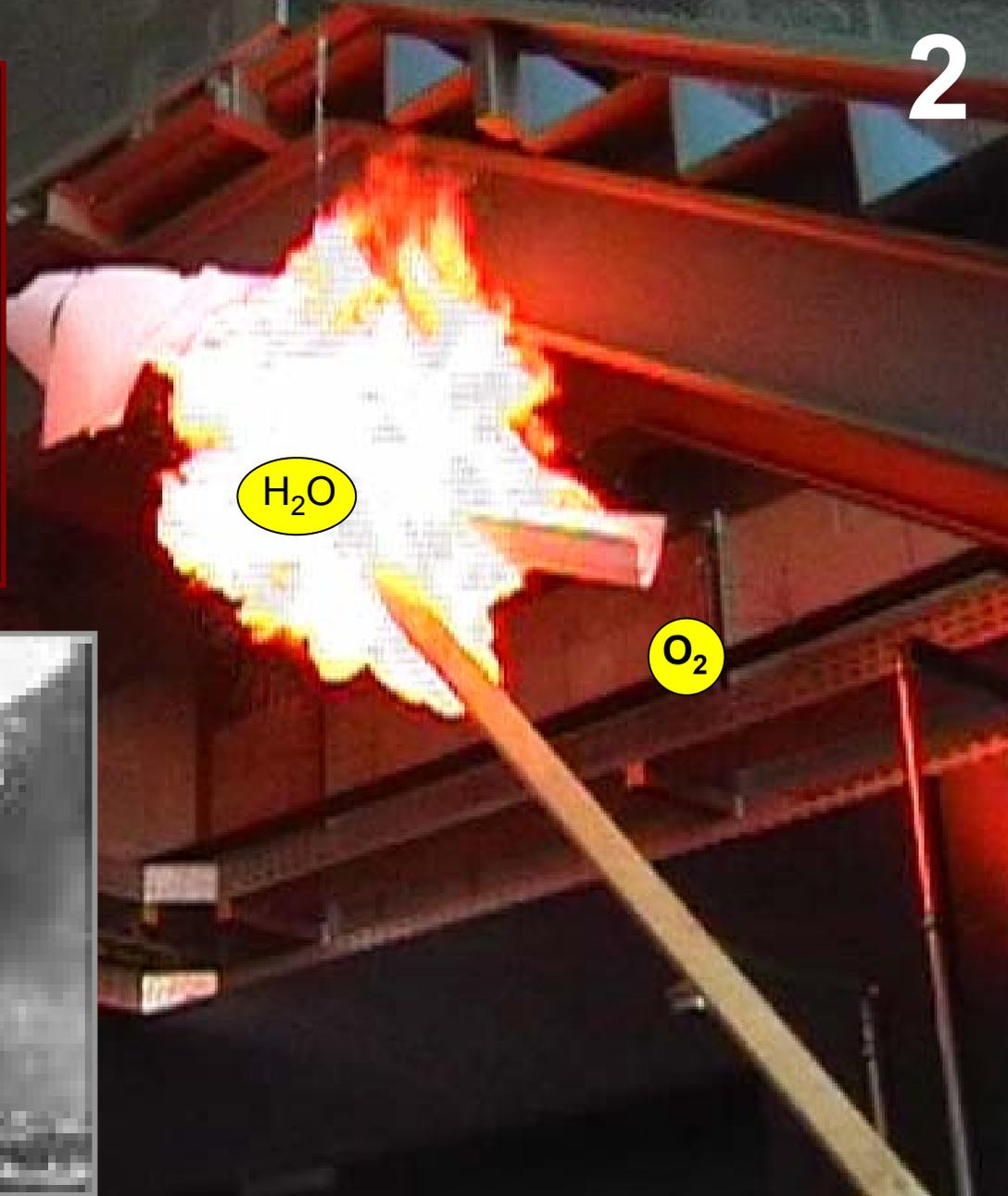
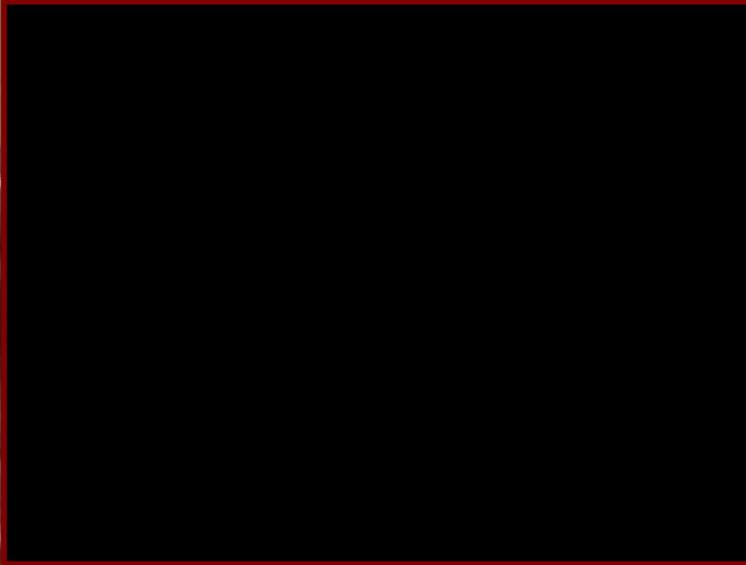


*Knallgasexplosion*



*Exotherme Reaktion*

$$\Delta H_r = -237 \text{ kJ/mol}$$



Lake Hurst 1937



O<sub>2</sub>: 209 ml/Ah

O<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>O

-

-

H<sub>2</sub>

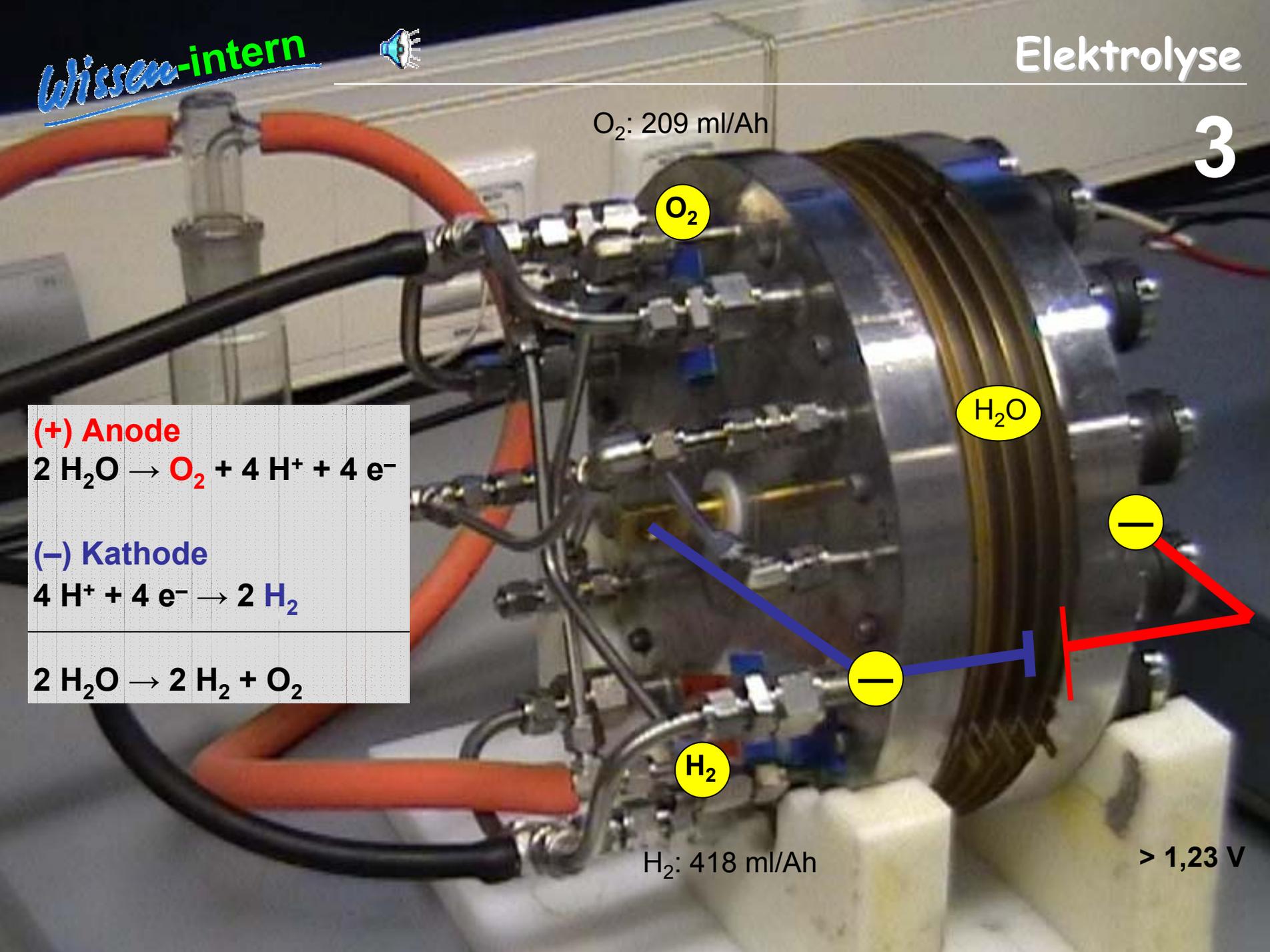
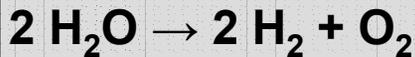
H<sub>2</sub>: 418 ml/Ah

> 1,23 V

(+) Anode



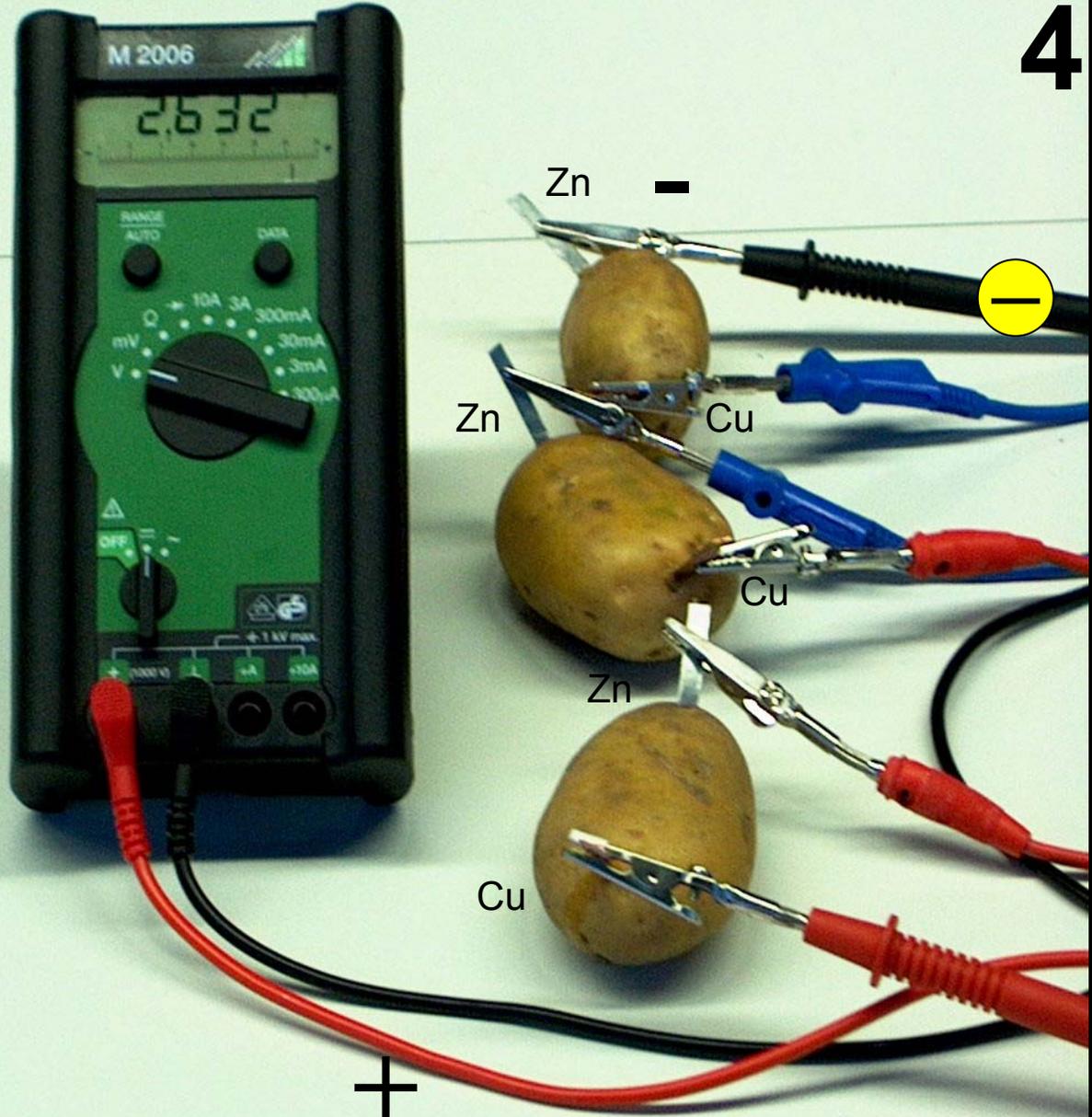
(-) Kathode





4

Die "Kartoffelbatterie"

