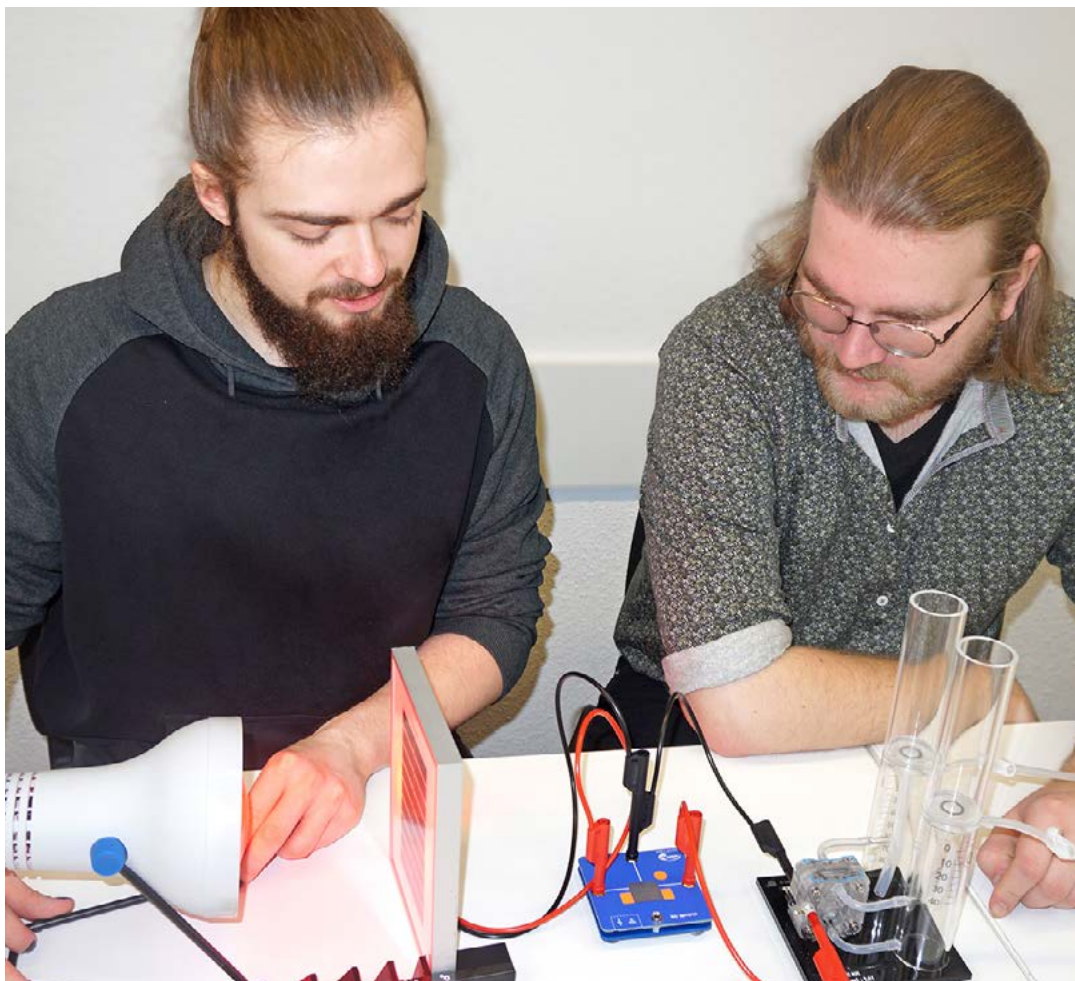


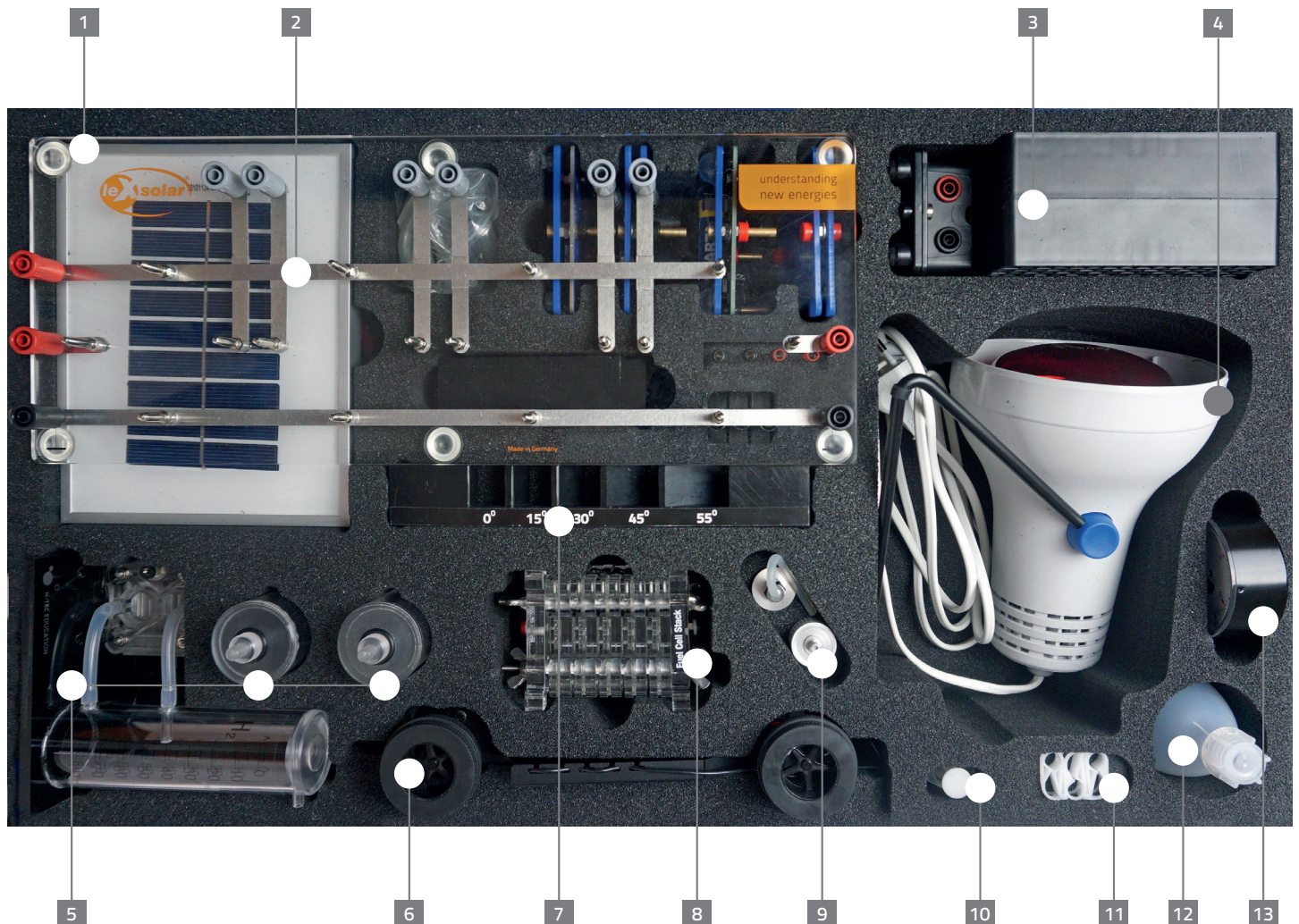
leXsolar-H₂ Professional 2.0



Anleitungsheft

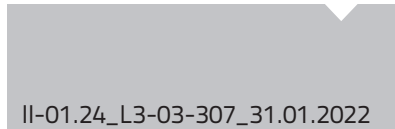


Layout diagram leXsolar-H₂ Professional 2.0
 Item-No.1222
 Bestückungsplan leXsolar-H₂ Professional 2.0
 Art.-Nr.1222

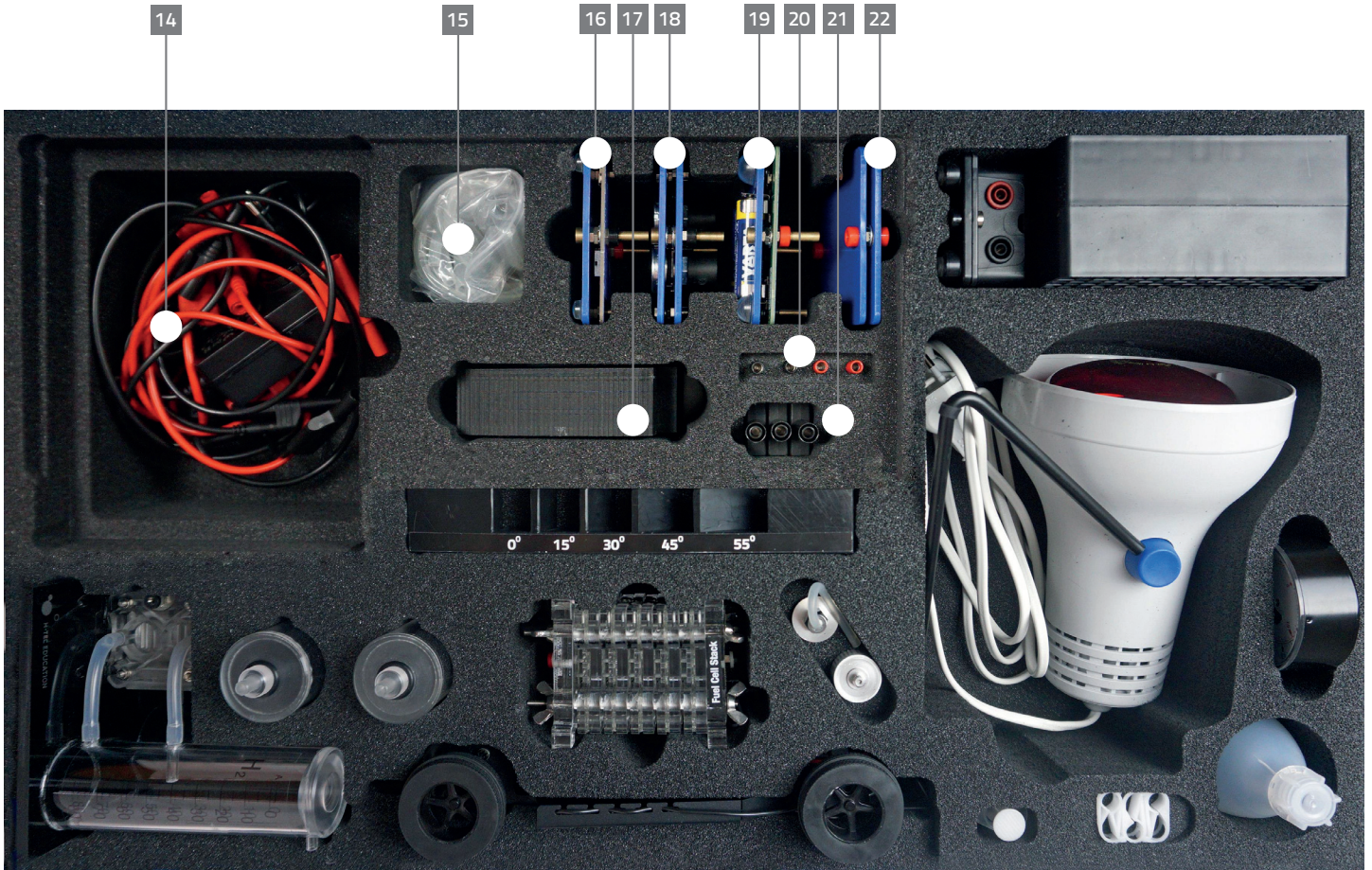


- | | |
|--|---|
| <p>1 1x 1100-04 Solar panel 5.33 V, 370 mA 1x 1100-04 Solarmodul 5.33 V, 370 mA</p> <p>2 1x 1400-13 leXsolar-Base unit Pro 1x 1400-13 leXsolar-Grundeinheit Professional</p> <p>3 1x 1400-19 leXsolar-Wind machine 1x 1400-19 leXsolar-Winderzeuger</p> <p>4 1x L2-04-080 Lamp housing with L2-04-200 Illuminant 100W 1x L2-04-080 Lampengehäuse mit L2-04-200 Leuchtmittel 100W</p> <p>5 1x L2-06-206 Electrolyser 1x L2-06-206 Elektrolyseur</p> <p>6 1x L2-06-207 FCEV car model 1x L2-06-207 FCEV Auto Model</p> | <p>7 1x 1118-17 Base for solar panel 1x 1118-17 Standfuß Solarmodul</p> <p>8 1x L2-06-205 Fuel cell stack 1 W 1x L2-06-205 Brennstoffzellenstack 1 W</p> <p>9 1x 1200-18 H₂ Storage with L2-06-132 Pressure regulator and L2-02-048 Silicone hose i.d. 2mm 1x 1200-18 H₂ Storage mit L2-06-132 Druckregler und L2-02-048 Silikonschlauch Ø-innen 2 mm</p> <p>10 1x L2-06-087 Syringe 2 ml 1x L2-06-087 Spritze 2 ml</p> <p>11 3x L2-06-213 Hose clamp 3x L2-06-213 Schlauchklemme</p> <p>12 1x 1800-17 Distilled water 200 ml 1x 1800-17 Destilliertes Wasser 200 ml</p> <p>13 1x 1222-02 Manometer set 1 bar 1x 1222-02 Manometer Set 1 bar</p> |
|--|---|

Version number
 Versionsnummer



Layout diagram leXsolar-H₂ Professional 2.0
 Item-No.1222
 Bestückungsplan leXsolar-H₂ Professional 2.0
 Art.-Nr.1222



14 3x L2-04-059/060 Test lead 50 cm red/black
 3x L2-04-059/060 Messleitung rot 50 cm rot/schwarz
 2x L2-04-066/067 Test lead 25 cm red/black
 2x L2-04-066/067 Messleitung 25 cm rot/schwarz

15 1x/5x L2-02-088 Silicone hose i.d. 4 mm
 1x/5x L2-02-088 Silikonschlauch \varnothing -innen 4 mm

16 1x 9100-05 Power module
 1x 9100-05 PowerModul

17 1x L2-01-126 Base for FC stack
 1x L2-01-126 Fuss für den BSZ Stack

18 1x 1100-62 Potentiometer module 110 Ohm Pro
 1x 1100-62 Potentiometermodul 110 Ohm Pro

19 1x 9100-03 AV-module
 1x 9100-03 AV-Modul

20 2x L2-06-210 Adapter 2 mm/4 mm red
 2x L2-06-210 Adapter 2 mm/4 mm rot
 2x L2-06-211 Adapter 2 mm/4 mm black
 2x L2-06-211 Adapter 2 mm/4 mm schwarz

21 3x L2-05-068 Safety short-circuit plug
 3x L2-05-068 Sicherheits-Kurzschlussstecker

22 1x 1118-02 Motor module Pro with L2-02-017 Propeller
 1x 1118-02 Motormodul Pro mit L2-02-017 Propeller

leXsolar-H2 Professional 2.0

Item No.: 1222

Anleitungsheft

| | |
|--|-----------|
| I Theoretische Grundlagen | 5 |
| 1. Einleitung | 5 |
| 2. Geschichtliche Hintergründe..... | 6 |
| 3. Herstellung von Wasserstoff..... | 7 |
| 4. Grundlagen der Elektrochemie | 10 |
| 5. Elektrolyse | 14 |
| 6. H2 Transport und Lagerung..... | 19 |
| 7. Verwendung von Wasserstoff..... | 21 |
| 8. Die Brennstoffzellentechnologie | 23 |
| II. Allgemeine Informationen zum Experimentiersystem | 31 |
| Bestandteile und Handhabung | 31 |
| Optionale Komponente H2- Charger (1200-17) | 41 |
| Handhabung und Zusammenbau des Elektrolyseurs | 44 |
| Sicherheitshinweise | 46 |
| III. Experimentiersektion | 48 |
| 1.1 U-I Kennlinie des Solarmoduls | 49 |
| 1.2 U-I Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke | 51 |
| 1.3 U-I Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur..... | 54 |
| 2.1 Wasserstoffproduktion mit dem Elektrolyseur | 57 |
| 2.2 U-I Kennlinie des Elektrolyseurs..... | 58 |
| 2.3 Faraday und Energiewirkungsgrad des Elektrolyseurs | 61 |
| 2.4 Betreiben des Elektrolyseurs mit der Solarzelle | 63 |
| 3.1 Einrichten, Anschließen und Überprüfen des Brennstoffzellen Stacks | 65 |
| 3.2 Betrieb eines Verbrauchers mit dem Brennstoffzellen Stack | 67 |
| 3.3 U-I Kennlinie des Brennstoffzellen Stacks..... | 68 |
| 3.4 Untersuchung an der Einzelzelle | 70 |
| 3.5 Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellen Stacks | 72 |
| 3.6 Untersuchen Sie den Kamineffekt | 75 |
| 3.7 Betrieb des Automodells mit dem Brennstoffzellen Stack..... | 77 |

I Theoretische Grundlagen

1. Einleitung

Die Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels und die zukünftige Verknappung an fossilen Rohstoffen bestimmen die Gesellschaft, Industrie und Politik immer mehr. Um die katastrophalen Folgen der Erderwärmung zu begrenzen und den Planeten Erde auch für zukünftige Generationen als bewohnbaren und lebenswerten Ort zu hinterlassen, wird von führenden Industrienationen das Ziel der klimaneutralen Energieproduktion (Net Zero Emissions, NZE) bis 2050 gestellt. [1]

Die Technologien zur Herstellung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff stellen ein wichtiges Instrument dar, die auf fossilen Rohstoffen basierenden Industriezweige neu und nachhaltig zu gestalten. Wasserstoff ist das am häufigsten vorkommende Element des Universums. Auf der Erde kommt er meist in Form von Verbindungen wie Wasser oder kurz- und langkettigen Kohlenwasserstoffen vor. Er muss also zur wirtschaftlichen Nutzung erst aufgearbeitet werden. Dabei wird Wasserstoff nach der Art der Herstellungsverfahren in folgende Kategorien eingeteilt: [2]

- Grüner Wasserstoff: Hergestellt durch Elektrolyse von Wasser, der Strom für die Elektrolyse kommt komplett aus erneuerbaren Energien
- Gelber Wasserstoff: Hergestellt durch Elektrolyse von Wasser, der Strom für die Elektrolyse stammt aus Kernenergie
- Blauer Wasserstoff: Hergestellt durch Dampfreformierung von Methan mit anschließender Kohlenstoffabsorption und Lagerung, wenig Kohlenstoffemissionen bei der Herstellung
- Türkiser Wasserstoff: Hergestellt durch Pyrolyse mit Rußentstehung als Nebenprodukt, wenig Kohlenstoffemissionen bei der Herstellung
- Grauer Wasserstoff: Hergestellt durch Dampfreformierung von Methan ohne Kohlenstoffabsorption, Hohe Treibhausgasemissionen

*(Erneuerbarer (engl. renewable) Wasserstoff: Synonym für grünen Wasserstoff
Clean Hydrogen: Synonym für grünen Wasserstoff)*

Physikalische und technische Eigenschaften von Wasserstoff. [3]

| | |
|------------------------------------|---|
| Name, Symbol, Ordnungszahl | Wasserstoff, H, 1 |
| Aggregatzustand, Elementkategorie | Gasförmig, Nichtmetall, farbloses Gas |
| Dichte, Siedepunkt, Schmelzpunkt | 0,09 kg/m ³ (273K), 21,2 K, 14 K |
| Isotope | Deuterium, Tritium |
| Oxidationszustände | -1, 0, +1 |
| Elektronegativität (Pauling Skala) | 2,2 |
| Brennwert | 141,8 MJ/kg, 12,7 MJ/m ³ |
| Heizwert | ≈85 % → 3 kWh/m ³ = 11 MJ/m ³ |
| Elektronenkonfiguration | 1s ¹ |

Tabelle 1: Eigenschaften Wasserstoff

2. Geschichtliche Hintergründe

Mitte des 18. Jahrhunderts wurde das Gas Wasserstoff durch den britischen Naturwissenschaftler Henry Cavendish erstmal beschrieben. Er übergoss verschiedene Metalle mit Säuren und nannte das dabei entstehende Gas aufgrund seiner Brennbarkeit "brennbare Luft". Folgende Tabelle soll einen Überblick der verschiedenen Meilensteine auf dem Weg zu unserem heutigen Verständnis vom Element Wasserstoff und der Wasserstoffwirtschaft, geben. [4,5]

