



## Die Brennstoffzelle



Handwerkskammer-Flensburg

**DAS HANDEWERK**  
DIE WIRTSCHAFTSMACHT. VON NEBENAN.

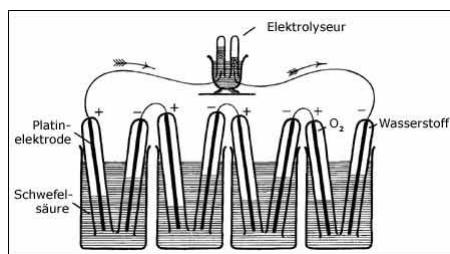
© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg



## Die Geschichte der Brennstoffzelle

Im Jahre 1839 wurde die Brennstoffzelle "erfunden". Der in Swansea, Wales, geborene Jurist und Physiker **Sir William Robert Grove** (1811-1896) experimentierte zu dieser Zeit mit der Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff und stellte fest, dass sich dieser Prozess auch umkehren ließ.

Schon bald stellte er eine "galvanische Gasbatterie" vor, die durch sogenannte kalte Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff Strom erzeugen konnte.

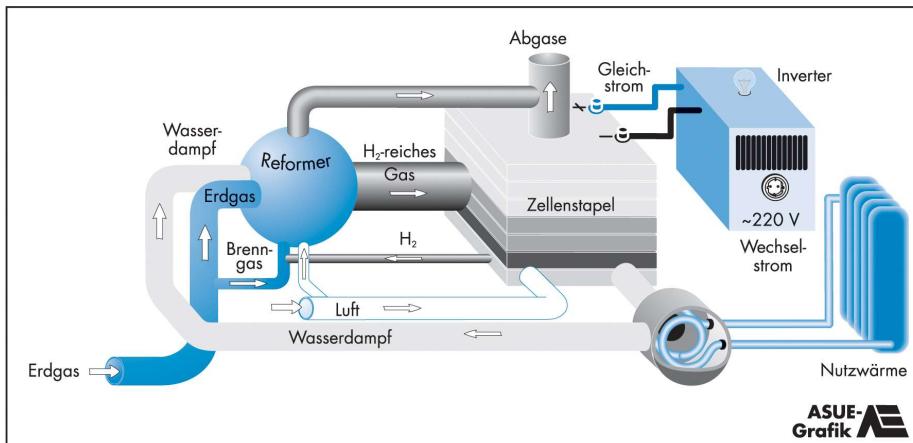


Diese erste Brennstoffzelle bestand aus zwei Platin-Elektroden, die in Schwefelsäure getaucht wurden. Um diese wurden Wasserstoff und Sauerstoff gespült.

Da aber die messbare Spannung und der Stromfluss der Brennstoffzelle zu gering waren, konnte sich die Brennstoffzelle nicht gegen Erfindungen wie den **Elektrodynamo** oder den **Verbrennungsmotor** durchsetzen.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

## Aufbau der Brennstoffzelle



ASUE-Grafik

1870 schrieb Jules Verne über die Brennstoffzelle: „Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Wegen der Erfindung des elektrischen Generators, damals *Dynamomaschine* genannt, durch Werner von Siemens geriet die als „**Galvanische Gasbatterie**“ bezeichnete Erfindung zunächst in Vergessenheit.“