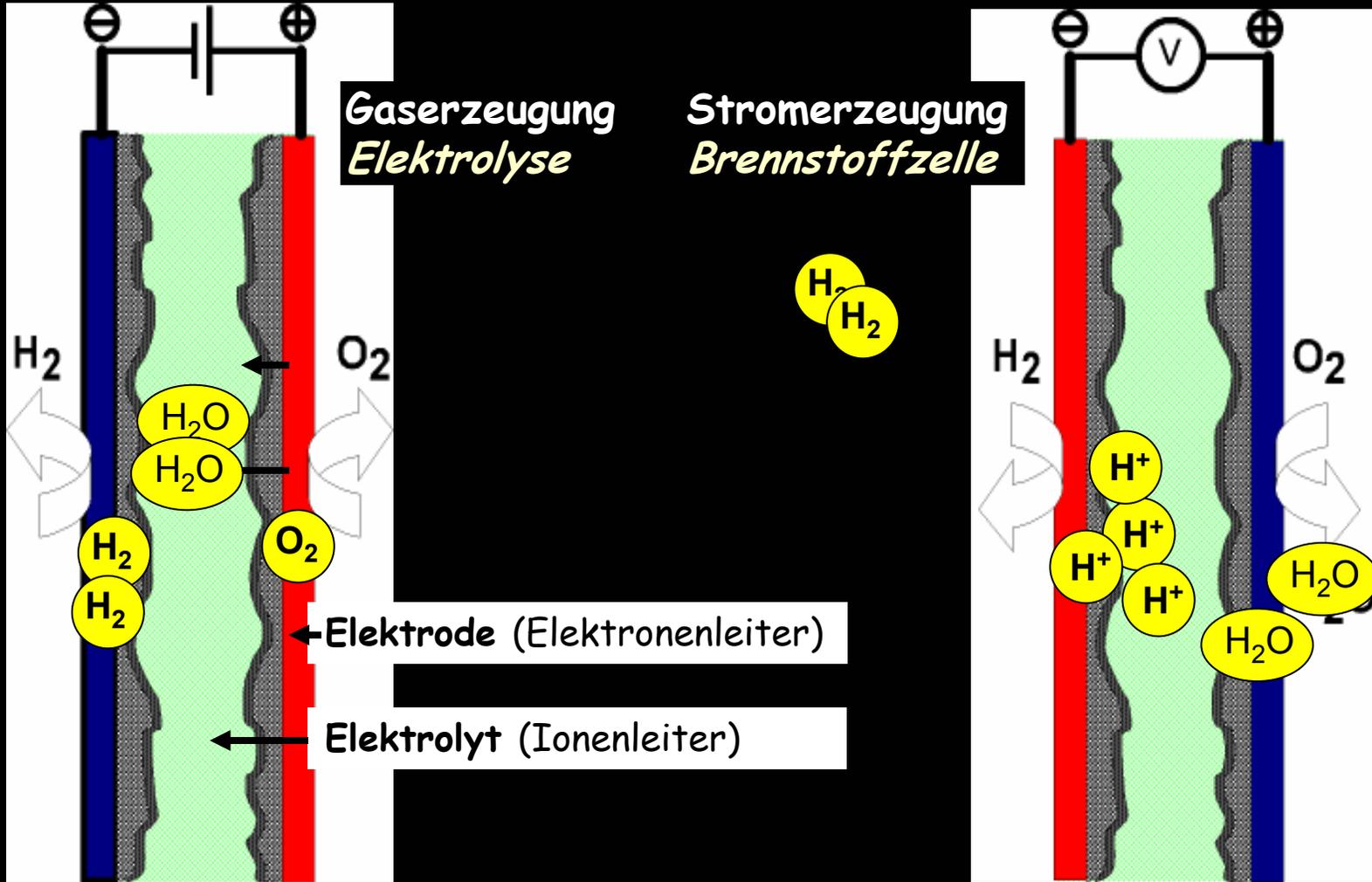


(-) **Anode**, Oxidation



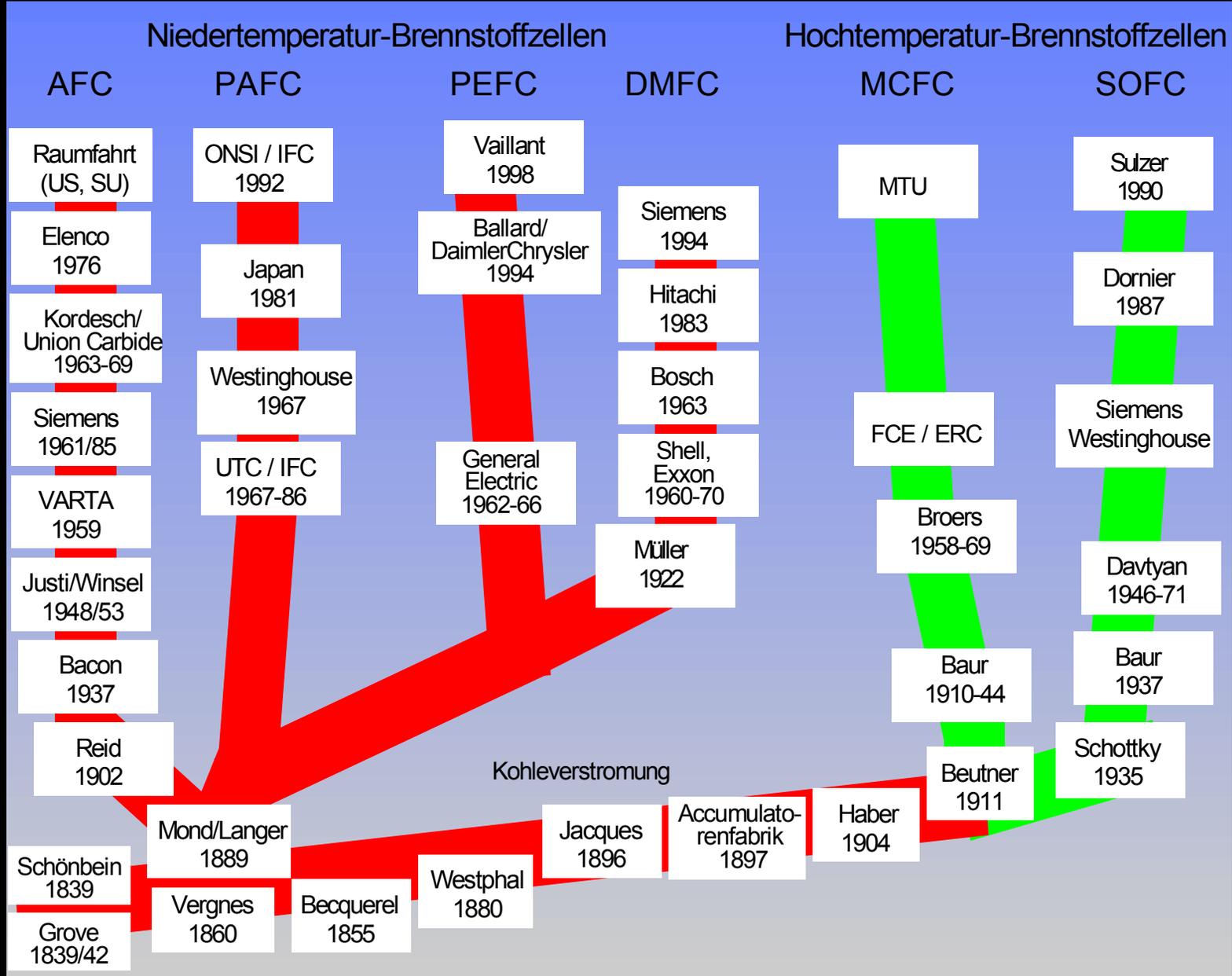
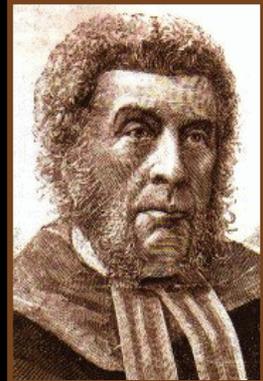
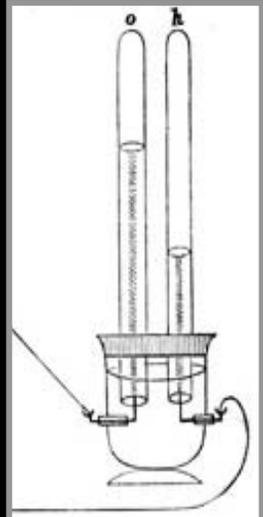
(+) **Kathode**, Reduktion





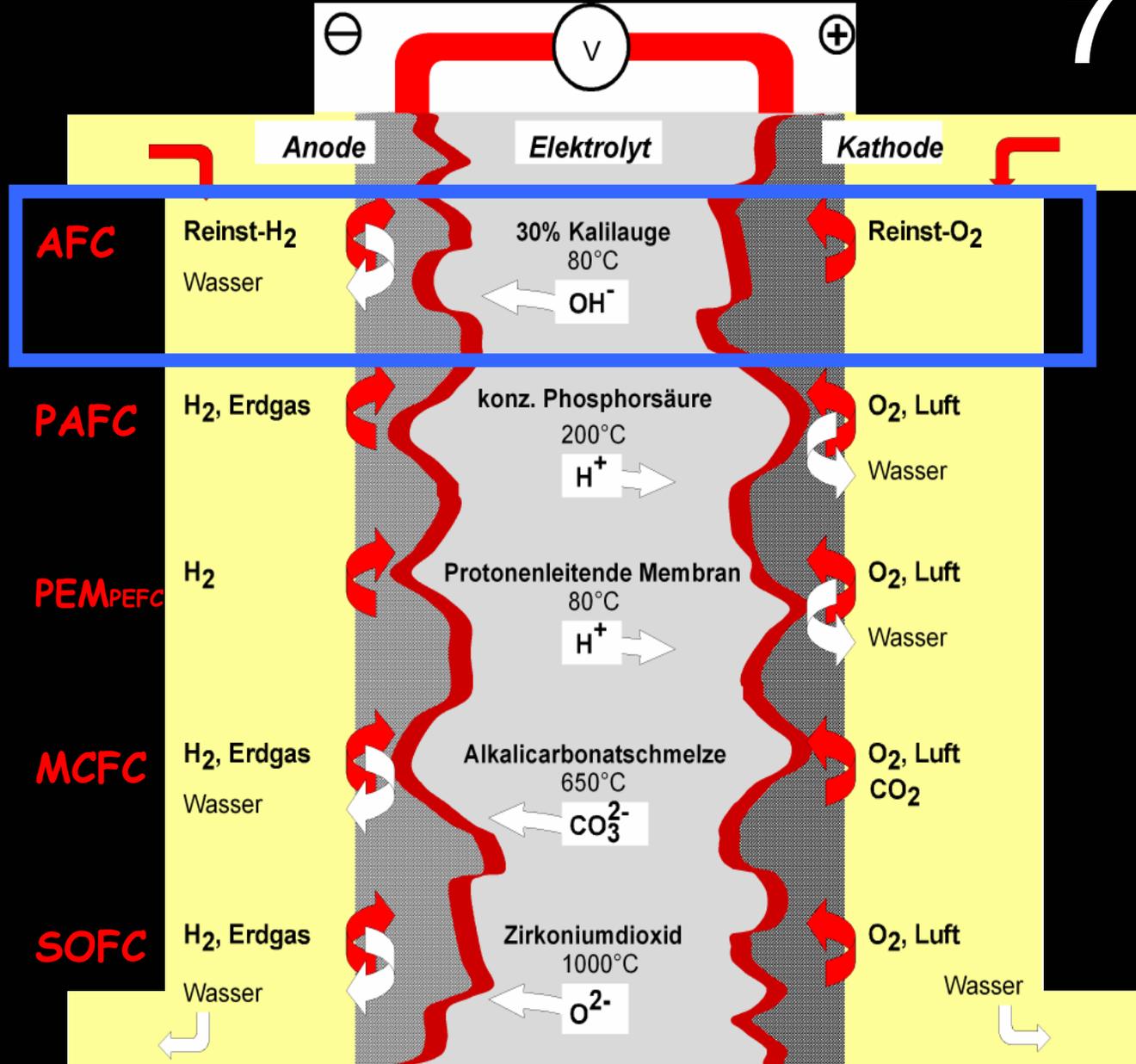
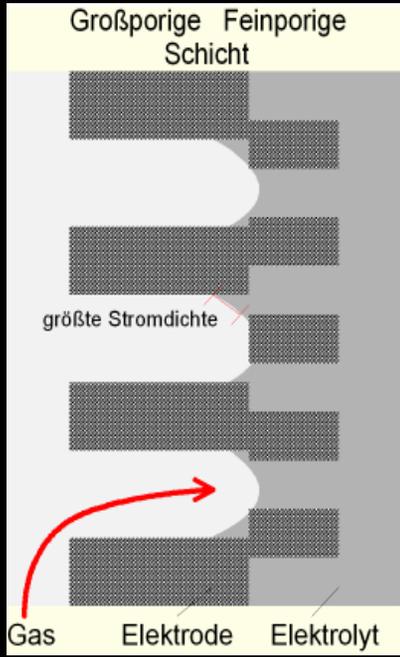


