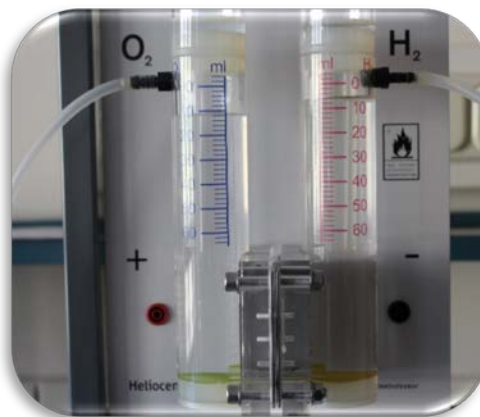
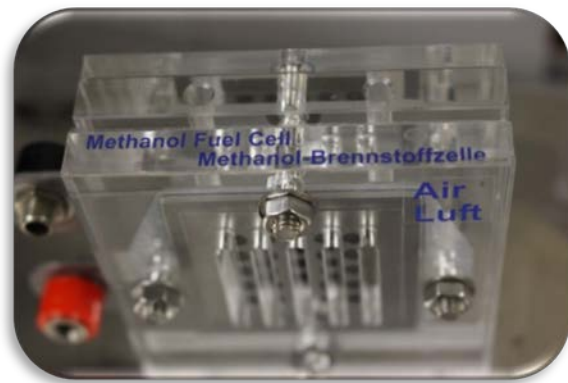
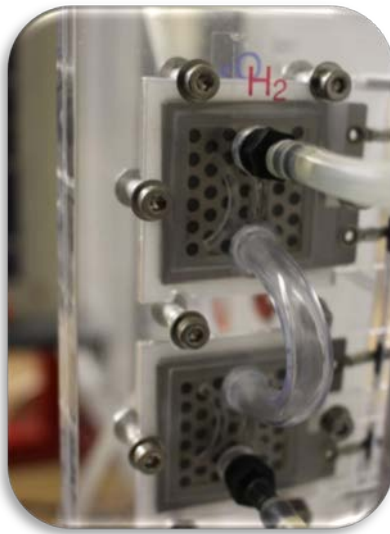


Themengebiet: **Elektrochemische Wandler**

Brennstoffzelle II

Betreiben und Charakterisieren von Brennstoffzellen



Lernziele:

1. Aufbau sowie Funktionsweise von Brennstoffzellen verstehen
2. Verschiedene Wirkungsgrade theoretisch berechnen und experimentell bestimmen
3. Strom-Spannungskennlinien bei verschiedenen Verschaltungen interpretieren

„Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von Morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“

- JULES VERNE 1874, Die geheimnisvolle Insel

Verwendete Abkürzungen und Indizes

FC	Brennstoffzelle (Fuel Cell)
PEM	Protonenaustauschmembran (Proton Exchange Membrane)
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle (Direct Methanol Fuel Cell)
OCV	Offene Klemmspannung (Open Circuit Voltage)
GDL	Gasdiffusionslage (Gas Diffusion Layer)
AFC	Alkalische Brennstoffzelle (Alkaline Fuel Cell)
PAFC	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (Phosphoric Acid Fuel Cell)
MCFC	Carbonatschmelzen-Brennstoffzelle (Molten Carbonate Fuel Cell)
SOFC	Oxidelektrolyt-Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell)
η_F	Faraday-Wirkungsgrad
η_E	Energie-Wirkungsgrad
η_{ges}	Gesamtüberspannung in Volt
η_D	Durchtrittsüberspannung in Volt
ΔH_{H_2}	Verbrennungsenthalpie Wasserstoff in kJ m^{-3}
$\Delta_r H_m$	Reaktionsenthalpie in kJ mol^{-1}
$\Delta_r G_m$	Freie Gibbs Reaktionsenthalpie in kJ mol^{-1}
E	Energie in Joule
R	Allgemeine Gaskonstante $8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
F	Faraday-Konstante 96485 C mol^{-1}
V	Volumen in Milliliter
U	Spannung in Volt
I	Strom in Ampere
R	Elektrischer Widerstand in Ohm
t	Zeit in Sekunden
T	Temperatur in Kelvin

*Bitte lassen Sie sich nicht durch die Nomenklatur von Wirkungsgraden und Überspannungen verwirren. Zufälligerweise ist für beide Größen der griechische Buchstabe „Eta“ in Gebrauch.

1. Einleitung ^[1]

In diesem Praktikumsversuch werden wir uns mit der wahrscheinlich ersten chemischen Reaktion befassen, die Sie als solche kennengelernt haben: Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu dem Produkt Wasser, besser bekannt als „*Knallgasreaktion*“. So wie die Oxidation von Kohlenstoff in unserer Atmungskette als „*kalte Verbrennung*“ stattfindet, so ist es auch möglich die Knallgasreaktion ganz ohne Knall durchzuführen, um kontrolliert Energie aus dem Brennstoff Wasserstoff zu gewinnen. Realisiert wird dies durch einen elektrochemischen Wandler bzw. eine Brennstoffzelle, deren Zweck es ist, chemische Energie direkt in elektrische Energie umzuwandeln.