Tabelle 2: Historie Wasserstoff

| | |
|--------------|---|
| 1766 | Henry Cavendish, Herstellung von Wasserstoff über die Reaktion von Zinn, Zink, Eisen mit Schwefelsäure. Er bezeichnet seine Entdeckung als „brennbare Luft“. |
| 1774 | Carl Wilhelm Scheele und Joseph Priestley finden ein Gas, welches Bestandteil der Luft ist und nennen es „Feuerluft“. |
| 1787 | Antoine Lavoisier bezeichnet die Entdeckung der „Feuerluft“ als <i>oxygen</i> und die Entdeckung der „brennbaren Luft“ als <i>hydrogen</i> . |
| Ab 1800 | Anwendung von Wasserstoff als Leuchtgas/Stadtgas bis 1950/60 danach verdrängt durch das billigere Erdgas. |
| 1808 | In London brennen die ersten Straßenlaternen mit Leuchtgas/Stadtgas (50 % H ₂ , 30 % CH ₄ , 10 % CO u.a.). |
| 1842 | William Robert Grove führt mit seiner „Gas-Chain“ das Prinzip der Brennstoffzelle ein. |
| 1918 | Haber-Bosch-Verfahren, großtechnische Ammoniaksynthese. Herstellung von Düngemitteln und Sprengstoffen ohne Salpeter aus Chile. |
| 1930er | Steam Methan Reforming wird etabliert. |
| 1937 | Pabst von Ohain: Test eines Strahltriebwerkes mit Wasserstoff als Brennstoff. |
| 1960er | Wasserstoff als Treibstoff für Raketen in der Raumfahrt. |
| 20 Jh. | Erdgas, Erdöl, Kernenergie gelten als billig und immer verfügbar bis zur Ölkrise 1973 – ab dann rückt Wasserstoff wieder in den Vordergrund. |
| 1970er- 80er | Die Ölkrise und die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl brachte abermals wieder Bewegung in die Wasserstoffwirtschaft. Das Bewusstsein für Umwelt und Nachhaltigkeit der Rohstoffketten steigt. |
| Ab 2002 | Preise für Erdöl/Erdgas steigen immer weiter. |
| 2020 | Die Bundesregierung führt die Nationale Wasserstoffstrategie ein. |

3. Herstellung von Wasserstoff

Wasserstoff wird heute sehr oft als eine saubere Energiequelle verstanden. Allerdings können die Anwendungsmöglichkeiten eines Energieträgers nur so umweltverträglich bzw. nachhaltig sein, wie es die unterschiedlichen Herstellungsverfahren zulassen. [6]

Heutzutage werden ca. 90 Mt Wasserstoff produziert (Stand 2019), davon 60% aus Erdgas. Nur 2% der weltweiten Wasserstoffproduktion basiert auf Elektrolyseverfahren. [7]

Auch wenn das Prinzip der Elektrolyse ein sehr einfaches ist (Spaltung von Wasser durch elektrische Energie), so ist es aufgrund des hohen Energieaufwandes ein teureres Verfahren im Vergleich zu den etablierten petrochemischen Produktionsanlagen. Großtechnisch wird Wasserstoff also zurzeit hauptsächlich aus fossilen Rohstoffen durch das Verfahren der Dampfreformierung (Steamreforming) und der partiellen Oxidation gewonnen. [6]

Außerdem ist Wasserstoff ein Nebenprodukt in anderen technischen/chemischen Verfahren wie z.B. der Isomerisierung/Aromatisierung oder der Chlor-Alkali-Elektrolyse.

Dampfreformierung/ Steamreforming

Dampfreformierung bezeichnet allgemein die Umsetzung von Kohlenwasserstoff mit Wasser, wobei als Produkte Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff entstehen. Im Speziellen ist die Dampfreformierung von Methan (steam methane reforming, SMR) das gängigste Verfahren der Wasserstoffproduktion. Das Methan stammt dabei hauptsächlich aus Erdgas. Durch das (noch) billige Erdgas und die gut optimierte Reaktorstruktur ist das SMR die derzeit günstigste Methode zur Herstellung von Wasserstoff: [8]

Reaktionsgleichung: $CH_4(g) + H_2O \leftrightarrow CO(g) + 3H_2(g)$

Diese Reaktion ist stark endotherm. Die Umsetzung des Erdgases findet deshalb in gasbeheizten Röhrenöfen statt, in die ein Katalysatorbett aus Nickel eingebracht ist. Die Reaktoren bestehen aus Edelstahl, um den Temperaturen (bis 1000°C) und hohen Drücken (20-40 bar) bei dem Prozess standzuhalten.

Alternativ zu Methan können auch Kohlenwasserstoffe mit einer Kettenlänge von C₅-C₈ eingesetzt werden. Allerdings ist zu beachten, dass durch die Verwendung von langkettigen Kohlenwasserstoffen auch automatisch mehr Verunreinigungen seitens der Edukte mit in den Prozess eingebracht werden. Diese Verunreinigungen, konkret Schwefel, können zur Vergiftung des Nickelkatalysators führen. Um dem entgegenzuwirken, müssen die Prozessparameter angeglichen werden und es wird ein Platinkatalysator eingesetzt, um den Prozess auch weiterhin wirtschaftlich führen zu können.

Die Dampfreformierung kann weiterhin mit der im Folgenden beschriebenen partiellen Oxidation kombiniert werden, um eine autotherme Prozessführung zu ermöglichen. [9,10]

Partielle Oxidation

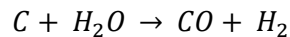
Als partielle Oxidation wird die teilweise Verbrennung von Kohlenwasserstoffen bezeichnet. Dabei wird nochmal unterschieden zwischen:

- Partielle Oxidation ohne Katalysator (noncatalytic partial Oxidation, POX)
- Partielle Oxidation mit Katalysator (catalytic partial Oxidation, CPO)

Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass durch die Verbrennung keine komplexen beheizten Reaktoren nötig sind. Nachteilig ist das niedrigere H₂-CO Verhältnis als beim Dampfreformieren, d.h. es sind wesentlich größere Reaktoren nötig, um dieselbe Menge an Wasserstoff zu produzieren. Die Partielle Oxidation ohne Katalysator findet bei sehr hohen Temperaturen statt, um sicher zu stellen, dass alle Edukte umgesetzt werden können. Außerdem sind im Anschluss an die Oxidation weitere Reinigungsschritte des Reaktors und der Produkte nötig, um den sich bildenden Ruß zu binden und zu entfernen. Die Vergasung, besonders von Schwerölfractionen, hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, da die Nachfrage nach Schweröl rückläufig ist und diese Produkte der Erdölförderung trotzdem verarbeitet werden müssen. Die partielle Oxidation mit Katalysator findet bis ca. 800- 900°C statt. Als Katalysator dient meist Rhodium. Die Auswahl geeigneter Katalysatoren ist bei diesem Prozess besonders wichtig, da es weder zu einer Vergiftung des Katalysators durch Schwefel noch zu einer Oxidation mit Sauerstoff kommen darf. [9,10]

Kohlevergasung

Ein spezieller Fall der partiellen Oxidation ist die Kohlevergasung. Dieses Verfahren wurde bereits vor 200 Jahren angewendet, um das sogenannte „Stadtgas“ zu produzieren, welches in allen Großstädten Europas die Haupt Licht- und Wärmequelle für die Bevölkerung war, bis es in den 1950er Jahren durch das billigere Erdgas verdrängt wurde. Die Kohle wird während des Prozesses auf ca. 900°C erhitzt und gasförmig. Zusammen mit Wasserdampf erfolgt im Beisein von Luftsauerstoff die Partielle Oxidation: [6]



Weitere wichtige Begriffe im Zusammenhang mit der technischen Produktion von Wasserstoff aus fossilen Energien sind:

Synthesegas:

- Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid, welches aus Erdgas, Erdöl und Kohle erzeugt wird
- Die Folgechemie von Synthesegas ist sehr umfangreich, es wird z.B. eingesetzt in der Ammoniaksynthese, Fischer-Tropsch Prozess, Methanisierung, Methanolsynthese

Gasreinigung

- Nach der CO Konvertierung kann noch der Schritt der Gasreinigung erfolgen, um die Reinheit der Produkte sicher zu stellen
- Man erhält am Ende Wasserstoff mit einer Reinheit von 96 %, das noch mit gebildete Methan stört bei den meisten weiteren Verwendungsmöglichkeiten nicht

Water- Gas Shift Reaktion

- Andere Bezeichnung für „Kohlenmonoxid Konvertierung“
- Entfernen von Kohlenstoffmonoxid durch die Reaktion mit Wasser

Chlor- Alkali Elektrolyse

Chlor ist einer der wichtigsten Grundstoffe in der chemischen Industrie. Ein wesentlicher Grund dafür ist die Reaktivität des Chlors. Es wird direkt verwendet zu Wasserchlorung, zur Zellstoffbleiche oder bei der Polymerisation zu Polyvinylchlorid (PVC). Daneben spielt Chlor eine Rolle bei der Herstellung von Epichlorhydrin (Pestizide, Epoxidharze), Lösungsmitteln, Chlormethan (Silikonkleber, Farben, Kosmetika), PTFE, Isocyanaten (Polstermaterial, Isolierungen). Die Gesamtproduktion von Chlor betrug im Jahre 2021 ca. 90 Mt. [11, 12]

Chlor wird hauptsächlich aus Natriumchlorid (NaCl) hergestellt, aber auch aus anderen Salzen oder durch Salzsäureelektrolyse. Die Hauptverfahren der Chlor- Alkali Elektrolyse sind:

- Das Diaphragmaverfahren
- Das Membranverfahren
- Das Amalgamverfahren

| Verfahren | Vorteile | Nachteile |
|----------------------|--|---|
| Diaphragma | Geringe Anforderungen an Solequalität. Geringer spezifischer Energieverbrauch. | Gebrauch von Asbestdiaphragmen. Hoher Wärmebedarf für NaOH Aufkonzentration. Geringe NaOH Reinheit. Empfindlich gegenüber Druckschwankungen in der Zelle. |
| Amalgam ¹ | 50%ige NaOH direkt aus der Zelle. Hohe Reinheit von Cl ₂ und H ₂ . Einfache Solreinigung. | Gebrauch von Quecksilber. Hohe Reinheitsanforderungen an die Sole. Hohe Kosten für Zellbetrieb. Großer Aufwand für die Umwelttechnik Großer Raumbedarf. |
| Membran | Geringer spezifischer Energieverbrauch. Geringe Kapitalinvestitionen. Kostengünstiger Zellbetrieb. Hochreine NaOH Lösung. Unempfindlich gegenüber Lastwechsel und Zellabschaltung. Weiteres Potenzial für Verbesserungen. | Höchste Reinheitsanforderungen für die Sole. Hohe O ₂ Konzentrationen im Cl ₂ . Hohe Membrankosten. |

Tabelle 3: Herstellungsverfahren Chlor [11]

¹ In Europa ab 2017 verboten

4. Grundlagen der Elektrochemie

Die Elektrochemie ist ein Teilgebiet der physikalischen Chemie und wird bereits seit dem 18. Jahrhundert untersucht. Historische Beispiele für elektrochemische Experimente sind die Experimente von Alessandro Volta (Voltaische Säule, 1799) und Michael Faraday (Elektrolyse) welche den Grundstein für ein neues Verhältnis für den Ablauf chemischer Reaktionen legten. Heute sind elektrochemische Verfahren grundsätzliche integrierte Bestandteile der technischen Chemie und der Verfahrenstechnik, ohne welche, die Verarbeitung und die Produktion aller weltwirtschaftlich relevanten Güter nicht möglich wäre. Beispiele hierfür wären die Produktion und Wirkungsweise von Batterien aller Art oder die Produktion von Aluminium aus Bauxit (Schmelzflusselektrolyse). Um die Rolle der Elektrolyse bei der Zersetzung von Wasser zu verstehen, ist es nötig die Grundlagen der Elektrochemie zu kennen und zu verstehen.

Jede elektrochemische Reaktion ist mit der Übertragung von Elektronen auf einen Reaktionspartner verbunden. Diese Übertragung erfolgt nicht direkt, wie bei einer normalen chemischen Reaktion, sondern über einen Elektronenleiter. Das ist der wesentliche Unterschied zwischen einer chemischen und einer elektrochemischen Reaktion.

Eine chemische Reaktion lässt sich immer anhand der Einzelreaktionen der Reaktionspartner analysieren. Läuft diese Reaktion unter Elektronenabgabe, bezeichnet man diesen Reaktionsschritt als Oxidation. Die Elektronenaufnahme wird als Reduktion bezeichnet. Die Gesamtreaktion ist also eine Kombination aus Elektronenabgabe und Elektronenaufnahme (Oxidation und Reduktion), wird als Redoxreaktion bezeichnet.

Beispiel: Historisches Thermitschweißen (Verschweißen von Bahnschienen)

Gesamtreaktion: $Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow 2Fe + Al_2O_3$

Teilreaktion Reduktion: $2Fe^{3+} + 6e^- \rightarrow 2Fe$

Teilreaktion Oxidation: $2Al \rightarrow 2Al^{3+} + 6e^-$

Das historische Thermitschweißen ist eine chemische Reaktion, die Reduktion und die Oxidation laufen nicht räumlich getrennt ab.

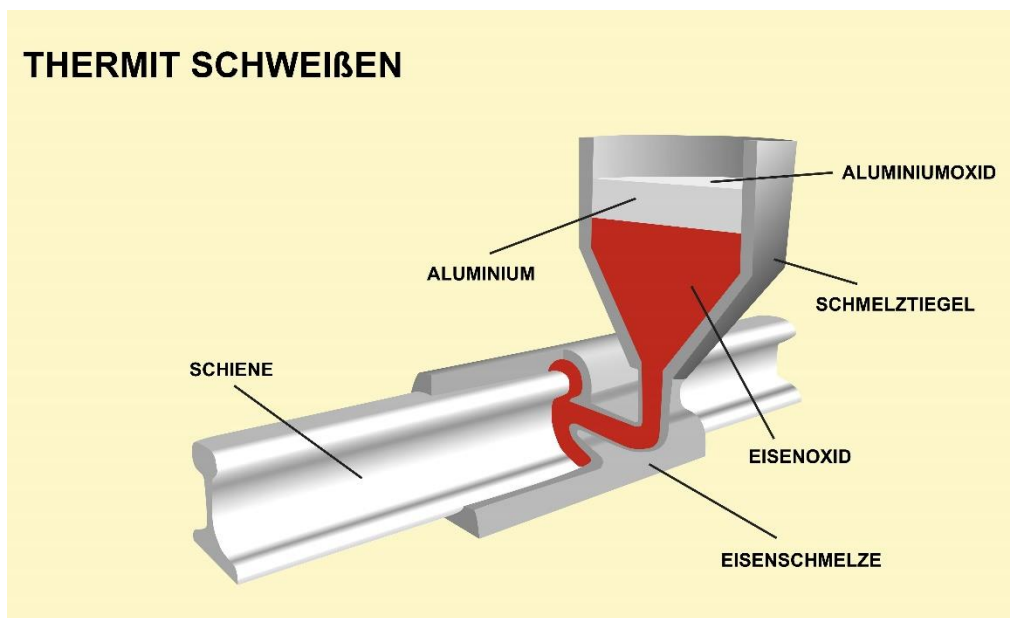


Abbildung 1: Historisches Thermitschweißen

Alle Verbindungen, die an einer chemischen/elektrochemischen Reaktion beteiligt sind, haben eine unterschiedliche Affinität zur Elektronenaufnahme bzw. -abgabe, die im Atomaufbau begründet liegt. Ein Reaktionspartner ist also immer bestrebt, Elektronen aufzunehmen, und der jeweils andere, sie abzugeben. Die Folge ist ein Elektronenfluss vom elektronenabgebenden Reaktionspartner (Reduktionsmittel) zum elektronenaufnehmenden Reaktionspartner (Oxidationsmittel).

Die Differenz zwischen den unterschiedlichen Affinitäten bezeichnet man als Potential. Da es sich um Oxidations- bzw. Reduktionsschritte handelt, als Redoxpotential. Laufen Reduktion und Oxidation räumlich getrennt voneinander ab, spricht man von einer elektrochemischen Reaktion. Beide Reaktionsräume sind dabei durch ein elektronenleitendes Material verbunden, welches einen Elektronenfluss ermöglicht und damit das Verrichten elektrischer Arbeit.

Ein Beispiel für eine solche elektrochemische Reaktion ist das Daniell Element, welches von John F. Daniell im Jahr 1836 vorgestellt wurde:

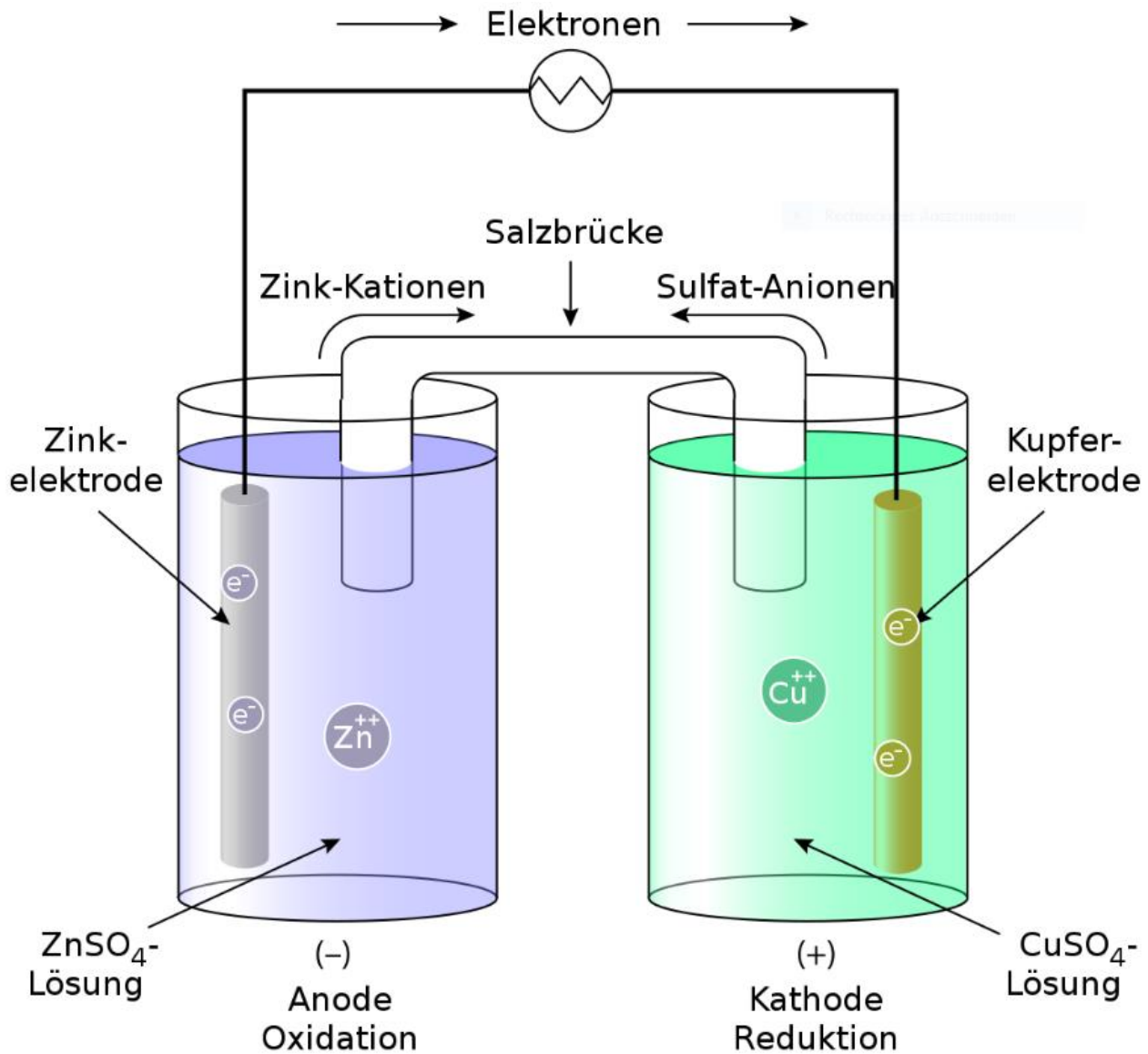
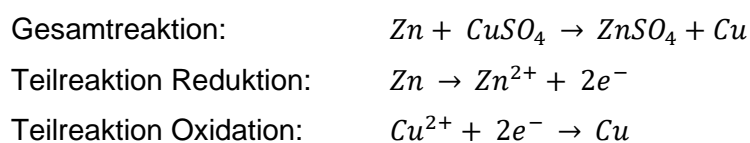


Abbildung 2: Daniell Element



Eine Zinkelektrode wird in eine Zinksulfat Lösung getaucht, eine Kupferelektrode in eine Kupfersulfatlösung. Beide Lösungen sind räumlich voneinander getrennt, sodass sich die Lösungen nicht miteinander vermischen können. Sie sind durch eine Salzbrücke (z.B. KCl) verbunden, über welche Ionen aus der jeweiligen Lösung in die andere gelangen können und die beiden Elektroden sind außerdem leitend verbunden. Die Elektronen fließen jetzt von der Zinkelektrode zur Kupferelektrode. Dieser Elektronenfluss ist messbar und kann genutzt werden. Die Zinkelektrode löst sich mit der Zeit auf, da immer mehr Zink Ionen ihre Elektronen abgeben und daraufhin in die Lösung übergehen. An der Kupferelektrode nehmen die Kupferionen in der Kupfersulfatlösung die Elektronen auf und werden zu elementarem Kupfer reduziert, welches sich an der Elektrode ablagert. Dieser Vorgang findet unter Normalbedingungen freiwillig, d.h. ohne Einfluss einer Kraft von außen statt.