6



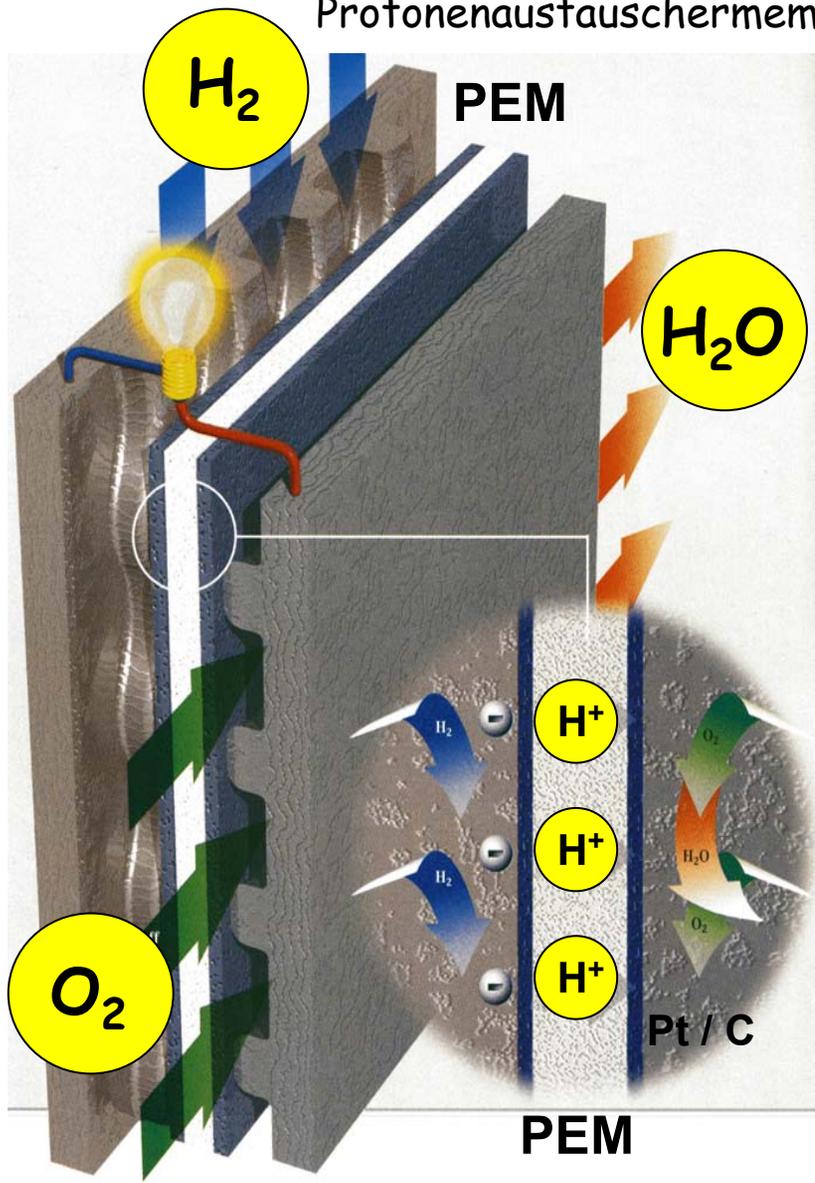


Gasdiffusions-  
elektrode



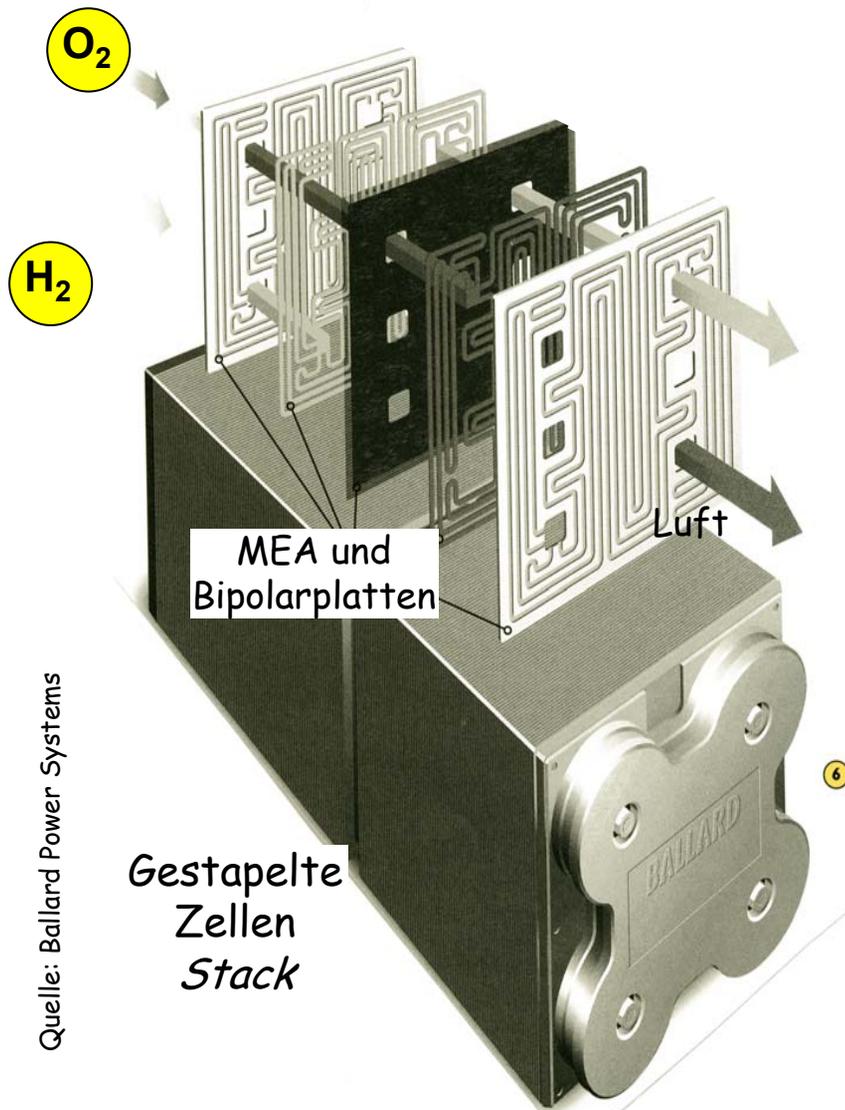


**PEM** = Proton Exchange Membrane  
Protonenaustauschermembran,



**MEA** = Membrane Electrode Assembly  
Membran-Elektroden-Einheit

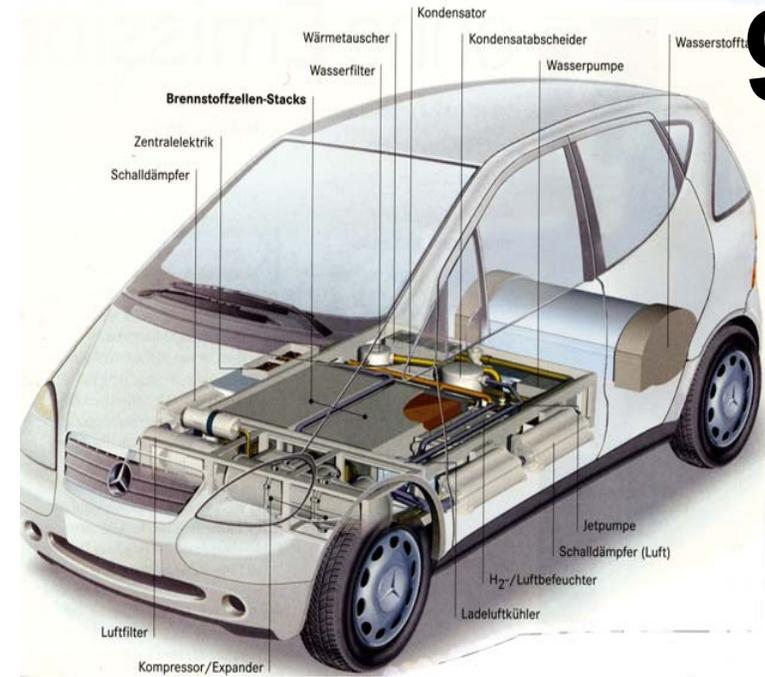
8

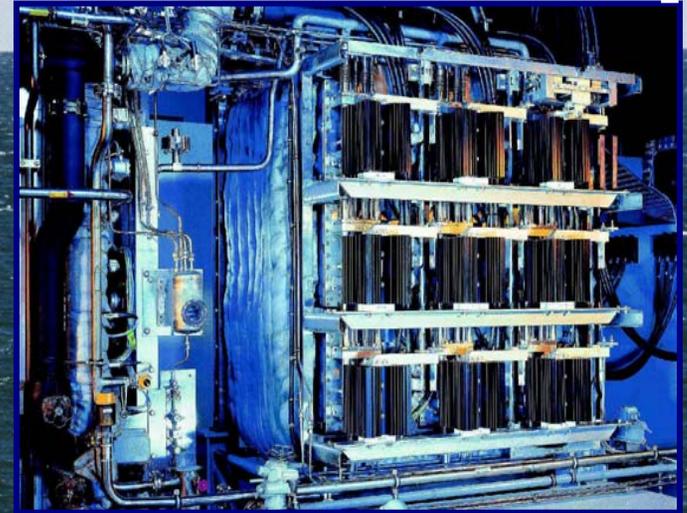


Quelle: Ballard Power Systems

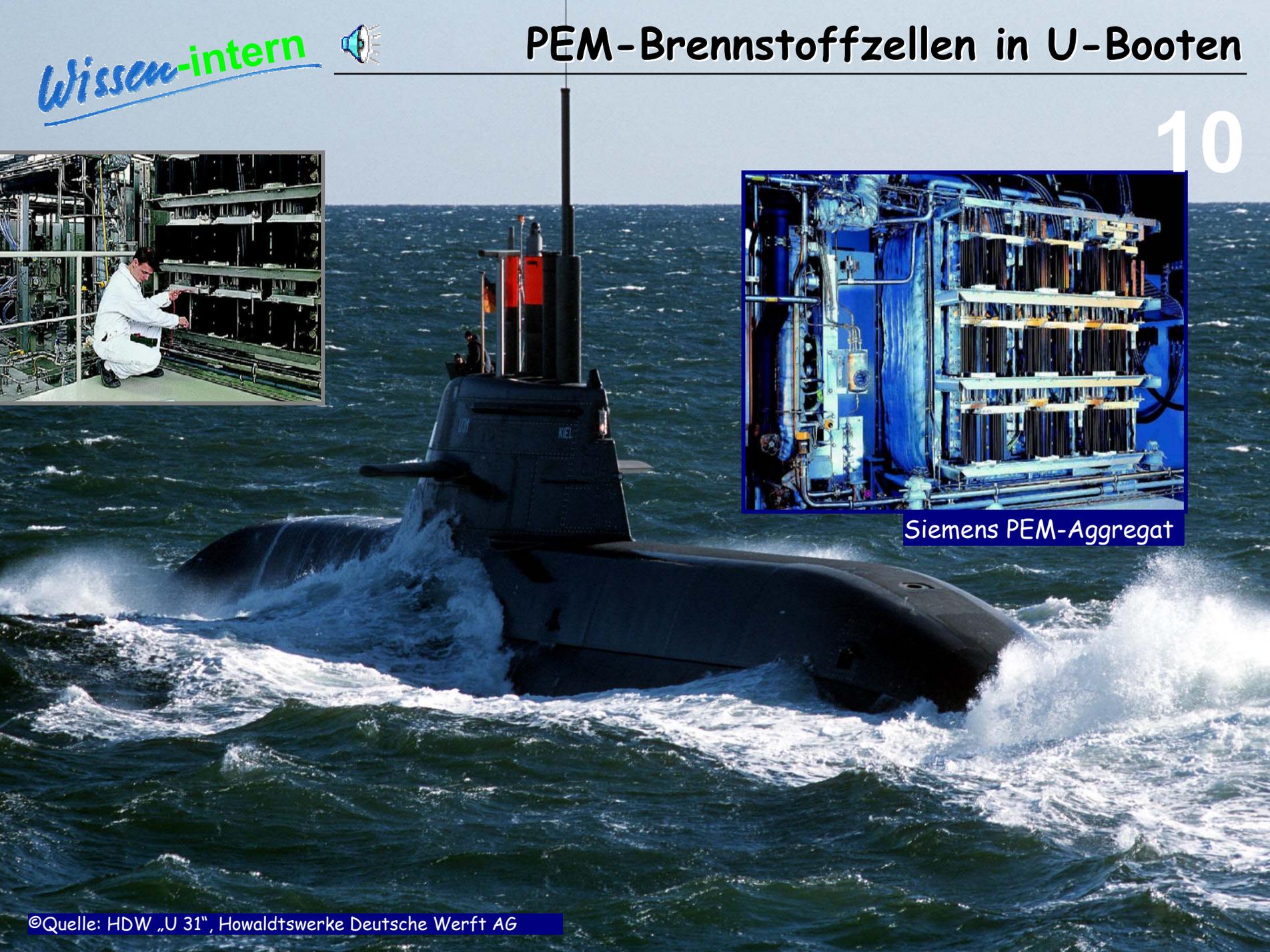
Quelle: Daimler Chrysler AG

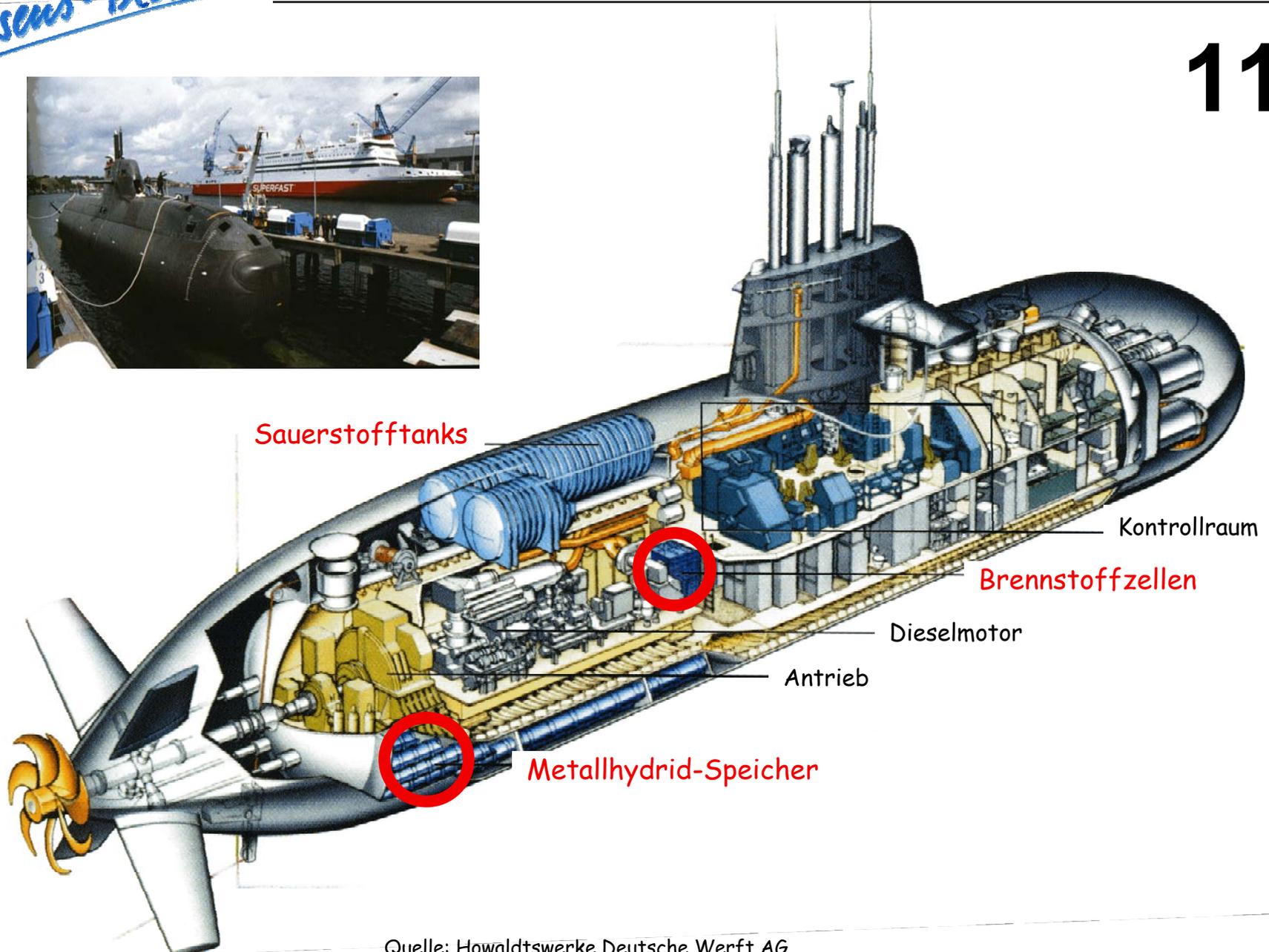
6



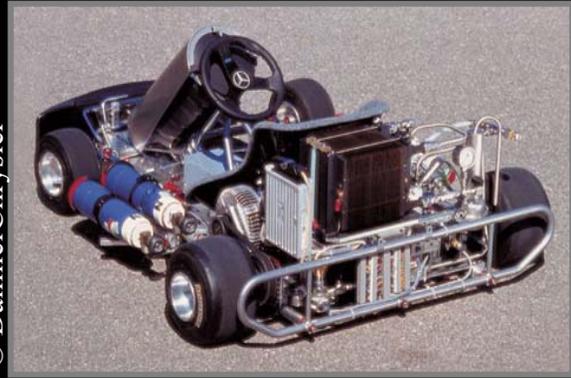


Siemens PEM-Aggregat



