

UNTERRICHTSMODUL BRENNSTOFFZELLE

# BRENNSTOFFZELLE

ARBEITSBLATT UND LEHRERINFORMATION

---

## Fachinhalte:

- ▶ **Elektrolyse und Knallgasreaktion**
- ▶ **Galvanische Gasbatterie**
- ▶ **Galvanische Elemente, Batterie, Akku, Brennstoffzelle in der Übersicht**
- ▶ **Historische Versuche von Schönbein und Grove**
- ▶ **Bauformen von Brennstoffzellen**
- ▶ **Fachbegriffe und Kenngrößen wie Elektrolyt, Katalysator**
- ▶ **Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzelle**
- ▶ **Brennstoffzelle als Energiespeicher für erneuerbare Energien, Elektromobilität sowie Strom und Wärmeversorgung im Haushalt**

## ENERGIEN DER ZUKUNFT: BRENNSTOFFZELLEN

Die Idee zur Brennstoffzelle kam erstmals vor 180 Jahren auf und geriet dann in Vergessenheit. Dennoch hat die Brennstoffzelle großes Potenzial als Energie der Zukunft aufgrund des hohen Wirkungsgrads der Energieerzeugung, der Umweltfreundlichkeit, der einfachen Handhabung und der doppelten Energieerzeugung von elektrischem Strom und Wärme. Besonders der Umweltaspekt ist heute wichtig, da bei der „Verbrennung“ als „Verbrennungsprodukt“ nur Wasser entsteht. Sie kann chemische Energie sehr effizient direkt in elektrische Energie umwandeln. Bei der Energieerzeugung verbraucht sich nur der nachfüllbare „Brennstoff“, die Zelle selbst ist extrem robust und langlebig. Je nach Auslegung gibt die Brennstoffzelle neben elektrischer Energie auch größere Mengen Heizwärme ab. Die Brennstoffzelle ist eine geeignete Energiequelle für mobile Anwendungen etwa für Fahrzeuge, Boote und Raumfahrt, aber auch zur Wärme- und Stromerzeugung in Gebäuden.

► Basisaufgabe ► Bonusaufgabe

### 1. VON DER KNALLGASREAKTION ZUR BRENNSTOFFZELLE NACH SCHÖNBEIN UND GROVE

- Lies die Beschreibungstexte mit den Nummern 1 bis 3 (Abbildung 1) aufmerksam durch. Ordne danach die grafischen Versuchsbeschreibungen in Abbildung 2 den Texten zu und trage die passenden Überschriften und Textnummern ein.

#### MATERIAL

#### VON DER KNALLGASREAKTION ZUR BRENNSTOFFZELLE

##### 1. KNALLGASREAKTION

Das durchgeführte Experiment beschreibt die **Elektrolyse** von Wasser. Dabei wird **Wasser (H<sub>2</sub>O)** in **saurer Lösung** in seine Bestandteile **Wasserstoff (H<sub>2</sub>)** und **Sauerstoff (O<sub>2</sub>)** durch **elektrischen Strom** aufgespalten. Hier ist die **Knallgasreaktion** dargestellt. Sie ist die **Umkehrung der Elektrolyse**, bei der sich Wasserstoff und Sauerstoff **explosionsartig** wieder zu Wasser **vereinen**, sobald ein **Zündfunke** die nötige **Aktivierungsenergie** liefert. Bei diesem Vorgang wird viel Wärme frei.

##### 2. „KALTE VERBRENNUNG“

1838 wandelte der Deutsch-Schweizer Chemiker Schönbein als Erster die Knallgasreaktion in eine **kontrollierte „kalte Verbrennung“** um. Die Idee war, die frei werdende chemische in elektrische Energie, also in elektrischen Strom und Spannung, und etwas Wärme umzuwandeln. Zur Beschleunigung der Reaktion bei geringer Temperatur nutzte er einen **Katalysator**. Dieser wirkt, ohne sich bei der Reaktion zu verbrauchen. Die beiden Gase, der **„Brennstoff“ Wasserstoff** und das **„Oxidationsmittel“ Sauerstoff**, sollten räumlich getrennt voneinander reagieren: Einerseits werden über eine **elektrische Leitung Elektronen**, andererseits durch Eintauchen in eine wässrige Säurelösung (**=Elektrolyt**) elektrisch geladene Gasteilchen (**= Ionen**) ausgetauscht.