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

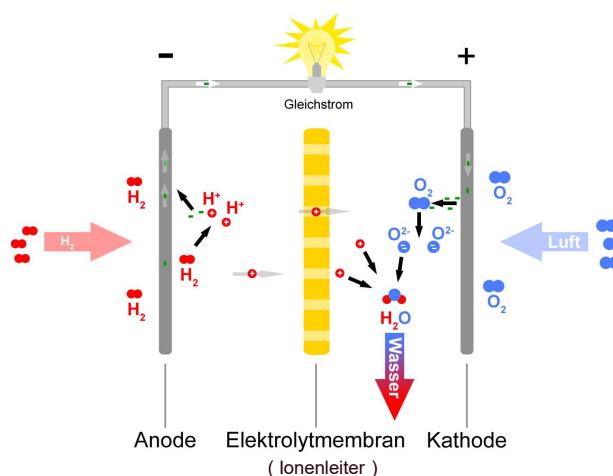
## Prinzip der Brennstoffzelle

1. Anode: H<sub>2</sub> werden Elektronen entzogen

2. Elektronen wandern von Kathode zu Anode und erzeugen Strom

3. Kathode: O<sub>2</sub> werden Elektronen hinzugefügt

4. H<sup>+</sup> Teilchen wandern durch Membran und verbinden sich mit O<sup>2-</sup> Teilchen zu heißem Wasser



© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

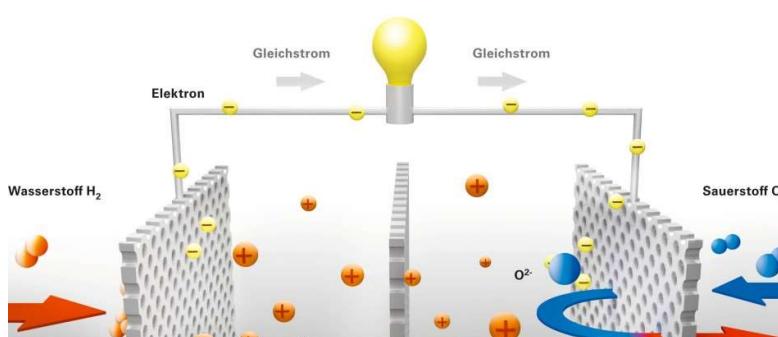
Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer  
Flensburg

Die Energie liefert eine Reaktion von Sauerstoff mit dem Brennstoff, der Wasserstoff sein kann, jedoch ebenso aus organischen Verbindungen wie z.B. Methan oder Methanol bestehen kann. Beide Reaktionspartner werden über die Elektroden kontinuierlich zugeführt.

Die gelieferte Spannung liegt theoretisch bei **1,23 V** für die Wasserstoff-Sauerstoff-Zelle, bei einer Temperatur von 25 °C.

**Praktisch sind die von Brennstoffzellen erzielten Wirkungsgrade (60%) höher als die von Otto- oder Dieselmotoren.**



Die amerikanischen **Space Shuttle** verwenden Brennstoffzellen mit einer maximalen **Dauerleistung von  $3 \times 7 \text{ kW}$**  für die Stromversorgung.

Das bei den Brennstoffzellen anfallende Wasser kann im Lebenserhaltungssystem verwendet werden.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer  
Flensburg



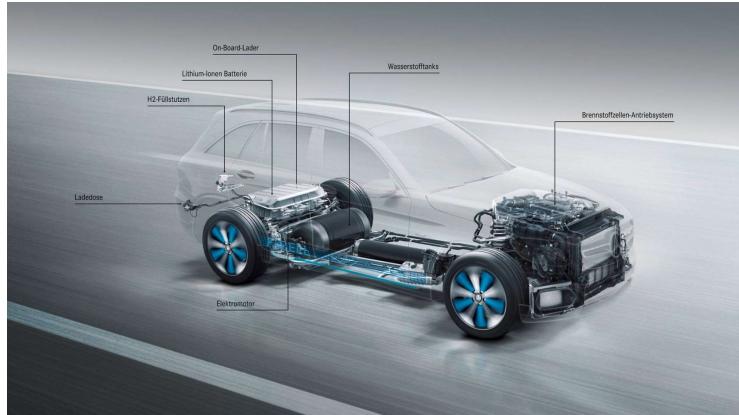
© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

**Handwerk**  
-> Bildung  
Beratung

 **Handwerkskammer  
Flensburg**

Die Fahrzeughersteller Toyota, Nissan, Mercedes-Benz und Honda haben **die Produktionskosten** für wasserstoffgetriebene Fahrzeuge inzwischen drastisch **reduziert**.

Um die Alltagstauglichkeit des Wasserstoffantriebes nachzuweisen, hat Mercedes-Benz eine Weltumrundung mit mehreren Brennstoffzellenfahrzeugen der B-Klasse erfolgreich abgeschlossen. Bereits 200 Serienfahrzeuge dieses Typs sind **2010 an Kunden ausgeliefert** worden.