Die Zerlegung von Wasser in seine Elemente wurde erstmals im Jahre 1800 durch NICHOLSON und CARLISLE wissenschaftlich dokumentiert. Jene taten nichts anderes als unter Spannung stehende Platindrähte in Wasser zu tauchen und die entstehenden Gase separat aufzufangen. Als Strom- und Spannungsquelle verwendeten sie eine VOLTA'sche Säule aus Zink- und Silberstapeln, deren Erfindung erst im selben Jahr in London präsentiert worden war. Warum an einem Draht Wasserstoff und an dem anderen Draht Sauerstoff entstand, war ihnen noch nicht klar – die Begriffe der Anode und Kathode wurden schließlich erst 1833 durch MICHAEL FARADAY geprägt. Allerdings wurde damals schon über die Möglichkeit spekuliert, die Reaktion umzukehren und den elektrischen Strom andersartig zu nutzen.

In dieser Hinsicht war CHRISTIAN SCHÖNBEIN im Jahr 1838 erfolgreich. Als er zwei Platindrähte mit den jeweiligen Gasen umspülte und sie gleichzeitig in konzentrierte Salpetersäure tauchte, konnte er tatsächlich einen kleinen aber messbaren elektrischen Strom beobachten. Dieses Experiment gilt als Geburtsstunde von Wasserstoff-Brennstoffzellen; dennoch ist als Urvater der Brennstoffzelle ein anderer bekannt: Der Patentanwalt und Chemiker Sir WILLIAM GROVE demonstrierte 1839 die Umkehrbarkeit der Reaktion mit einer recht einfachen Apparatur, die in **Abbildung 1 links** dargestellt ist. Vier Jahre später präsentierte er die berühmte VOLTA'sche Gaskette (**Abbildung 1 rechts**), wie sie in zahlreichen Lehrbüchern zu finden ist. Indem er bis zu 50 Einzelzellen in „*Kette*“ schaltete, erzielte GROVE Spannungen von über 30 V und konstruierte damit nachweislich den ersten Brennstoffzellen-„*Stack*“ der Geschichte.

Trotz dieser erstaunlichen Entdeckung wurde sie zunächst nur in akademischen Kreisen geschätzt; allgemein wurde ihr nichts weiter als der Rang einer wissenschaftlichen Kuriosität zuteil und es kam zu keiner dokumentierten Anwendung der VOLTA'schen Gaskette.

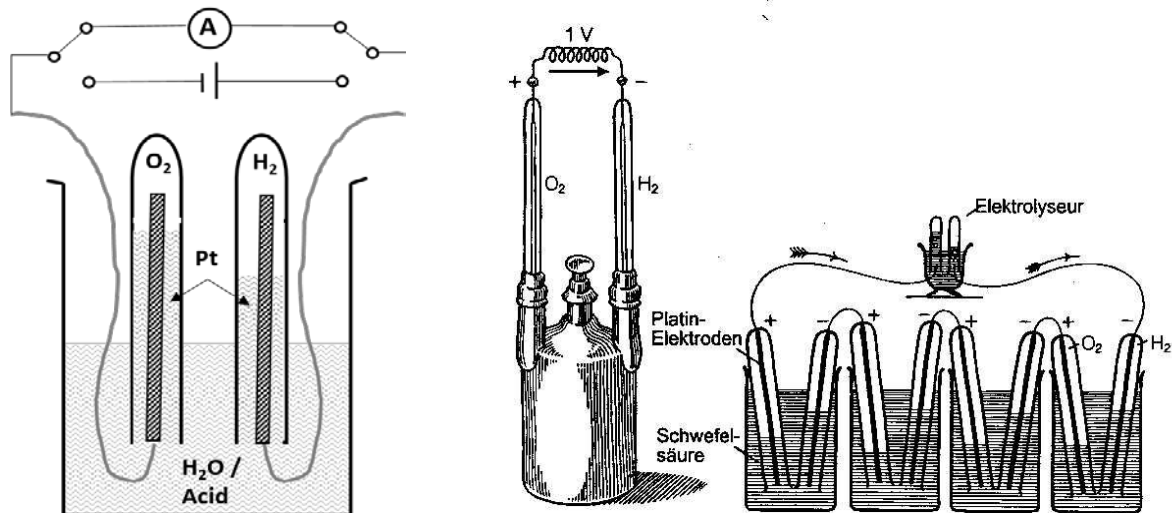


Abbildung 1: Links: Brennstoff- und Elektrolysezelle; Rechts: Volta'sche Gaskette; beide nach William Grove

Es war dann der Begründer der physikalischen Chemie WILHELM OSTWALD, welcher 1894 bewies, dass die Brennstoffzelle nicht durch den CARNOT-Wirkungsgrad limitiert ist und beschrieb ihre theoretische Effizienz gegenüber der von Wärmekraftmaschinen als weit überlegen. Gleichzeitig sagte er diesbezüglich eine energietechnische Revolution voraus, die noch ihrer Zeit bedarf.