Damit es zu einer elektrochemischen Reaktion kommen kann, muss es also immer einen elektronenabgebenden und einen elektronenaufnehmenden Reaktionspartner geben. Die Reaktion selbst kann entweder freiwillig stattfinden, unter Abgabe elektrischer Energie, wie im genannten Beispiel, oder nicht freiwillig, durch das Zuführen von elektrischer Energie (Bsp. Kapitel Chlor Alkali Elektrolyse).

Unabhängig davon, ob eine elektrochemische Reaktion freiwillig stattfindet, oder durch Energie von außen, wird die Elektrode, an der die Reduktion stattfindet als Kathode bezeichnet und die Elektrode, an der die Oxidation stattfindet, als Anode.

Ob eine elektrochemische Reaktion (unter Normalbedingungen) freiwillig stattfindet oder nicht, kann mit Hilfe des Standartpotentials E_0 vorausgesagt werden.

Das Standartpotential ist eine experimentell bestimmte Zellspannung (Potentialdifferenz) zwischen einer Normal-Wasserstoffelektrode (dieser wird der Wert ± 0 V zugeordnet) und der jeweiligen Bezugselektrode unter Normbedingungen. Eine Auswahl einiger Standartpotentiale befindet sich in Tabelle 3.

| Element im RedoxPaar | Reaktionsgleichung | Standartpotential E° |
|----------------------|--|-----------------------------|
| Fluor (F) | $F_2 + 2 e^- \rightarrow 2 F^-$ | +2,890 V |
| Sauerstoff (O) | $O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O$ | +1,299 V |
| Platin (Pt) | $Pt^{2+} + 2 e^- \rightarrow Pt$ | +1,180 V |
| Eisen (Fe) | $Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$ | +0,771V |
| Kupfer (Cu) | $Cu^+ + e^- \rightarrow Cu$ | +0,518 V |
| Kupfer (Cu) | $Cu^{2+} + 2 e^- \rightarrow Cu$ | +0,339 V |
| Wasserstoff (H) | $2H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2$ | ± 0 V |
| Nickel (Ni) | $Ni^{2+} + 2 e^- \rightarrow Ni$ | -0,236 V |
| Zink (Zn) | $Zn^{2+} + 2 e^- \rightarrow Zn$ | -0,762 V |
| Wasser | $2 H_2O + 2 e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ | -0,828 V |
| Titan (Ti) | $Ti^{3+} + 3 e^- \rightarrow Ti$ | -0,90 V |
| Magnesium (Mg) | $Mg^{2+} + 2 e^- \rightarrow Mg$ | -2,362 V |
| Natrium (Na) | $Na^+ + e^- \rightarrow Na$ | -2,714 V |

Tabelle 4: Elektrochemische Spannungsreihe (Auswahl)

Die Ordnung der Redoxreaktionen nach der Größe ihrer Standardpotentiale wird auch als elektrochemische Spannungsreihe bezeichnet. Mit der Nernst'schen Gleichung ist es möglich das Redoxpotential unter anderen Reaktionsbedingungen zu errechnen:

$$E = E_0 + \frac{R * T}{z * F} * \ln \frac{c_{Ox}}{c_{Red}}$$

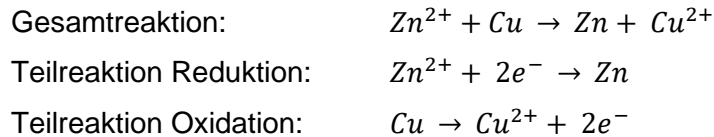
| | |
|---------------------|--|
| E | Redoxpotential |
| E ₀ | Standardpotential |
| R | allgemeine Gaskonstante |
| T | Temperatur in K |
| F | Faraday Konstante |
| Z | Zahl der ausgetauschten Elektronen |
| c _{Ox/Red} | Konzentration Oxidations-/Reduktionsmittel |

Die Redoxreaktion mit dem negativeren Standardpotential ist bei chemischen Reaktionen immer der elektronenliefernde Vorgang. Mit Hilfe des Standardpotentials hat man also eine Methode etabliert, gezielt elektrochemische Reaktionen zu nutzen, um elektrische Energie zu erzeugen. Das Standartelektrodenpotential bildet also das Grundgerüst zum Aufbau von:

- Primärelementen: nicht umkehrbaren Redoxreaktionen → Batterien (z.B. Alkali-Mangan Batterie)
- Sekundärelementen: umkehrbare Redoxreaktionen, d.h. durch Zuführung elektrischer Energie kann der Ausgangszustand wieder hergestellt werden → Akkumulator
- Brennstoffzellen: durch kontinuierliche Zuführung der Reduktion- und Oxidationsmittel (H₂, O₂) kann (elektr.) Energie erzeugt werden.

5. Elektrolyse

Ein chemischer Prozess, bei welchem eine Redoxreaktion durch einen elektrischen Strom erzwungen wird, nennt man Elektrolyse. Ein Beispiel für eine Elektrolyse, ist das Anlegen einer Spannung an das Daniell-Element. Dadurch kann man den Oxidations- und Reduktionsprozess vertauschen. (vgl. Abbildung 2)



Der negative Pol der Spannungsquelle muss negativer sein als das Potential der Zink Elektrode, das die Elektronen zum Zink fließen können. Die angelegte Gesamtspannung muss also mindestens so groß sein, wie das Potential des Daniell-Elements. In der Praxis ist die angelegte Spannung größer als die Mindestspannung. Man benötigt eine Überspannung um kinetische Hemmungen, Elektrodenwiderstände oder Nebenreaktionen auszugleichen. Auch für die Elektrolyse gilt, dass an der Kathode die Reduktion und an der Anode die Oxidation stattfindet. Nur ist zu beachten, dass im Unterschied zur freiwillig ablaufenden Reaktion, die Pole vertauscht sind.

Wasserelektrolyse

Der Chemiker William Nicholson und der Arzt Anthony Carlisle führten im Jahr 1800 mit Hilfe einer Voltaschen Säule eine Spaltung von Wasser durch und erhielten im Ergebnis zwei Gase im Verhältnis 2:1. Dieses erste Experiment vor über 200 Jahren legte den Grundstein für die Herstellung von Wasserstoff aus Wasser. Die technische Spaltung von Wasser wurde in der Folge immer weiterentwickelt. Mit der Gramme Maschine konnte auf die aufwendige Batteriekonstruktion verzichtet werden. Im Jahr 1888 schlug Dmitri A. Lachinow die Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser durch Elektrolyse vor und reichte einige Patente ein. Damals mit dem Ziel, Sauerstoff in der Stahlindustrie einzusetzen. Der enorme Bedarf an elektrischer Energie machte es jedoch schwierig den mit der Zeit steigenden Bedarf an Wasserstoff zu decken. Große Elektrolyseanlagen wurde 1929 neben einem Wasserkraftwerk in Rjukan (Norwegen) fertiggestellt oder 1960 neben dem Assuan Staudamm. Mit der großtechnischen Umsetzung des Haber-Bosch Verfahrens wurde Wasserstoff endgültig als Grundstoff der chemischen Industrie etabliert. Damals, wie heute, stieß man jedoch immer wieder auf dasselbe Problem, dass enorme Mengen an Energie für die Elektrolyse von Wasser notwendig sind. [9, 13]

Vor 100 Jahren wurde das Problem dadurch „gelöst“, dass immer mehr Verfahren entwickelt wurden, um Wasserstoff aus fossilen Quellen zu gewinnen (vgl. Kapitel 3). Das war so erfolgreich, wie falsch, wie wir heute feststellen müssen. In Zeiten des Klimawandels richtet sich der Fokus wieder auf die Elektrolyse von Wasser. Die Weiterentwicklung der Energieerzeugung aus Sonne und Wind geben uns die Möglichkeit den Bedarf der Weltwirtschaft an Wasserstoff zu decken.

Die modernen Verfahren zur Wasserelektrolyse lassen sich nach der Art des verwendeten Elektrolyten einteilen:

1. Alkalische Elektrolyse
2. Hochtemperaturelektrolyse
3. Membranverfahren

Weitere Verfahren zur Wasserstoffherstellung, die sich zurzeit noch im frühen Stadium der Entwicklung befinden sind: [16]

- Biomassevergasung und -pyrolyse
- Produktion durch Microorganismen
- Photolytischer Aufschluss von Wasser
- Produktion durch photosynthetische Bakterien
- Wasserstoffproduktion durch Algen
- Produktion in Verbindung mit Atomkraft
- Thermochemische Produktion

Alkalische Elektrolyse

Alkalische Elektrolyse ist die am weitesten verbreitete und am besten entwickelte Form der technischen Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff. Als Elektrolyt wird meist eine 20 %-ige bis 40 %-ige Kaliumhydroxidlösung (KOH) verwendet, in welchen Elektroden aus einer Nickellegierung eingetaucht werden. Die Prozesstemperatur beträgt 60 – 90 °C unter Normaldruck. Die Elektroden werden mit Elektrolytlösung umspült. Das entstehende Gas muss konstant abgeführt werden. Der Abstand der Elektroden sollte möglichst gering sein, um den Zellwiderstand zu verringern, allerdings wird es so auch schwerer, die entstehenden Gase abzuführen. [14] Ein Beispiel für den Aufbau eines alkalischen Elektrolyseurs bietet Abbildung 3.

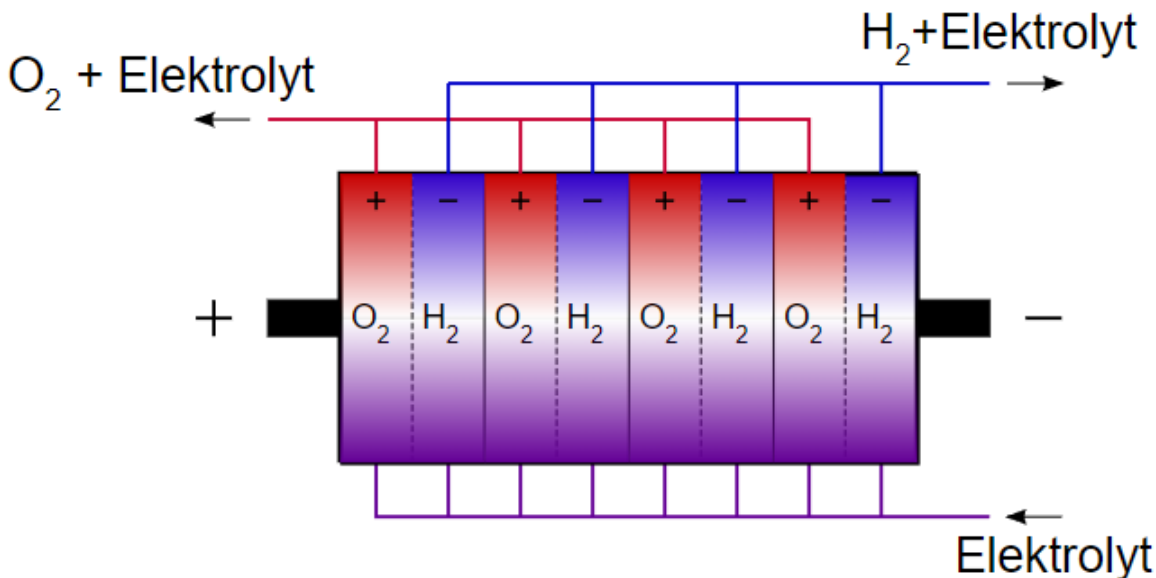
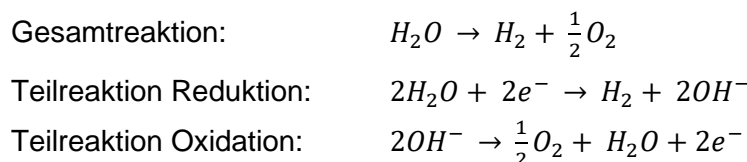


Abbildung 3: Alkalische Elektrolyse



Fest Oxid Elektrolyse

Das Prinzip der Festoxidelektrolysezelle ist relativ neu und wurde in den 1980er Jahren entwickelt. Es ist zu beachten, dass der Begriff der Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (High Temperature Steam Electrolysis, HTSE) den gesamten Prozess der Wasserstoffherzeugung beschreibt und die Festoxid-Elektrolysezelle (Solid Oxid Electrolysis Cell, SOEC) nur ein Teil davon ist. Festoxid-Elektrolysezellen arbeiten im Allgemeinen bei 450°C – 1000°C. Generell besteht eine solche Zelle aus drei Hauptkomponenten: einer Brennstoffelektrode, an der der Brennstoff (also Wasser) zugeführt wird; einem festen Elektrolyten; und einer Sauerstoff Elektrode. Man unterscheidet zwischen zwei Hauptbauformen für solche Elektrolysezellen, nach der Art des Elektrolyten. Es gibt protonenleitende Elektrolyte (P-SOEC) und sauerstoffionenleitende Elektrolyte (O-SOEC). [14]

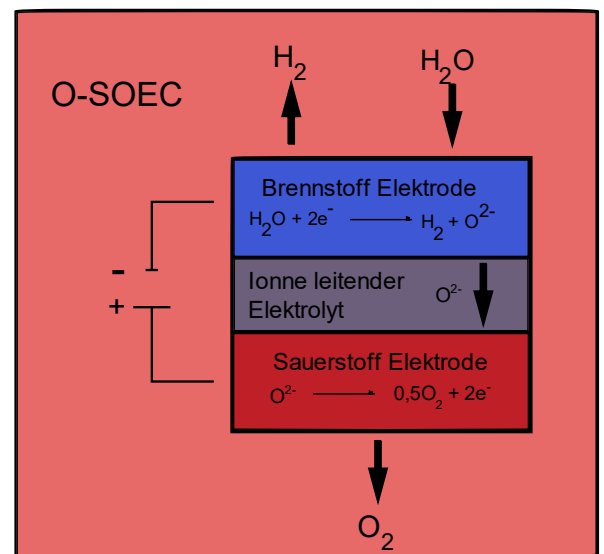
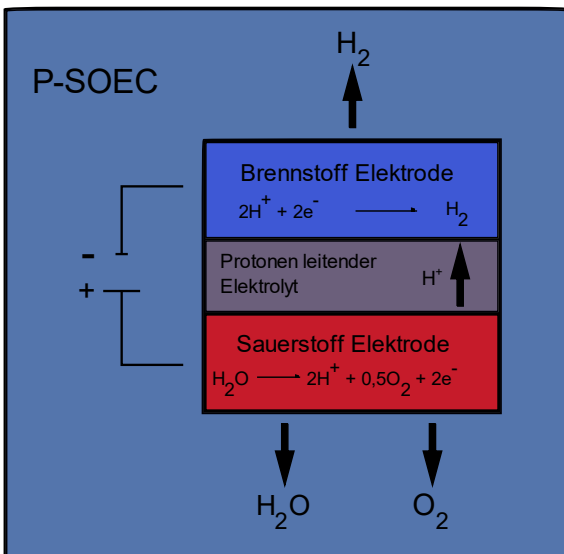


Abbildung 4: SOFC Brennstoffzelle

Membranverfahren

Die Elektrolyse mittels Polymerelektrolytmembran ist wohl das derzeit vielseitigste Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff. Historisch geht die Nutzung von Polymeren in diesem Zusammenhang auf die US-Raumfahrt Programm und die Entwicklungen der Firma DuPont in den 1960er Jahren zurück. DuPont entwickelte eine Membran auf Basis von Polytetrafluorethan (PTFE). Das auch heute noch unter dem Markennamen Nafion® bekannte Polymer ist selektiv leitend für Protonen oder andere Kationen. Anionen dagegen können die Membran nicht passieren.

Neben PTFE wurden Polymermembranen häufig auch auf Basis von Polyetheretherketon (PEEK) hergestellt. Diese haben den Vorteil, dass sie ohne das umweltschädliche Fluor hergestellt werden können. Sie haben jedoch nicht die chemische Beständigkeit von PTFE.

Alle Polymermembranen haben in der Regel eine Dicke von 50- 250 µm und dienen aufgrund ihrer protonenleitenden Eigenschaft als fester Elektrolyt bei der Elektrolyse von Wasser. Dabei kann eine Effizienz von bis zu 80% bei 1 A cm⁻² erreicht werden. Zur Elektrolyse wird destilliertes Wasser (oder Süßwasser) eingesetzt. Der Einsatz von Salzwasser führt zur Korrosion wichtiger Anlagenelemente.