Der Preis soll nur etwa **20%** über dem eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor liegen.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

**Handwerk**  
-> Bildung  
Beratung

 **Handwerkskammer  
Flensburg**

## **WASSERSTOFF ALS ANTRIEB**

Die Vor- und Nachteile auf einen Blick

<b>VORTEILE</b>	<b>NACHTEILE</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li> <b>Emissionsfrei</b> &gt; Ausstoß besteht aus Wasserdampf</li> <li> <b>Wasserstoff ist in unendlicher Menge verfügbar</b> &gt; Mit Elektrolyseverfahren</li> <li> <b>Hohe Reichweite</b> &gt; Bis zu 600 km</li> <li> <b>Schnelle Betankung</b> &gt; 3-5 Minuten</li> <li> <b>Keine Motorengeräusche</b> &gt; Führt zu weniger Straßenlärm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> <b>Geringerer Wirkungsgrad</b> &gt; Durch hohe Energieverluste</li> <li> <b>Hoch entzündlich</b> &gt; Wasserstoff verflüchtigt sich jedoch schnell</li> <li> <b>Schlechte Infrastruktur</b> &gt; Nur 60 Tankstellen in Deutschland</li> <li> <b>Hohe Kosten</b> &gt; In Anschaffung und Wartung sehr teuer</li> </ul>

Quelle: C3

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer Flensburg

**Toyota Mirai**

**Antrieb:** Permanent erregter Synchron-Elektromotor, Vorderradantrieb, 113 kW/**154 PS**, maximales Drehmoment: **335 Nm**  
 0-100 km/h: 9,6 s, Vmax: 178 km/h  
 Durchschnittsverbrauch: 0,76 Kilo Wasserstoff je 100 km  
 Reichweite: **ca.500km** CO2-Ausstoß: 0g/km, Effizienzklasse: A+

Leergew.: 1925kg  
**Zuladung: 255kg**

ca.78.000€

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer Flensburg

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung

The image shows the interior of a Toyota Mirai hydrogen fuel cell vehicle. The view is from the front passenger seat, looking towards the driver's side. The car features a large panoramic sunroof. The interior is modern with white leather seats and a black dashboard. The steering wheel has the Toyota logo. A central infotainment screen displays the word "TOYOTA". The center console includes a gear selector and various control buttons.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung

The image shows the rear three-quarter view of a white Hyundai ix35 Fuel Cell SUV. The car is displayed at an auto show, with other vehicles and people visible in the background. The side of the car features a graphic of a honeycomb pattern with the words "ix35 Fuel Cell" and "hydrogen".

**Hyundai ix35**  
NEU 78.000 €  
5-jährig ca. 30.000 €

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer  
Flensburg



© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer  
Flensburg



© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung

Handwerkskammer Flensburg



A photograph of an OMV gas station. On the left, there is a tall blue and green OMV fuel price sign for 'VIVA' fuel. It lists prices for Diesel (1.89), MassMotor Diesel (1.09), Super (1.49), MassMotor 100 (1.59), and Wasserstoff (0.90). On the right, a white car is being fueled at a hydrogen station under a large blue and green canopy. A man in a suit stands next to the car. In the background, there are other OMV fuel pumps and some trees under a cloudy sky.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung

Handwerkskammer Flensburg



A nighttime photograph of a hydrogen fueling station. A white and orange bus is stopped at a fueling bay under a modern, illuminated canopy. A person is standing near the bus. In the background, another illuminated canopy is visible, and the scene is lit by streetlights and the station's own lights, creating a blurred effect due to motion or low light conditions.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung



Handwerkskammer  
Flensburg



Reichweite: 1200 km

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
> Bildung  
Beratung



Handwerkskammer  
Flensburg



© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer  
Flensburg



U-Boot-Klasse 212

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer  
Flensburg

### Wasserstofftankstellennetz

Am 5. März 2018 wurde in Ingolstadt immerhin die **45. deutsche Zapfmöglichkeit** in Betrieb genommen.

