

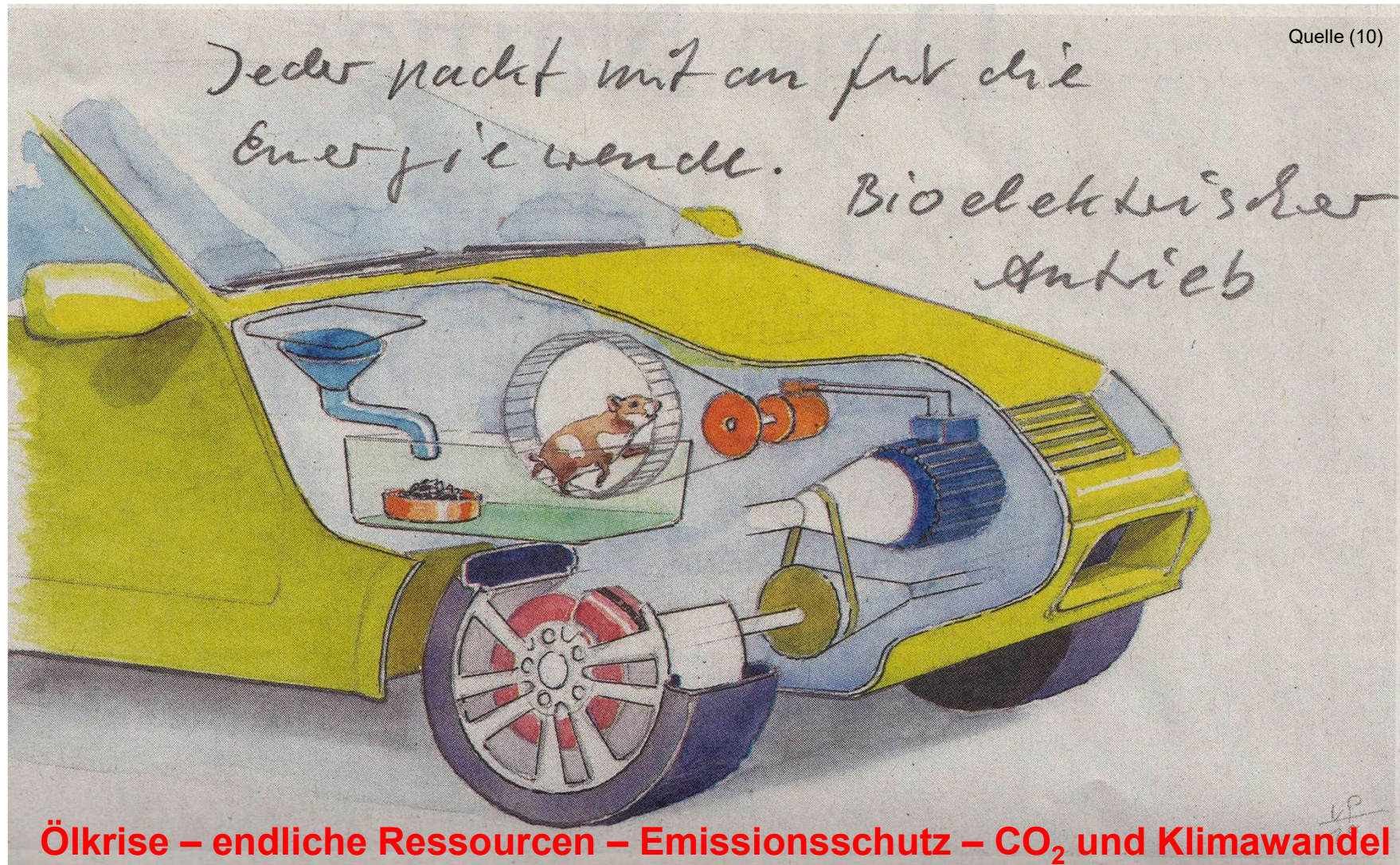
**VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug**

# **Grundlagen der Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug**

Prof. Dr. Lutz Mardorf - VDI AK Energietechnik

**VDI Arbeitskreis Energietechnik – Osnabrück 13. Juni 2019**

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug



Energiewende

## VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

**1839** Sir William Grove das **Prinzip der Brennstoffzelle**

als Umkehrung der Elektrolyse

Elektrischer Strom aus galvanischer Zelle mit Wasserstoff und Sauerstoff

**1965** Apollo-Programm.

Energieversorgung erfolgte durch **Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle**

Trinkwassererzeugung in der Gemini-Kapsel

ab ca. **1980** „terrestrische Anwendung

**Brennstoffzellenkraftwerke** als stationäre Testanlagen

**1999** DaimlerChrysler erprobt **Brennstoffzellen-Stadtbusse**

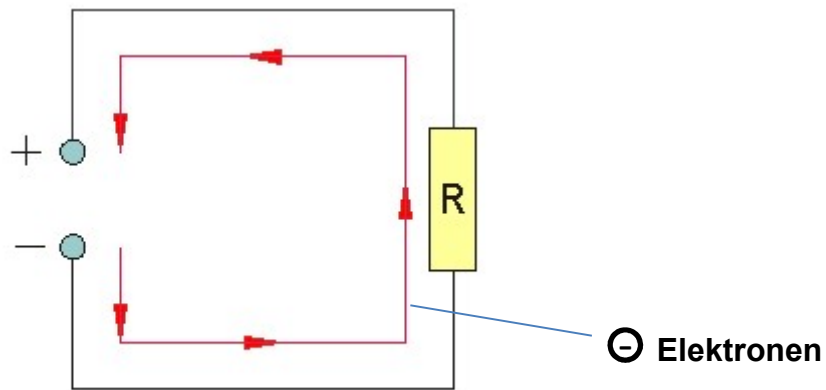
ab ca. **2000** Hausenergieversorgung mit **Brennstoffzellengeräten**

**2005** als Beispiel von **BZ-Autos**: Mercedes-Benz B-Klasse „F-Cell“

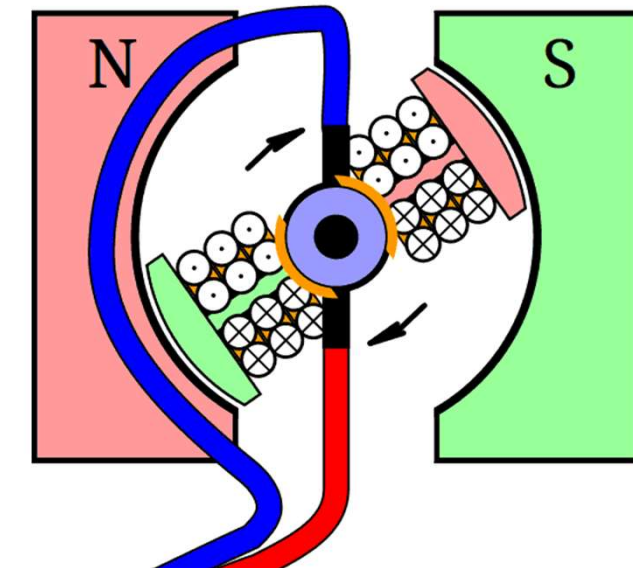
**Historie der Brennstoffzelle**

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

Brennstoffzellenfahrzeug ist ein Elektrofahrzeug  
Antriebsstrang mit Elektromotor



Ersatzschaltbild (2)



Gleichstrommotor (1)

Negativ geladenen Elektronen vom Minuspol einer Spannungsquelle durch den Stromkreis zum Pluspol.