##### 3. DIE GALVANISCHE GASBATTERIE

1839 griff der britische Jurist und Chemiker **William Grove** die Idee von Schönbein auf und konstruierte die erste funktionstüchtige **Brennstoffzelle** als Umwandlung der Knallgasreaktion in eine kontrollierte Verbrennung. Hierbei werden der **Brennstoff Wasserstoff** und das **Oxidationsmittel Sauerstoff** regelmäßig als Gase von außen zugeführt. Seine sogenannte **„galvanische Gasbatterie“** erzeugte eine Spannung von 0,6 Volt, einen sehr geringen Strom, und nutzte das Prinzip der **galvanischen Zelle**. Hierbei tauchen **Elektroden**, also metallische Leiterplatten, in eine stark saure **Elektrolyt-Flüssigkeit** ein. Die Elektroden sind aus dem Edelmetall **Platin** und dienen als **Katalysatoren**. Der Wasserstoff umspült das obere, trockene Ende der **Minus-Elektrode**, das untere Ende taucht in die Säure. Das ist die **Anode**. An der **Grenzfläche** der drei Stoffe Gas, Elektrode und Säure reagiert der Wasserstoff und gibt **negativ geladene Elektronen** in die elektrische Leitung ab. Der positiv geladene Rumpf des Wasserstoffs, das Ion, geht in die Säure über. Die Elektronen wandern durch die Leitung zur **positiv geladenen Elektrode**, der **Kathode**. Der elektrische Anschluss der Kathode ist in einem **Reagenzglas** von Sauerstoff umgeben. Das untere Ende taucht ebenfalls in die Säure. An der Dreiphasen-Grenzfläche von Katalysator, Säure und Gas geht der Sauerstoff in die Säure über und reagiert mit den positiv geladenen Wasserstoff-Teilchen zu **Wasser**.

Abbildung 1

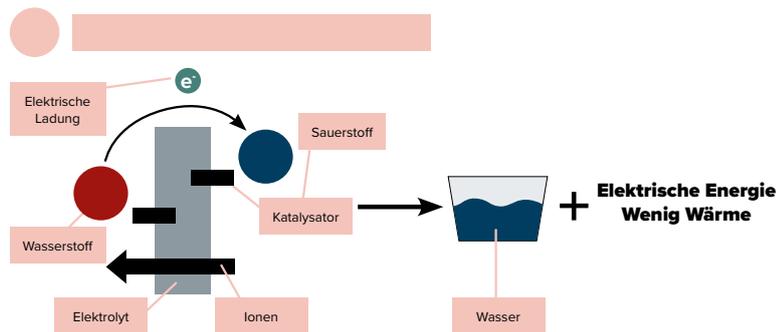
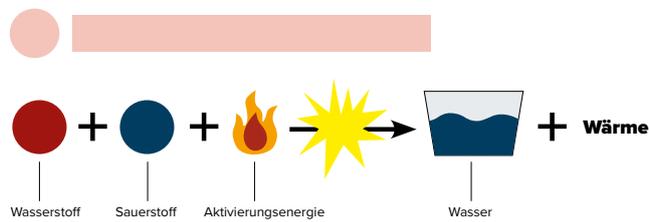
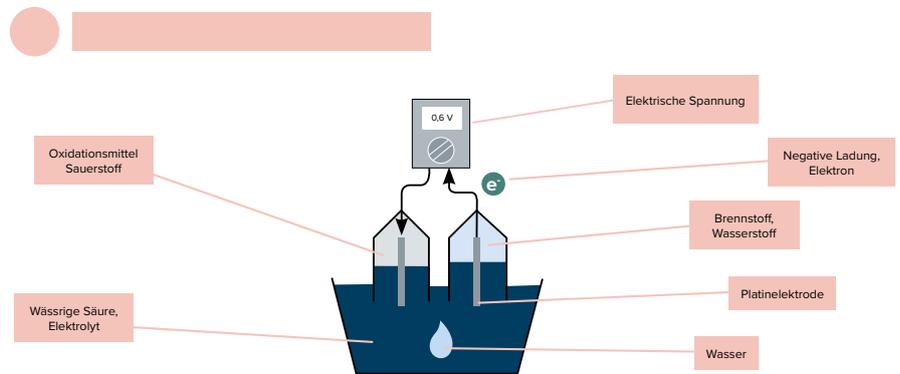