Bis 2019 soll das hiesige Tankstellennetz auf 100 H<sub>2</sub>-Stationen und **bis 2023 auf 400 Zapfstellen** wachsen.

Doch viele der bisherigen Versorgungseinheiten sind Prototypen für Forschungseinrichtungen, die öfters den Dienst quittieren.



© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg





### Elektrischer Wirkungsgrad, Kosten, Lebensdauer (2018)

Typ	Leistung	Wirkungsgrad	Kosten €/kW
konventionelle KWK	bis 100 kW	34 % (el.)	1000
konventionelle KWK	ab 1000 kW	41 % (el.)	< 500
Stadtbus (Dieselmotor)	300 kW	30 %	< 275
LKW, Reisebus	500 kW	30 %	< 100
PKW (Ottomotor)	100 kW	15–20 %	50
Gasturbinen	1 kW – 300 MW	25–46 %	2200

**Die Lebensdauer** einer PAFC-Brennstoffzelle liegt zwischen 40.000 Betriebsstunden für stationäre und **5.000 Betriebsstunden für mobile Systeme.** (2h/Tag = 7Jahre)

Typ	Betriebsparameter	Leistung	Elektrischer Wirkungsgrad	Einsatzbereitschaft für KWK	Kosten €/kW
PEFC <sup>[18]</sup>	70 °C, fester Elektrolyt	250 kW	35 %	Feldtest	< 10.000
PAFC	250 °C	200 kW	38 %	Serie	> 5.000
MCFC	650 °C, für stationäre Anwendung	280 kW	48 %	Feldtest	< 8.000
SOFC <sup>[19]</sup>	900 °C, für stationäre Anwendung	100 kW	47 %	Feldtest	20.000

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg



### Die PEM-Brennstoffzelle

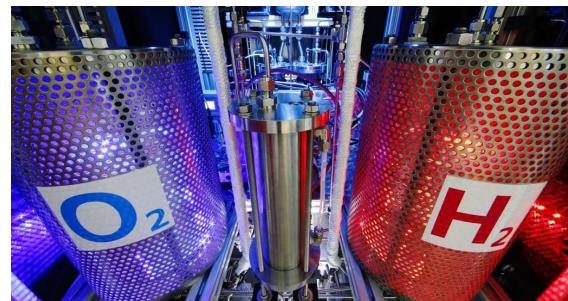
Die PEM-Brennstoffzelle in der Übersicht:

PEM-FC ???	Proton Exchange Membrane Fuel Cell		
Elektrolyt	Polymermembran	Wirkungsgrad	60% (H <sub>2</sub> ) 40% (CH <sub>4</sub> )
Anodengase	Wasserstoff (Methanol) <sup>a</sup> (Methan) <sup>a</sup>	Anwendungen	Stromversorgung Pkw/Bus Hausversorgung Blockheizkraftwerke
Temperatur	0-80 °C	Zusatz	
Leistung	bis 250kW		CO-empfindlich

Brennstoffzellen sind leichter als Akkumulatoren und zuverlässiger und leiser als Generatoren.

Die geringen Geräuschemissionen und die Möglichkeit, Brennstoffzellen nach sehr langer Inaktivität zuverlässig zu betreiben, trugen zu einer anfangs oft militärischen Nutzung sowie einem Einsatz in Notstromversorgungen bei.

Die besondere Stärke von Brennstoffzellen ist jedoch die hohe Energiedichte, wodurch sich das frühzeitige Interesse des Militärs und der Raumfahrt an dieser Technik erklärt.



© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer Flensburg

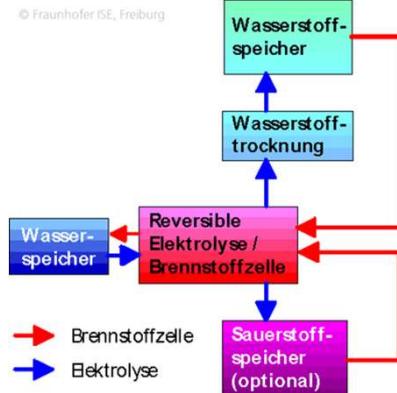
## Reversible Brennstoffzelle

Neuere Modelle kombinieren den Verbrennungs- und den Elektrolyse-Prozess, um Gewicht zu sparen und die Komplexität zu vermindern.