Am Minuspol herrscht dadurch Elektronenüberschuss, am Pluspol Elektronenmangel.

## Elektronenfluss

## VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

Der elektrische Strom, der Elektronenfluss, wird hauptsächlich im Gegensatz zu einem reinen Elektrofahrzeug mit Batterie (Speicher) in der **Brennstoffzelle on board** erzeugt.

Brennstoffzelle ist kein Energiespeicher sondern ein Wandler

**Brennstoffzelle** ist ein galvanisches Element (Zelle)  
Chemische Reaktionsenergie aus Brennstoff und Oxidationsmittel

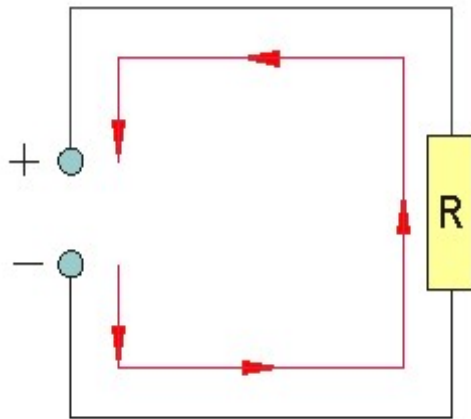
 elektrische Energie mit Elektronenfluss

**Brennstoffzelle:** Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle

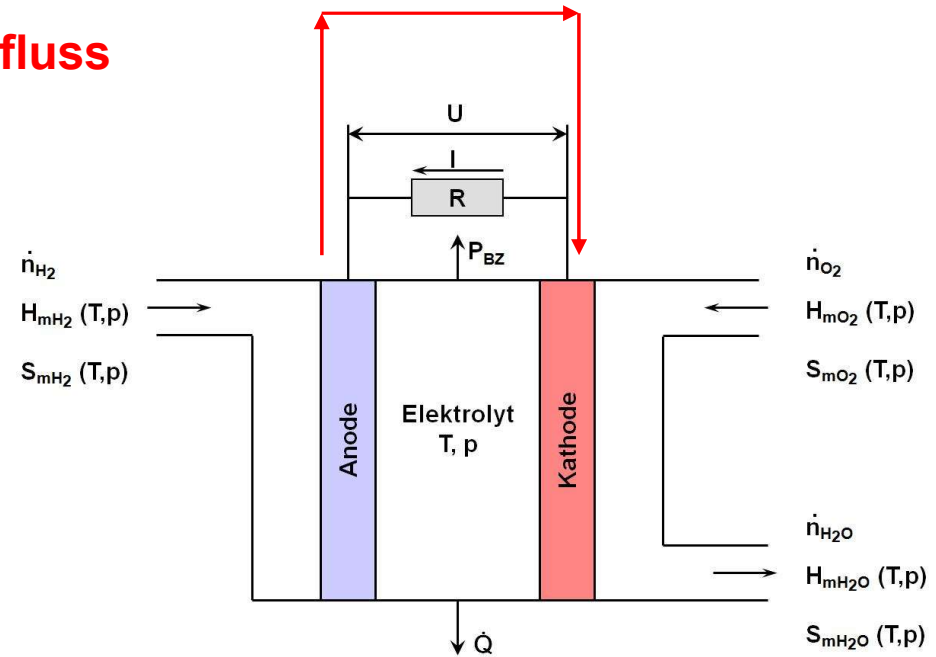
**Brennstoffzelle als Stromerzeuger**

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

## Elektronenfluss



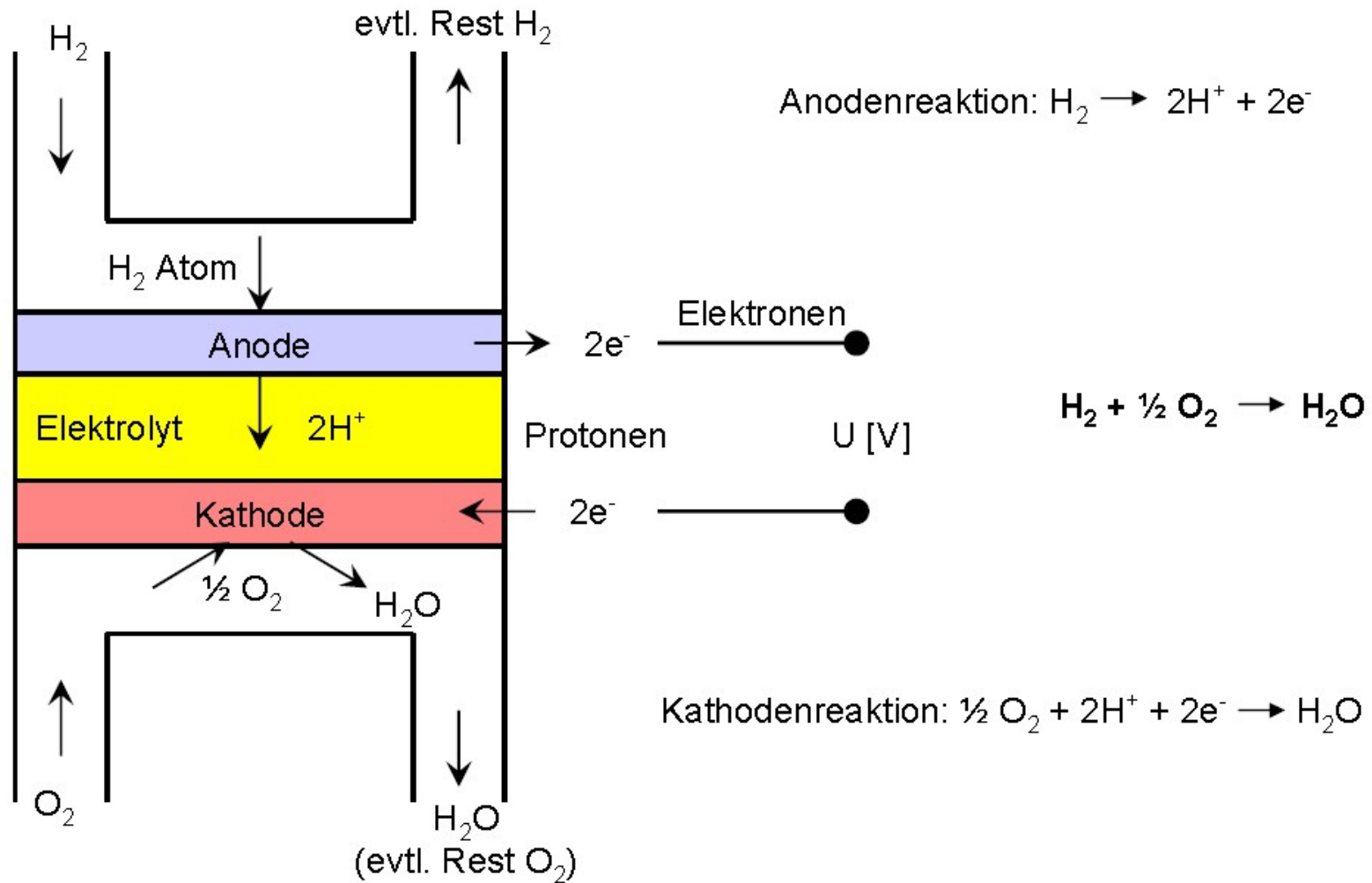
Ersatzschaltbild (2)