Nach GROVES Entdeckungen dauerte es schließlich ein Jahrhundert bis intensiv an Brennstoffzellen-Systemen für technische Anwendungen geforscht wurde. So gelang die Fertigstellung und Charakterisierung eines 30 kW Hochleistungs-Brennstoffzellenstacks im Jahr 1952 durch FRANCIS T. BACON, dessen Ergebnisse und Patente für die Ambitionen der NASA noch eine große Rolle spielen sollten.

Unter dem Stichwort der Energiewende erfährt die Brennstoffzellentechnologie in der heutigen Zeit ihre Wiederbelebung. Speziell in dem Feld der Elektromobilität versprechen die Systeme hohe Effizienz sowie geringe bis keine Emissionen von Treibhausgasen. **Tabelle 1** beinhaltet diesbezüglich die Energiegehalte von Wasserstoff, Methanol und Octan sowie deren ideale Abgaszusammensetzung bei der Verbrennung. So ist Wasserstoff der einzige Brennstoff, auf den das Prädikat „Zero Emission“ zutreffen kann, natürlich abhängig davon wie er erzeugt wurde. Im Rahmen dieses Praktikumsversuchs werden wir uns bevorzugt mit der Effizienz und den Leistungsfähigkeiten sowie Leistungsgrenzen von Brennstoffzellen beschäftigen. Zusätzlich wird im Vergleich dazu die Effizienz der Wasserelektrolyse beleuchtet. Am Praktikumsplatz werden Ihnen dafür eine Elektrolysezelle, zwei PEMFCs und eine DMFC zur Verfügung stehen.

Tabelle 1: Energiegehalte und Produkte verschiedener Brennstoffe

Brennstoff	Energiedichte (gravimetrisch)	Energiedichte (volumetrisch)	Produkte „Abgase“
H ₂ (g)	33,0 kWh kg ⁻¹	3,0 kWh m ⁻³	H ₂ O (l)
CH ₃ OH (l)	6,3 kWh kg ⁻¹	5000 kWh m ⁻³	2H ₂ O (l) + CO ₂ (g)
Octan (l)	13,3 kWh kg ⁻¹	9330 kWh m ⁻³	9H ₂ O (l) + 8CO ₂ (g)

2. Messaufbau

Der Messaufbau besteht aus zwei separaten PEM-Brennstoffzellen sowie einer Elektrolysezelle zur Erzeugung von reinem Wasserstoff und Sauerstoff. Die Elektrolyse kann von einem Solar-Modul (siehe Versuch Brennstoffzelle I) oder von einem Potentio-Galvanostaten angetrieben werden.

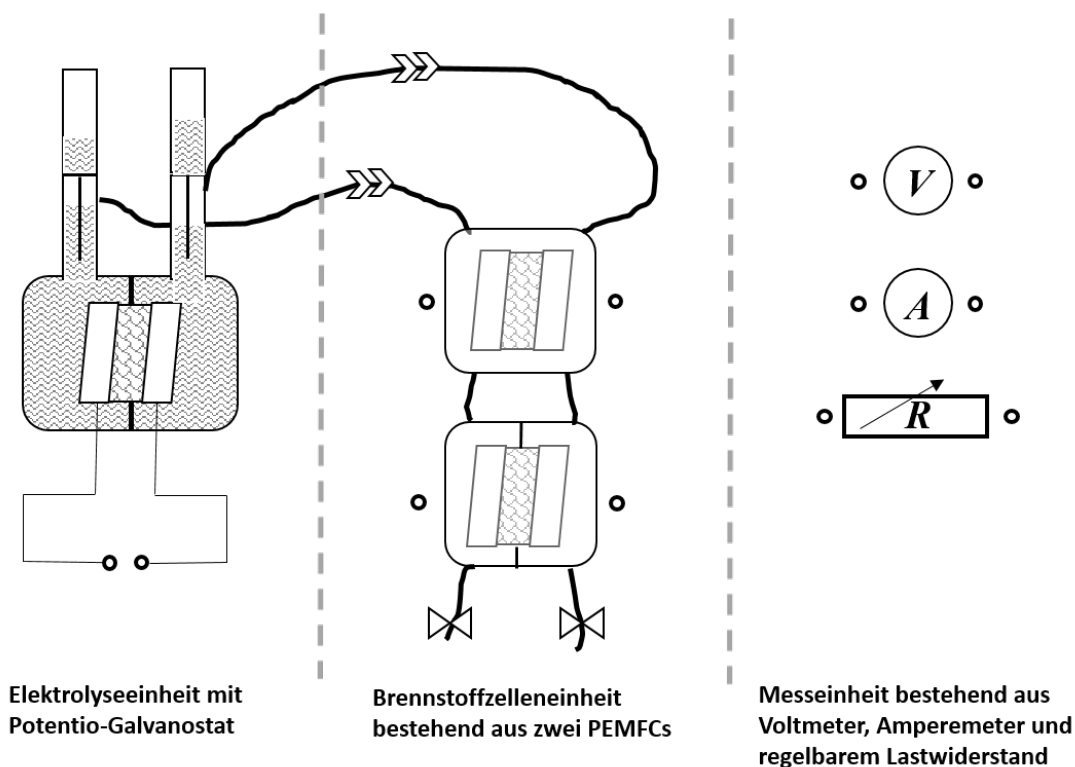


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau „Brennstoffzelle II“

Im Folgenden sind die beiden Verschaltungen abgebildet, mit denen die Brennstoffzellen zu charakterisieren sind.