Anders als bei der alkalischen Elektrolyse ist es möglich den PEM Elektrolyseur auch umgekehrt als Brennstoffzelle zu betreiben. [14]

| Vorteile | Nachteile |
|--|---|
| Keine korrosiven Elektrolyte | Teure Herstellung der Membran |
| Prozess bei hohen Strömen möglich | Saure Polymere immer schlecht für Langlebigkeit |
| Prozess bei hohem Druck möglich | Dimensionierung und Zellaufbau komplex = teuer |
| Sehr hohe Reinheit der Produkte | |
| Kann auch gut mit inkonsistenten Energiequellen betrieben werden | |
| Vielseitig und kompakt auch in kleinen Anlagen einsetzbar | |

Tabelle 5: Vor- und Nachteile Membranverfahren

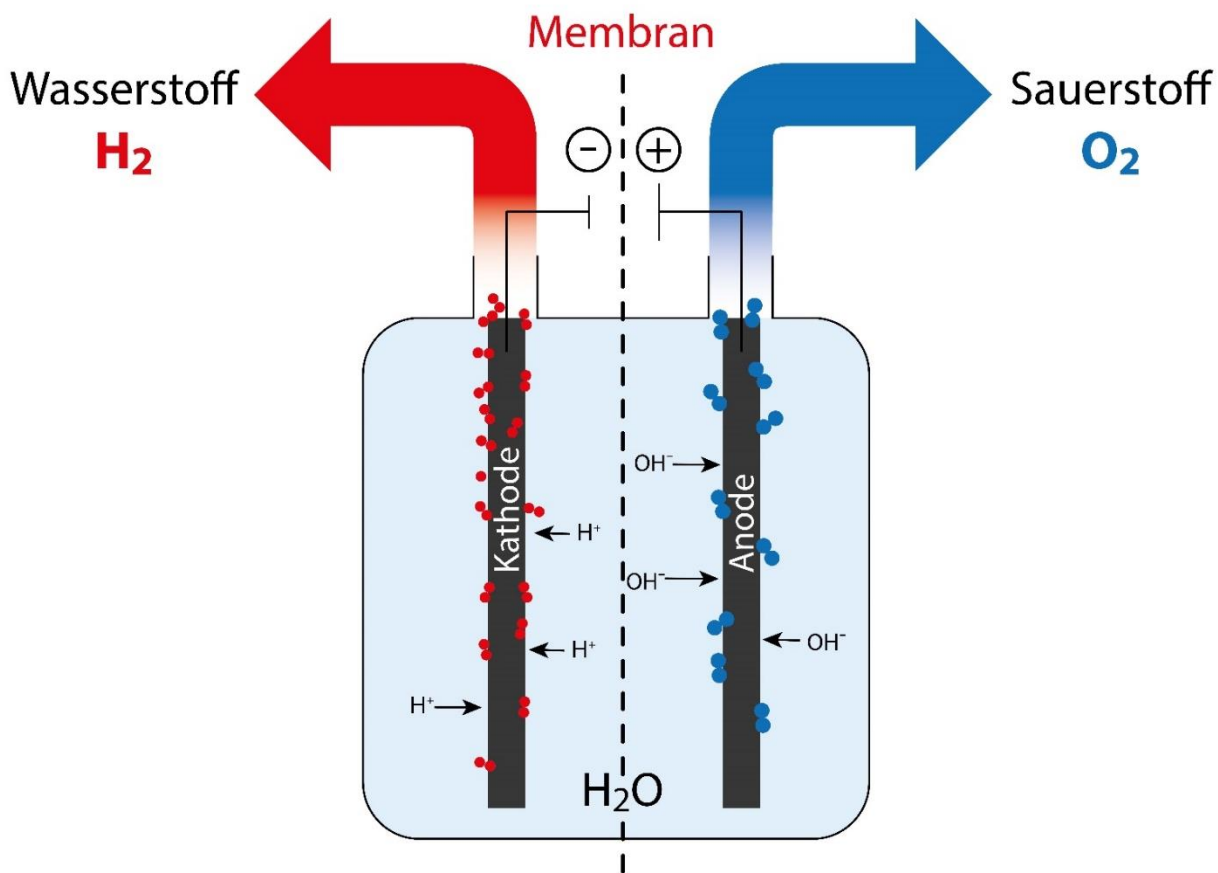






Abbildung 5: Membranverfahren

Tabelle 6: Vergleich der Elektrolysemethode [14]

| | Alkalische Elektrolyse | | | PEM Elektrolyse (Poly Elektrolyt Membran) | | | SOEC Elektrolyse (Festoxidelektrolyse Zelle) | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------|--|----------------------------|----------------------|---|----------------------------|-----------------------|
| | Heute | 2030 | Langfristi g | Heute | 2030 | Langfristi g | Heute | 2030 | Langfristi g |
| Effizienz (%) | 63-70 | 65-71 | 70-80 | 56-60 | 63-68 | 67-74 | 74-81 | 77-84 | 77-90 |
| Prozessdruck (bar) | 1-30 | | | 30-80 | | | 1 | | |
| Prozess- temperatur (°C) | 60-80 | | | 50-80 | | | 650- 1000 | | |
| Stack Lebensdauer (h) | 60.00 0 - 90.00 0 | 90.000 - 100.00 0 | 100.000 - 150.000 | 30.00 0 - 90.00 0 | 60.00 0 - 90.00 0 | 100.000 - 150.000 | 10.00 0 - 30.00 0 | 40.00 0 - 60.00 0 | 75.000 - - 100.000 |
| Lastbereich (%, relativ zur Nennleistung) | 10 - 110 | | | 0 - 160 | | | 20 - 100 | | |
| Anlagengröße (m ² /kW _e) | 0,095 | | | 0,48 | | | | | |
| Kapitalaufwan d (USD/kW _e) | 500 - 1400 | 400 - 850 | 200 - 700 | 1100 - 1800 | 650 - 1500 | 200 - 900 | 2800 - 5600 | 800 - 2800 | 500 - 1000 |

6. H2 Transport und Lagerung

Die Speicherung und die Verteilung von Wasserstoff effizient und fair zu gestalten ist ein wichtiger Teilaspekt auf dem Weg zur Realisierung eines europaweiten (weltweiten) neuen Wirtschaftszweiges. Während in der Vergangenheit immer die nachhaltige Produktion bzw. die wirtschaftliche Nutzung im Vordergrund der politischen und industriellen Entwicklung stand, müssen für die zukünftig produzierten enormen Volumina Wege zum energetisch effizienten Lagern und Handeln der Ware Wasserstoff gefunden werden. Dafür bieten sich bereits etablierte Methoden an, welche durch den Umgang mit Erdgas oder anderen technischen Gasen bekannt sind.

| Lagerungsmöglichkeiten | | | |
|------------------------|-----------------------|--------------------------|--|
| Chemische Speicherung | Metallhydrid-speicher | Stationär und Mobil |  <p>Abbildung 6: Metallhydridspeicher</p> |
| | H2 Verbindungen | Bestehende Infrastruktur |  <p>Abbildung 7: Speicherung mittels H2 Verbindung</p> |
| Flüssig-speicherung | Kryo-speicherung | Mobil |  <p>Abbildung 8: H2 LKW-Transport</p> |
| | | Stationäre Großspeicher |  <p>Abbildung 9: H2 Großspeicher</p> |







| Lagerungsmöglichkeiten | | | |
|------------------------|-------------|-----------------------------------|--|
| Druck- speicherung | Gasspeicher | Erdgaslagerstädte/ Salzkaverne |  <p>Abbildung 10: H₂ Kavernenspeicher</p> |
| | | Stationär und Mobil |  <p>Abbildung 11: H₂ Gasspeicher</p> |
| Verteilung | | | |
| Land | | LKW |  <p>Abbildung 12: H₂ LKW-Transport</p> |
| | | Pipeline |  <p>Abbildung 13: H₂ Pipeline</p> |
| Wasser | | Schiff |  <p>Abbildung 14: H₂ Tankschiff</p> |
| | | Pipeline |  <p>Abbildung 15: H₂ Unterseepipeline</p> |

Tabelle 7: Lagerung und Verteilung von Wasserstoff [5]

7. Verwendung von Wasserstoff

Für Wasserstoff gibt es schon seit 50 Jahren zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie und Energiewirtschaft. Durch das größere Bewusstsein der Menschen für den globalen Klimawandel rücken diese Technologien immer weiter in den Focus und es werden die Möglichkeiten der Nutzung zur Elektrifizierung, als Energiespeicher oder zur Treibstoffherstellung immer weiterentwickelt. Nachfolgend soll eine kurze Übersicht zu den verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten gegeben werden. [17]

1. *Wasserstoff als Energieträger*

Die Tatsache, dass Wasserstoff auf der Erde nur gebunden vorkommt und erst durch geeignete Technologien hergestellt werden muss, macht ihn zum Energieträger. Sei es durch die Herstellung mittels erneuerbarer Energien oder industrielle Prozesse bzw. chemische Reaktionen. Die chemische Energie, die bei diesen Prozessen durch den hergestellten Wasserstoff „gespeichert“ wird, kann zu einem gewissen Prozentsatz durch die jeweilige Einsatzmöglichkeit zurückgewonnen werden. Dabei hat Wasserstoff den Vorteil, dass diese Nutzung kaum bis gar nicht umweltschädlich und vielseitig einsetzbar ist. Nachteilig ist allerdings der hohe Aufwand bei der Speicherung von Wasserstoff.

2. *Nutzung als Energiespeicher*

Die Möglichkeit der Wasserstoffspeicherung und damit die Nutzung von Wasserstoff als Energiespeicher sind vielfältig. Die geringe Dichte führt jedoch dazu, dass Teile der herkömmlichen Technologien zur Gasspeicherung angepasst werden müssen. Große Mengen gasförmigen Wasserstoffs lassen sich daher nur in geeigneten Kavernen und Salzstöcken speichern. Ansonsten wird meist auf die Speicherung in Druckbehältern oder auf die Kryospeicherung zurückgegriffen. Eine weitere Möglichkeit der Speicherung stellt die chemische Speicherung in H₂ Verbindung dar. Diese haben die Vorteile, dass die notwendige Infrastruktur bereits vorhanden ist. Auch eine Speicherung in Form von Metallhydridspeichern, bei denen die Wasserstoffmoleküle im Metallgitter des Speichers gehalten werden, wie beim H₂ Storage Modul (1200-18), ist denkbar. (vgl. Kapitel 6)

3. *Nutzung als Brennstoff*

Wie aus der Knallgasprobe aus der Schule bekannt, ist ein Gemisch aus Sauerstoff und Wasserstoff entflammbar und explosiv. Die Grundvoraussetzung für die Nutzung von Wasserstoff in klassischen Verbrennungsmotoren ist also vorhanden. Trotzdem hat Wasserstoff eine geringere Energiedichte als Benzin oder Diesel, was dazu führen würde, dass man statt eines vier zylindrigen Motors, einen größeren mit 8- 12 Zylindern bräuchte, um dieselbe Wirkung zu erzielen. Diese Tatsache macht die Nutzung von H₂ als Ersatz für klassisches Benzin in Privatfahrzeugen eher unattraktiv. Dennoch gab und gibt es Bestrebungen ohnehin größere Motoren, wie in Lastkraftwagen oder Schiffen auf Wasserstoff umzubauen. [8] Außerdem kann Wasserstoff natürlich via Fischer-Tropsch Synthese zu Herstellung von höherkettigen Kohlenwasserstoffen und damit zur Kraftstoffherstellung genutzt werden.

4. *Einsatz in stationären Brennstoffzellen*

Der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen hat durch die Bemühungen den globalen Klimawandel zu reduzieren auch für die breite Öffentlichkeit an Bedeutung gewonnen. Heute gibt es Bestrebungen stationäre Brennstoffzellen in Einfamilienhäusern einzusetzen und damit eine Elektrifizierung bereitzustellen, als auch eine klassische Gasheizung zu ersetzen. [18,19] Dafür eignen sich Brennstoffzellen mit Protonenaustauschmembran, aber auch Festoxid-Brennstoffzellen oder Schmelzcarbonat Brennstoffzellen.

5. *Mobile Brennstoffzellen*

Der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen breitet sich immer weiter aus. Bis jetzt gibt es keine Alternativtechnologien mit einem derartigen Potential für den Masseneinsatz. Wasserstoff entweder gasförmig unter hohem Druck oder flüssig gespeichert, kann mittels PEM Brennstoffzelle ein Fahrzeug mit Elektromotor antreiben (FCEV) Damit ist es möglich einen erheblichen Teil an klassischen Verbrennungsmotoren und damit CO₂ Quellen, durch umweltfreundliche Brennstoffzellen zu ersetzen. Bereits heute gibt es Pilotprojekte in denen Brennstoffzellen in Zügen oder Flugzeugen eingesetzt werden.

Im Kraftfahrzeuge Sektor kann man grundsätzlich unterscheiden zwischen: [8]

- Hybrid electric vehicle (HEV): Das Fahrzeug wird durch einen Standard-Kohlenwasserstoff basierten Verbrennungsmotor und durch einen Elektromotor angetrieben.
- Battery electric vehicle (BEV): Vollständig auf Elektromotor und Batteriespeicherung basierendes Kraftfahrzeug
- Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV): HEV mit der Option den Elektroantrieb von außen zu laden
- Fuel cell electric vehicle (FCEV): Wasserstoff basierter Elektromotor, vollständig elektrifizierter Antriebsstrang.

6. *Direkte Nutzung von Wasserstoff*

Klassisch dient Wasserstoff in den Verfahren des Hydrocrackens und Hydrotreating zur Veredelung von Kraftstoffen

Außerdem ist Wasserstoff in der chemischen Industrie ein Grundstein des Haber-Bosch Verfahrens und dient zur Herstellung von Düngemitteln und Sprengstoffen. Außerdem gibt es seit einigen Jahren den Versuch Wasserstoff in der Stahlindustrie zur Reduktion zu nutzen. [14]

8. Die Brennstoffzellentechnologie

Die Erforschung, Verbesserung und Verbreitung der Wasserstoffbrennstoffzelle ist ein aktuell vorrangiges Ziel von Politik und Industrie. Daneben existieren allerdings noch weitere Brennstoffzellentechnologien. Brennstoffzellen stellen eine Möglichkeit dar, die als chemische Energie gespeicherte, elektrische Energie aus Wind- und Solarkraftwerken wieder möglichst effizient nutzbar zu machen. Allgemein gilt, dass sie wichtige Eigenschaften von klassischen Verbrennungsmotoren und Batterien vereinen.

Dem Verbrennungsmotor wird kontinuierlich ein Treibstoff und Luftsauerstoff zugeführt. Das Gemisch wird gezündet und die Explosion trieb einen Hubkolben an. So wird die chemische Energie der Reaktionspartner teilweise in nutzbare mechanische Energie umgewandelt, wobei ein großer Teil als thermische Energie verloren geht. Danach werden die Reaktionsprodukte aus dem Reaktionsraum entfernt. Die mechanische Energie kann entweder direkt genutzt werden oder wird in elektrische Energie umgewandelt. Durch die hohen Verluste in Form von Wärmeenergie ist der Verbrennungsmotor im Vergleich zu anderen Antriebsarten eine sehr ineffiziente Bauweise zur Energieumwandlung. [20,21]

Eine Batterie ist ein abgeschlossener Reaktionsraum, in welchem sich alle an der chemischen Reaktion beteiligten Stoffe, während der gesamten Nutzungsdauer befinden. Hier wird die chemische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt, wobei nur wenig als thermische Energie verloren geht. Die Reaktionsprodukte verbleiben in der Batterie. Je nach der zugrunde liegenden chemischen Reaktion spricht man von einer Batterie erster Ordnung, bzw. einem Primärelement, wenn die chemische Reaktion unumkehrbar ist. Eine Batterie zweiter Ordnung, oder Sekundärelement, bezeichnet eine wieder aufladbare Batterie, bzw. einen Akkumulator. Der Akku lässt sich durch das Anlegen einer Spannung wieder aufladen, d.h. es wird die zugrunde liegende chemische Reaktion umgekehrt, indem elektrische Energie zugeführt wird. Die Ladezeiten sind lang und abhängig von der Art und der Größe des Akkus. [20,21]

Die allgemeine Brennstoffzelle vereint einige der Eigenschaften von Verbrennungsmotor und Batterie erfolgreich zu einer für die Zukunft relevanten Technik. In Abbildung 16 ist der schematische Aufbau einer Brennstoffzelle dargestellt. Die verschiedenen Arten von Brennstoffzellen unterscheiden sich hauptsächlich durch die zugrundeliegende chemische Reaktion.

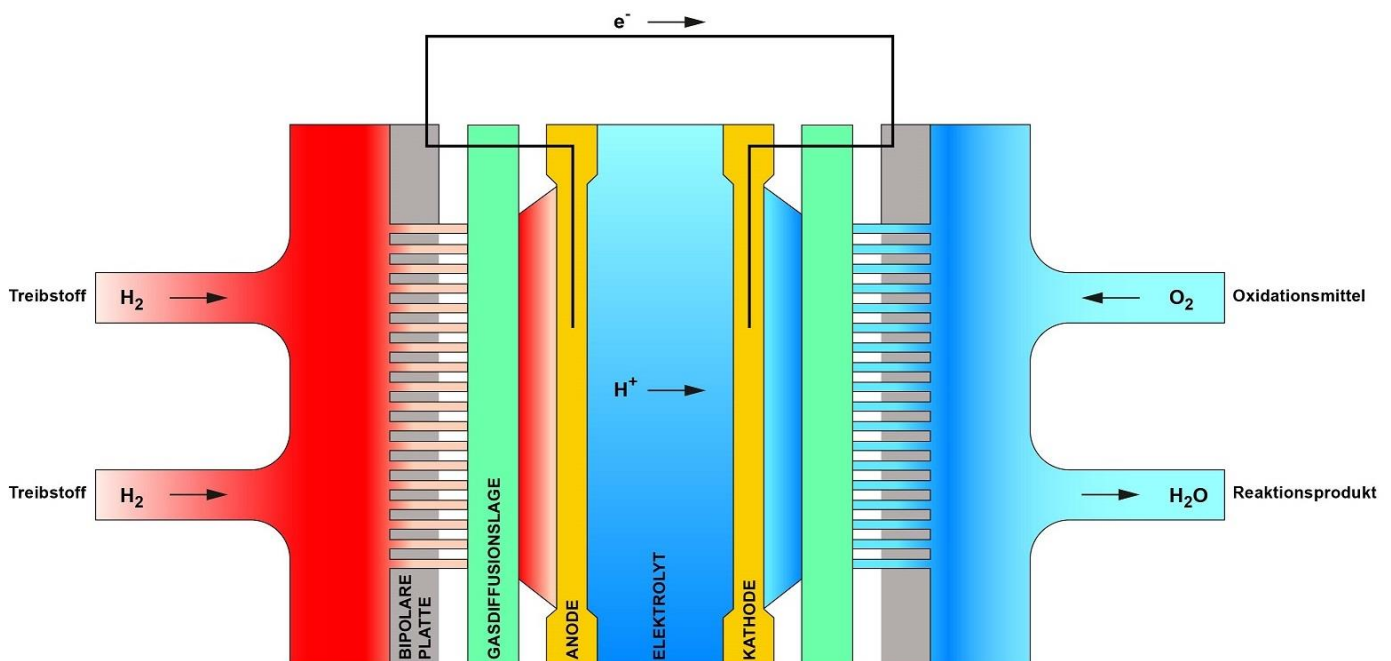


Abbildung 16: Allgemeine Brennstoffzelle

Treibstoff und Oxidationsmittel werden wie beim Verbrennungsmotor von außen kontinuierlich zugeführt. Die ablaufende Reaktion wandelt wie bei einer Batterie chemische Energie in elektrische Energie um. Die Reaktionsprodukte werden anschließend wieder aus der Brennstoffzelle entfernt. Bei der ablaufenden Redoxreaktion sind der Oxidations- und der Reduktionsschritt voneinander räumlich getrennt. Möglich wird dies durch die Einführung eines Elektrolyten. Der Elektrolyt ermöglicht einen Ionenfluss von der Anode (Minuspol) zur Kathode (Pluspol). Die freien Elektronen können diesen Weg nicht nehmen und fließen durch einen elektrischen Leiter bzw. Verbraucher. So wird ein elektrischer Strom induziert. Als Elektrolyt dienen sowohl Flüssigkeiten (Säuren wie Laugen) und Feststoffe (Keramiken oder Membranen).

| Vorteile | Nachteile |
|--|--|
| Sehr hohe Effizienz verglichen mit herkömmlichen Technologien basierend Fossilien Energien | Materialkosten sinken zwar durch die verstärkte Massenproduktion, sind aber dennoch hoch |
| Sehr gute Skalierbarkeit | Verlässlichkeit und Langlebigkeit muss noch weiter erhöht werden |
| Wenn Wasserstoff eingesetzt wird, kann die Umweltbelastung deutlich minimiert werden | Lagerung und Verteilung der Treibstoffe muss einheitlich/ normiert geregelt werden |
| Keine beweglichen Teile abgesehen von Pumpen, Kompressoren, Einspritzeinrichtungen | Zusatzkomponenten wie Kryotanks und Pumpen müssen weiter entwickelt werden |
| Es sind mehrere Treibstoffe möglich | Sensoren und Onlineanbindung ist nötig zur Überwachung |
| Sehr schnelles Befüllen/Nachtanken verglichen mit Batterien | Normierung, Gütesiegel und die behördliche Umsetzung müssen gesetzlich geregelt werden |
| | Abhängigkeit von der Reinheit des Treibstoffes ist bei einigen BSZ Arten sehr hoch |

Tabelle 8: Vor- und Nachteile der Brennstoffzellen

PEM-Brennstoffzelle

Die PEM FC (**P**olymer **E**lectrolyte **M**embran **F**uel **C**ell) ist eine spezielle Art der Brennstoffzelle, welche auf einem festen Elektrolytmaterial basiert. Es handelt sich um dieselbe Art Membran, welche bereits in Kapitel 5 zur PEM-Elektrolyse behandelt wurde. Aufgrund von erheblichen technologischen Durchbrüchen kann diese Art der Brennstoffzelle in den letzten 20 Jahren sehr große Entwicklungssprünge verzeichnen. Die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten in stationären und auch mobilen Systemen werden möglich durch die niedrige Betriebstemperatur, die hohe Leistungsdichte und die kurzen Anlaufzeiten der PEM-Brennstoffzellen. Abbildung 17 zeigt den schematischen Aufbau einer Brennstoffzelle mit Polymermembran:

POLYMERELEKTROLYT (PEM) BRENNSTOFFZELLE

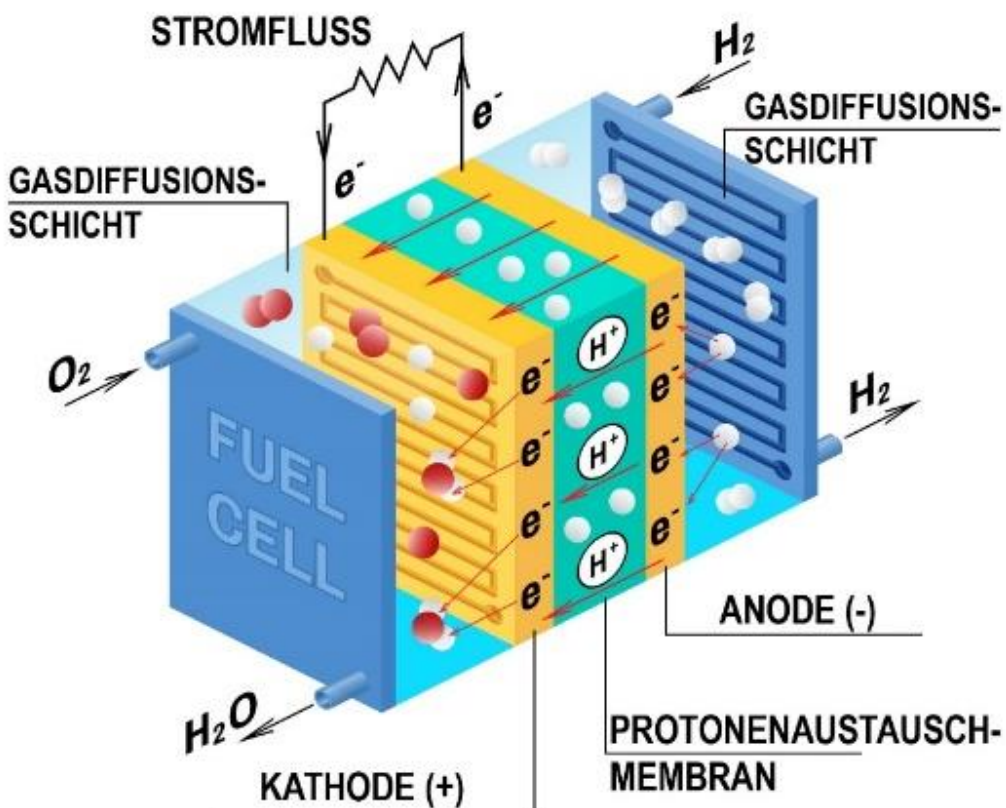
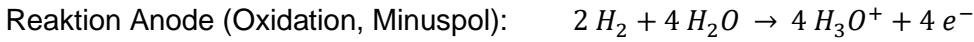


Abbildung 17: PEM Brennstoffzelle

Von entscheidender Bedeutung für den Betrieb der PEM Brennstoffzelle ist neben der Membran, die Konstruktion der Gasdiffusionsschicht und der Elektroden. Die Membran selbst ist wesentlich dünner als beim Elektrolysevorgang ($<50 \mu m$). Sie ist mit einer 2- 3 nm dicken Schicht (Pt) – Katalysatormaterial ummantelt und mit einer extra Carbonschicht, um die reaktive Oberfläche noch weiter zu erhöhen. Die Gasdiffusionsschicht (Gas Diffusion Layer, GDL) sorgt für die Zuführung von Edukt Gas zur aktiven Oberfläche. Außerdem stabilisiert sie die Struktur der Membran noch zusätzlich.