Abbildung 2

► Die Idee nach Schönbein und die Umsetzung der Brennstoffzelle durch Grove greifen auf die Funktion der galvanischen Zelle zurück. Das ist eine Vorrichtung zur spontanen Erzeugung elektrischer Energie aus einer chemischen Reaktion. In Abbildung 3 ist eine Übersicht der galvanischen Zellen gegeben. Die Brennstoffzelle ist eine Unterart der galvanischen Zellen. Analysiere die Tabelle und fülle die fehlenden Felder aus.

**MATERIAL**

**GALVANISCHE ZELLEN**

Galvanische Zellen (Bezeichnung nach Luigi Galvani (1737-1798), er entdeckte die spontane elektrische Energie aus einer physikalisch-chemischen Reaktion)		
Batterie (Primärzelle)	Akku (Sekundärzelle)	Brennstoffzelle (Tertiärzelle)

Was geht hinein und wie?	.....	.....	
Was passiert in der Zelle?	Die fest verbauten Stoffe reagieren in einer chemischen Reaktion miteinander.	Chemische Reaktion läuft in beiden Richtungen ab.	Katalysator und Elektrolyt aktivieren die „kalte Verbrennung“ des Brennstoffs durch Luft-Sauerstoff.
Endzustand, Abbauprodukt	Nicht umkehrbare Zersetzung der Inhaltsstoffe, Umweltgifte.	Umwandlung der chemischen Stoffe wird für viele Zyklen rückgängig gemacht.	....., manchmal Kohlendioxid.
Was kommt heraus?	.....	.....	

Abbildung 3

**2. BRENNSTOFFZELLEN UND IHRE BAUFORMEN**

► In Abbildung 4 ist der typische Aufbau einer Brennstoffzelle dargestellt. Analysiere die Grafik und beschreibe in Stichpunkten die Funktionsweise der Brennstoffzelle.

**MATERIAL AUFBAU EINER BRENNSTOFFZELLE**

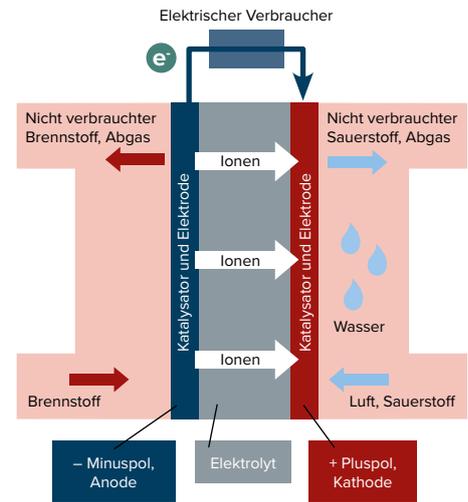
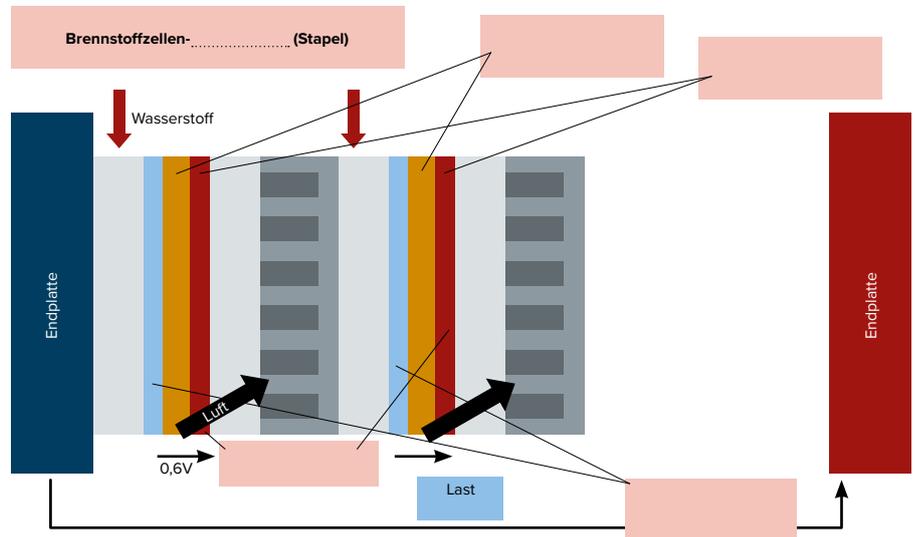