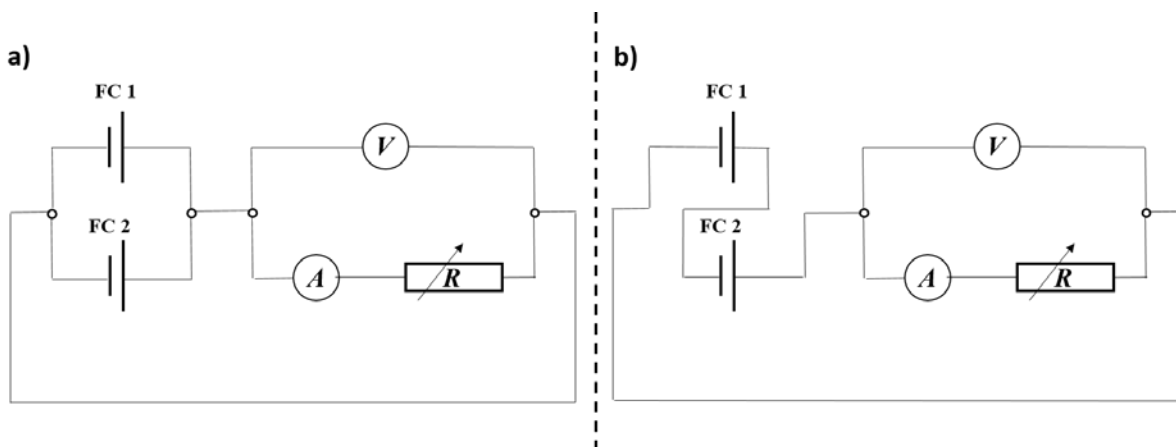


Abbildung 3: a) Schaltplan Parallel b) Schaltplan Reihe

3. Funktionsweise von Brennstoffzellen [1-7]

Im Gegensatz zu Batterien handelt es sich bei einer Brennstoffzelle um einen reinen elektrochemischen Wandler und keinen Speicher. Der Unterschied besteht darin, dass dem System eine elektrochemisch umzusetzende Substanz (H_2 , CH_3OH) von außen zugeführt werden muss; die Erzeugung von energiereichen Brennstoffen innerhalb ist nicht vorgesehen.

Wie bei allen elektrochemischen Zellen liegen der Funktionsweise von Brennstoffzellen zwei Elektroden (Anode und Kathode), zwischen welchen ein Strom fließt, zugrunde. An der Anode findet die Oxidation des Brennstoffes statt, während an der Kathode Sauerstoff reduziert wird. Die entsprechenden Reaktionen sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Tabelle 2: Halbzellenreaktionen sowie Gesamtreaktionen der PEMFC und der DMFC

Anodenreaktion	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$
Kathodenreaktion	$O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$	$1,5O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
Gesamtreaktion	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	$CH_3OH + 1,5O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$

Ein zentraler Bestandteil von vielen Brennstoffzellen ist eine Membran, die den Ionentransport zwischen den beiden Elektroden gewährleistet. Im Falle von PEMFCs und DMFCs handelt es sich zumeist um *Nafion*[®], einer flexiblen Kunststoffolie, die im nassen Zustand selektiv Protonen leiten kann. Die Folie besteht aus einem PTFE-Grundgerüst (*Teflon*[®]) und ist mit Sulfonsäuregruppen funktionalisiert. Die funktionalen Gruppen bewirken zudem, dass der Einsatz von

zusätzlichen Säureelektrolyten nicht notwendig ist, weshalb das Akronym PEM oft auch als „*polymere electrolyte membrane*“ übersetzt wird. Die Funktionsweise ist schematisch in **Abbildung 4** aufgezeigt. Ein alternatives Material mit ähnlicher Funktionsweise trägt den Namen Polybenzimidazol (PBI) und ist für höhere Arbeitstemperaturen bis 200°C ausgelegt.

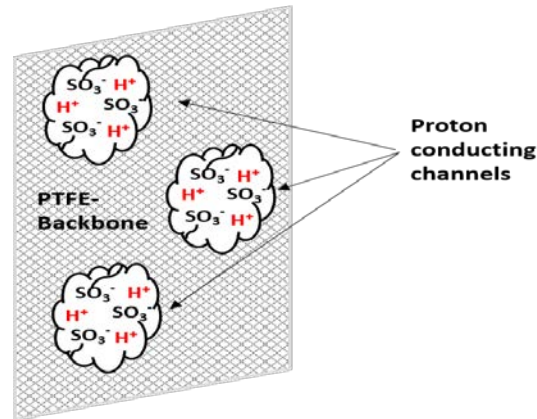


Abbildung 4: Schema der protonenleitenden Nafion[®]-Membran

Die elektrochemische Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff begegnet aufgrund eines 4-Elektronentransfers hohen kinetischen Barrieren, die den Einsatz von katalytisch aktiven Elektrodenmaterialien unabdingbar machen. Die physikalische Größe, die die elektrokatalytische Leistungsfähigkeit eines Materials ausmacht ist die Austauschstromdichte, welche für die Wasserstoffreaktion am Platindraht beispielsweise $5 \cdot 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ und für die Sauerstoffreaktion nur $5 \cdot 10^{-7} \text{ mA/cm}^2$ beträgt. Die Werte sind in der Tat nicht sehr groß, allerdings gibt es kaum alternative Materialien, die über höhere Austauschstromdichten bei guter Lebensdauer und Korrosionsbeständigkeit verfügen. Entsprechend müssen bislang hohe Überspannungen beim Betrieb von Brennstoffzellen in Kauf genommen werden.