Durch die GDL wird außerdem das bei der Reaktion entstandene Wasser abtransportiert und so die reaktiven Katalysatorzentren wieder frei. Sie besteht aus verwobenen oder nicht verwobenen Carbonfasern. Über 2-4 mm breite Kanäle wird das Gas zur GDL geleitet und an der jeweiligen Seite finden die Anodenreaktion und die Kathodenreaktion räumlich getrennt voneinander statt: [16,20,22,]



Eine einzelne Brennstoffzelle kann theoretisch 1,23 V erzeugen. In der Praxis liegt die erreichte Spannung oft bei ca. 0,7 V. Um den in der Industrie und Privatwirtschaft geforderten Leistungsbereich von 1kW bis in den Megawattbereich zu erreichen, werden mehrere Einzelzellen in Reihe geschaltet. Diese Reihenschaltung und die damit einhergehende typische Bauweise wie in Abbildung 18 darstellt, wird als Brennstoffzellen Stack bezeichnet. Durch die Stack-Bauweise wird es nötig zusätzliche Peripheriegeräte/ Armaturen zu betreiben wie z.B.: Injektionsdüsen, Pumpen, Kühlung, Gas(druck)speicher und Sensoren zur Überwachung. Diese Zusatzkomponenten erhöhen den räumlichen Bedarf des Stacks, aber auch die Kosten. Je nach mobilem oder stationärem Einsatz des Brennstoffzellensystems gibt es bei diesen Prozesskomponenten sehr große Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und Optimierung.

WASSERSTOFF

BRENNSTOFFZELLENSTACK

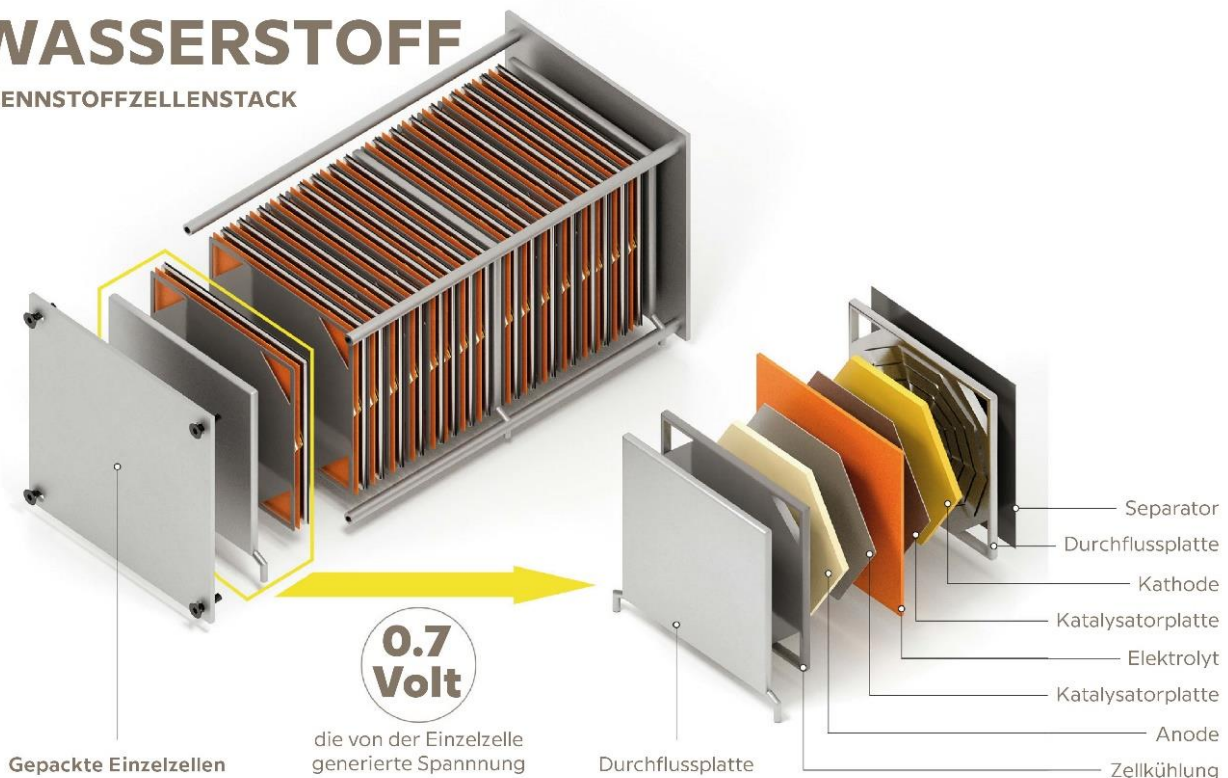


Abbildung 18: Brennstoffzellen Stack

Neben der populären Möglichkeit Brennstoffzellen (-stacks) mit Wasserstoff zu betreiben, gibt es noch weitere Arten von Brennstoffzellen, welche sich in der zugrundeliegenden Reaktion und der Prozessparameter unterscheiden. In Tabelle 8 sehen Sie eine Zusammenfassung der verschiedenen technischen Möglichkeiten:

| Brennstoffzelle | Elektrolyt | Typische Leistungswerte | Temperatur | Wirkungsgrad | Reduktionsmittel | Oxidationsmittel | Vorteile | Nachteile |
|--|---|-------------------------|-------------|--------------|---|------------------|---|---|
| Polymer Elektrolyt Membran (PEM) | PTFE PEEK sPi | <1 kW – 100 kW | <120°C | 40-60% | H ₂ , C ₂ H ₅ OH, CH ₃ OH | O ₂ | Fester Elektrolyt. wenig Korrosion. Elektrolyt Management einfach. Schneller Anlaufzeit. | Teurer Katalysator. hohe Reinheit des Treibstoffes nötig. |
| Alkalische Brennstoffzelle (AFC) | KOH | 1 – 100 kW | 60-250°C | >60% | H ₂ | O ₂ | Hoher Wirkungsgrad. Niedrige Materialanforderungen, niedrige Kosten. | Reiner Sauerstoff nötig. frei von CO ₂ Kontamination. |
| Phosphorsäure Brennstoffzelle (PAFC) | Phosphorsäure eingebettet in einem porösen Material | 5 – 400 kW | 150-200 °C | 40% | H ₂ | O ₂ | Geeignet für Kraft-Wärme-Kopplung. hohe Toleranz an die Edukt Reinheit. | Kraft-Wärme-Kopplung nur bei hoher Treibstoff Reinheit. |
| Schmelzcarbonat Brennstoffzelle (MCFC) | Geschmolzenes Li, Na oder K Carbonat | 300 kW – 3 MW | 600-700 °C | 50% | H ₂ | O ₂ | Hoher Wirkungsgrad. niedrige Anforderungen an Reinheit der Edukte. Geeignet für Kraft-Wärme-Kopplung. | Hohe Temperaturen. hohe Korrosion. Anforderungen an die Komponenten sehr hoch. |
| Festoxid Brennstoffzelle (SOFC) | YSZ (Yttria stabilized zirconia) | 1 kW – 2 MW | 500-1000 °C | 60% | H ₂ , CO | O ₂ | Hoher Wirkungsgrad. flexibler Treibstoffeinsatz; fester Elektrolyt. Geeignet für Kraft-Wärme-Kopplung. | Hohe Temperaturen. hohe Korrosion. Anforderungen an die Komponenten sehr hoch. Lange Startzeit. begrenze Anzahl an Neustarts. |

Tabelle 8: Vergleich verschiedener Brennstoffzellentechnologien [20,22,23]

Quellenverzeichnis

| | |
|----|--|
| 1 | IEA ; International Energy Agency; <i>World Energy Outlook 2021</i> ; Paris |
| 2 | R. Scita, P. P. Raimondi and M. Noussan ; <i>Green Hydrogen: The Holy Grail of Decarbonisation?</i> ; FEEM Working Paper; 2020; Milan, Italy |
| 3 | https://www.webelements.com/hydrogen/ , abgerufen am 18.07.2022 |
| 4 | R. Weber , <i>Der sauberste Brennstoff: der Weg zur Wasserstoffwirtschaft</i> ; Olythus-Verlag; Oberbözberg, 1991 |
| 5 | J. Lehmann, T. Luschtinetz ; <i>Wasserstoff und Brennstoffzellen: Unterwegs mit dem saubersten Brennstoff</i> ; Springer, Heidelberg, 2014 |
| 6 | IEA , International Energy Agency, <i>Hydrogen & Fuel Cells Review of National R&D Programs</i> , JOUVE, France, 2004 |
| 7 | IEA , International Energy Agency, <i>The Future of Hydrogen</i> ; Report prepared by the IEA for the G20 Japan, France, 2019 |
| 8 | W. J. Nutall, A. T. Bakenne ; <i>Fossil Fuel Hydrogen Technical, Economic and Environmental Potential</i> ; Springer Nature Switzerland AG; 2020 |
| 9 | M. Baerns, A. Behr, A. Brehm, J. Gmehling, H. Hofmann, U. Onken, A. Renken ; <i>Technische Chemie</i> ; Wiley-VCH, Weinheim, 2006 |
| 10 | D. Stolten ; <i>Hydrogen and fuel cells : [fundamentals, technologies and applications ; contributions to the 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, Essen] - [1. Reprint]</i> ; Wiley-VCH2010; Weinheim |
| 11 | V.M. Schmidt ; <i>Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozeßoptimierung</i> ; Wiley-VCH; Weinheim; 2003 |
| 12 | https://www.globaldata.com/store/report/chlorine-market-analysis/ , abgerufen am 18.07.2022 |
| 13 | A. Züttel [Ed.], A. Borgschulte [Ed.], L. Schlapbach [Ed.] ; <i>Hydrogen as a Future Energy Carrier</i> , WILEY-VCH, 2008, Weinheim |
| 14 | IEA , International Energy Agency; <i>Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells</i> ; Paris; 2015 |
| 15 | K. Scott [Ed.] ; <i>Electrochemical Methods for Hydrogen Production</i> ; The Royal Society of Chemistry; 2020 |
| 16 | T. E. Lipman [Ed], A. Z. Weber [Ed] ; <i>Fuel Cells and Hydrogen Production</i> ; Springer Science+Business Media; 2019 |
| 17 | B. Sørensen ; <i>Hydrogen and fuel cells : emerging technologies and applications</i> ; Heidelberg [u.a.]: Elsevier Academic Press; Amsterdam; 2012 |
| 18 | https://www.k-wz.de/mini-kraftwerk-bhkw-brennstoffzelle/ abgerufen am 18.07.2022 |
| 19 | https://www.sunfire.de/de/news/detail/aus-new-enerday-wird-sunfire-fuel-cells1 abgerufen am 18.07.2022 |
| 20 | R. P. O'Hayre ; <i>Fuel Cell Fundamentals</i> ; John Wiley&Sons; New York; 2009 |
| 21 | M. M. Mench ; <i>Fuel Cell Engines</i> ; John Wiley&Sons; New York; 2008 |
| 22 | H. Pu , <i>Polymers for PEM Fuel cell</i> , John Wiley&Sons; New York; 2014 |
| 23 | R. -A. Felseghi, E. Carcadea, M. S. Raboace, C. N. Trufin, C. Filote , <i>Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications</i> , <i>Energies</i> 2019, 12, 4593 |

Abbildungsverzeichnis

| Abbildung Nr. | Bezeichnung | Quelle |
|---------------|---|--|
| 1 | Historisches Thermit schweißen | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#383953615 |
| 2 | Daniell Element | S 10: Rehua, A common example of a galvanic cell, labelled,2012, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz by-sa-3.0-de |
| 3 | Alkalische Elektrolyse | Lizenz liegt bei leXsolar |
| 4 | SOFC Brennstoffzelle | Lizenz liegt bei leXsolar |
| 5 | Membranverfahren | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#96021825 |
| 6 | Metallhydridspeicher | Lizenz liegt bei leXsolar |
| 7 | Speicherung mittels H ₂ Verbindung | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#312274965 , # 134128155 |
| 8 | H ₂ LKW-Transport | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#464989203 |
| 9 | H ₂ Großspeicher | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#306010353 |
| 10 | H ₂ Kavernenspeicher | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#88516199 |
| 11 | H ₂ Gasspeicher | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#325076499 |
| 12 | H ₂ LKW-Transport | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#464989203 |
| 13 | H ₂ Pipeline | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#1209565 |
| 14 | H ₂ Tankschiff | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#493104481 |
| 15 | H ₂ Unterseepipeline | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#499640444 |
| 16 | Allgemeine Brennstoffzelle | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#38449790 |
| 17 | PEM-Brennstoffzelle | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#216329880 |
| 18 | Brennstoffzellen Stack | Lizenz Erwerb über https://stock.adobe.com/de/#436927291 |

Tabellenverzeichnis

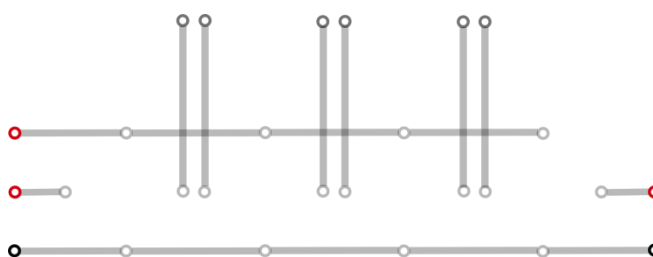
| Tabelle Nr. | Bezeichnung |
|-------------|--|
| 1 | Eigenschaften Wasserstoff |
| 2 | Historie Wasserstoff |
| 3 | Herstellungsverfahren Chlor |
| 4 | Elektrochemische Spannungsreihe |
| 5 | Vergleich der Elektrolysemethode |
| 6 | Vor- und Nachteile Membranverfahren |
| 7 | Lagerung und Verteilung von Wasserstoff |
| 8 | Vor- und Nachteile der Brennstoffzellen |
| 9 | Vergleich verschiedener Brennstoffzellentechnologien |

II. Allgemeine Informationen zum Experimentiersystem

Bestandteile und Handhabung

In der folgenden Auflistung werden alle im leXsolar H2 Professional 2.0 enthaltenen Einzelteile aufgeführt. Zu jeder Komponente finden Sie die Bezeichnung mit Artikelnummer, eine Abbildung, das Piktogramm in den Versuchsaufbauten und Hinweise zur Bedienung. Mit Hilfe der Artikelnummer können Sie jedes Einzelteil separat nachbestellen.

Grundeinheit Professional (1400-13)



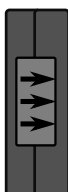
Die Grundeinheit ist eine Steckplatine auf der bis zu 4 Module in Reihe und parallel zueinander geschaltet werden können. Der Strom fließt über die an der Unterseite angebrachten Leitungen. Um die Komponenten auf der Grundeinheit mit einander zu verbinden, befinden sich am oberen Ende Kurzschlusssteckplätze.

Winderzeuger (1400-19)

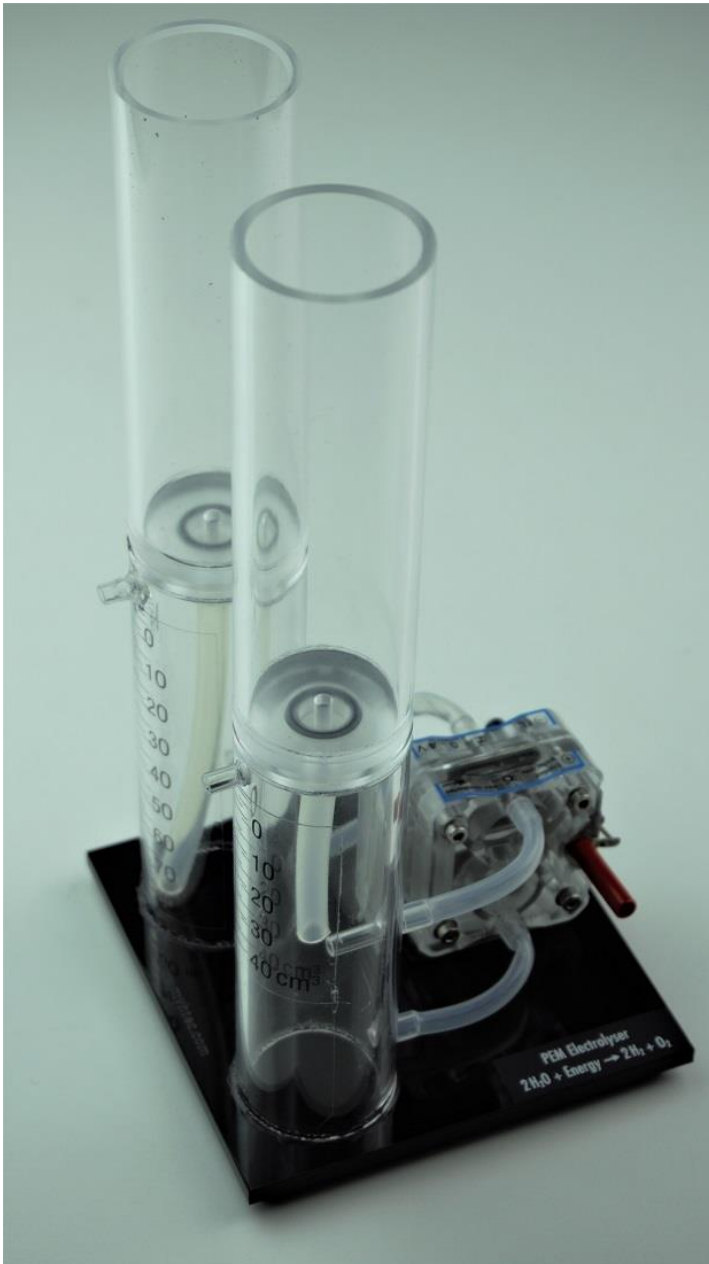
Der Winderzeuger dient zur kontrollierten Steuerung des Windes für das Experimentieren mit der Windturbine. Für die Experimente wird der Winderzeuger mit dem PowerModul (Spannungsquelle) verbunden. Hierzu muss der negative (positive) Pol des PowerModuls mit dem schwarzen (roten) Anschluss verbunden werden. Zur Inbetriebnahme befindet sich auf der den Anschlüssen gegenüber liegenden Seite ein separater An/Aus-Schalter. Die Windrichtung ist durch die Pfeile auf der Oberseite des Winderzeugers markiert. Der Betrieb des Winderzeugers ist nur mit dem mitgelieferten PowerModul oder einer stabilisierten Gleichspannung zulässig, andernfalls erlischt die Garantie.