Schema Brennstoffzelle (9)

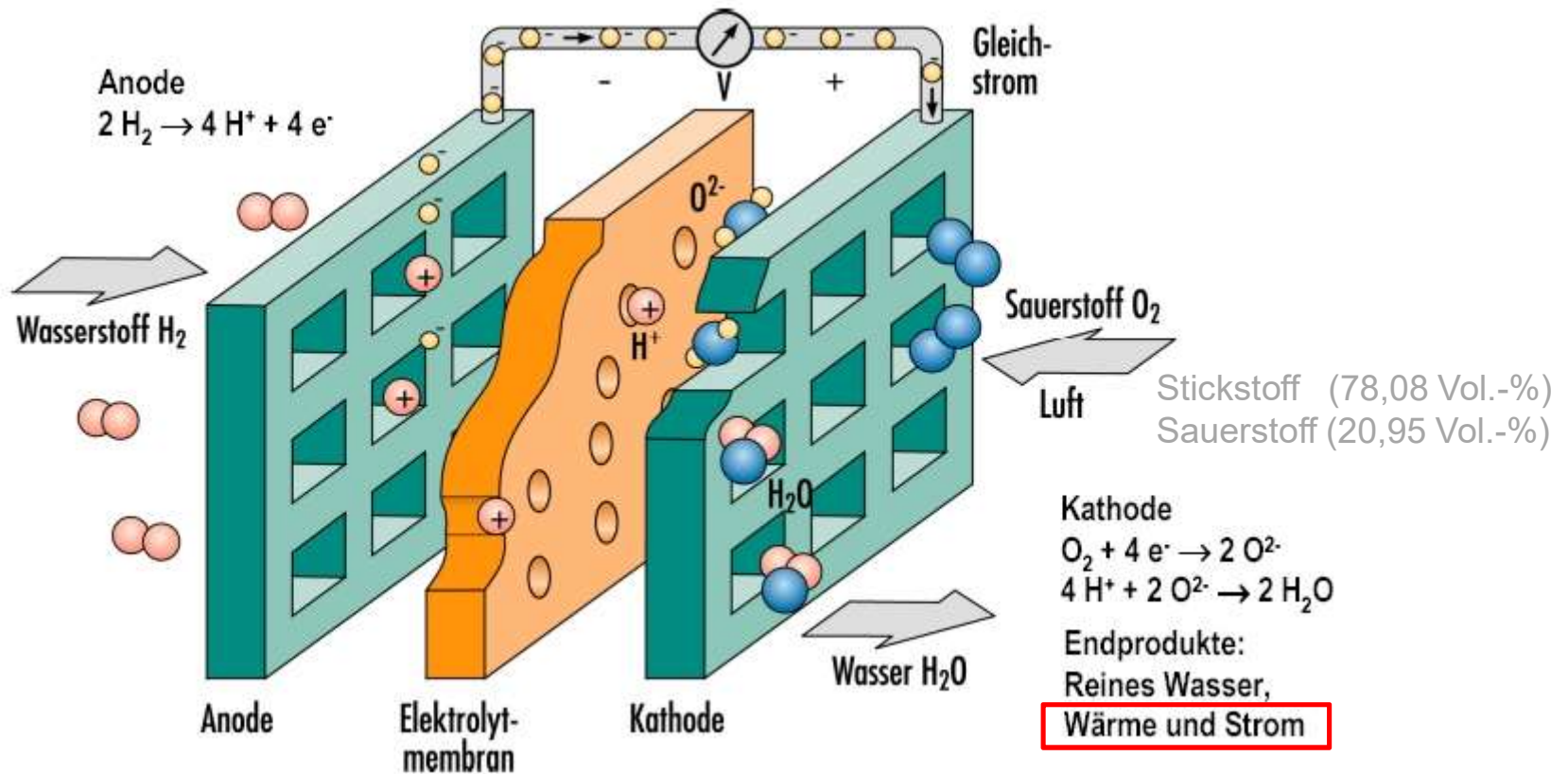
## Brennstoffzelle als Stromerzeuger

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug



## Brennstoffzelle als Stromerzeuger

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug



Quelle (3)

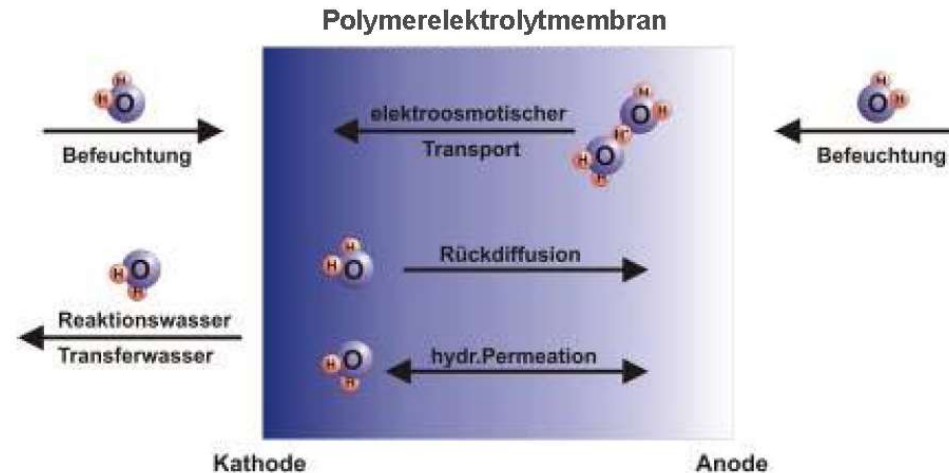
## Proton Exchange Membrane



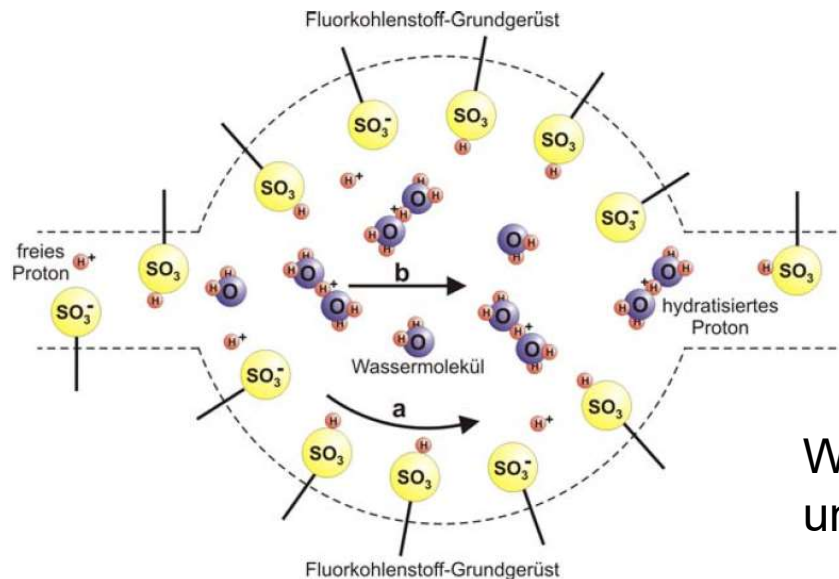
# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