Nach 180 Jahren wird in vielen Brennstoffzellen immer noch Platin als Elektrodenmaterial eingesetzt. Hingegen hat sich viel im Hinblick auf die Strukturierung der Elektroden getan. Ein Platindraht ist kostenintensiv und bietet nur geringe Oberfläche für die Reaktion. Heutige Elektroden bestehen daher aus einer sogenannten Gasdiffusionslage (GDL), ein leitfähiges Kohlenstofffasermaterial, durch das sich die Gase leicht hindurchbewegen können. Auf der GDL ist der Platinkatalysator in kaum sichtbarer Mikropartikelform aufgebracht. Zweck des Ganzen ist es, möglichst wenig Platin einzusetzen und gleichzeitig der Reaktion viel Oberfläche zur Verfügung zu stellen. Die Elektrode selbst wird somit quasi 3-dimensional. Dennoch zielen aktuelle Forschungen darauf ab, Platin durch kostengünstigere Materialien zu ersetzen. Diesbezüglich gelten spezielle, auf Nickel basierende Legierungen als vielversprechende Alternativen. Eine Zusammenfassung von Aufbau und Funktionsweise der PEMFCs finden Sie in **Abbildung 5**.

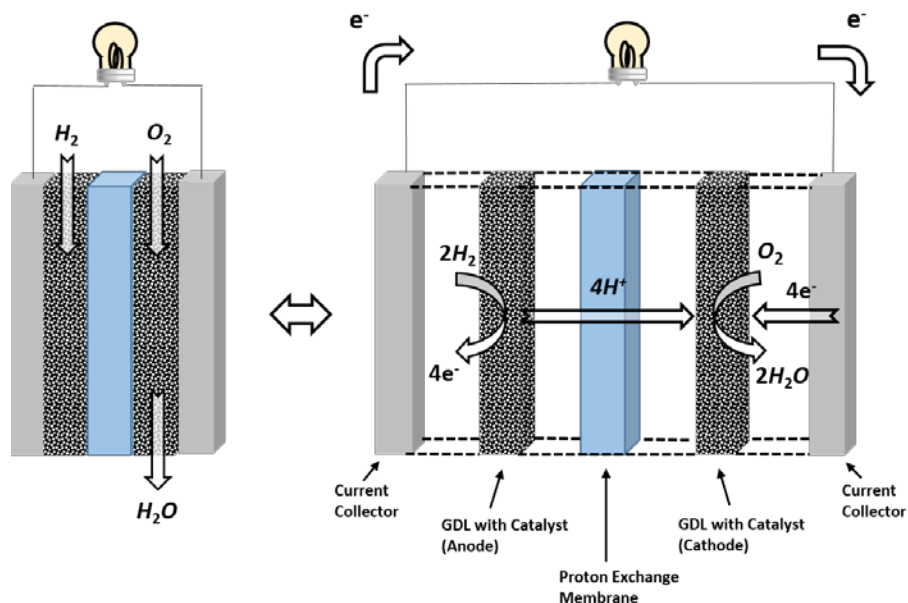


Abbildung 5: Aufbau und Funktionsweise der H₂-PEMFC. Oxidation und Reduktion finden jeweils an einer 3-Phasengrenze statt: gasförmige Edukte, flüssiger Elektrolyt, fester Katalysator

4. Anwendung in der Praxis ^[1-7]

Die ersten Anwendungen von Brennstoffzellen mit Polymermembranen gehen auf die Raumfahrtprogramme der NASA in den 1960er Jahren zurück. Diese wurden für die Energiesicherstellung der frühen Gemini-Missionen sowie für darauffolgenden bemannten Apollo-Missionen eingesetzt. Schon damals schien die Zuverlässigkeit der Technologie ausgereift genug, um ihr das Leben der ersten Astronauten anzuvertrauen. Der erste Prototyp eines Brennstoffzellenfahrzeuges wurde dann Mitte der 1960er von GENERAL MOTORS in Kooperation mit UNION CARBIDE noch vor der ersten Ölpreiskrise konstruiert; derartige Fahrzeug gingen allerdings nicht in Produktion und die Anwendung von Brennstoffzellentechnologie blieb zunächst Raumfahrt und vereinzelt Militär vorbehalten.