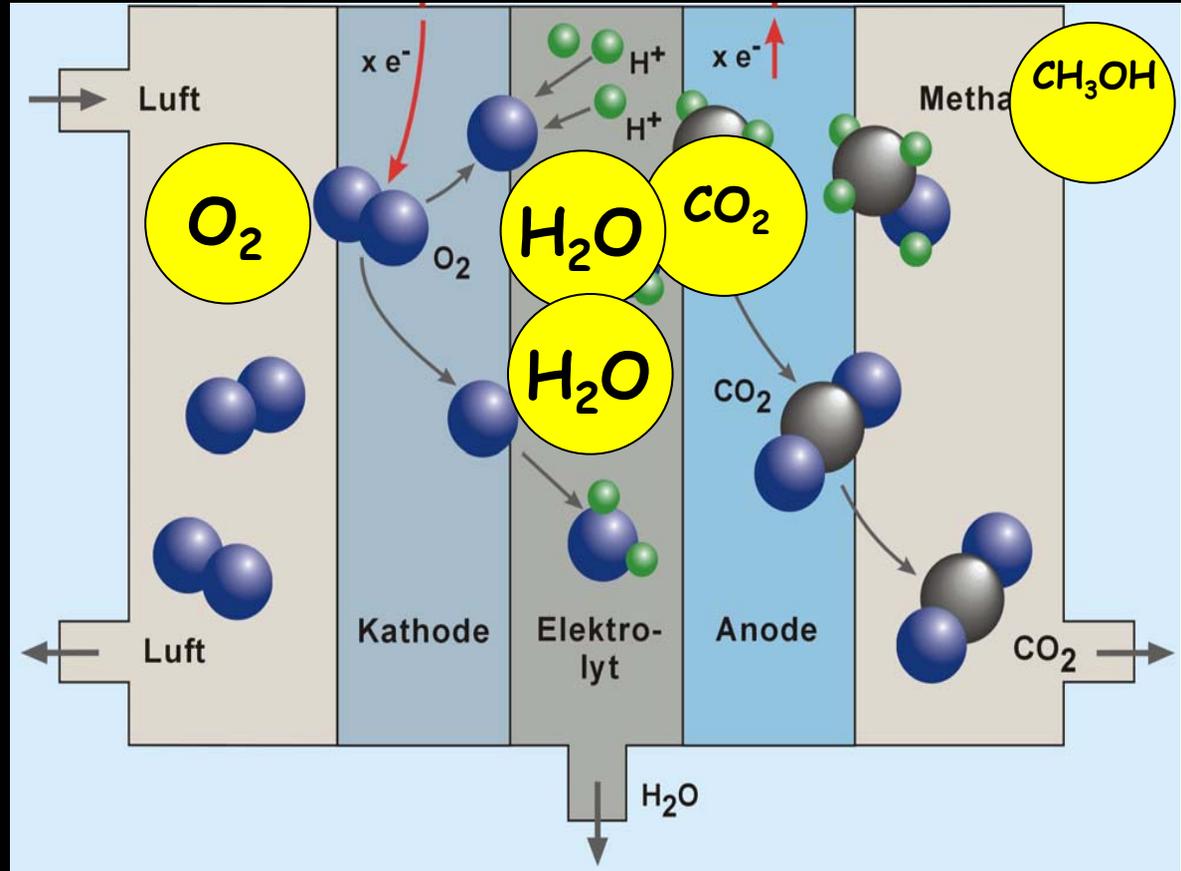
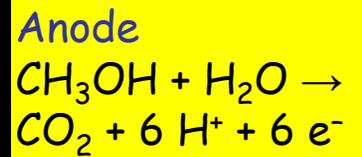
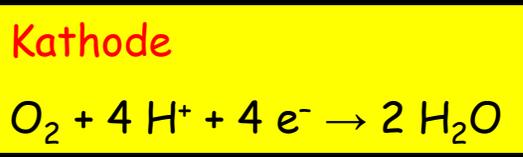


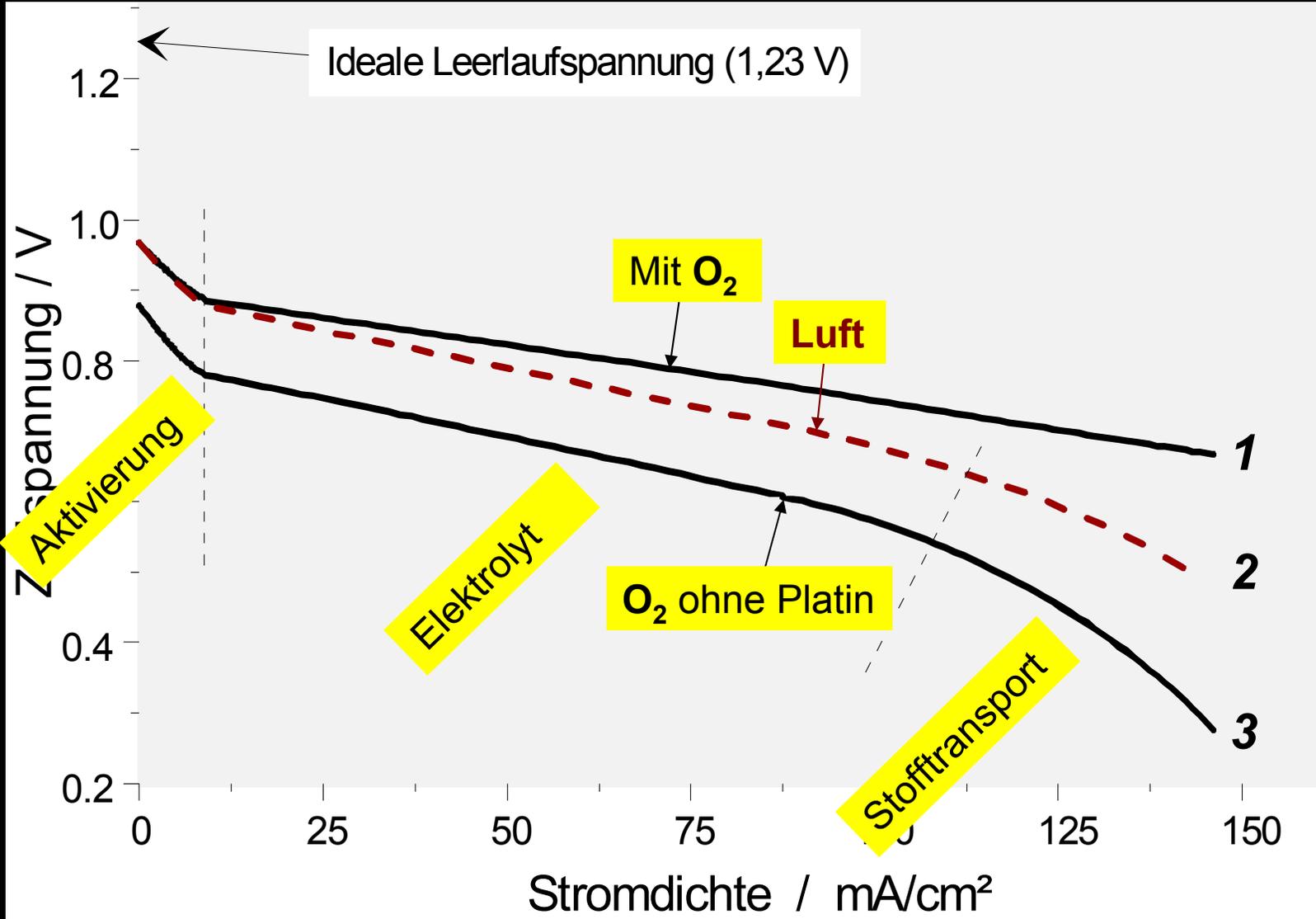
## Direktverstromung von Methanol

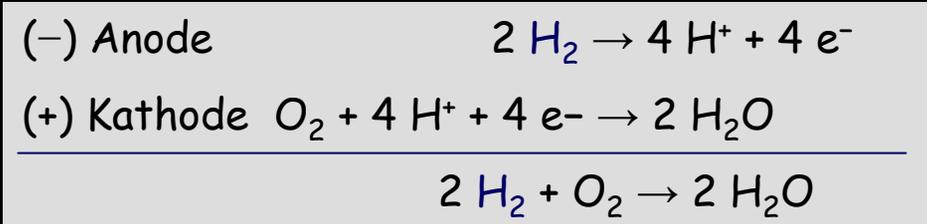
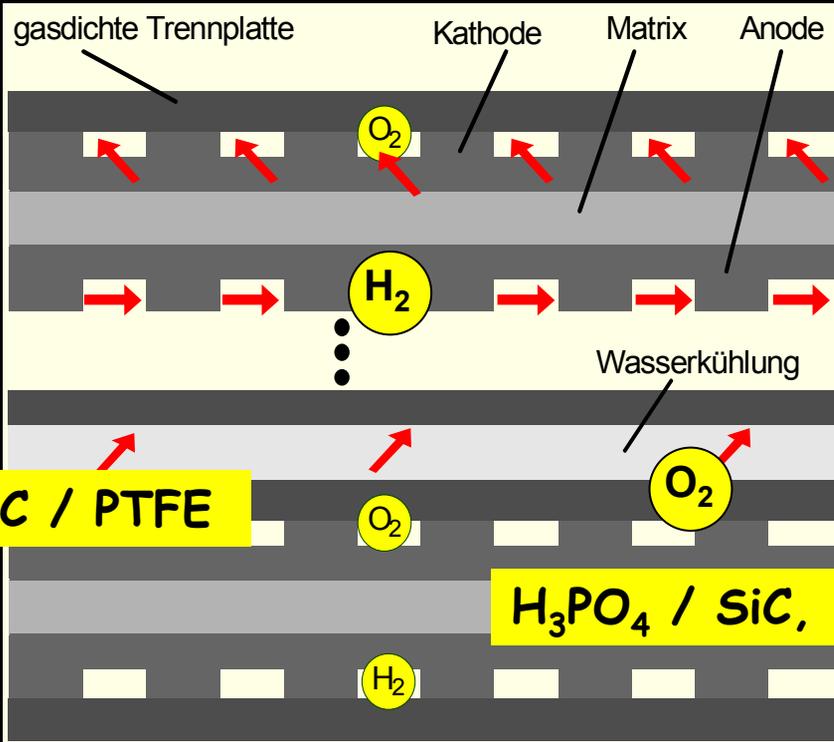


© Smart Fuel Cell

© DaimlerChrysler







IFC/ONSI PC 25C

Dimensionen:	18 t, 50 m <sup>3</sup>
Brennstoff:	Stadtgas 44 m <sup>3</sup> /h
Elektrische Leistung:	200 kW
Heißwasser:	60°C oder 120°C
Elektr. Wirkungsgrad:	40 %
Gesamtwirkungsgrad:	80%