## Nafion

perfluoriertes Copolymer,  
enthält eine ionische Sulfogruppe  
Nafion gehört zu den Ionomeren.  
Wurde in den 1960er-Jahren  
federführend von Walther Grot  
bei der Firma DuPont entwickelt



Schema des Wasserhaushaltes

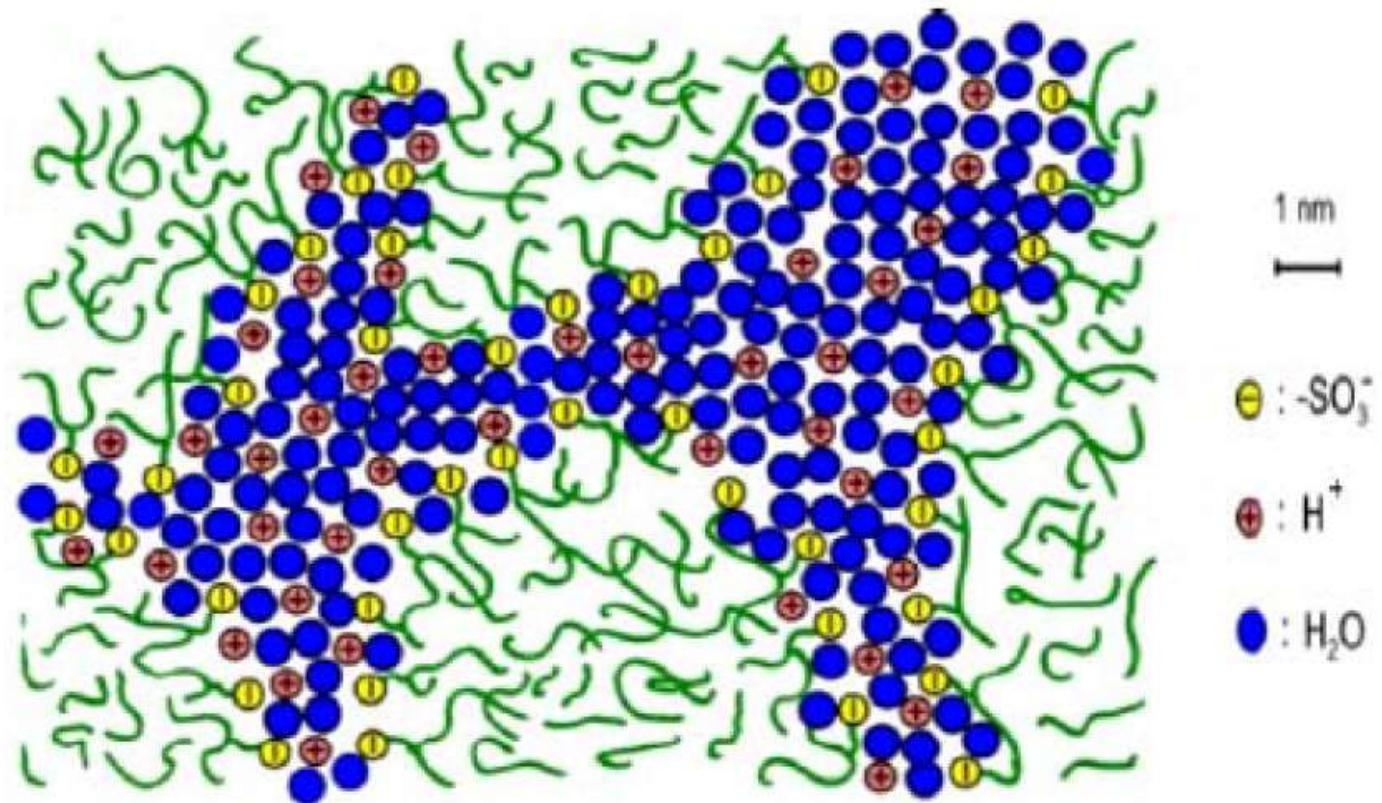


Wechselwirkung zwischen den  $SO_3^-H^+$ -Gruppen  
und den  $H_2O$ -Dipolen - - Befeuchtungswasser

Quelle (4)

## Proton Exchange Membrane - Nafion

## VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug



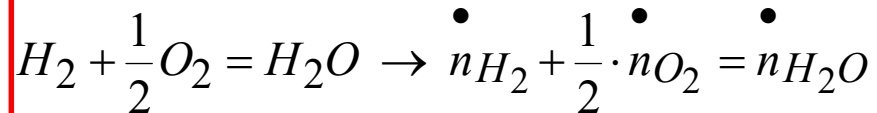
Im freien Volumen im Polymer mit nanometergroße Poren entstehen Cluster- und Kanalstrukturen für den wässrigen Protonentransport

Quelle (5)

**Netzwerk einer gequollenen Nafion- Membrane mit Ionenclustern**

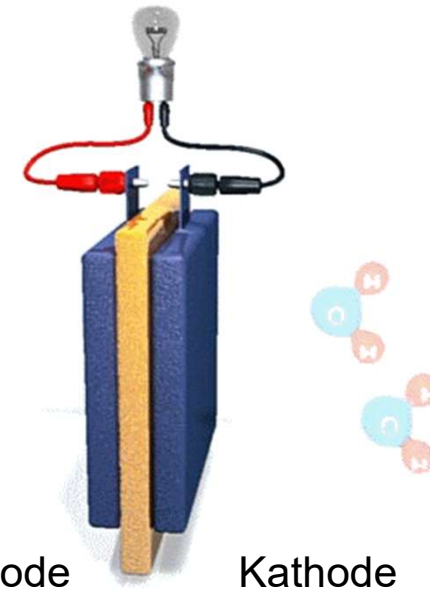
# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

## Energieumwandlung in Brennstoffzelle



$$\frac{\overset{\bullet}{n}H_2O}{\overset{\bullet}{n}H_2} = 1 \quad \frac{\overset{\bullet}{n}O_2}{\overset{\bullet}{n}H_2} = \frac{1}{2}$$