Abbildung 4

► Zur Steigerung der Gesamtspannung an einer Brennstoffzelle schaltet man mehrere Zellen hintereinander in Reihe. Abbildung 5 stellt einen solchen Stapel von zwei Brennstoffzellen dar. Vergleiche den Stapel mit der Einzelzelle und zeichne eine weitere Brennstoffzelle hinzu, so dass der Stapel aus 3 Brennstoffzellen besteht. Beschrifte nun deine Zeichnung mit allen zutreffenden Begriffen.

**MATERIAL BRENNSTOFFZELLENSTAPEL**



Eine Anordnung von mehreren Brennstoffzellen hintereinander in elektrischer Reihenschaltung nennt man Brennstoffzellenstapel oder Stack. Die Einzelspannungen addieren sich.

Abbildung 5

- ▶ Gruppenpuzzle: Bildet zuerst Sechser-Gruppen, dies sind eure Stammgruppen. Dann wird jeder/jedem von euch ein Typ der Brennstoffzellen (Abbildung 6) zugeteilt. Trefft euch in den Expertengruppen und analysiert den euch zugeteilten Typ der Brennstoffzelle. Im Anschluss kehrt ihr in eure Stammgruppe zurück, vermittelt euer Expertenwissen und ordnet euren Brennstoffzellen-Typ an der richtigen Stelle im Diagramm (Abbildung 7) ein.

MATERIAL		BRENNSTOFFZELLENTYPEN				
Bauformen von Brennstoffzellen – Einteilung nach verwendetem Elektrolyt						
Name	Phosphorsäure BZ	Polymer-Membran BZ	Alkalische BZ	Schmelz-Karbonat BZ	Direkt Methanol BZ	Festoxid BZ
Abkürzung	PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	PEFC o. PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	AFC (Alkaline FC)	MCFC (Molten Carbonate FC)	DMFC (Direct Methanol FC)	SOFC (Solid Oxid FC)
Typ, Anwendung	Blockheizkraftwerk	Fahrzeuge, Hausversorgung	Raumfahrt, U-Boot	Blockheizkraftwerk, Kleinkraftwerk	Smartphone-Versorgung, Kleingeräte, Camping-Car	Hausversorgung, Kraftwerke
Elektrolyt	Konzentrierte Phosphorsäure	Feste, saure Ionenleitende Kunststoff-Membran	Kalilauge	Alkalikarbonat-schmelze	Feste, saure Ionenleitende Kunststoff-Membran	Feste Oxidkeramik, z. B. Zirkonoxid
Brennstoff	Wasserstoff	Wasserstoff oder Direktmethanol	Wasserstoff	Wasserstoff, Methangas	Flüssiges Methanol	Wasserstoff, Methan, Erdgas
Katalysator	Platinlegierung oder Gold	Platinlegierung	Platin	Nickel, Stahl	Platinlegierung	Nickel, leitfähige Oxide
Temperatur	200 ° – 250 °C	20 ° – 100 °C	60 ° – 90 °C	650 °C	80 ° – 90 °C	800 ° – 1000 °C
Leistungsdynamik	Sehr mäßig	Hoch	Sehr hoch	Eher gleichmäßige Leistung	Mittel	Träge, nur gleichmäßige Leistung
Typische Leistung	Bis 11 MW	1 W – 300 kW	1 – 100 kW	2,2 MW	1 – 1 kW	1 – 25 kW, einige MW
Einsatzmöglichkeit	Meist stationär	Portabel und mobil	Mobil	Stationär	Mobil	Nur stationär