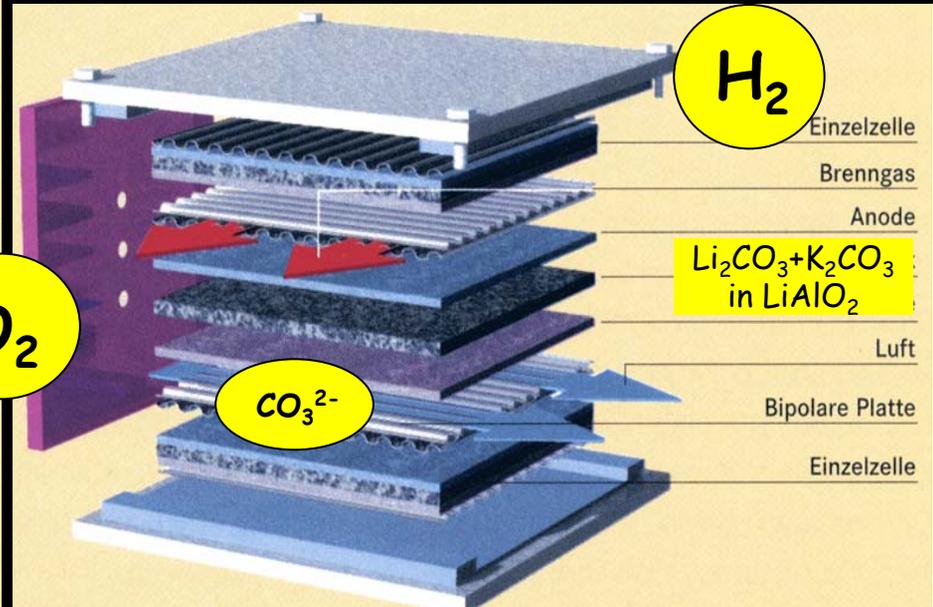
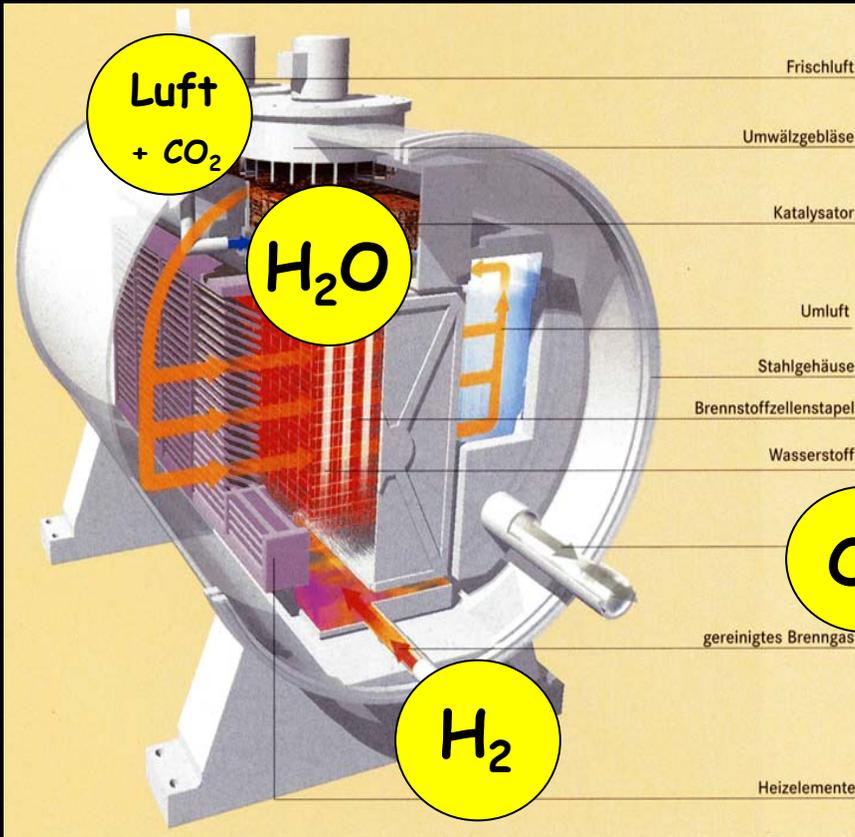
# Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

15

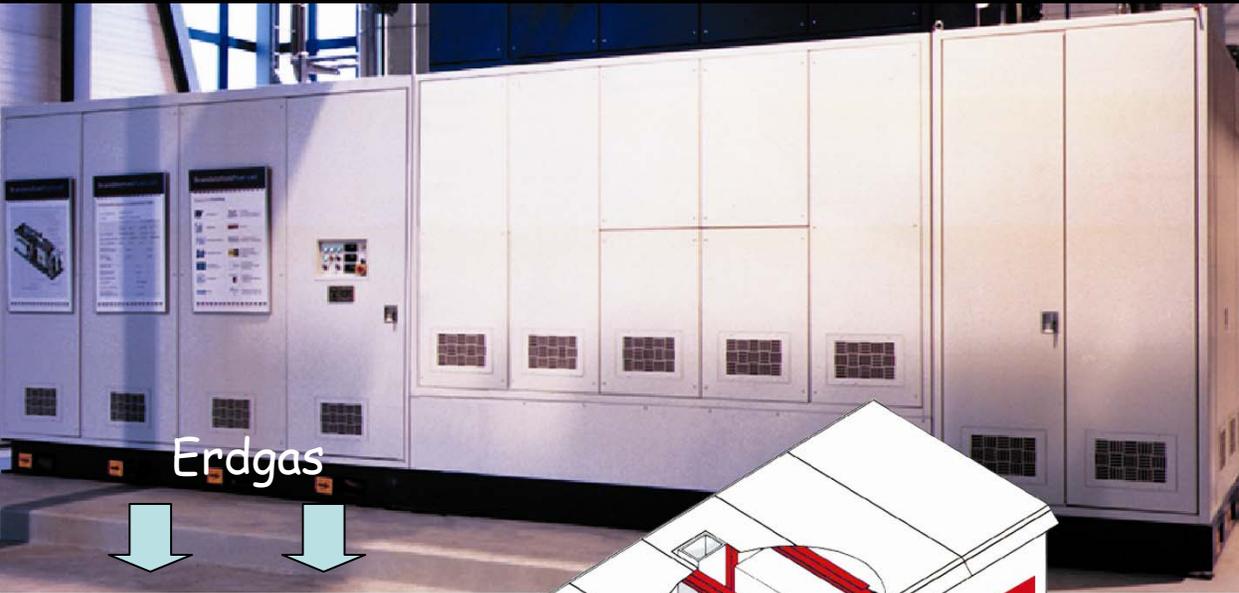
(-) Anode



(+) Kathode



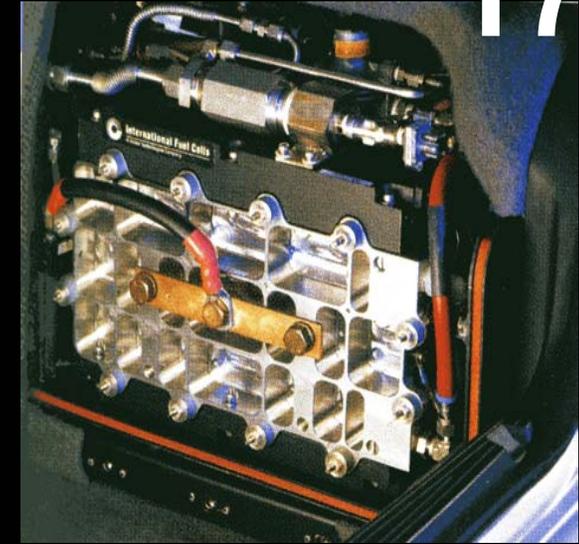




Erdgas

Strom Prozess  
wärme

Quelle:  
Siemens-Westinghouse  
CHP 250



Kfz-Bordnetzversorgung  
(BMW)



Hochtemperaturkeramik



Wasserelektrolyse

H<sub>2</sub>

Solarenergie

Windkraft

Wasserkraft

Dampfreformierung

Biomasse

Fossile  
Energieträger



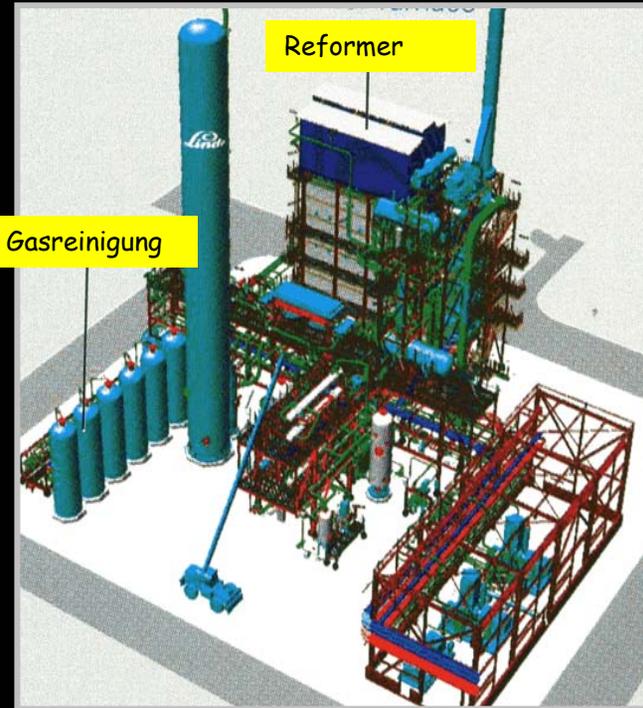
Spanien



Canada



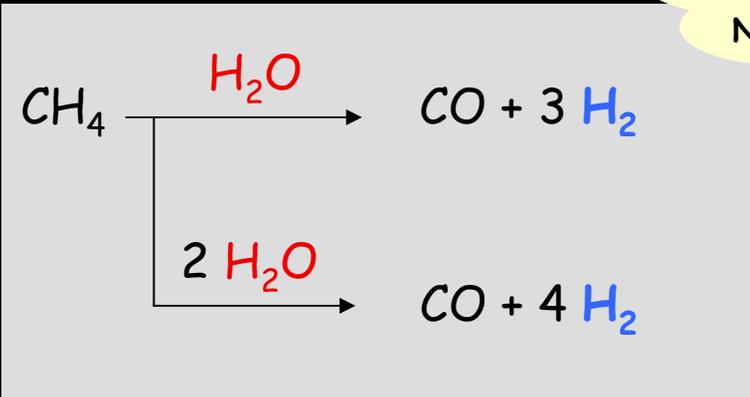
Gran Canaria



Deutschland



## Dampfreformierung von Erdgas Steam reforming

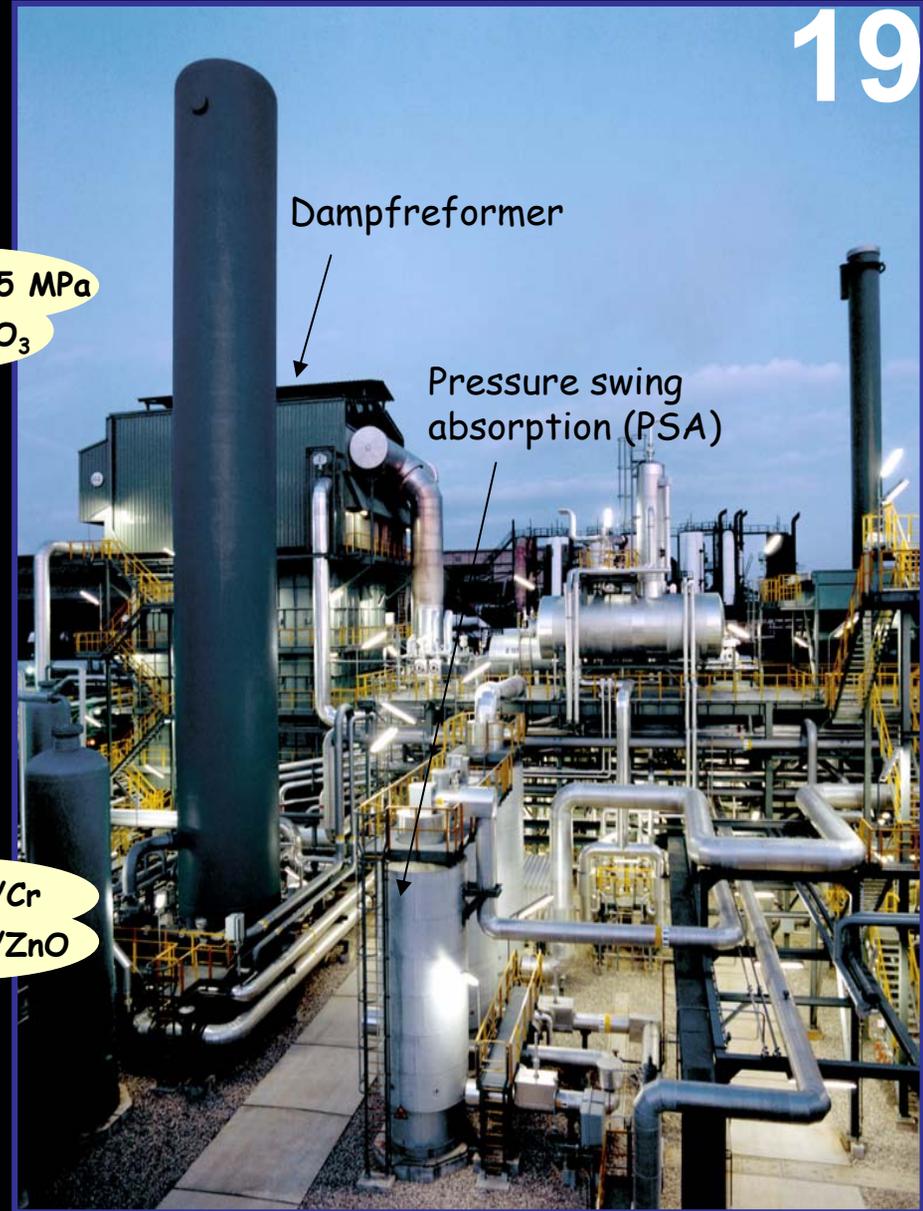


950°C, 2,5 MPa  
Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## Konvertierung Water gas shift reaction