- Wasserstoff Atom
- ⊕ Wasserstoff Protonen
- ⊖ Elektronen
- Sauerstoff Atom



Anode

Kathode

$$P_{BZ} = \overset{\bullet}{n}H_2 \cdot \left[ \left( H_{m_{H_2O}} - T \cdot S_{m_{H_2O}} \right) - \left( H_{m_{H_2}} - T \cdot S_{m_{H_2}} + \frac{1}{2} \cdot \left( H_{m_{O_2}} - T \cdot S_{m_{O_2}} \right) \right) \right] - P_{diss_{BZ}}$$

$$P_{BZ} = U \cdot I$$

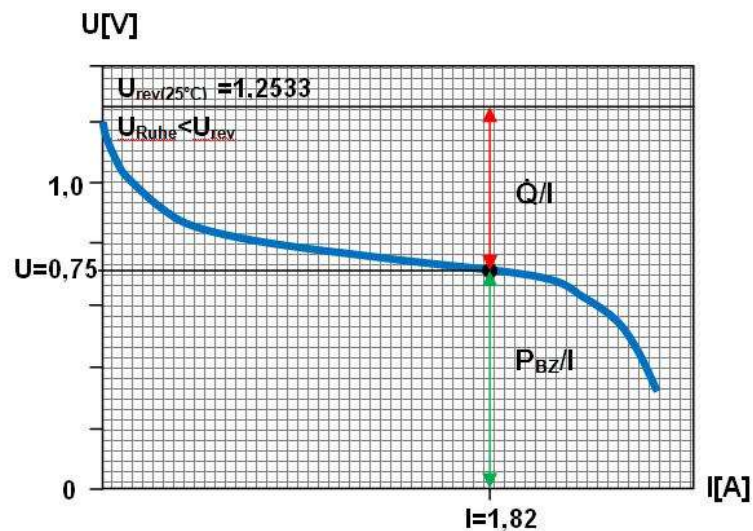
$$P_{BZ_{rev}} \Rightarrow \text{verlustfrei mit } P_{diss_{BZ}} = 0$$

$$\eta_{BZ} = \frac{P_{BZ}}{P_{BZ_{rev}}}$$

$$\rightarrow P_{diss_{BZ}} = -P_{BZ_{rev}} \cdot (1 - \eta_{BZ})$$

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

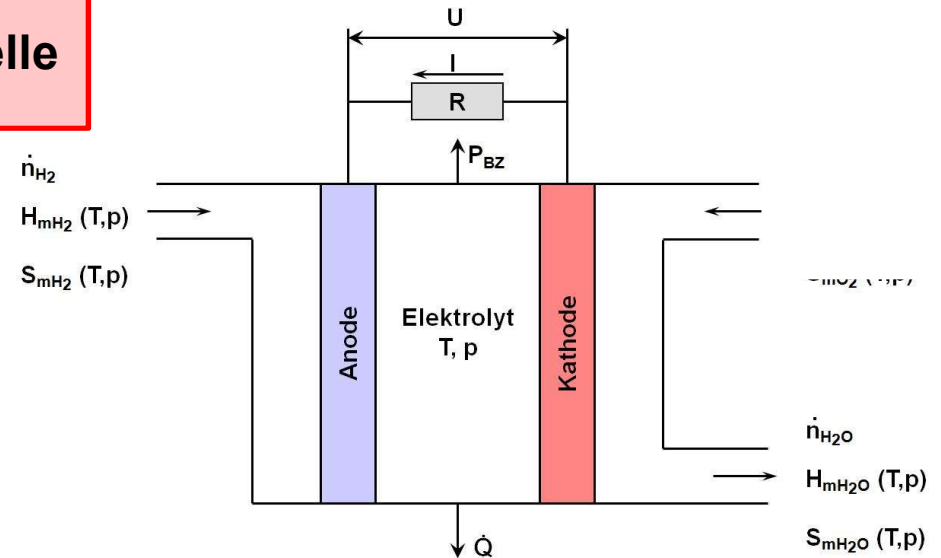
## Energieumwandlung in Brennstoffzelle



Beispiel: Zelle mit Betriebspunkt

- $\Delta U_{rev}$  – reversible Spannungsverluste
- $\Delta U_D$  – Durchtritts-Spannungsverluste
- $\Delta U_R$  – ohmsche Spannungsverluste
- $\Delta U_{Diff}$  – kinetische Spannungsverluste

Wirkungsgrad  $\eta_{BZ} \downarrow$  sinkt mit abgeführten Wärmestrom  $\dot{Q} \uparrow$



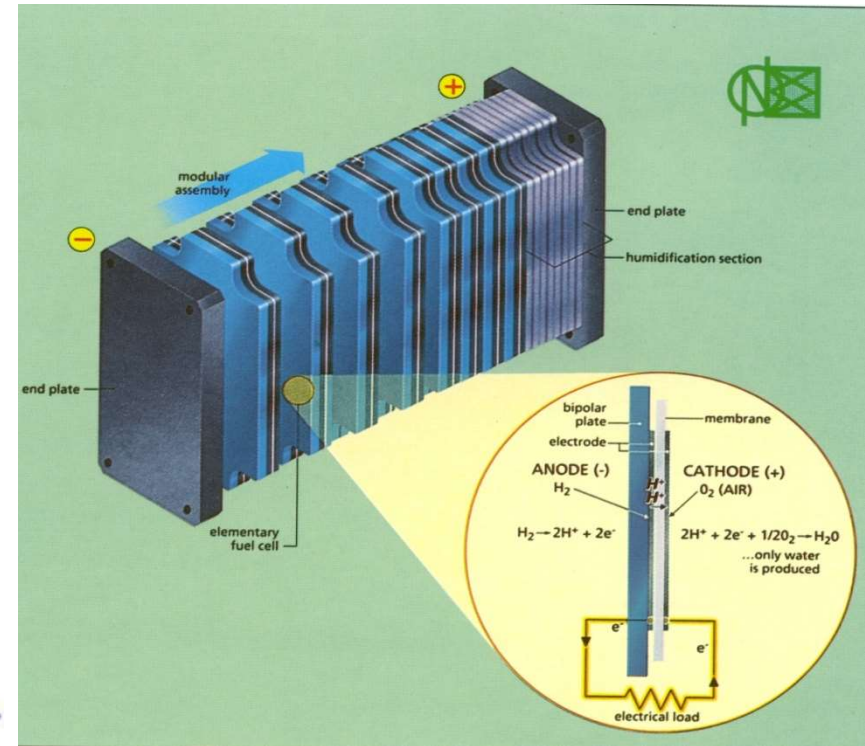
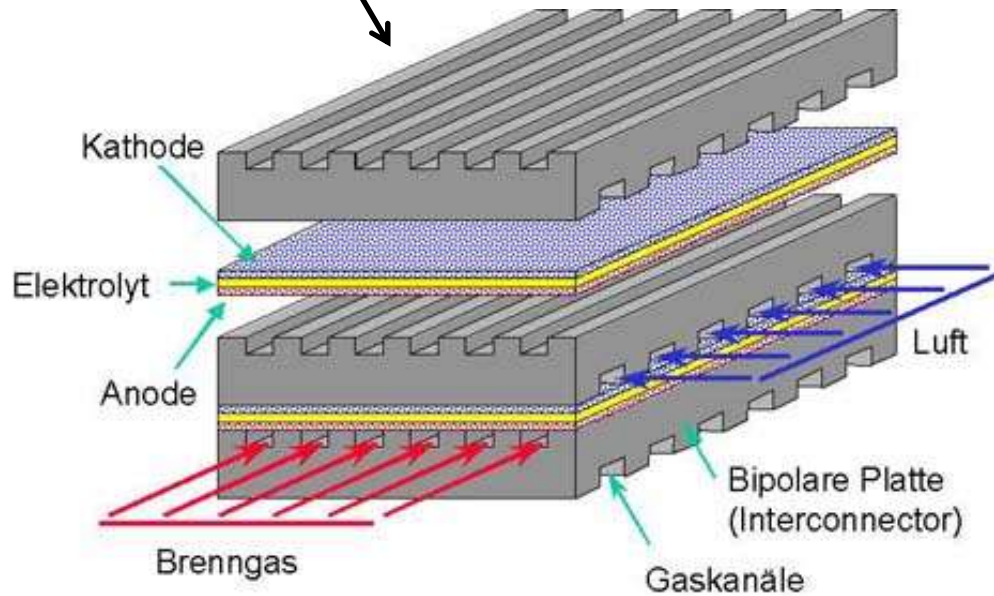
$$\dot{Q} = \dot{n}_{H_2} \cdot T \cdot \left[ S_{m_{H_2O}} - \left( S_{m_{H_2}} + \frac{1}{2} \cdot S_{m_{O_2}} \right) \right] - P_{diss_{BZ}}$$