Bei der möglichen Etablierung von H₂-Brennstoffzellentechnologie in der aktuellen Elektromobilitätsfrage stößt man auf drei Problematiken: 1. Die Zellen verwenden statt reinem Sauerstoff normale Luft. Dies führt gemäß der NERNST-Gleichung zu Spannungs- und Leistungseinbußen. 2. Die flächendeckende Bereitstellung von Wasserstoff als Brennstoff ist eine logistische Herausforderung. Zudem ist das Gas sehr flüchtig, was Transport und Speicherung erschwert. 3. Die Speicherung des Brennstoffs im Fahrzeug erfordert technische Lösungen, um die niedrige volumetrische Energiedichte von Wasserstoff zu umgehen. Gegenüber von Hydridspeichern und sogenannten „Onboard-Reformern“ hat sich der 700 bar Hochdrucktank trotz anfänglicher Sicherheitsfragen als effizienteste Lösung durchgesetzt. So haben auch die meisten Fahrzeughersteller mit Rang und Namen ab Mitte der 2000er Jahre diesen Lösungsansatz

gewählt als sie ihre ersten serienmäßigen Elektrofahrzeuge mit integrierten Brennstoffzellen präsentierten. Eine Übersicht zu den Fahrzeugmodellen befindet sich in **Tabelle 3**.

Tabelle 3: Erste Modelle sowie Herstellerdaten zu H₂-Brennstoffzellen angetriebenen PKW; oft sind die Brennstoffzellen mit weiteren Batteriesystemen gekoppelt, was Unterschiede in den Reichweiten erklärt. Entnommen aus [1]

Modell	Hersteller	Jahr	Leistung	H₂ Speicherung	Reichweite
<i>FCX Clarity</i>	Honda	2005	100 kW	2 x 5 kg 350 bar	560 km
<i>Equinox</i>	GM	2006	115 kW	4,5 kg 700 bar	300 km
<i>Tiguan HyMotion</i>	Volkswagen	2007	80 kW	3,2 kg 700 bar	-
<i>FCHV Adv</i>	Toyota	2008	90 kW	156 L 700 bar	690 km
<i>Borego</i>	KIA	2008	100 kW	3 x 76 L 700 bar	600 km
<i>F-Cell B-Class</i>	Mercedes	2009	100 kW	700 bar	400 km
<i>X-Trail</i>	Nissan	2009	90 kW	700 bar	-
<i>Tucson ix35</i>	Hyundai	2010	100 kW	5,6 kg 700 bar	650 km

Obwohl der Brennstoff flüssig ist, werden DMFCs für die Elektromobilität eher nicht in Betracht gezogen. Gründe dafür sind geringe Leitungsfähigkeit sowie erhöhte Katalysatorabnutzung bei hohen Methanolkonzentrationen. Diesem Brennstoffzellentyp wird daher mehr die Versorgung tragbarer elektronischer Geräte kleinen Energiebedarfs eingeräumt. Neben der PEMFC und der DMFC, deren Anwendung bei Raumtemperatur möglich ist, existieren noch weitere Kandidaten, auf die der Begriff Brennstoffzelle zutrifft. Jedoch ist für die optimale Nutzbarkeit dieser Systeme eine erhöhte Arbeitstemperatur nötig, was für mobile Anwendungen eher unpraktisch ist. Die Alkalische Brennstoffzelle (AFC) beispielsweise beinhaltet Kalilauge als Elektrolyt und kann zudem auf eine Membran verzichten. Verwendung fand sie ebenfalls in zahlreichen bemannten Raumfahrtmissionen der 60er Jahre. Die Phosphorsäuren-Brennstoffzelle (PAFC) arbeitet bei Temperaturen von über 200°C und wird für stationäre Energieerzeugung eingesetzt. Die Säure gewährleistet hohe Protonenleitfähigkeit, während die Temperatur die Leistungsfähigkeit erhöht. Oft wird ein solches System mit anderen Kraftwerkstandorten kombiniert, um deren abtransportierte Wärme zu nutzen. Gleiche Anwendungsstrategie gilt auch für die Brennstoffzellen mit Carbonatschmelzen als Elektrolyt (MCFC). Trotz ihrer höheren Effizienz und der Verwendung von Nickelkatalysatoren, hat dieses System aufgrund von geringer Lebenszeit keine große Zukunftsperspektive. Als letztes wäre da noch die Oxidelektrolyt Brennstoffzelle (SOFC), die nur bei außerordentlich hohen Temperaturen funk-

tioniert und damit ausschließlich stationär anwendbar ist. Diese Systeme verwenden keramische Oxidionenleiter (zumeist Yttrium-dotiertes Zirkoniumoxid, YSZ), welche nur bei solchen Temperaturen über ausreichende Leitfähigkeit verfügen. Bei angemessenem Temperaturmanagement überzeugt das System dennoch durch hohe Effizienzwerte und hoher Lebensdauer bei vollständigem Verzicht auf Edelmetallkatalysatoren.

In **Tabelle 4** finden Sie eine Zusammenfassung der verschiedenen Brennstoffzellentypen.