Abbildung 6

► **BERECHNUNG EINES BRENNSTOFFZELLEN-STAPELS FÜR PKW**

Ein Brennstoffzellen-Stapel hat eine aktive Fläche von 100 cm<sup>2</sup>. Eine Einzelzelle hat eine Spannung von  $U = 0,6$  Volt. Im Arbeitspunkt wird eine Gesamtspannung von  $U = 12$  Volt bei  $I = 40$  Ampere Strom erreicht. Für die elektrische Leistung  $P$  gilt  $P = U \cdot I$ .

- Berechne die Gesamtleistung des Stapels.
- Wie dick ist der Stapel, wenn die typische Dicke einer Zelle  $d = 2,8$  mm ist?
- Welche Außenmaße hat der Gesamtstapel?
- Wie viele solcher Stapel braucht man für ein Fahrzeug mit 100 kWatt Leistung?
- Wie sind die Gesamtmaße?

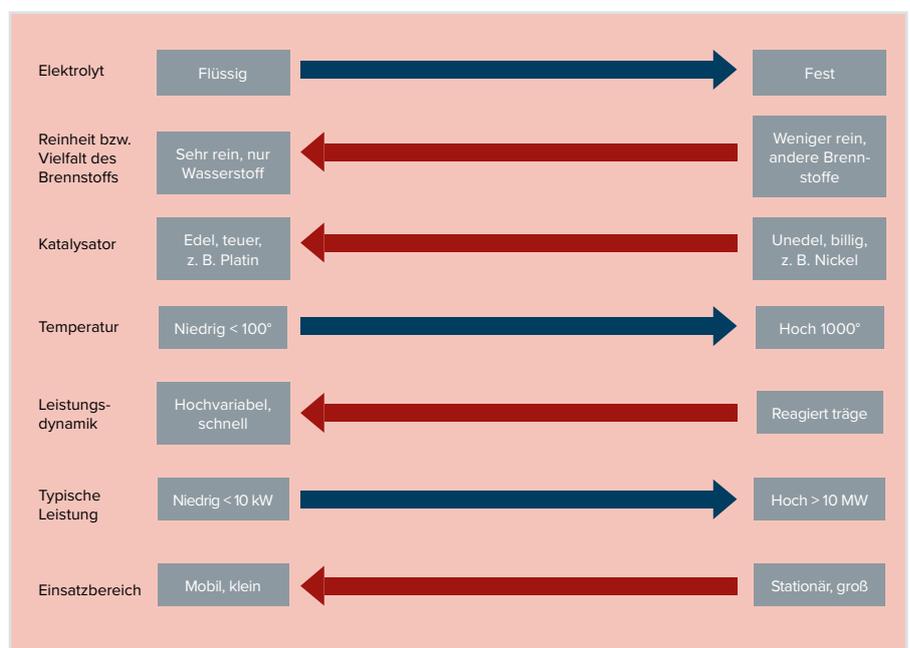


Abbildung 7

### 3. ANWENDUNGEN FÜR BRENNSTOFFZELLEN IN INDUSTRIE, VERKEHR UND HAUSHALTBRENNSTOFFZELLEN

- ▶ Bildet Dreier-Gruppen und teilt jedem Mitglied eurer Gruppe eine Anwendung von Brennstoffzellen aus Abbildung 8 zu. Lest euch die Texte durch und analysiert dabei die Anwendung. Nehmt dazu auch die Tabelle (Abbildung 6) zu Hilfe. Erörtert in der Gruppendiskussion die Fragen in Stichpunkten.
- Welche Vorteile haben die in den Beispielen verwendeten Brennstoffzellen?
- Welche Nachteile gibt es?
- Was macht diese Brennstoffzelle teuer?
- Welche Neuerungen würden die Technik stützen?