$$\dot{Q} = \dot{n}_{H_2} \cdot T \cdot \left[ S_{m_{H_2O}} - \left( S_{m_{H_2}} + \frac{1}{2} \cdot S_{m_{O_2}} \right) \right] + P_{BZ_{rev}} \cdot (1 - \eta_{BZ})$$

## Brennstoffzelle als Stromerzeuger

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

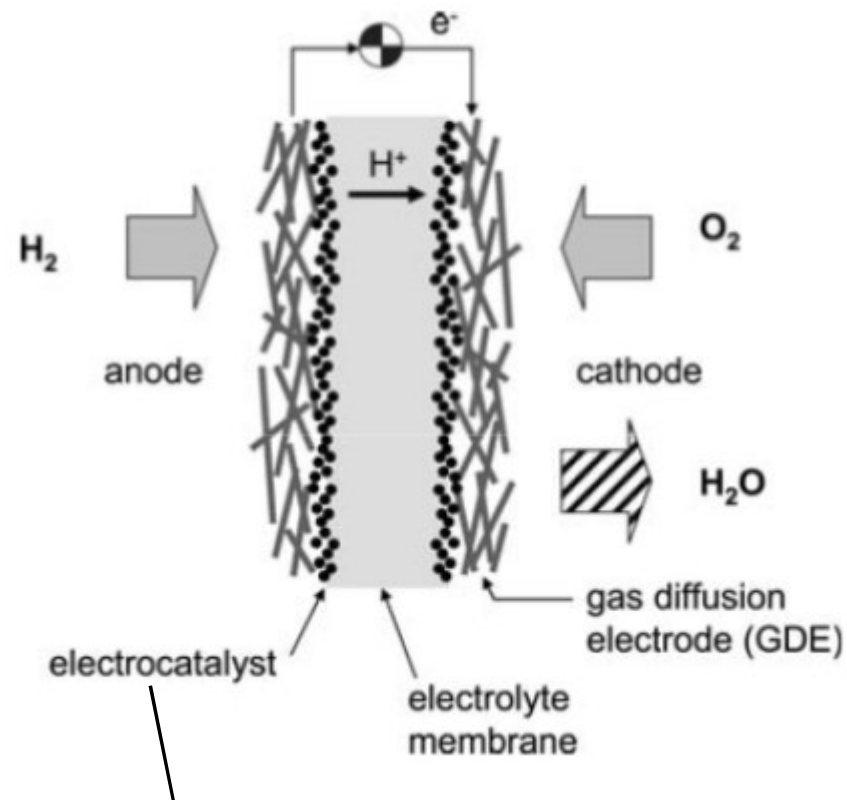
Brennstoffzellen Stack  
mit bipolaren Platten



Quelle: (9)

## Brennstoffzelle als Stromerzeuger

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug



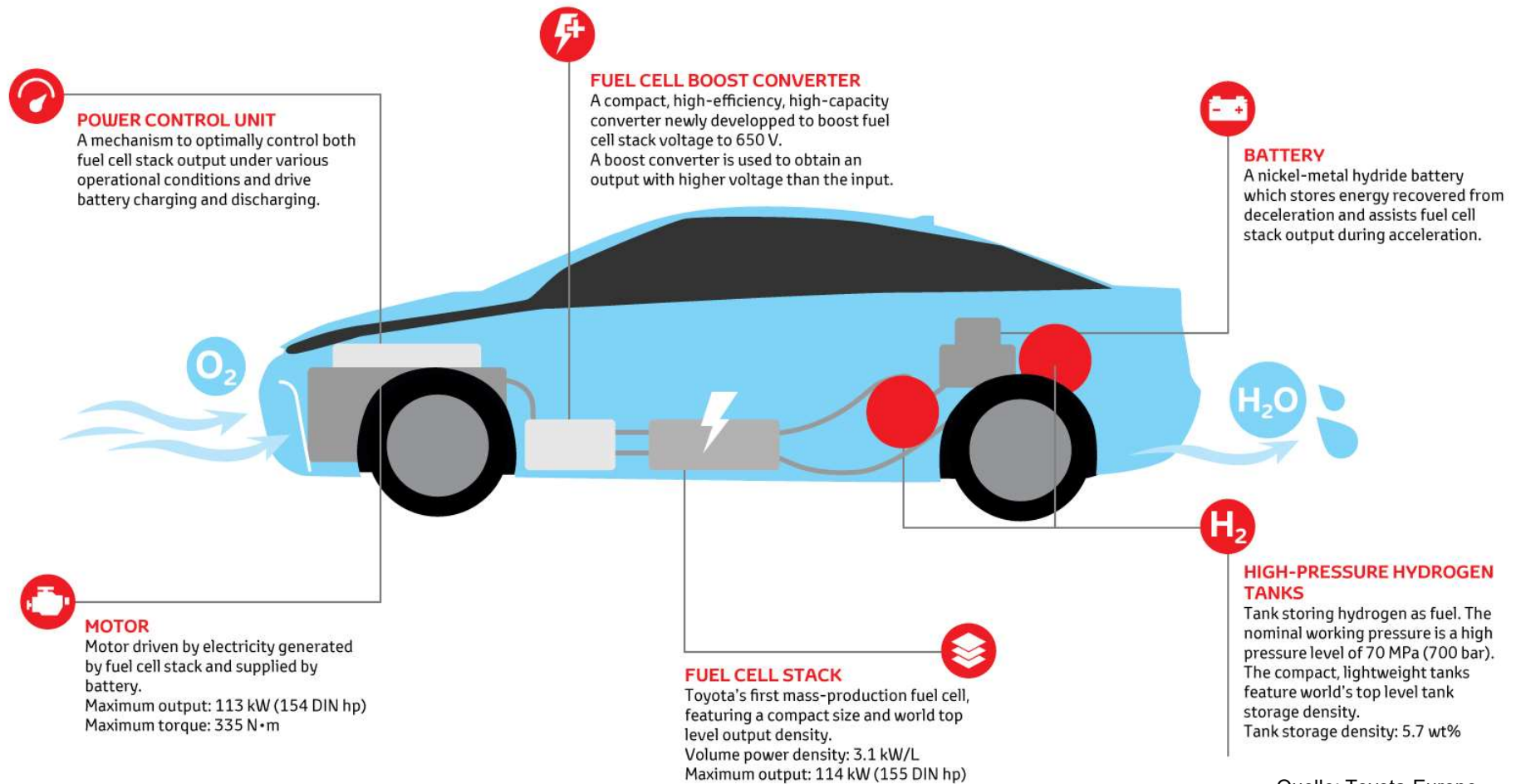
Katalysator: Platin oder Platin-Ruthenium