Tabelle 4: Verschiedene Brennstoffzellen sowie deren Arbeitstemperatur und Effizienzbereich (Entnommen aus [2- 5])

Brennstoffzelle Typ	Membran	Ladungstransport über	Betriebs-temperatur	Energieeffizienz (praktisch)
AFC	-	OH ⁻	65 - 220°C	50%
PEMFC	Nafion	H ⁺	20 - 100°C	40-50%
DMFC	Nafion	H ⁺	20 - 90°C	40%
PAFC	-	H ⁺	200°C	40-50%
MCFC	-	CO ₃ ²⁻	650°C	>50%
SOFC	Keramik	O ²⁻	800 - 1000°C	>60%

5. Physikalische Grundlagen ^[1-3]

Dieser Versuch dreht sich im Wesentlichen um Wirkungsgrade bzw. Effizienzen der elektrochemischen Reaktionen zwischen Wasserstoff und Sauerstoff. Der thermodynamische Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen trägt den Namen der CARNOT-Effizienz und ist durch **Gleichung 1** gegeben. Dieser hätte seine Gültigkeit, wenn Wasserstoff im Rahmen eines Verbrennungsmotors umgesetzt werden würde.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_K}{T_W} \quad (1)$$

Für den Energie-Wirkungsgrad elektrochemisch durchgeführter Reaktionen gilt hingegen **Gleichung 2**. Bei deren Betrachtung können die Wirkungsgrade Werte von über 100% annehmen, je nachdem welches Vorzeichen die Entropie hat. Was zunächst absurd erscheint lässt sich damit begründen, dass die Gleichung die Wärmebilanz der Umgebung nicht berücksichtigt.

$$\eta_E(\text{theor.}) = \frac{\Delta_r G}{\Delta_r H} \quad (2)$$

Die theoretische Energieeffizienz einer H_2 -Brennstoffzelle bei Standardbedingungen beträgt etwa 80%, was für eine elektrochemische Reaktion eher gering ist. Verursacht wird dies durch eine Entropieabnahme begründet durch die Aggregatzustandsänderung. Vergleicht man dies jedoch mit einer Wärmekraftmaschine, so wären Temperaturunterschiede von fast 1200 K nötig, um einen ähnlichen Wert zu erreichen.

In der Praxis werden für gewöhnlich deutlich niedrigere Effizienzwerte erzielt, da Energie durch verschiedene kinetische Phänomene verloren geht. Ein absoluter Energieeffizienzwert kann berechnet werden, indem man die erhaltene elektrische Energie mit der potentiellen Verbrennungsenthalpie des Brennstoffs ins Verhältnis setzt (**Gleichung 3**).

$$\eta_E(\text{prakt.}) = \frac{E_{el}}{E_{chem}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{V_{H_2} \cdot \Delta H_{H_2}} \quad (3)$$

Ein weiterer Wirkungsgrad, der speziell für Brennstoffzellen hohe Relevanz findet, ist der FARADAY-Wirkungsgrad. Dieser beschreibt, inwiefern der elektrochemische Prozess von dem FARADAY'schen Gesetzen abweicht, denn oft fließt nicht genauso viel Ladung durch ein System als entsprechend beabsichtigter Stoff umgesetzt wird. Bei Annahme des idealen Gasgesetzes ist der FARADAY-Wirkungsgrad gegeben durch **Gleichung 4**.

$$\eta_F = \frac{I \cdot t \cdot 24,4 \text{ L mol}^{-1}}{V_{H_2} \cdot z \cdot F} \quad (4)$$

Die theoretische Spannung einer H_2 -Brennstoffzelle beträgt bei Standardbedingungen 1,23 V. Im Vergleich dazu schneidet die DMFC mit 1,19 V recht ähnlich ab. Im direkten Zusammenhang mit der Abweichung von der theoretischen Energieeffizienz sind die in der Praxis gemessenen Spannungswerte ebenfalls niedriger, besonders dann wenn ein Strom fließt. Dies hat vielerlei Gründe, die größten Teils kinetischer Natur sind und gewöhnlich als Gesamtüberspannung η_{ges} zusammengefasst werden. Aus der Vorlesung wissen Sie, dass sich die Gesamtüberspannung aus mehreren Teilüberspannungen zusammensetzt (**Gleichung 5**).

$$\eta_{ges} = \sum_i \eta_i \quad (5)$$

Die bekannteste davon ist die Durchtrittsüberspannung η_D , die physikalische Kerngröße der BUTLER-VOLMER-Kinetik. Sie beschreibt, inwiefern der Ladungsübertrag von Stoff und Elektrode gehemmt ist. Dennoch ist die alleinige Betrachtung von gehemmtem Ladungsdurchtritt nicht ausreichend, um den Kurvenverlauf der U/I -Kennlinien von Brennstoffzellen vollständig zu verstehen.

6. Aufgabenstellungen und Durchführung

- a) Bestimmen Sie die Wirkungsgrade (Faraday und Energie) des Elektrolyseurs und der PEM Brennstoffzellen in Parallelschaltung.