Technische Daten:

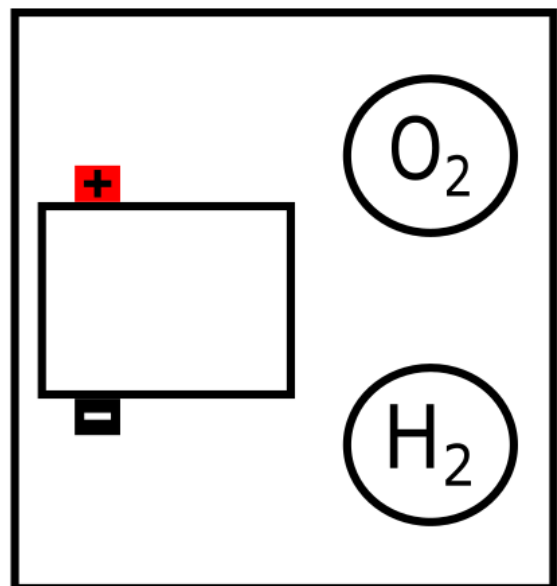
- Maximale Spannung: 12 V DC (stabilisiert)
- Maximalspannung: 13,4 V
- Eingangsstromstärke: 1 A
- Eingangsleistung 12,6 W
- Windgeschwindigkeit: 0 – 7 m/s



Elektrolyseur (L2-06-206)



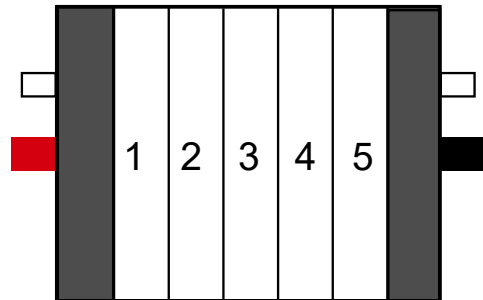
- Doppelzellenelektrolyseur
- Elektrolyseure in Reihe geschaltet
- Anode „+“ rot
- Kathode „-“, schwarz
- 90 x 170 x 135 mm, 290 g
- Wasserstoffspeicher: 80 ml
- Sauerstoffspeicher: 80 ml
- Durchschnittliche Wasserstoffproduktion: 30 ml/min
- Durchschnittliche Sauerstoffproduktion: 15 ml/min
- Abschraubbare Vorratsbehälter
- Maximale Stromzufuhr: 3 A
- Schließen Sie niemals das PowerModul direkt an den Elektrolyseur an. Verwenden Sie immer das Potentiometer und das AV- Modul, wenn Sie den Elektrolyseur mit Netzstrom betreiben!



Brennstoffzellen Stack 1W (L2-06-205)



- Modularer Aufbau
- Besteht aus 5 Einzelzellen
- Leistung pro Zelle laut Hersteller: 200 mW
- Die Abkürzung „**BSZ**“ in den Experimentierbeschreibungen bezeichnet immer den gesamten Brennstoffzellen Stack mit 5 Zellen



Den Brennstoffzellen-Stack für die weitere Verwendung zu überprüfen und funktionstüchtig zu machen, ist ein wichtiger Bestandteil der Experimente. Nach längerer Standzeit ohne Nutzung trocknet der Stack aus und verliert an Leistung.

Es ist durchaus üblich und gewollt, dass die Schüler/Studenten die Erfahrung machen, dass der Stack nicht beim ersten Versuch funktioniert. Der/Die Experimentierende soll auf diese Weise erfahren, dass es einen erheblichen Wartungsaufwand, sowohl personell als auch an Sensortechnik bedarf, um eine Brennstoffzelle im Einsatz zu halten.

Um die Brennstoffzelle wieder funktionsfähig zu machen, muss sie zunächst abwechselnd mehrmals mit destilliertem Wasser und mit Wasserstoff gespült werden. Dazu können Sie die mitgelieferte Spritze, sowie den H₂ Storage benutzen.

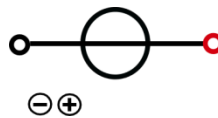
Die Nennspannung der Brennstoffzelle beträgt etwa 0,7-0,9 V pro Zelle, so dass die erwartete Spannung des gesamten Stapels in der Regel bei ca. 3,5 V - 4,5 V liegt. Der Spannungsabfall im Stack kann darauf hindeuten, dass die PEM-Membran zu trocken geworden ist (die Brennstoffzelle ist für den Betrieb bzw. die Lagerung bei 70 % relativer Luftfeuchtigkeit bei Raumtemperatur ausgelegt, um die Membran feucht zu halten).

Wenn die Leistung der Brennstoffzelle um mehr als 50 % der Nennspannung abgenommen hat, empfehlen wir, die folgenden Schritte durchzuführen:

Hinweis: Während des Vorgangs sollte der Brennstoffzellenstack unbelastet sein!

1. Schließen Sie einen Silikonschlauch an den Wasserstoffeingang der Brennstoffzelle an.
2. Füllen Sie eine Spritze mit destilliertem Wasser. Verbinden Sie die Spritze mit dem Schlauch, der am Stack befestigt ist.
3. Spritzen Sie destilliertes Wasser in den Stack, bis Sie Tropfen aus einer anderen Öffnung austreten sehen. Lassen Sie das Wasser 15-60 Minuten lang im Stack.
4. Verbinden Sie den Silikonschlauch mit dem Wasserstoff-Ausgangsanschluss. Stecken Sie das Ende des Schlauchs in den Becher oder ein Becherglas.
5. Spülen Sie das Wasser mit der Spritze so weit wie möglich aus dem Stack heraus.
6. Schließen Sie das H₂ Storage Modul über das Ventil an den Wasserstoff-Eingang an und lassen Sie den Wasserstoff einige Sekunden lang durch den Stack fließen, um das restliche Wasser und mögliche Verunreinigungen zu entfernen (tun Sie dies in einem gut belüfteten Raum und fern von möglichen Zündquellen!)
7. Messen Sie erneut die Leerlaufspannung des Brennstoffzellenstapels. Wenn die Brennstoffzelle nicht in Gebrauch ist, empfiehlt es sich, sie in einem luftdichten Behälter aufzubewahren, damit der Stack nicht zu trocken wird.

PowerModul (9100-05)

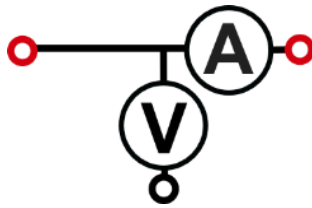


Das PowerModul ist ein kompaktes und intuitiv zu bedienendes Stromversorgungsgerät für Experimente. Zum Betrieb muss zunächst das beiliegende Steckernetzteil in die Steckdose gesteckt und mit der Eingangsbuchse oben rechts am PowerModul verbunden werden. Die Spannung wird mit der „+“- und „-“ -Taste ausgewählt und durch die LEDs angezeigt. Ist die gewünschte Spannung eingestellt, wird mit dem Einschalt-Button die Spannung an die Ausgangsbuchsen angelegt. Die Spannung liegt an, solange der Einschalt-Button rot leuchtet. Bei Kurzschluss oder Strömen >2 A schaltet das PowerModul die Spannung ab.

Technische Daten:

- Ausgangsspannung: 0-12 V
- Ausgangsleistung: max. 24 W
- Regelbar in 0,5 V Schritten per Touchbuttons
- Überstromerkennung >2 A und Abschaltung
- Eingangsspannung: 110-230 V, 50-60 Hz (über beiliegendes Steckernetzteil)

AV-Modul 9100-03

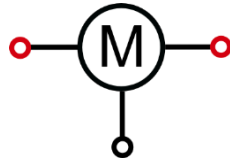


- Das AV-Modul ist ein kombiniertes Spannungs- und Strommessgerät.
- Es besitzt 3 Tasten, deren Funktionen jeweils im Display angezeigt werden.
- Durch das Drücken einer beliebigen Taste wird das Modul eingeschaltet.
- Im ausgeschalteten Zustand ist im Display das leXsolar-Logo zu sehen.
- Wenn das Display nichts anzeigt oder beim Betrieb „Bat“ angezeigt wird, müssen die Batterien auf der Rückseite ausgetauscht werden
- 2 x AA Batterien oder Akkus 1,2 bis 1,5V; Die Polarität beim Einsetzen der Batterien gemäß Markierung am Boden des Batteriefachs ist zu beachten!
- Sollte ein anderer Anzeigefehler vorliegen, kann das Gerät durch Herausnehmen und Wiedereinsetzen der Batterien neu gestartet werden.
- Beim Einlegen der Batterien dürfen die Touchfelder nicht berührt werden.
- Mit der Taste rechts oben kann zwischen den drei Modi: Spannungsmessung, Stromstärkemessung und kombinierte Spannungs- und Stromstärkemessung gewechselt werden.
- Der Messmodus und der Anschluss der Kabel an das Modul werden durch die Schaltsymbole im Display angezeigt.
- Im Modus der Spannungsmessung ist zu beachten, dass kein Strom zur rechten Buchse fließt. Im kombinierten Modus kann die Spannung sowohl über die rechte als auch die linke Buchse gemessen werden.
- Der Einfluss des Innenwiderstands der Stromstärkemessung wird intern kompensiert. Der Messwert ist vorzeichenbehaftet. Liegt der positive Pol an einer der roten und der negative Pol an der schwarzen Buchse an, ergibt die Spannungsmessung ein positives Ergebnis. Fließt der Strom von der linken zur rechten Buchse ist die angezeigte Stromstärke positiv.
- Achten Sie immer auf den korrekten Einbau des AV- Moduls auf der Grundplatte. Vergleichen Sie das aufgebaute Experiment immer mit der Anweisung aus der Anleitung. Eine **Rückwärtsschaltung kann zur Beschädigung der Platine führen**, wodurch die Spannungsmessung nicht gewährleistet werden kann.
- Vor der Quittierung der Fehlermeldung ist darauf zu achten, dass die Stromquelle, welche den Fehler verursacht hat, ausgeschaltet ist. Befinden sich die Messwerte wieder im zulässigen Bereich, misst das Modul weiter.
- Nach 30 min ohne Tastendruck oder nach 10 min ohne Messwertveränderung schaltet sich das Modul automatisch aus. Das AV-Modul kann Spannungen bis 12 V und Stromstärken bis 1,8 A messen. Falls eine dieser Größen überschritten wird, unterbricht das Modul den Stromfluss und es erscheint „overvoltage“ bzw. „overcurrent“ im Display. Diese Fehlermeldung kann durch Betätigen der entsprechenden Taste bestätigt werden.

Technische Daten:

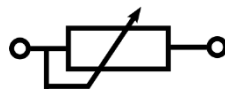
- Messbereich Spannung: 0...12 V
- Genauigkeit Spannungsmessung: 10 mV
- Messbereich Stromstärke: 0...1,8 A
- Genauigkeit Stromstärkemessung: 1 mA
- Innenwiderstand <0,5 Ohm (0...200 mA); <0,2 Ohm (200 mA...2 A)

Motormodul Pro (1118-02) mit Propeller (L2-02-017)



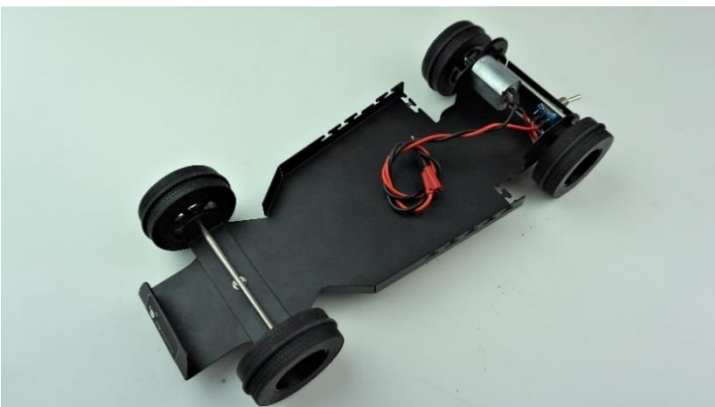
Das Motormodul fungiert als Verbraucher in den Versuchen mit dem Brennstoffzellen Stack.

Potentiometermodul Pro 110 Ω (1100-62)



Das Potentiometermodul besteht aus einem 0-10 Ω -Drehwiderstand und einem 0-100 Ω -Drehwiderstand. Beide sind in Reihe geschaltet, so dass das Potentiometermodul Widerstände zwischen 0 Ω bis 110 Ω annehmen kann. Die Messgenauigkeit beim Einstellen eines Widerstandes liegt bei 0,5 Ω beim kleineren Drehwiderstand und bei 5 Ω beim Größeren. Das Potentiometer ist für einen maximalen Strom von bis zu 200 mA ausgelegt

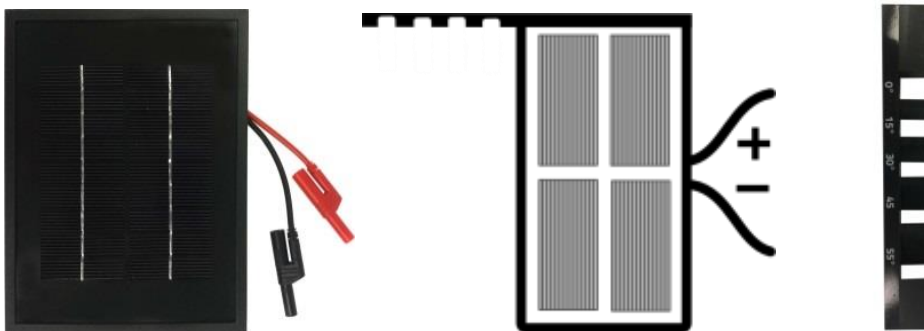
FCEV Auto Model (L2-06-207)



Das Autochassi dient als Verbraucher für den Brennstoffzellen Stack. Bei Benutzung sollte der Stack auf der Halterung für den Brennstoffzellen Stack (L2-01-126) aufgebracht sein.

Das Automodel dient zur Verdeutlichung des Nutzens der Brennstofftechnologien für den Personen- und Warentransport. Der Versuch mit dem Automodell stellt keine Simulation der eines realen Brennstoffzellenfahrzeuges dar

Solarmodul 5,22V, 380mA (1100-04) mit Standfuß (1118-17)



Das Solarmodul erwärmt sich durch die Beleuchtung und kann bei Unterschreitung des Abstandes von 30 cm zur Lampe dauerhaften Schaden nehmen. Die Lampe darf nur für die Dauer des Experimentes eingeschaltet sein und darf niemals auf andere Personen gerichtet werden. Aufgrund der Erhitzung muss die Lampe nach dem Ausschalten zunächst abkühlen, bevor sie angefasst und in die Schaumstoffeinlage zurückgelegt werden darf.

Während des Experimentierens sollten keine Gegenstände oder Personen im bzw. in der Nähe des Strahlengangs der Lampe stehen. Hierdurch kann es zu Reflexionen kommen, die die Experimentierergebnisse verfälschen.

Technische Daten:

Lampe: 100 W Infrarot-Lampe

Solarmodul:

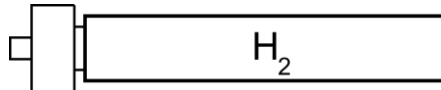
- 4,5 V Leerlaufspannung
- 840 mA Kurzschlussstrom
- 3,75 Wp Spitzenleistung

Schlauchklemme (L2-05-141) und Y Verteiler 4mm (L2-02-083)



Die Schlauchklemme dient zum Verschließen bzw. Verengen von Schläuchen

H2 Storage (1100-18) mit Druckminderer (L2-06-132) und Silikonschlauch 2 mm (L2-02-048)

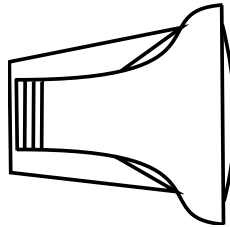


Hinweis: Das H2 Storage Modul wird leer ausgeliefert und sollte auch nur leer transportiert werden

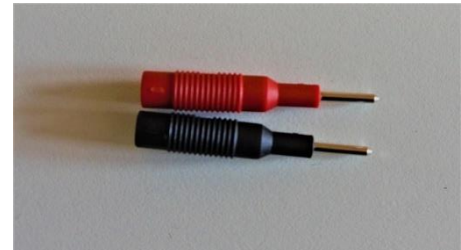
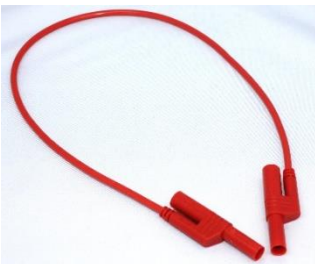
Spritze (L2-06-087) und Schläuche (L2-02-046)



Lampengehäuse (L2-04-080) mit Leuchtmittel (L2-04-200)

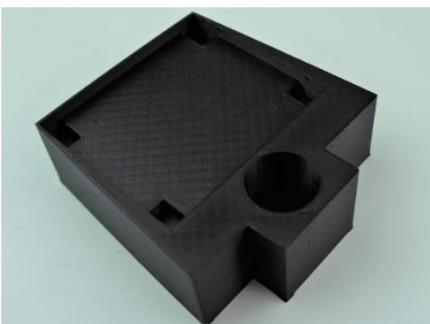


**Sicherheitsmessleitung 50 cm (L2-04-059/060)
Sicherheitsmessleitung 25 cm (L2-04-066/067)
Adapter (L2-06-210/211)
Kurzschlussstecker(L2-05-068)**



- 3x Mesleitung rot (2x 50 cm + 1x 25 cm)
- 3x Messleitung schwarz (1x 50 cm + 1x 25 cm)
- 3x Kurzschlussstecker
- 2x Adapter rot
- 2x Adapter schwarz

Halterung für die Brennstoffzelle (L2-01-126)



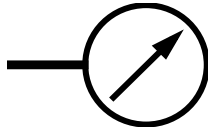
Kunststoff ABS schwarz

Im 3D Druck hergestellte Halterung für den Brennstoffzellen Stack

Manometer Set 1 bar (1222-02)



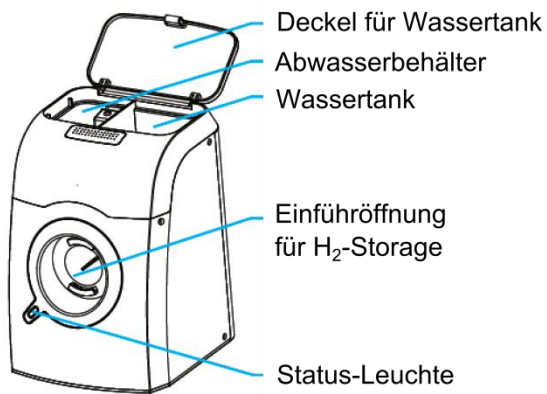
- Gehäuse aus schwarzem Kunststoff
- Anschlussgewinde G1/4"
- Anzeigebereich 0... 1 bar



Destilliertes Wasser 200 ml (1800-17)



Optionale Komponente H₂- Charger (1200-17)



Spezifikationen H₂-Charger:

- Leistung: 23 W
- Eingangsspannung: 10 V-19 V (DC)
- Verwendung: De-ionisiertes oder destilliertes Wasser (10-40 °C)
- Wasserverbrauch: ca. 20 ml/h
- Wasserstoffdruck: 0-3 MPaG
- Wasserstofferzeugungsrate: ca. 3 l/h
- Wasserstoffreinheit: 99,99 %
- Nachfüllzeit pro Kartusche: rund 4 h

Spezifikationen H₂-Storage:

- Kapazität: 10 l Wasserstoff
- Speichermaterial: AB5 Metallhydrid
- Ladedruck: 3 MPa
- Arbeitstemperatur: 0-55 °C

Wichtige Hinweise zur Handhabung:

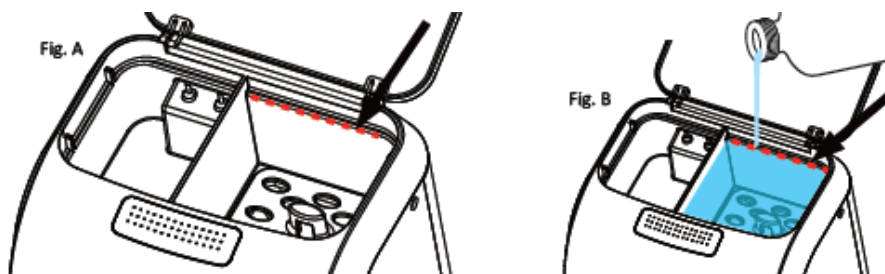
- Der H₂-Charger darf nicht auseinandergelassen werden
- H₂-Charger und H₂-Storage müssen vor offenen Flammen und großer Hitzeeinwirkung ferngehalten werden
- Der H₂-Charger sollte in aufrechter Position angewendet werden
- Der Betrieb sollte in einem gut belüfteten Raum stattfinden
- Die elektrischen Verbindungen sollten nicht mit Wasser in Berührung kommen

Status-Leuchte:

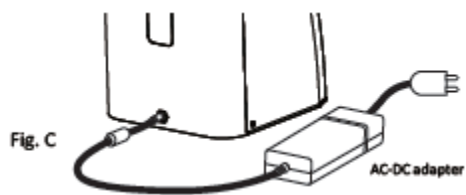
| Grün | Rot | System-Status |
|-----------------------------|------------------------------|---|
| an | | H ₂ -Storage gefüllt |
| 1 Sekunde an, 1 Sekunde aus | | Warten mit dem Auffüllen von H ₂ -Storage |
| | an | H ₂ -Storage wird aufgefüllt |
| | 1 Sekunde an, 3 Sekunden aus | Fügen Sie Wartungspulver hinzu („Apple Acid Powder“) |
| | 1 Sekunde an, 1 Sekunde aus | Fügen Sie Wasser hinzu oder leeren sie den Abwasserbehälter |

Gebrauchsanweisung:

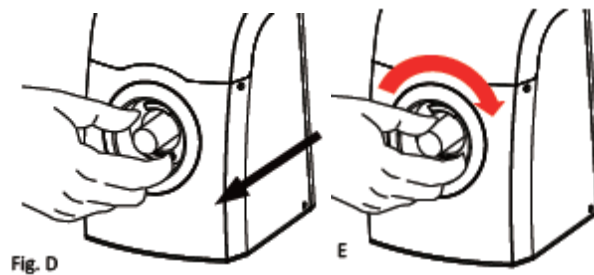
1. Zunächst wird destilliertes oder de-ionisiertes Wasser in den Wassertank bis zum Rand aufgefüllt (im Bild durch rot markierte Linie, beziehungsweise Pfeil gekennzeichnet).