Quelle (11)

**Anode – Kathode - Proton Exchange Membrane**

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

## Fuel cell electric technology explained



## Komponenten im Brennstoffzellenfahrzeug

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

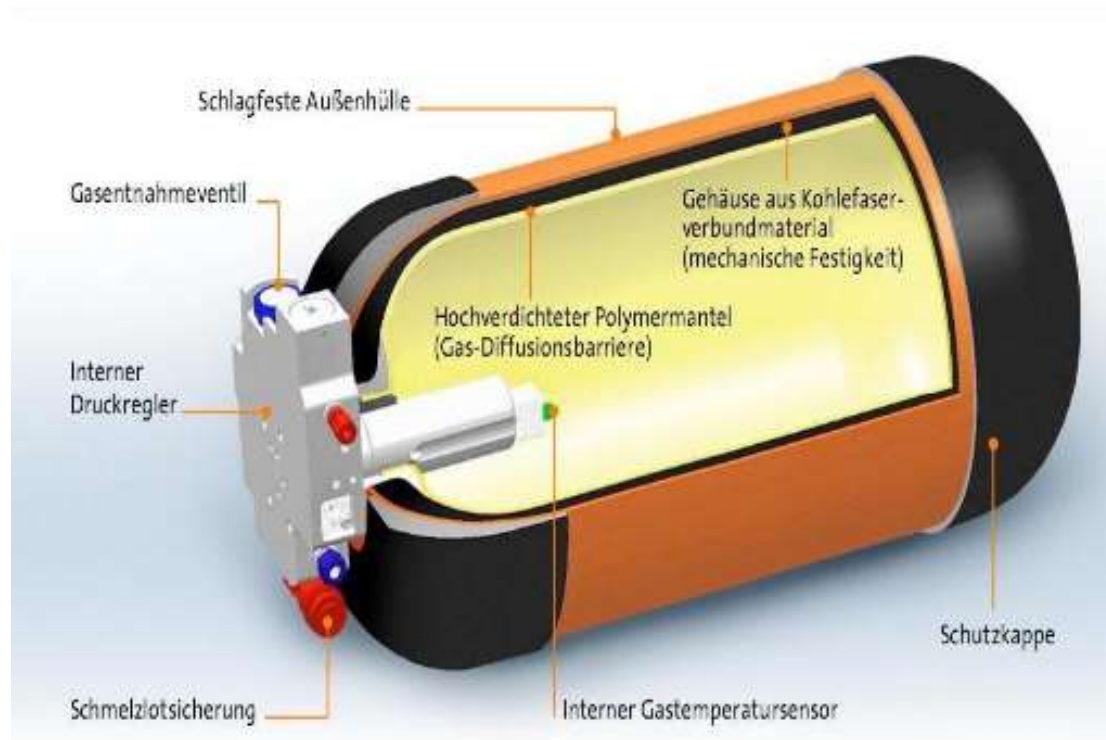
Art des Energiefluss	Vereinfachte Energieflussgrafik	Art des Energiefluss	Vereinfachte Energieflussgrafik
Kein Energiefluss		Batterie Brennstoffzellenstack E-Motor	
Motor Versorgung durch Batterie		Rekuperation der Motorenergie in die Batterie	
Motor Versorgung durch Brennstoffzelle		Rekuperation der Motorenergie und Batterieladung durch Brennstoffzelle	
Motor Versorgung durch Batterie und Brennstoffzelle		Motor Versorgung und Batterieladung durch Brennstoffzelle	

## Betriebsmodi im Brennstoffzellenfahrzeug



# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

1 kg Wasserstoff enthält soviel Energie wie 2,8 kg Benzin



700 bar Druck  
Tankinhalt ca. 5 kg  
in zwei Speichern.

Reichweite ca. 500 km

Tanken in ca. 3 Minuten

Bis Ende 2019 stehen  
100 öffentliche  
Wasserstoff-Stationen  
für Pkw zur Verfügung

Quelle: (6)

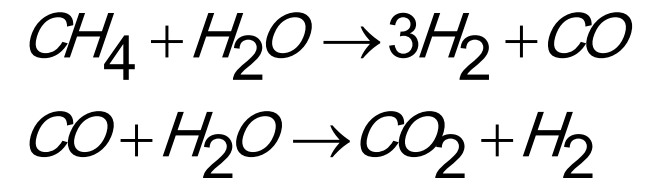
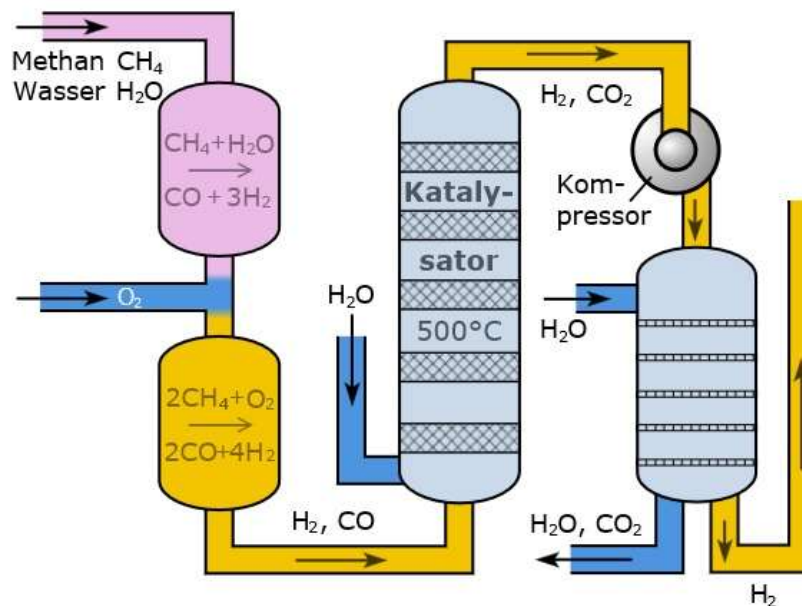
## Wasserstoff Druckgasspeicher im Fahrzeug

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

Wasserstoff ist keine Energiequelle sondern ein Energieträger !