Schließen Sie den Potentio-Galvanostaten an die Elektrolysezelle an und erzeugen Sie 50 mL Wasserstoff. Wählen Sie dazu einen konstanten Strom von maximal 3 A und eine konstante Spannung von maximal 1,75 V. Notieren Sie die Zeit, die für die Wasserstoffbildung nötig ist. Bestimmen Sie anschließend die Leckrate für das Wasserstoffreservoir. Dazu warten Sie 5-10 min ab und notieren die Abnahme des Wasserstoffs. Die Leckrate ist als Korrektur für Ihre Ergebnisse anzuwenden. Wiederholen Sie nun die Elektrolyse und notieren Sie wiederum die benötigte Zeit. Verschalten Sie danach die beiden Brennstoffzellen parallel und beziehen Sie die Messvorrichtung gemäß **Abbildung 2** ein. Spülen Sie die Zellen sorgfältig mit den Gasen bis sich eine stabile OCV einstellt. Nun stellen Sie den Lastwiderstand von zuvor „*offen*“ auf den niedrigsten Wert. Sobald Strom und Spannung stabil sind, notieren Sie diese und zeichnen den Wasserstoffverbrauch abhängig der Zeit auf. Auch diesen Vorgang wiederholen Sie für ein weiteres Zeitintervall. Generieren Sie gegebenenfalls neues Gasvolumen mit der Elektrolysezelle.

- b) Zeichnen Sie die U/I -Kennlinien der PEMFCs in Parallel- und Reihenschaltung auf und stellen Sie Ihre Ergebnisse gegenüber.

Stellen Sie zunächst sicher, dass für die Messreihe genügend Gas vorrätig ist. Schalten Sie zur Messung der Kennlinie einmal alle verfügbaren Lastwiderstände durch, beginnend mit dem größten. Notieren Sie für jeden Widerstand das Wertepaar aus Strom und Spannung. Spülen Sie gelegentlich die Brennstoffzellen mit den beiden Gasen durch kurzzeitiges öffnen der Schlauchklemmen. Gleiche Messreihe wiederholen Sie für die Reihenschaltung.

- c) Charakterisieren Sie die DMFC abhängig der Methanolkonzentration und zeichnen Sie eine U/I Kennlinie auf.

Wenn nicht vorhanden, setzen Sie wässrige Methanollösungen mit 2, 3 und 4 % vol Methanol an. Befüllen Sie die DMFC mit der niedrigsten Konzentration und messen Sie die OCV; die Einstellung einer stabilen OCV kann einige Minuten dauern. Stellen Sie nun einen beliebigen Widerstand ein und messen Sie Strom und Spannungswert, nachdem diese sich stabilisiert haben. Wiederholen Sie diese Vorgehensweise für die beiden anderen Lösungen in aufsteigender Konzentration. Nehmen Sie zusätzlich eine U/I -Kennlinie für eine beliebige Methanolkonzentration auf (siehe b).

7. Protokoll

Schreiben Sie eine kurze Einleitung einschließlich Theorie (mind. 2 Seiten) zu dem Thema Brennstoffzellen (Funktionsweise, Geschichte, Motivation, Anwendung, Ausblick... Sie sind hier frei, in dem was Sie schreiben; orientieren Sie sich aber bitte dabei nicht zu sehr am Skript. Beschreiben Sie beim Durchführungsteil den Versuchsaufbau sowie die allgemeine Vorgehensweise. Sie müssen bei letzterem nicht wie in Kapitel 6 auf jedes Detail eingehen.

Die erhaltenen Ergebnisse sind übersichtlich darzustellen, zu beschreiben, einander zu vergleichen und zu diskutieren.

a) Die Berechnungen der Wirkungsgrade sollen nachvollziehbar und unter Angabe der relevanten Gleichungen erfolgen.

b) und c) Die Kennlinien sollten grafisch zusammengefasst werden. Erstellen Sie auch Diagramme mit Leistung gegen Strom.

Diskutieren Sie ihre Ergebnisse ausführlich. Eine qualitative Fehlerbetrachtung sowie Vergleiche mit der Literatur sollten in Ihrer Diskussion untergebracht sein.

Schließen Sie das Protokoll mit einem kurzen Resümee ab (2- 3 Sätze).

8. Antestat

Für den Versuch sollten Sie...

- den Versuchsablauf kennen.
- die Funktionsweise von PEMFCs und DMFCs verstanden haben.
- Grundlagen der elektrochemischen Thermodynamik und Kinetik kennen.
- elektrische Bauteile korrekt verschalten können.
- mit dem Gefahrstoff *Methanol* umzugehen wissen. (Gegebenenfalls Sicherheitsdatenblatt heranziehen)

9. Literatur

- [1] Barbir F.; *PEM Fuel Cells Theory and Practice 2nd Edition*; Academic Press, Elsevier Ltd, 2013
- [2] Larminie J. & Dicks A.; *Fuel Cell Systems Explained 2nd Edition*; Wiley, 2003
- [3] O'Hayre R., Cha S. W., Colella W. & Prinz F. B.; *Fuel Cell Fundamentals 2nd Edition*; Wiley, 2009
- [4] Kirubakaran, A., Jain, S. & Nema, R. K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **13**, 2430–2440 (2009).
- [5] Peighambardoust, S. J., Rowshanzamir, S. & Amjadi, M. *Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. International Journal of Hydrogen Energy* **35**, Elsevier Ltd, 2010.
- [6] Crastan, V. Elektrische Energieversorgung 2. (2017). doi:10.1007/978-3-662-48965-9
- [7] Lehmann, J. & Luschtinetz, T. *Wasserstoff und Brennstoffzellen.* (2014). doi:10.1007/978-3-642-34668-2