Damit eignen sich reversible Brennstoffzellen als Energiewandler für Energiespeicher und zum Einsatz etwa in Akkumulator-Systemen.



© Fraunhofer ISE, Freiburg



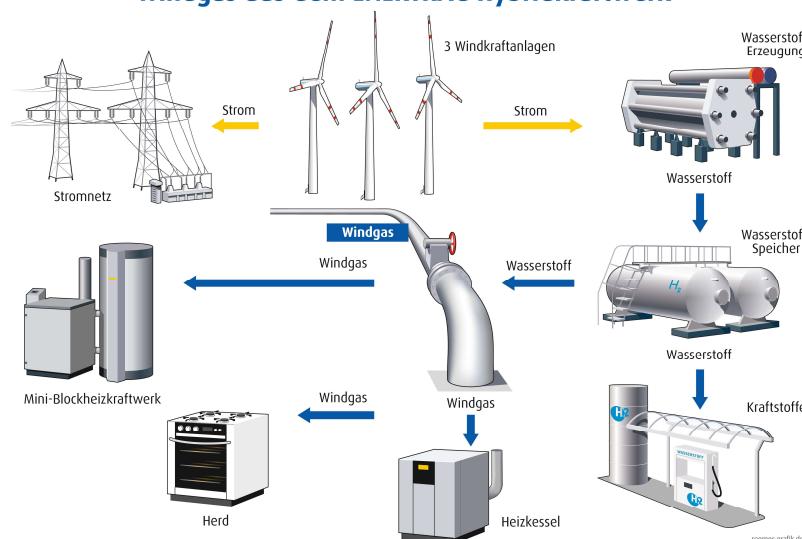
→ Brennstoffzelle  
→ Elektrolyse

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

 Handwerkskammer Flensburg

## Windgas aus dem ENERTRAG Hybridkraftwerk



Stromnetz  
3 Windkraftanlagen  
Windgas  
Windgas  
Windgas  
Windgas  
Herd  
Heizkessel  
Wasserstoff-Erzeugung  
Wasserstoff-Speicher  
Kraftstoffe

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

**Handwerkskammer Flensburg**

## Wasserstoff aus dem Windpark

### EE-Gas

Als EE-Gas wird ein Brenngas bezeichnet, welches mittels Elektrolyse unter dem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien (EE) hergestellt wird.

Mögliche Bezeichnungen sind auch Windgas oder Solargas.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

**Handwerkskammer Flensburg**

### Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Konzepte

„Der Begriff Power-to-Gas steht für ein Konzept, bei dem **überschüssiger Strom** dazu verwendet wird, per **Wasserelektrolyse Wasserstoff zu produzieren** und **bei Bedarf** in einem zweiten Schritt unter Verwendung von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in synthetisches **Methan** umzuwandeln.“

Als Speicher für dieses Methan und bis zu einem gewissen **Volumenanteil (10%)** auch des elementaren Wasserstoffs könnte die bestehende Erdgasinfrastruktur, also das **Gasnetz**, mit den angeschlossenen Untertagespeichern, verwendet werden.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

Handwerk  
› Bildung  
Beratung

**Handwerkskammer Flensburg**

### Elektrolyse von Wasser

The diagram illustrates the electrolytic decomposition of water. An external power source (GBF) provides electrons ( $e^-$ ) to two electrodes immersed in a beaker of water. At the anode (+), oxygen gas ( $O_2$ ) is released. At the cathode (-), hydrogen gas ( $H_2$ ) is released. The overall reaction is  $H_2O \rightarrow H_2 + O_2$ .

An aerial view of a coastal industrial complex. The area features several wind turbines in the water, industrial buildings, and green spaces. A large body of water surrounds the facility, illustrating a sustainable energy hub integrated with renewable marine energy sources.

© Handwerkskammer Flensburg, Johanniskirchhof 1-7, 24937 Flensburg