2. Im Anschluss wird das zugehörige Netzteil an den H₂-Charger angeschlossen. Die Status-Leuchte sollte grün aufleuchten.



3. Setzen Sie den H₂-Storage in die Einführöffnung an der Vorderseite des H₂-Charger ein. Der Stick wird dazu im Uhrzeigersinn in das Gewinde eingedreht, bis er einen sicheren Halt hat. Dabei sollte nicht zu viel Kraft aufgewendet werden!



4. Während die Statusleuchte rot leuchtet, wird der H₂-Storage gefüllt. Erst wenn die der Status ein grünes Leuchten anzeigt, ist die Kartusche vollständig aufgefüllt. Der Stick kann dann durch Drehen gegen den Uhrzeigersinn wieder entfernt werden.

5. Entfernen Sie anschließend den Netzstecker vom H₂-Charger und leeren Sie den Wassertank, falls der Charger länger als eine Woche lang nicht benutzt wird. Wenn weitere Kartuschen gefüllt werden sollen, beginnen Sie wieder bei Schritt 3.

HINWEIS: Geräusche während des Ladevorgangs (Puffen oder Pfeifen) sind normal und werden durch den Säuberungsprozess hervorgerufen.

Handhabung und Zusammenbau des Elektrolyseurs

Der Elektrolyseur (ItemNo: L2-06-206) ist in einige Bestandteile zerlegt worden, um besser in das kompakte leXsolar Kofferformat integriert werden zu können. Bevor Sie einen Versuch durchführen können, folgen Sie bitte dieser Anleitung, um den Elektrolyseur wieder funktionsfähig zusammen zu setzen.

Der Elektrolyseur ist auf der schwarzen Grundplatte durch eine Klebeverbindung aufgebracht. Es handelt sich dabei um einen **Doppelzellenelektrolyseur**, also um zwei in Reihe arbeitende Elektrolysezellen.

Der Elektrolyseur ist über vier Verbindungsschläuche mit den Vorratsgefäßen verbunden. Die unteren Schläuche dienen der Wasserzufuhr über die oberen Schläuche wird das entstehende Gas abgeleitet.

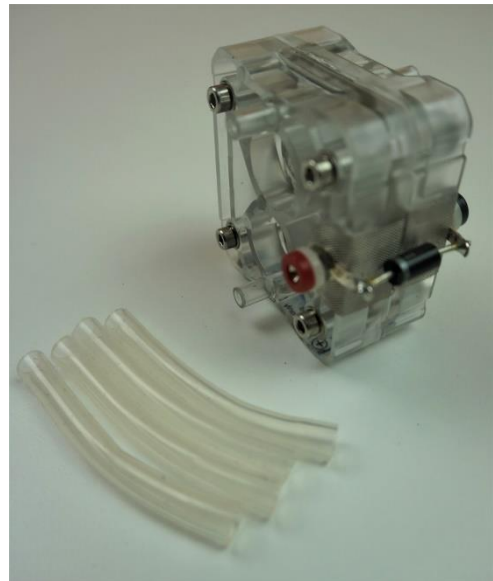


Abb.: Doppelzellenelektrolyseur mit Anschlusschläuchen

Außerdem befinden sich bereits zwei Vorratsgefäße auf der schwarzen Grundplatte, welche mit „H₂“ für die Wasserstoff produzierende Seite und „O₂“ für die Sauerstoff produzierende Seite gekennzeichnet sind.

Vor dem Versuch wird empfohlen die beiden Vorratsgefäße mit destilliertem Wasser zu spülen. Das ist besonders bei neu erworbenen Produkten wichtig, um sicher zu stellen, dass keine Schwebstoffe in die Elektrolysezellen gelangen.

Die beiden Vorratsgefäße sollten zu Versuchsbeginn mit mindestens 40 ml und maximal 80 ml destilliertem Wasser gefüllt werden.



Abb: Elektrolyseur auf Grundplatte mit angeschlossenen Vorratsgefäßen

Auf die Vorratsgefäße werden die Ausgleichsgefäße aufgeschraubt. Vor dem Aufschrauben ist unbedingt zu kontrollieren, ob sich die Zuleitungsschläuche am Ausgleichsgefäß befinden. Diese sind entweder bereits angebracht, oder befinden sich in der Verpackung zusammen mit anderen Schläuchen. Dabei ist zu beachten, dass der längere Schlauch (l= 110 mm, Ø= 5 mm) an das Ausgleichsgefäß für den Wasserstoff und der kürzere Schlauch (l= 60 mm, Ø= 5 mm) an das Ausgleichsgefäß für den Sauerstoff angebracht wird.



Abb.: Ausgleichsgefäße mit Zuleitungsschläuchen

Während der Elektrolyse wird das Wasser im Vorratsgefäß vom entstehenden Gas verdrängt und steigt nach oben in das Ausgleichsgefäß. Auf diese Weise werden die Vorratsgefäße gasdicht verschlossen.

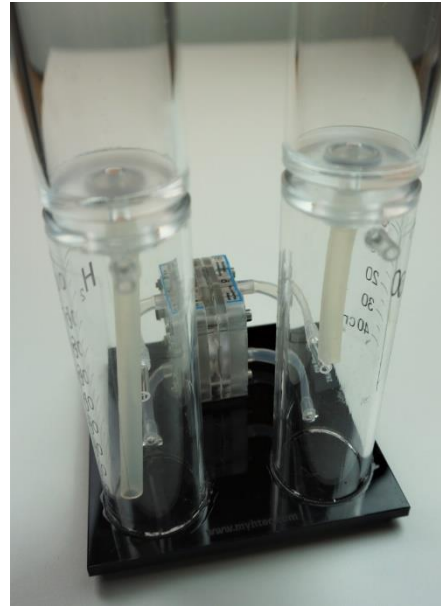


Abb.: zusammengebauter Elektrolyseur

An die Vorratsgefäße müssen außerdem noch zwei weitere Schläuche angebracht werden, welche das entstehende Gas aus dem Vorratsgefäß abführen. Diese sollten vor Beginn der Elektrolyse mit der Schlauchklemme verschlossen werden, um Gasverluste zu vermeiden

Über die Adapter (L2-06-210/211) für die Sicherheitskabel kann der Elektrolyseur mit dem Stromkreis, bzw. mit der Grundplatte verbunden werden. Dabei findet auf der roten Anodenseite (Pluspol) die Oxidation, und auf der schwarzen Kathodenseite (Minuspol) die Reduktion, also die Wasserstoffentstehung, statt.

Sicherheitshinweise

Allgemein

- Alle leXsolar Module sollten mit Vorsicht behandelt werden
- Es sind alle vor Ort etablierten Sicherheitskonzepte und -aushänge zu beachten
- Es gelten alle gängigen Sicherheitsvorschriften im Umgang mit elektrischem Strom
- Schüler und Studenten sind im Umgang mit den leXsolar Produkten zu unterweisen und sollten nicht allein experimentieren.
- leXsolar Module dürfen nicht auseinandergenommen werden.
- Bei eventuellen Beschädigungen von Modulen kontaktieren Sie den zuständigen Verantwortlichen und stellen sie die Arbeit am Experiment ein. Beschädigte Module können bei leXsolar nachbestellt werden.

H₂ Storage Modul

- Die Einzelteile des H₂ Storage Moduls sind entzündlich und das Modul darf nicht auseinandergenommen werden.
- *Hinweis:* Das H₂ Storage Modul wird leer ausgeliefert und sollte auch nur leer transportiert werden
- Berührungen mit kaputten Teilen vermeiden
- Keinen Temperaturen über 50 °C oder offenen Flammen aussetzen
- Von Kindern fernhalten
- Folgen Sie beim Arbeiten mit dem H₂ Storage Modul den Anweisungen der Anleitung
- Das Modul sollte direkt nach der Nutzung wieder von den anderen Modulen getrennt werden
- Laden sie das H₂ Storage Modul nur mit dem dafür vorgesehenen H₂ Charger (1200-07)
- Das H₂ Storage Modul darf nicht über den Hausmüll entsorgt werden!

Wasserstoff



H220 Extrem entzündbares Gas.

H280 Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.

P210 Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellenarten fernhalten. Nicht rauchen.

P377 Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.

P381 Bei Undichtigkeit alle Zündquellen entfernen.

P403 An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.

Sauerstoff



H270 Extrem entzündbares Gas.

H280 Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.

P244 Druckminderer frei von Fett und Öl halten.

P220 Von Kleidung und anderen brennbaren Materialien fernhalten

P370+376 Bei Brand: Undichtigkeit beseitigen, wenn gefahrlos möglich.

P403 An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.

III. Experimentiersektion

Musterlösungen der Experimente

Die ausgefüllten Formulare des Lehrerheftes geben eine Darstellung von zu erwartenden Ergebnissen der Experimente und zeigen Antwortmöglichkeiten für die Fragestellungen der Auswertung. Die dargestellten Lösungen sind als Richtlinie zu verstehen. Jeder Lehrer sollte selbst entscheiden, welche Ergebnisse er von den Schülern fordert.

Als Hilfestellung für den Lehrer wurden zusätzliche Kommentare zu den jeweiligen Aufgaben in Klammern angegeben. Bei einigen Fragestellungen ist es außerdem notwendig, die Antworten auf einem weiteren Blatt zu ergänzen, wenn der zur Verfügung gestellte Platz nicht ausreicht.

Die Zuordnung der einzelnen Experimente zu den Klassenstufen variiert je nach Lehrplan. Details der Einsatzmöglichkeiten sind bei jedem Versuch angegeben. Für einige Experimente gibt es verschiedenen Altersgruppen angepasste Versuchsanordnungen. Der phänomenologische Teil der Versuche ist geeignet für jüngere Klassenstufen, die Versuche zur Leistungsmessung sind vor allem für ältere Schüler (ab Klasse 9) geeignet, da teilweise physikalische und mathematische Grundlagen vorausgesetzt werden. Die Anleitungen liegen alle als Word-Datei vor, so dass sie nach eigenem Ermessen geändert und angepasst werden können.

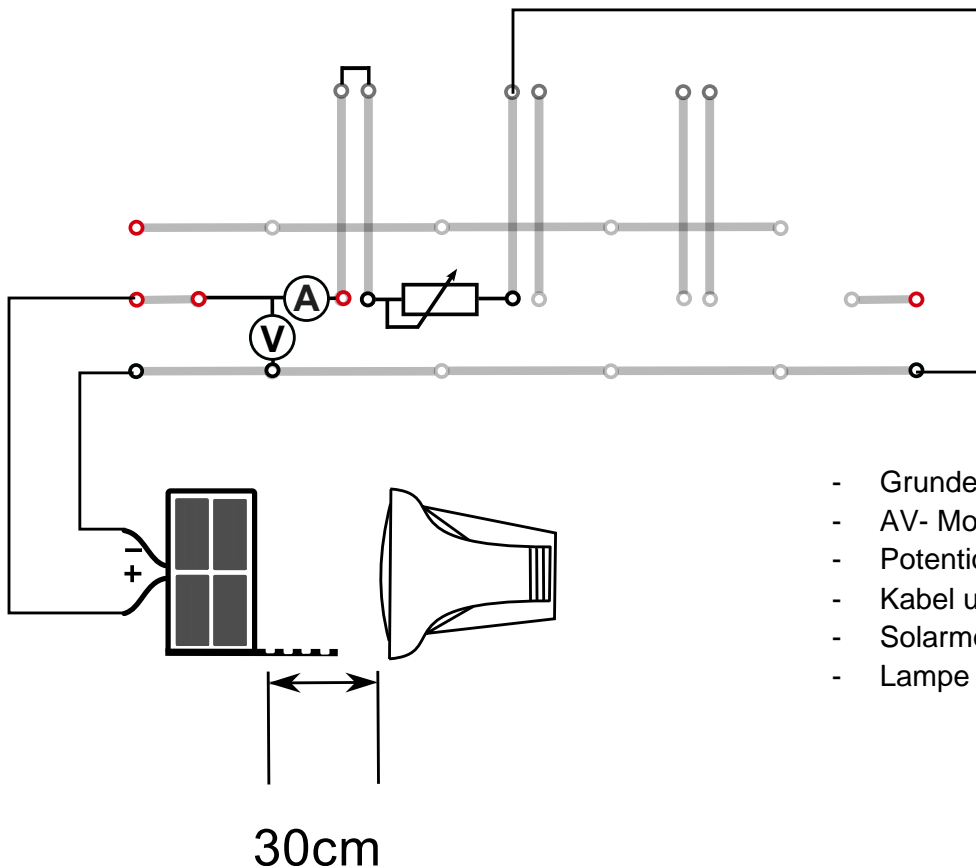
1.1 U-I Kennlinie des Solarmoduls

Aufgabe

Nehmen Sie die U-I Kennlinie des Solarmoduls auf und interpretieren Sie deren Verlauf.

Aufbau

Benötigte Geräte



- Grundeinheit
- AV- Modul
- Potentiometermodul
- Kabel und Kurzschlussstecker
- Solarmodul + Fuß
- Lampe

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stellen Sie das Potentiometer auf den maximalen Widerstand. Stellen Sie das Solarmodul senkrecht zur Tischplatte und frontal zur Lampe in einem Abstand von 30 cm auf, so dass es vollständig beschienen werden kann. Die Lampe soll parallel zur Tischplatte ausgerichtet werden.
2. Messen Sie nun die Stromstärke, während Sie den Widerstand am Potentiometer verringern. Um sinnvolle Messwerte zu erhalten, sollten Sie einen Messwert immer dann aufnehmen, wenn sich die Stromstärke um etwa 10 mA erhöht oder sich die Spannung um ca. 0,5 V gegenüber dem vorherigen Messwert verringert hat. Messen Sie ebenfalls die Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.
3. Berechnen Sie die Leistung des Solarmoduls für jeden Messpunkt.



1.1 U-I Kennlinie des Solarmoduls

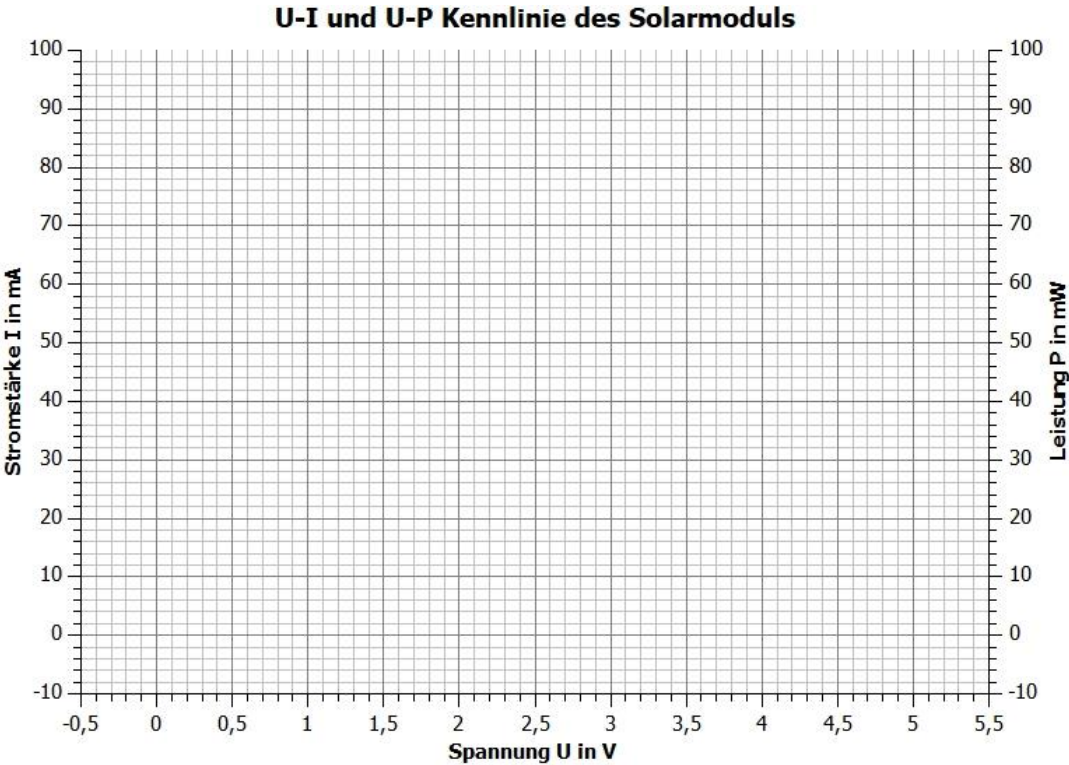
Messwerte

| | | | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | | | |

Auswertung

- 1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das U-I und das U-P Diagramm und zeichnen Sie den zugehörigen Graphen.