Reformierungsverfahren im industriellen Maßstab wird Wasserstoff hauptsächlich durch Reformierung von Erdgas. Als Nebenprodukte u.a. Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickoxide und Schwefeldioxid.

## Dampfreformierung mit Methan (Erdgas)



Quelle: (7)

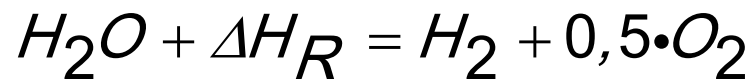
## Wasserstoff-Herstellung

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

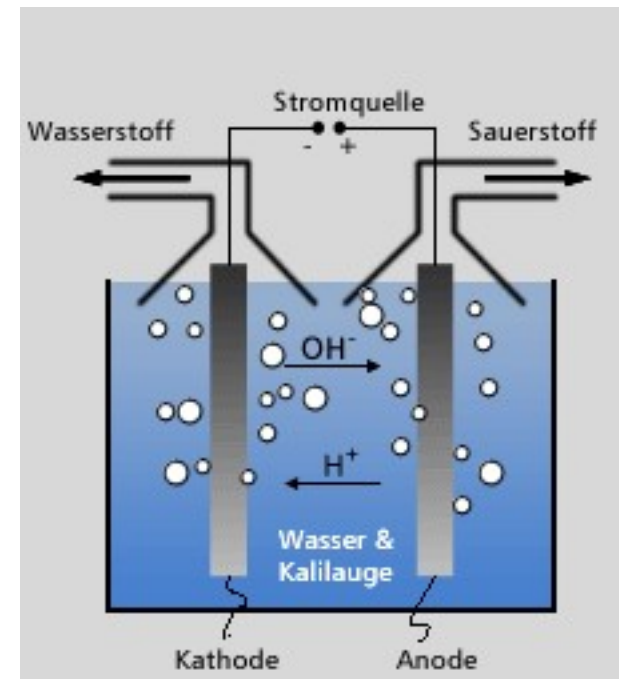
Wasser-Elektrolyse: Bei der Elektrolyse wird Wasser ( $H_2O$ ) mit einer Flüssigkeit versetzt, die den Ionentransport ermöglicht. Nach der Art des ionenleitenden Elektrolyten und der Betriebstemperatur z.B. Alkalische Elektrolyseure mit wässriger Kalilauge als Elektrolyt

Unter Einsatz von Strom wird Wasser in Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) zerlegt

Wasser + Energie = Wasserstoff + Sauerstoff



Quelle: (8)



## Wasserstoff-Herstellung

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

**Alstom Brennstoffzellen-Zug  
mit Elektromotor**



**Brennstoffzellenbus  
Hersteller Van Hool**

**Brennstoffzellenanwendung**

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

Deutsche Bahn entwickelt für das Projekt eine neue Wasserstoff-Tankstelle. In einer Anlage im DB-Werk Tübingen soll Wasserstoff in einem sogenannten Elektrolyseur hergestellt werden. Der Wasserstoff wird aufbereitet und gekühlt, eine Schnellbetankung des Zuges soll dann in 15 Minuten möglich sein.



Für 2024 ist ein Probetrieb zwischen Tübingen, Horb und Pforzheim geplant.

Quelle: (12)

## Brennstoffzellenanwendung



## Toyota MIRAI

Brennstoffzellen-Fahrzeug

Reichweite: 500 Km

Elektromotor: 114 kW/155 PS

Tankinhalt: 5 Kg

Kraftstoffverbrauch (H2) kombiniert: 0,76 kg/100 km

CO2-Emissionen kombiniert: 0 g/km

Typ: Limousine

Listenpreis: 78.600 €



## Hyundai NEXO

Brennstoffzellen-Fahrzeug

Reichweite: 756 Km

Elektromotor: 120 kW/163 PS

Tankinhalt: 6,33 Kg

Kraftstoffverbrauch (H2) kombiniert: 0,84 kg/100km (NEFZ\*)

CO2-Emissionen kombiniert: 0 g/km

Typ: SUV

Preis: 69.000 €

Umweltbonus: 4.000 €

\* Die angegebenen Verbrauchs- und CO2-Emissionswerte wurden nach dem vorgeschriebenen WLTP-Messverfahren ermittelt und in NEFZ-Werte umgerechnet.

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug



## Mercedes-Benz GLC F-Cell

Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Lithium-Ionen-Batterie

H2-Reichweite im Hybrid-Modus (NEFZ\*): 478 km

Batterieelektrische Reichweite im Battery-Modus (NEFZ\*): 51 km

Nennleistung: 155 kW/211 PS

Tankinhalt: 4,4 kg

Energieinhalt (brutto/netto) (kWh): 13,5 /9,3

Lithium-Ionen-Batterie (brutto): 13,8 kWh

Wasserstoffverbrauch kombiniert: 0,34 kg/100 km,

Stromverbrauch kombiniert: 13,7 kWh/100 km\*

CO2-Emissionen kombiniert: 0 g/km

Typ: SUV

Vertrieb: Full-Service-Mietmodell

\*Angaben zu Kraftstoffverbrauch, Stromverbrauch und CO2-Emissionen sind vorläufig und wurden vom Technischen Dienst für das Zertifizierungsverfahren nach Maßgabe des WLTP-Prüfverfahrens ermittelt und in NEFZ-Werte korreliert. Die EG-Typgenehmigung und eine Konformitätsbescheinigung mit amtlichen Werten liegen noch nicht vor. Abweichungen zwischen den Angaben und den amtlichen Werten sind möglich.

## Brennstoffzellenautos auf dem Markt

Prof. Dr. Lutz Mardorf

# VDI Veranstaltung: Brennstoffzelle und Anwendung im Fahrzeug

Literatur und Quellenverzeichnis:

- (1) <https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichstrommaschine> 2019
- (2) <https://123mathe.de/physik-technische-und-physikalische-stromrichtung>
- (3) Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG
- (4) T. Kaz, Herstellung und Charakterisierung von Membran-Elektroden-Einheiten für Niedertemperatur Brennstoffzellen 2008
- (5) H. Löhn, Leistungsvergleich von Nieder- und Hochtemperatur Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen–Experimentelle Untersuchungen, Modellierung und numerische Simulation 2010
- (6) J. Wolf, Verflüssigung und Speicherung von Wasserstoff, Linde AG
- (7) <https://de.wikipedia.org/wiki/Dampfreformierung>
- (8) PLANET - Planungsgruppe Energie und Technik GbR
- (9) L. Mardorf , Technische Thermodynamik Kompendium 2019
- (10) FAZ 2019, Alfred Zellinger
- (11) L. Gubler, G.G.Scherer: A Proton-Conducting Polymer Membrane as Solid Electrolyte –Function and Required Properties, Adv Polym Sci 2008
- (12) N.N.: Deutsche Bahn AG, Berlin

**VDI Arbeitskreis Energietechnik**

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**