#### ELEKTROMOBILITÄT UND BRENNSTOFFZELLE

Aus Umweltsicht ist eine immer größer werdende Zahl von Elektroautos wünschenswert. Immer häufiger wird auch die **Brennstoffzelle vom Membran-Typ (PEFC)** als Stromerzeuger für PKWs, Busse und Lastwagen diskutiert. Sie kann sich dynamisch an unterschiedliche Leistungsanforderungen anpassen. Eine Brennstoffzelle für einen PKW mit 100 kW kann **relativ kompakt** hergestellt werden und ist pro Kilowatt Leistung **leichter als ein vergleichbarer Akku**. Ein **5 kg Flüssigwasserstofftank** mit 700 bar Druck hat eine elektrische Reichweite von etwa 450 km und die Abwärme der Zelle wird für die **Wärmeversorgung im Auto** genutzt. Trotzdem sehen Experten die Brennstoffzelle eher bei Bussen und Lastwagen als im PKW. Der Wasserstoff lässt sich **minutenschnell an geeigneten Zapfsäulen nachtanken**. Transport und Lagerung von reinem Wasserstoff stellen allerdings **hohe Anforderungen an die Sicherheit** wegen der Explosionsgefahr von Wasserstoff mit Luft. Ein ausreichendes **Tankstellennetz** gibt es noch nicht und geeignete Brennstoffzellen benötigen einen **teuren Katalysator**.

#### ENERGIEEFFIZIENTE HAUSVERSORGUNG

Für die zukunftsweisende Versorgung von Gebäuden mit Energie produzieren meist die **Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC)** sowohl **Strom als auch Wärme**. Als Nebenprodukt und „Abgas“ fällt Wasser aus der chemischen Reaktion an. Der produzierte **Gleichstrom aus der Zelle ist kostengünstiger als zugekaufter**, wird in 230 V-Wechselstrom gewandelt und für das Hausnetz nutzbar gemacht. Überschüssiger Strom wird ins Netz **eingespeist und vergütet**. Da dieser Zelltyp konstant Wärme erzeugt, wird nicht genutzte Wärme über einen Wärmetauscher an einen **Heizwasser-Pufferspeicher** abgegeben. Zur Versorgung mit dem **Brennstoff Wasserstoff** nutzt die **SOFC kostengünstiges** und über die Gasinfrastruktur verfügbares **Erdgas (Methan)**. Mit einem Wirkungsgrad von 60 % ist das Gesamtsystem **energieeffizient und kostengünstig**. Die Energiekosten können um bis zu 40 % gesenkt werden.

#### ENERGIESPEICHERUNG AUS WIND- UND SOLARENERGIE

Die Universität Magdeburg entwickelte eine **Reversible PEM-Brennstoffzelle (PEFC)** mit zwei Funktionen. Sie arbeitet in der ersten Funktion als **Elektrolyseur** zur Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff aus zugeführter elektrischer Energie. Damit dient sie als **Energie- und Zwischenspeicher** für Energie aus Sonne und Wind. Bei Umkehrung der Arbeitsweise mit dem gleichen Zellstapel im Brennstoffzellenbetrieb erzeugt die Zelle aus den Gasen **elektrische Energie und Wärme**. Damit kann die Brennstoffzelle zur stationären **Versorgung von Haushalten bis zur großtechnischen Zwischenspeicherung von regenerativer Energie** eingesetzt werden. Durch die Doppelfunktion der Zelle können **Material und Kosten eingespart** werden.