350°C Fe/Cr  
250°C Cu/ZnO





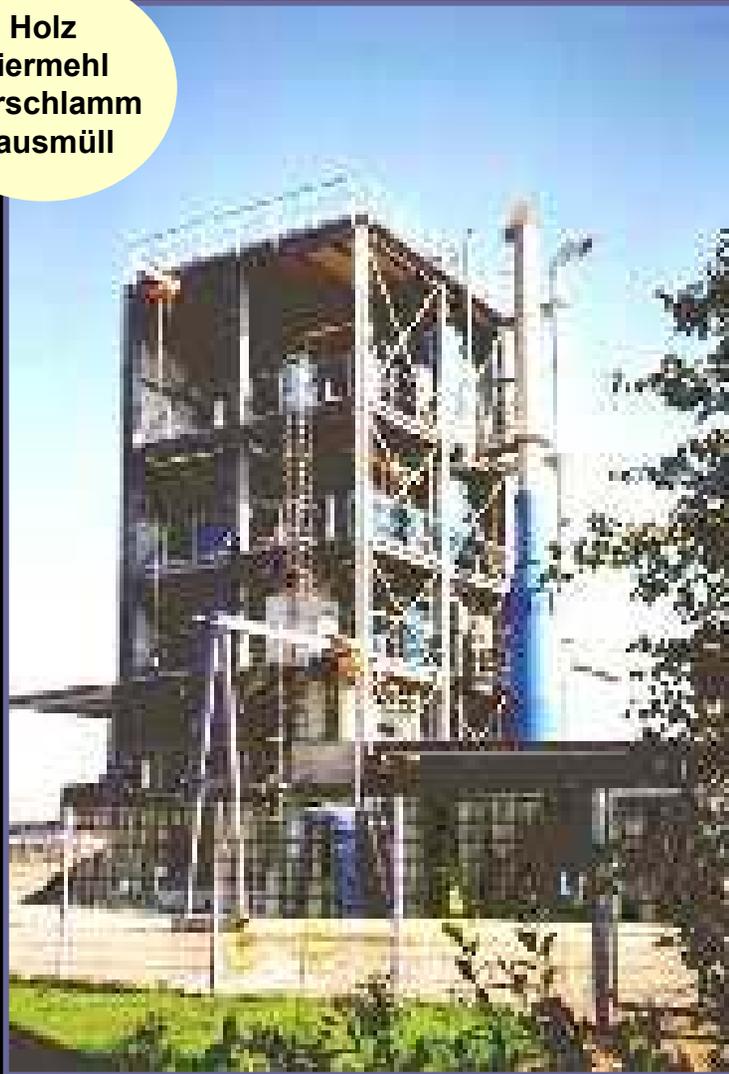
Quelle: Air Products

## Gasreinigung

- Gaswäsche
- Methanisierung  
 $\text{CO} + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
- Selektive katalytische Oxidation  
*Preferential Oxidation (PROX)*  
 $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$
- Druckwechselabsorption  
*Pressure swing absorption (PSA)*
- Membrandiffusion



Holz  
Tiermehl  
Klärschlamm  
Hausmüll



Quelle: DaimlerChrysler

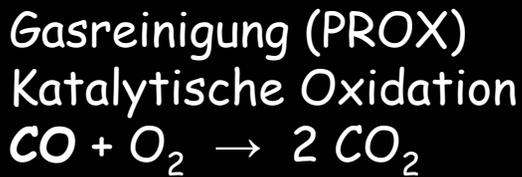
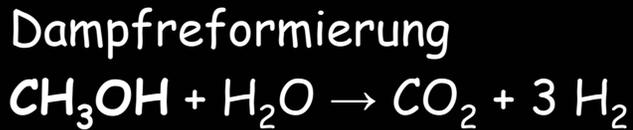
Ölpflanzen auf allen Äckern  
der Welt würden gerade

**8 %** von Europas  
Energiebedarf

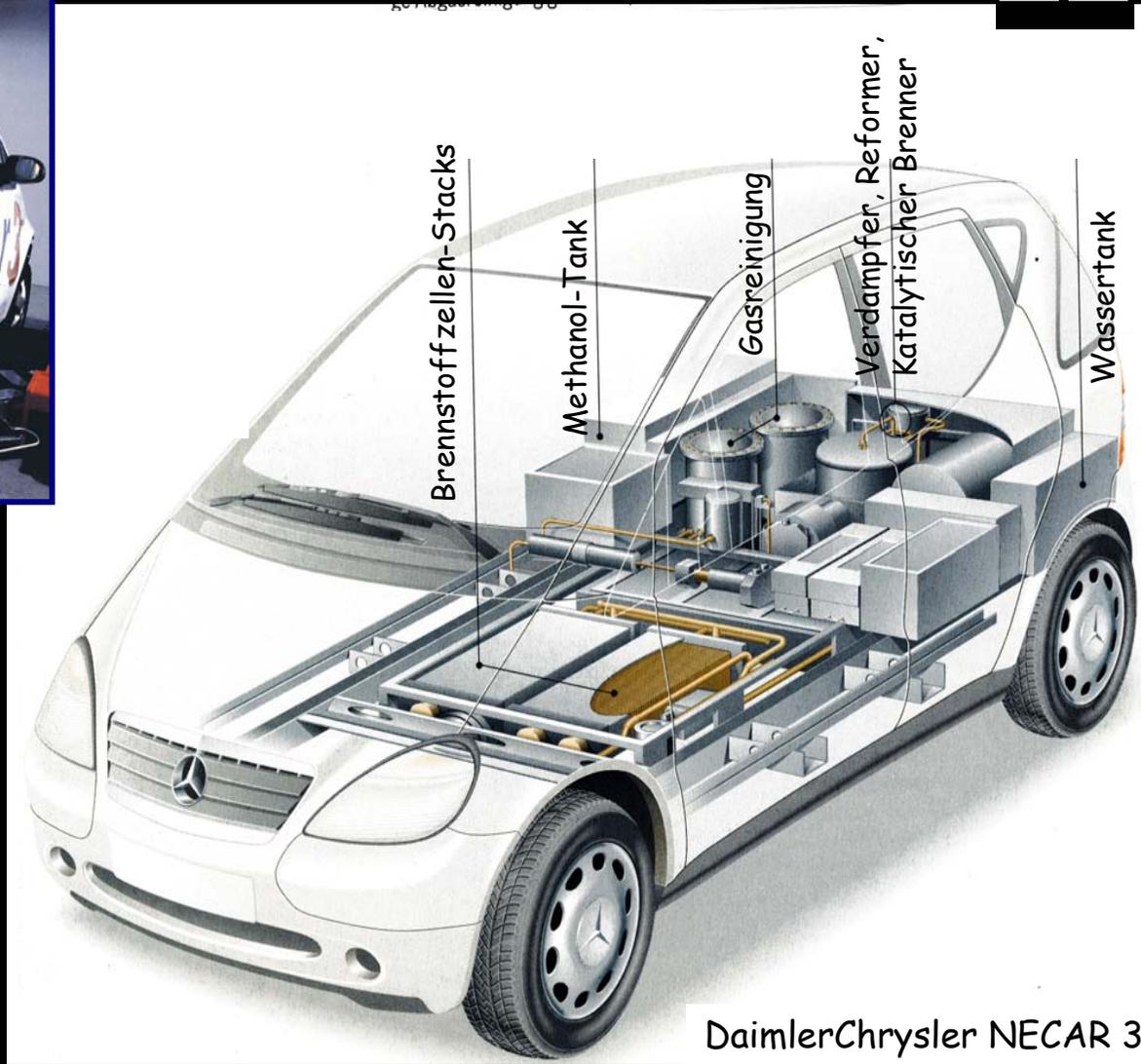
decken!



Quelle: DaimlerChrysler



PEM-Brennstoffzelle



DaimlerChrysler NECAR 3

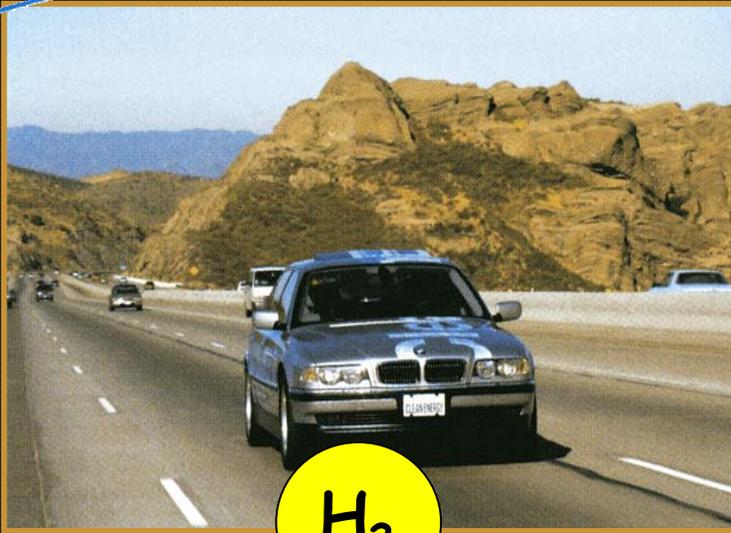


Tankroboter



Wasserstoffsensor

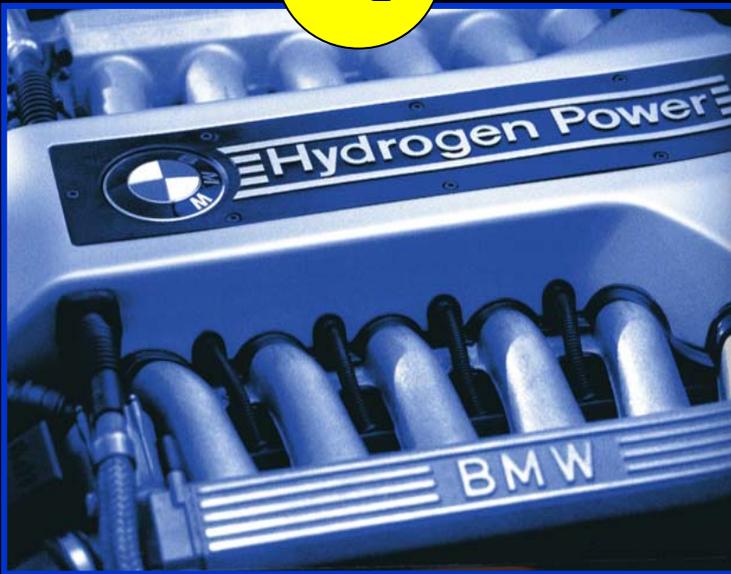




H<sub>2</sub>



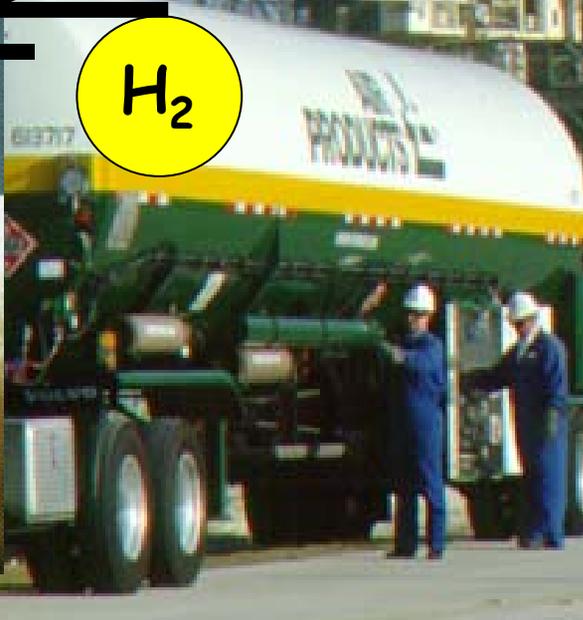
Bus: Flughafen München

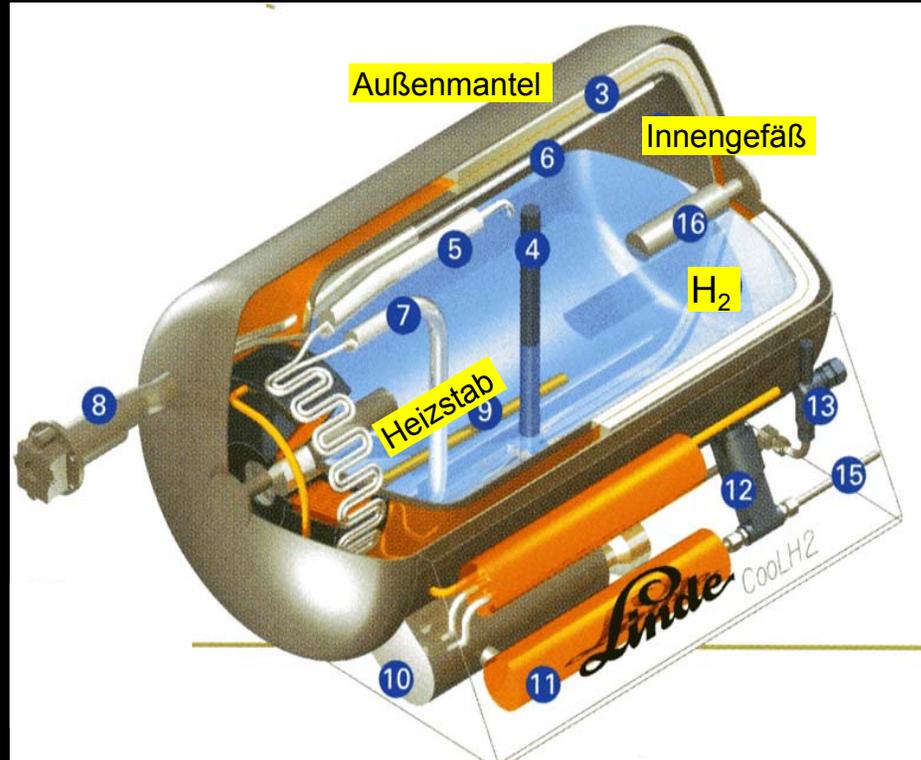


BMW 750hL: 5,4 l-V12-Motor,  
150 kW, 300 km mit 140 l H<sub>2</sub> (-273°C)

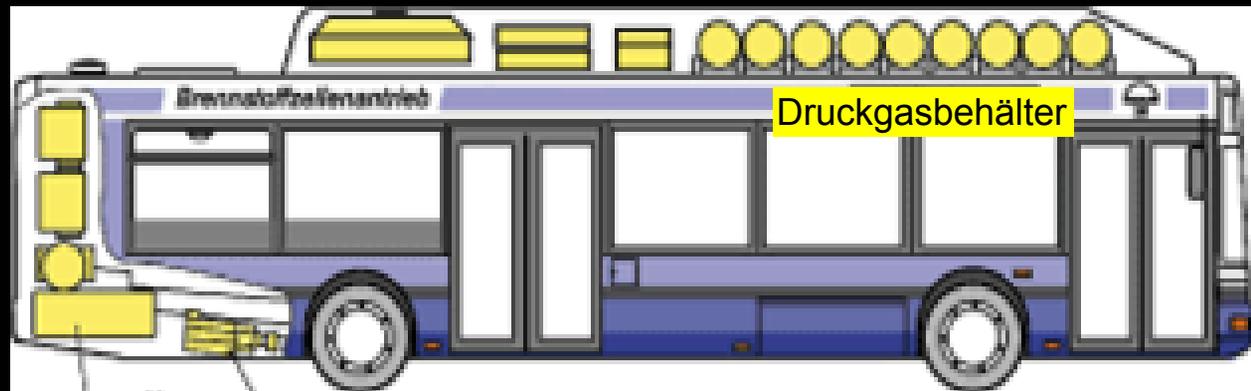


Wasserstoff-Druckgasflaschen





- Druckwasserstoffgas  $GH_2$
- Flüssigwasserstoff  $LH_2$
- Metallhydride



Brennstoffzelle

*Autor:*

**Prof. Dr. Peter Kurzweil,  
Amberg**

*Sprecher:*

**Prof. Dr.-Ing. Helmut Richter,  
Wuppertal**

**Ende**



# Anhang

*Texte der einzelnen Folien*

# Text zur Titelfolie

*Brennstoffzelle und Wasserstofftechnik*

*Ein Wissensfloater mit Videos und Hörtext*

*Vom Lichtstrahl zum Antrieb*

Strom aus dem **Solarmodul** zersetzt die verdünnte Schwefelsäure in der **Elektrolysezelle**.

Die Elektrolysegase Wasserstoff und Sauerstoff rekombinieren in der **Brennstoffzelle** zu Wasser und liefern wieder elektrischen Strom zum Antrieb des Propellers.

Wasserstoff ist in diesem Experiment die chemische Speicherform der Sonnenenergie. Der Propeller läuft auch nach Erlöschen des Lichtes, bis der Wasserstoff im Reservoir verbraucht ist.

Am Anfang war der Wasserstoff.

Dieses leichteste aller Gase entsteht bei der chemischen Reaktion unedler Metalle mit wässrigen Säuren und Basen.

So zum Beispiel, wenn man ein Stück Natriummetall in Wasser wirft.

Es entsteht Natronlauge – und Wasserstoff, der mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft explosives Knallgas bildet.

Diese ungestüme Macht gilt es einzufangen – in technischen Anwendungen wie der Brennstoffzelle.

Das Luftschiff „Hindenburg“ ging am 6. Mai 1937 in New York / Lakehurst während der Landung mit 97 Personen an Bord in Flammen auf.

Statische Elektrizität an der mit Aluminiumfarbe gestrichenen Hülle löste vermutlich die Entzündung des Wasserstoffgases aus.

Gemessen an der Opfern, war es „nur“ der fünftsschwerste Unfall eines Luftschiffes.

Die legendäre Radioreportage von Herbert Morrison, später mit Filmmaterial verbunden, prägte sich jedoch als die Technikkatastrophe des 20. Jahrhunderts ein.

Doch der Umgang mit Wasserstoff ist nicht gefährlicher als die Nutzung von Erdgas.

Elektrolyse – die Zersetzung von Wasser durch den elektrischen Strom.

**Fünf** Kilowattstunden elektrische Energie setzen 1000 Liter Wasserstoff und 500 Liter Sauerstoff frei.

Die Elektrolysezelle umfasst eine **Anode** – das ist die **Sauerstoffelektrode**, die vom **Pluspol** der Stromquelle versorgt wird – und eine **Kathode** – die **Wasserstoffelektrode** am **Minuspole** der Stromquelle.

Um hohe Ströme einzuspeisen, muss der **Elektrolyt** – das ist die Lösung zwischen den Elektroden – eine möglichst hohe Leitfähigkeit aufweisen.

Statt Reinstwasser werden Kalilauge oder Schwefelsäure eingesetzt.

Die Elektrodenvorgänge laufen nicht freiwillig ab. Die Elektrolyse setzt erst oberhalb der Zersetzungsspannung von etwa 1,5 V ein.

Man muss die **Überspannung** an den Elektroden und den ohmschen Widerstand des Elektrolyten überwinden.

Als Katalysatoren werden Platinmetalloxide auf Elektroden aus Nickel oder Titan eingesetzt.

Wie funktioniert eigentlich eine **Batterie**?

Man muss nur zwei Elektronenleiter in einen Ionenleiter, den Elektrolyten, tauchen.

Z.B. drei Kartoffeln, durch Kupfer- und Zinkblech-Streifen verbunden, liefern eine galvanische Spannung von 2,6 Volt.

Der fließende Strom reicht zum Betrieb einer Quarzuhr.

Das **unedle** Zink löst sich auf; es wird **oxidiert** und spendet Elektronen; es bildet somit die **Anode** (den Minuspol der Batterie).

Das **edlere** Kupfer will durch einen **Reduktionsvorgang** Elektronen aufnehmen; es bildet die **Kathode**, den Pluspol der Batterie.

Hydroniumionen – oder vereinfacht Protonen „H plus“ – aus der wasserhaltigen Kartoffel werden zu Wasserstoff reduziert. In Wirklichkeit nur winzige Mengen!

Als Elektrolyt für galvanische Elemente eignen sich auch Zitronen und Apfel.

# Text zu Folie 5

Bei der **Elektrolyse** erzwingen wir durch eine äußere Spannung einen Stromfluss durch den Elektrolyten. Aus wässrigen Lösungen werden Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt.

Elektrolyse und Batterien funktionieren nach denselben Prinzipien, aber die Elektrodenvorgänge laufen in **umgekehrte** Richtungen.

In einer **Brennstoffzelle** werden die Elektroden mit Wasserstoff und Sauerstoff umspült.

Das elektrochemische Gleichgewicht weicht dem äußeren Zwang aus – und will die zugeführten Stoffe verbrauchen.

An der Anode wird Wasserstoff zu Protonen oxidiert, an der Kathode wird Sauerstoff zu Wasser reduziert. Fertig ist die Wasserstoff-Sauerstoff-Batterie!

Brennstoffzellen wandeln chemische Energie direkt in Elektrizität um – **ohne Umweg über Wärme**. Es gibt keine offenen Flammen und beweglichen Teile.

Die Geschichte der Brennstoffzelle beginnt im 19. Jahrhundert.

**Schönbein** in Basel und **Grove** in London beobachteten, dass eine Elektrolysezelle nach dem Abschalten des Stromes kurzzeitig als Spannungsquelle arbeitet – indem sie noch vorhandenen Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser „verbrennt“.

Man erkannte diese „stille Verbrennung“ bald als elektrochemische Oxidation von Wasserstoff – und erforschte die Verstromung von Kohle und Erdgas.

Bis heute leider mit sehr schlechten Wirkungsgraden!

So trat der Verbrennungsmotor den Siegeszug in unsere mobile Welt an – und nicht die Brennstoffzelle.

Sie wurde erst mit den Raumfahrtprogrammen der 1960er Jahre wiederentdeckt und erlebt im Zeitalter der knappen Energieresourcen eine Renaissance.

Der Clou jeder Brennstoffzelle ist die **Dreiphasengrenze** aus Elektrode, Elektrolyt und Gasraum.

Poröse **Gasdiffusionselektroden** ermöglichen die Reaktion des Brenngases (Wasserstoff) mit dem Oxidationsmittel (Sauerstoff) und erlauben das Entweichen des Reaktionsproduktes Wasser.

Der Elektrolyt prägt das Namenskürzel der eingeführten Brennstoffzellen.

**A-F-C** – die alkalische Brennstoffzelle mit Kalilauge.

**P-A-F-C** – die saure Brennstoffzelle mit Phosphorsäure

**P-E-M** – die **PEM-Brennstoffzelle** mit einer protonenleitenden Kunststoffolie; die wichtigste Niedertemperatur-Brennstoffzelle.

**M-C-F-C** – mit einer Elektrolytschmelze

**S-O-F-C** – die Festoxid-Brennstoffzelle mit einer keramischen Elektrolytfolie.

Am fortschrittlichsten sind PEM-Brennstoffzellen.

Eine hauchdünne Polymer-Membran bildet den Festelektrolyt, der Protonen, aber keine Elektronen, leitet.

Beidseitig auf der PEM-Membran befindet sich eine dünne Katalysatorschicht aus kohlegetragertem Platin.

Über Strömungskanäle in den äußeren Grafitplatten fließen das Brenngas Wasserstoff und das Oxidationsmittel Sauerstoff bzw. Luft zu. Wasser entsteht.

Eine einzelne Brennstoffzelle (M-E-A) liefert eine Spannung von weniger als einem Volt.

Daher werden Hunderte von Membran-Elektroden-Einheiten und bipolaren Strömungsplatten zu einem Stapel integriert.

Ein solches Aggregat liefert genügend Leistung, um einen Kleinwagen anzutreiben.

Vor der Jahrtausendwende realisierte DaimlerChrysler die ersten Versuchsfahrzeuge mit PEM-Brennstoffzellen in Europa.

Das 50-Kilowatt-Aggregat füllte 1994 noch den Laderaum eines Mercedes-Transporters.

NECAR 3 von 1997 passte bereits in den vergrößerten Kofferraum und den Unterboden der A-Klasse.

Alle großen Autobauer demonstrieren derzeit die Machbarkeit und Alltagstauglichkeit von Brennstoffzellen-Antrieben.

Brennstoffzellenbusse verkehren schon heute emissionsfrei in Innenstädten und auf Flughäfen.

Der Wasserstoffantrieb emittiert weder CO<sub>2</sub> noch Stickstoffoxide

Für den Individualverkehr ist der Brennstoffzellen-Antrieb noch zu teuer.

Wasserstoff erschließt bislang keine Massenmärkte; die Technik reift in Nischen.

Mit Wasserstoff betriebene Land-, See- und Luftfahrzeuge emittieren weniger Schadstoffe und erschließen neue Antriebstechnologien.

Ein Unterseeboot, das sich der Ortung entziehen soll, darf weder Schall, Wärme noch Magnetfelder aussenden.

Der Druckkörper aus unmagnetischem Stahl, die Schiffshülle aus Kunststoff und ein leiser **PEM-Brennstoffzellenantrieb** kennzeichnen den Typ „U 212“ der Howaldswerke Deutsche Werft AG.

Der Vorläufer „U1“ - Ende der 1980er Jahre - wurde von einer alkalischen Brennstoffzelle angetrieben.

Konventionelle Batterien dieselektrischer U-Boote erschöpfen nach wenigen Tagen Unterwasserfahrt.

Der **Metallhydridspeicher** in „U 31“ nährt die **Brennstoffzellen** wochenlang – und unabhängig von der Außenluft.

Vor dem Tauchgang wird der Speicher mit Tieftemperatur-Druckwasserstoff beladen.

Brennstoffzellen müssen nicht unbedingt mit Wasserstoff betrieben werden.

Methanol - in Mischung mit Wasser - kann in einer PEM-Brennstoffzelle **direkt** verstromt werden.

Die Zellspannung beträgt in der Praxis etwa ein halbes Volt je Zelle.

Leider ist die Leistung der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle gering.

Große Fahrzeuge kann man damit nicht betreiben.

Als portable Stromquelle – für Campingzwecke und im Feldeinsatz – jedoch eröffnet die D-M-F-C neue Dimensionen der Energieversorgung.

Statt Batterien wechseln, heißt es hier: Methanol nachfüllen.

In der komplizierten Anodenreaktion entstehen Kohlendioxid und Wasser. Luftsauerstoff wird zuvor an der Kathode zu Wasser reduziert.

Die **alkalische Brennstoffzelle** - mit Kalilauge als Elektrolyt – liefert hohe elektrische Leistung, wenn sie mit Reinsauerstoff beschickt wird.

Beim Betrieb mit Luft löst sich Kohlendioxid im Elektrolyten.

Das gebildete Kaliumcarbonat kann die porösen Nickelelektroden verstopfen. PEM-Brennstoffzellen haben die alkalische Technik deshalb verdrängt.

Die **Strom-Spannungs-Kennlinie** einer Brennstoffzelle zeigt drei Regionen.

**A** – der **Aktivierungsbereich** zeigt im Wesentlichen die Überspannung der kinetisch gehemmten **Sauerstoffreduktion**.

**B** – der **ohmsche** Spannungsabfall im **Elektrolyten** wächst mit steigendem Strom.

**C** – **Stofftransporthemmungen**: Die Geschwindigkeit, mit der Sauerstoff und Wasserstoff zuströmen und Reaktionswasser entweicht, begrenzt den nutzbaren Strom.

Je mehr Strom die Zelle an den Verbraucher liefert, desto mehr bricht die Quellenspannung ein.

Beim Betrieb mit Luft liefert die Brennstoffzelle weniger Leistung als mit Reinsauerstoff – ebenso, wenn man den Platinkatalysator auf den Nickelelektroden weglässt.

Reine Phosphorsäure leitet den elektrischen Strom erst bei Temperaturen von 190 °C so gut wie Kalilauge bei Raumtemperatur.

Eingebettet in eine Matrix aus Siliciumcarbid, bildet „H drei P O vier“ den Ionenleiter der P-A-F-C.

Die Elektroden bestehen aus porösen Kohlenstofffasern - und sind mit Platin-Nanopartikeln auf Acetylenruß belegt.

Diese Technologie hat auch die PEM-Brennstoffzelle maßgeblich beflügelt.

An den Elektroden läuft die bekannte Knallgasreaktion ab.

Die reversible Zellspannung (bei offenen Klemmen) beträgt in der Praxis etwa 0,64 Volt.

P-A-F-C-Kraftwerke wurden im Megawatt-Maßstab realisiert.

Kommerzielle Aggregate erzeugen nicht nur elektrische Energie, sondern nutzen auch die Abwärme zur Heißwasseraufbereitung.

Die **Schmelzelektrolyt**-Brennstoffzelle (M-C-F-C) arbeitet bei 650 °C.

In einer hitzefesten Matrix befinden sich geschmolzene Alkalicarbonate.

Die Elektroden bestehen aus Nickel.

An der Anode wird Wasserstoff zu Wasser oxidiert; gleichzeitig entsteht **Kohlendioxid** aus der Carbonatschmelze.

Das CO<sub>2</sub> wird dem Sauerstoffstrom zugemischt. An der Kathode entsteht daraus wieder Carbonat. In Summe läuft die Knallgasreaktion ab.

Die M-C-F-C liefert eine Ruheklemmenspannung von einem Volt - weitaus mehr als eine PEM-Zelle. Viele Zellen werden zu einem „Stack“ integriert.

Statt Wasserstoff kann **Erdgas** als Brenngas zugeführt werden. Dieses wird in einer vorgeschalteten „Reformerkammer“ durch Einwirkung von Wasserdampf in Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt.

Die **Abwärme** der Hochtemperaturbrennstoffzelle kann für die Kraft-Wärme-Kopplung mit einer Dampfturbine genutzt werden.

Dies ermöglicht Systemwirkungsgrade von sagenhaften 60 bis 65 Prozent!

Die **keramische** Brennstoffzelle (S-O-F-C) arbeitet bei 900 bis 1000°C.

Der Festelektrolyt in Röhrenform besteht aus Zirkoniumdioxid. Er leitet Oxidionen.

Auf der Außenseite ist die Brenngaselektrode aus Nickel aufgebracht.

Auf der Innenseite befindet sich die Lufterlektrode aus Perowskit.

Dort wird Sauerstoff aus dem Luftstrom reduziert; das entstehende **Oxidion** wandert in den Festelektrolyten, ein anderes Oxidion reagiert auf der Brenngasseite mit Wasserstoff zu Wasserdampf.

Bei 1000°C liefert die S-O-F-C eine Ruheklemmenspannung von 0,88 Volt im Luftbetrieb.

Der große Vorteil: die **Direktverstromung** von Erdgas.

Das Brenngas Wasserstoff wird durch interne Reformierung erzeugt.

Schwefel-Verunreinigungen im Ergas stören nicht.

Dezentrale Einheiten mit 250 Kilowatt Leistung befinden sich im Feldtest.

Ein solches Aggregat besteht aus rund 3000 Keramikröhrchen.

Der elektrische Wirkungsgrad von 47 % stellt verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke in den Schatten.

Durch **Kraft-Wärme-Kopplung** der S-O-F-C mit einer Gasturbine wird auch die Abwärme der Brennstoffzelle ausgeschöpft.

Durch zusätzliche Auskopplung von Nahwärme und Prozessdampf sind Gesamtwirkungsgrade bis 75 % erreichbar.

Die Restwärme des Gasturbinenabgases kann man anschließend noch für eine Dampfturbine nutzen.

Die Anwendung der S-O-F-C als Stromquelle in Fahrzeugen wird erforscht.

Thermische Spannungen in den Werkstoffen begrenzen die Lebensdauer der SOFC noch.

„Die Energie von morgen ist das Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist“, schrieb Jules Verne bereits 1874.

Wasserstoff kann mit Strom aus **Wind-**, **Wasserkraft-** und **Solaranlagen** erzeugt werden – technisch heute machbar, aber eine ökonomische Herausforderung!

Elektrolyseprozesse, vor allem bei der Natronlaugegewinnung, decken gegenwärtig 5 % des Wasserstoffs auf dem deutschen Markt, 19 % stammen aus **Erdgas (!)**, 30 % aus **Kohle (!!)** und 46 % aus **Erdöl (!!!)**. Wasserstoff ist also heute überwiegend **fossiler** Herkunft!

Die Stromversorgung der nächsten Jahrzehnte wird daher auf Wärmekraftwerke nicht verzichten.

Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen und nachwachsenden Rohstoffen bietet jedoch eine langfristige Alternative, wenn die fossilen Quellen versiegen.

Kühne Ideen gibt es: Solarstrom in den Wüsten Nordafrikas zu erzeugen und über Hochspannungskabel nach Mitteleuropa zu transportieren. Der Transport von Wasserstoff in Tankschiffen und Pipelines wäre schon heute viermal teurer.

**500** Milliarden Kubikmeter Wasserstoff werden weltweit produziert.

62 % davon stammen aus **fossilen** Quellen!

Als unerwünschtes Nebenprodukt wird das Treibhausgas **CO<sub>2</sub>** freigesetzt.

Wasserstoff wird heute überwiegend durch **Dampfreformierung** aus Erdgas oder die **Vergasung** von Schwerbenzin und Kohle gewonnen.

Durch die katalytische Umsetzung von Kohlenstoff mit Wasserdampf entsteht „**Synthesegas**“, ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffoxiden.

Die hohen Reaktionstemperaturen erfordern es, dass ein Teil der Rohstoffe als Heizmittel verbrannt wird.

Wasserstoffhaltiges Synthesegas eignet sich besonders für den Einsatz in Brennstoffzellen, erfordert aber eine aufwändige Gasreinigung von Kohlenstoffmonoxid und Schwefelverbindungen.

In der chemischen Technik eingeführte Prozesse zur Beseitigung von Kohlenmonoxid sind die

**Gaswäsche** mit Absorptionslösungen,

die Umwandlung von CO in **Methan**,

die **selektive Oxidation** zu CO<sub>2</sub>,

die **Absorption** an Molekularsieben

und **Membranverfahren**.

Zu den **künftigen Wasserstoffquellen** zählt **Biomasse**. Aus Holzhackschnitzeln, Tiermehl, Klärschlamm und Hausmüll kann man synthetischen Dieselkraftstoff gewinnen.

Durch **Pyrolyse** bei 500 °C entstehen Koks und teerhaltiges Schwelgas, das sich für die Dampfreformierung eignet.

Der Pyrolysekoks wird unter Luftabschluss vergast und die Holz- und Schwelgase werden verbrannt.

Nach Kühlung, Entstaubung und Dampfreformierung von Rest-Methan erhält man das Synthesegas aus 2 Teilen Wasserstoff und einem Teil Kohlenmonoxid.

Die **Lösung der Energiekrise?** Nicht unbedingt.

Ölpflanzen auf der gesamten Ackerfläche der Erde könnten nur **8 %** des Kraftstoffbedarfs von Europa decken.

Als preiswerte Wasserstoffquelle bietet sich **Methanol** an.

Der leichte Alkohol ist großtechnisch leicht zugänglich und kann an Bord eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs in Wasserstoff umgewandelt werden.

Ein Methanol-Wasser-Gemisch wird verdampft und bei etwa 280 °C an Kupfer/Zink-Oxid-Katalysatoren reformiert.

Jedoch: Das Nebenprodukt **Kohlenmonoxid** vergiftet das **Platin** auf den Elektroden der Brennstoffzelle.

CO muss daher selektiv zu CO<sub>2</sub> oxidiert werden – ein Meisterstück der Katalyse in einer reduzierenden Wasserstoffatmosphäre!

Ein flächendeckendes Angebot von Methanol an Tankstellen wäre mit vertretbarem Aufwand möglich.

Ökonomen hinterfragen natürlich: Rechnet sich der höhere Wirkungsgrad von Brennstoffzellen gegenüber der simplen Verbrennung von Methanol in Motoren?

Wasserstoff ist kein Schreckgespenst.

Der Umgang mit dem leichten Gas in belüfteten Räumen und im Freien ist **weitgehend gefahrlos**.

Die kleinen  $H_2$ -Moleküle entweichen blitzschnell durch kleinste Ritzen, so dass ein zündfähiges Gemisch rasch verdünnt wird.

Durch ein Leck gleicher Größe strömen pro Zeiteinheit zwar mehr Wasserstoff- als Erdgasmoleküle aus; aber der Energieverlust beim Wasserstoff ist geringer.

Die Sprengkraft von **einem Gramm Wasserstoff** entspricht immerhin **24 g TNT**. Die Zündtemperatur bei 585 °C liegt höher als bei Erdgas und Benzin. Rauch und Qualm wie bei Benzinbränden treten nicht auf.

**Explosionsfähige Gemische mit Luft enthalten 4 bis 76 Vol.-% Wasserstoff.** Ab 40 % Feuchte detoniert und ab 60 % entflammt Wasserstoff **nicht** mehr.

In Brennstoffzellen werden feuchte Gase eingesetzt.  
Also: **Vorsicht ja – Angst vor Wasserstoff: nein!**

Wasserstoff kann in **Motoren und Kraftwerkskesseln verbrannt** werden – auch im Gemisch mit Erdgas. Der Energieinhalt von 286 Kilojoule pro Mol ist jedoch um Faktoren kleiner als bei Erdgas und Benzin.

Das Abgas besteht aus praktisch reinem Wasserdampf, frei von Rußpartikeln, Kohlenstoff- und Schwefeloxiden, Kohlenwasserstoffen und Schwermetallen.

Im Wasserstoffmotor entstehen jedoch Spuren schädlicher Stickstoffoxide – wie bei jeder heißen Verbrennung mit Luft.

Die **Carnot**-Grenze beschränkt den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren auf 37 % (bei 600 °C). Das bedeutet: die im Brennstoff gespeicherte Energie fließt größtenteils **ungenutzt** als **Wärme** in die Umgebung ab.

Brennstoffzellen wandeln die chemische Energie im Brennstoff theoretisch zu **100%** in elektrische Nutzenergie um. In der Praxis erreichen Brennstoffzellenaggregate 45 bis 60 % Wirkungsgrad.

Antriebe mit Batterien und Brennstoffzellen gelten bei gedrosseltem Tempo als sinnvoll, etwa auf Flughäfen und im innerstädtischen Busverkehr; außerorts fährt der Verbrennungsmotor konkurrenzlos preiswert, Verbrennungsmotoren gleicher Leistung sind leichter als Elektroantriebe.

Flüssiger Wasserstoff in Raketenantrieben ist längst Realität.

Beim Start zündet das Space Shuttle allerdings Feststoffraketen, die einen noch größeren Schub entwickeln.

Zum Schutz der Umwelt wären **Wasserstoffflugzeuge** jedoch wünschenswert.

Das erste Wasserstoffflugzeug, eine Tupolew-155, hob am 15. April in Moskau zu einem 21-minütigen Probeflug ab.

Wegen der geringeren Speicherdichte müssen die Wasserstofftanks dreimal größer als die Kerosintanks sein.

Wie **speichert und transportiert** man das Wasserstoffgas?

Wasserstoff kann wie Erdgas komprimiert oder verflüssigt werden.

**Druckgasbehälter** aus einem Aluminiumkern und einem kohlenstofffaser-verstärkten Epoxidharzmantel eignen sich für den Einsatz in Fahrzeugen. In **einen Kubikmeter** bei 700 bar lassen sich **39 kg Wasserstoff** pressen.

**Flüssiger Wasserstoff** wird „kryogen“, das heißt „tiefkalt“ bei  $-273\text{ °C}$  in vakuumisolierten Tanks gelagert.

Ein Kilogramm **flüssiger Wasserstoff** speichert die Energie von 120 Megajoule - rund dreimal mehr als Benzin!

Kohle und Benzin speichern jedoch mehr Energie im **Volumen**.

Die hohe Speicherdichte ist ökonomisch gegen den Energieaufwand zur Verflüssigung abzuwägen.

**Metallhydride** erreichen kaum bessere Speicherdichten als 10 %; die reversible Befüllung und Entnahme des Wasserstoffs gelingt nicht befriedigend. Für Spezialanwendungen, zum Beispiel in U-Booten, sind sie dennoch im Einsatz.

Dieses Wissensselement ist urheberrechtlich geschützt.

Studierende dürfen es für das Selbststudium nutzen und die Texte in eigenen Arbeiten verwenden.

Das Bildmaterial ist **nicht** frei.

Bitte holen Sie von den angegebenen Quellen Abdruckrechte ein.

Ende