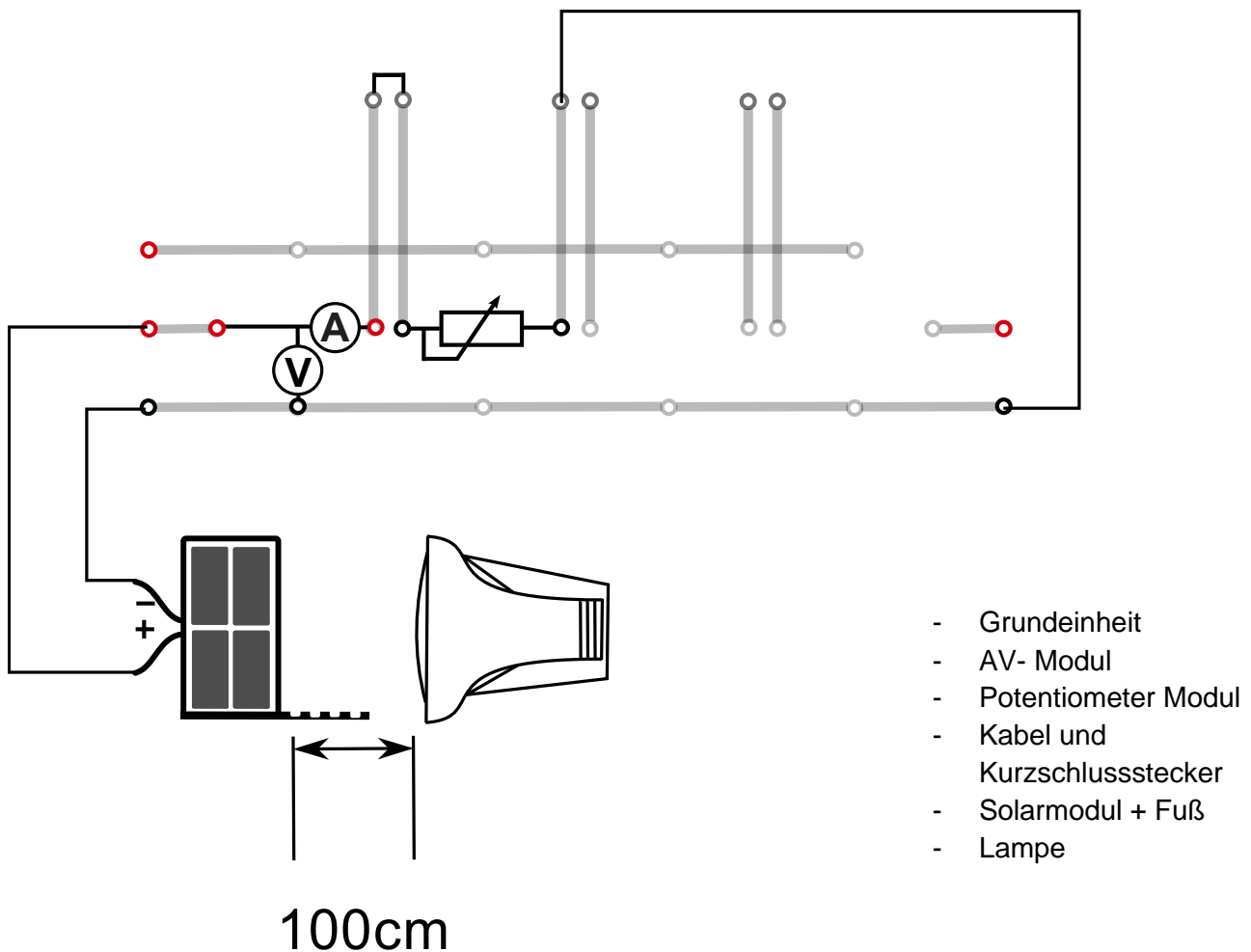
1.2 U-I Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

Aufgabe

Nehmen Sie die U-I Kennlinie unter einer geringeren Beleuchtungsstärke als in Experiment 1.1 auf.

Aufbau

Benötigte Geräte



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stellen Sie das Potentiometer auf den maximalen Widerstand. Stellen Sie das Solarmodul senkrecht zur Tischplatte und frontal zur Lampe in einem Abstand von 100 cm auf, sodass es vollständig beschienen werden kann.
2. Messen Sie nun die Stromstärke, während Sie den Widerstand am Potentiometer verringern. Um sinnvolle Messwerte zu erhalten, sollten Sie einen Messwert immer dann aufnehmen, wenn sich die Spannung um ca. 0,25 V gegenüber dem vorherigen Messwert verringert hat. Messen Sie ebenfalls die Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.
3. Berechnen Sie die Leistung des Solarmoduls für jeden Messpunkt.



1.2 U-I-Kennlinie des Solarmodells in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

Messwerte

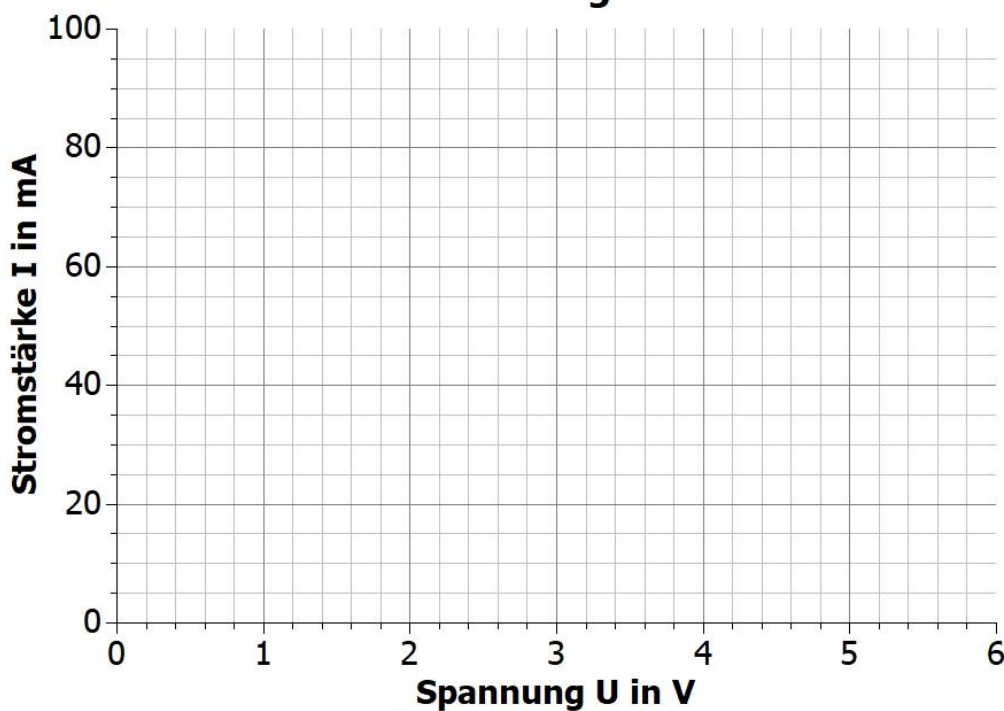
| | | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | | |

Auswertung

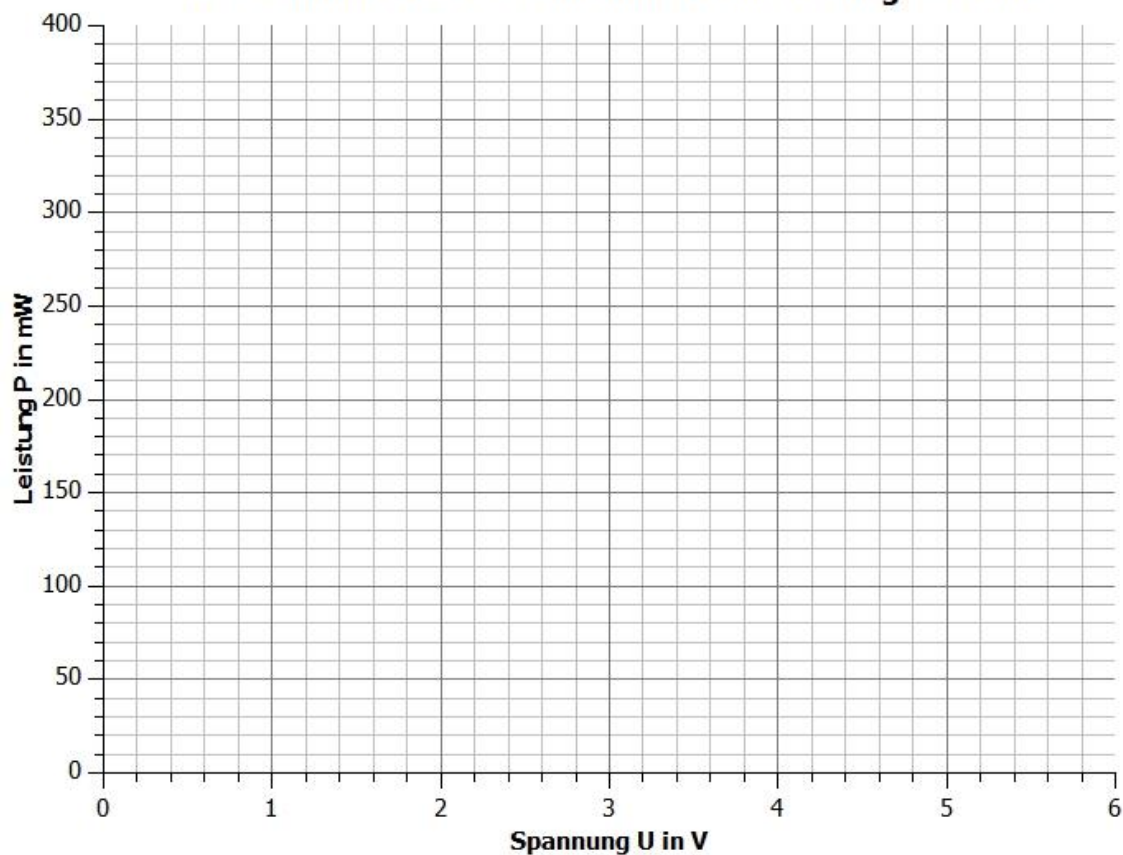
Vergleichen Sie die U-I Kennlinie und die U-P Graphen.

U-I Kennlinie bei verschiedenen Beleuchtungsstärke





U-P Kennlinie bei verschiedenen Beleuchtungsstärken



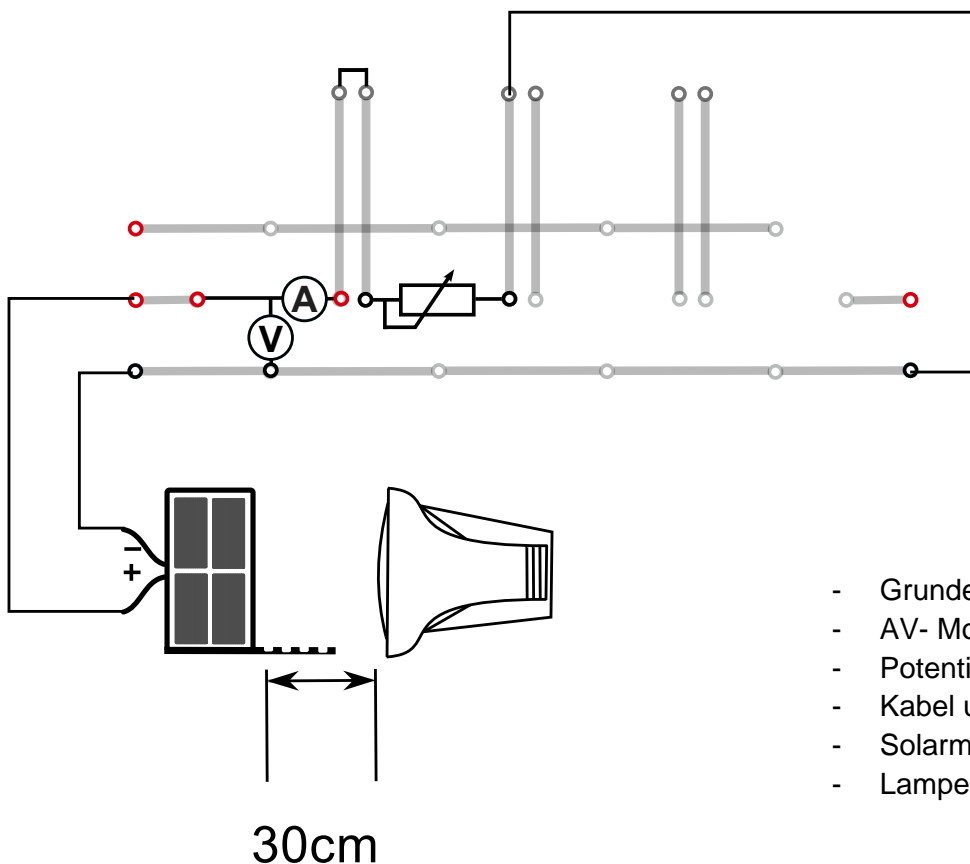
1.3 U-I Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur

Aufgabe

Nehmen Sie die U-I Kennlinie unter einer höheren Temperatur als in Experiment 1.1 auf.

Aufbau

Benötigte Geräte



- Grundeinheit
- AV- Modul
- Potentiometer Modul
- Kabel und Kurzschlussstecker
- Solarmodul + Fuß
- Lampe

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Stellen Sie das Potentiometer auf den maximalen Widerstand. Stellen Sie das Solarmodul senkrecht zur Tischplatte und frontal zur Lampe in einem Abstand von 30 cm auf, so dass es vollständig beschienen werden kann. Die Lampe soll parallel zur Tischplatte ausgerichtet werden. Bescheinen Sie das Solarmodul vor dem Experiment für 10 min. Sollten Sie dieses Experiment direkt nach Versuch 1.1 durchführen, bescheinen Sie das Solarmodul für 5 min. Die Temperatur auf der Oberfläche des Solarmoduls sollte nun bei ca. 45 °C liegen.
2. Messen Sie nun die Stromstärke, während Sie den Widerstand am Potentiometer verringern. Um sinnvolle Messwerte zu erhalten, sollten Sie einen Messwert immer dann aufnehmen, wenn sich die Stromstärke um etwa 20 mA erhöht oder sich die Spannung um ca. 0,5 V gegenüber dem vorherigen Messwert verringert hat. Messen Sie ebenfalls die Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.



1.3 U-I Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur

Aufgaben

1. Messen Sie die Spannung und die Stromstärke und berechnen Sie die Leistung der Solarzelle. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in die nachfolgende Tabelle ein.
2. Vergleichen Sie ihre Ergebnisse mit denen, aus Experiment 1.1 und zeichnen Sie die Graphen für die U-I und die P-U Kennlinie
3. Interpretieren Sie die Ergebnisse
4. Wie kann der Unterschied in der Leistung erklärt werden?

Messwerte

1.:

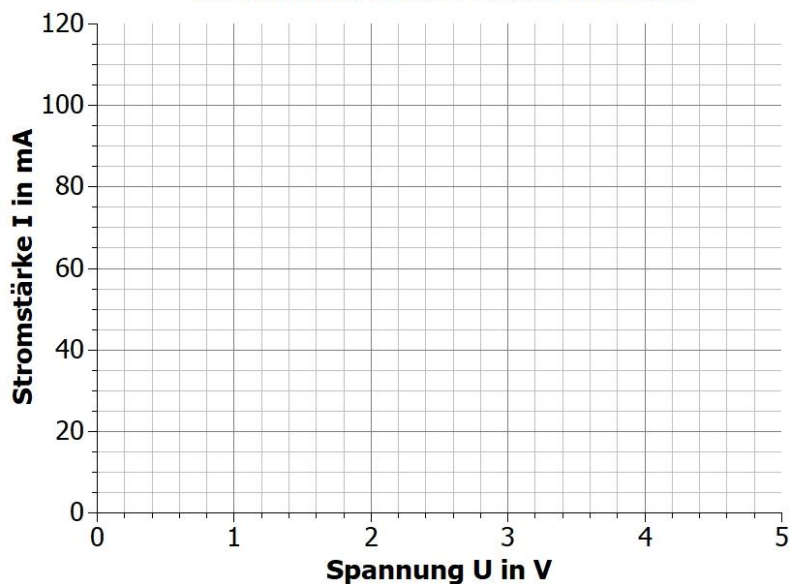
| | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | |

Auswertung

2.:

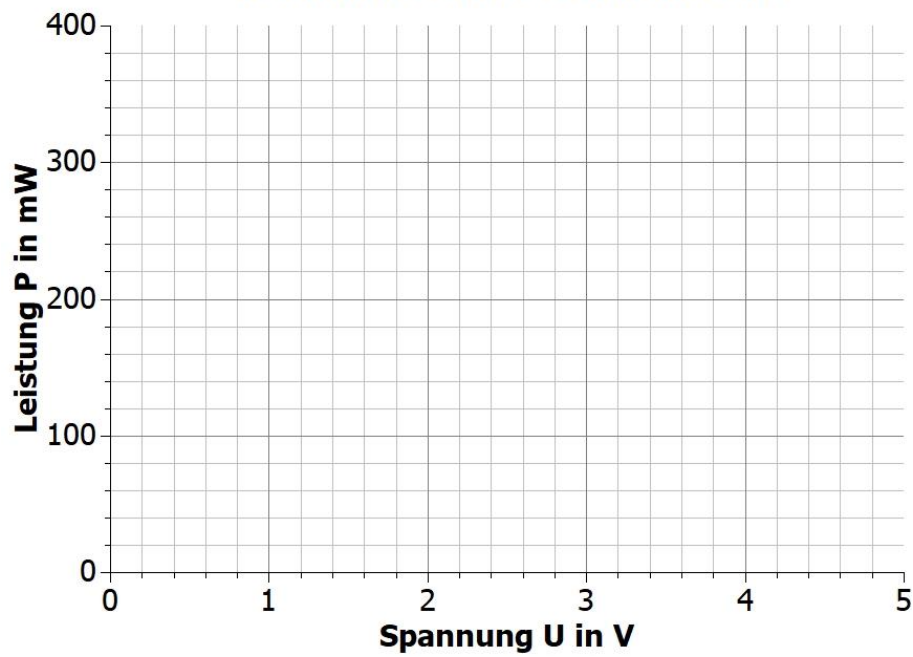
Temperaturabhängigkeit der U-I Kennlinie eines Solarmoduls





1.3 U-I Kennlinie des Solarmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur

Temperaturabhängigkeit der I-U Kennlinie einer Solarmoduls



3.:

4.:

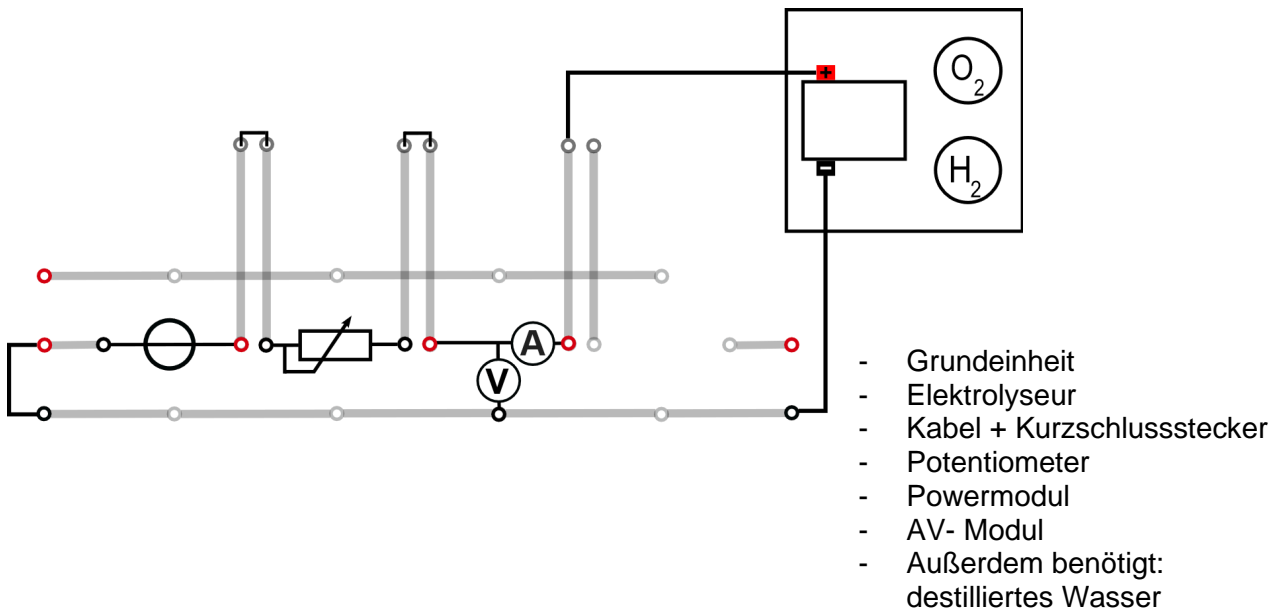
2.1 Wasserstoffproduktion mit dem Elektrolyseur

Aufgabe

Untersuchen Sie die Eigenschaft des Elektrolyseurs, Wasser in seine Bestandteile zu teilen.

Aufbau

Benötigte Geräte



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Befüllen Sie die Vorratsgefäße des Elektrolyseurs mit destilliertem Wasser.
3. Stellen Sie die Spannung am Powermodul auf 4,5 V und den Widerstand am Potentiometer auf 5 Ω
4. Wieviel Wasserstoff lässt sich in fünf Minuten herstellen?
5. Beobachten Sie wieviel Volumen an Wasserstoff und Sauerstoff hergestellt wird.

Hinweis: Schließen Sie niemals das PowerModul direkt an den Elektrolyseur an. Verwenden Sie immer das Potentiometer und das AV- Modul, um den Elektrolyseur zu betreiben.

Auswertung

$V_{H_2} =$

$V_{O_2} =$

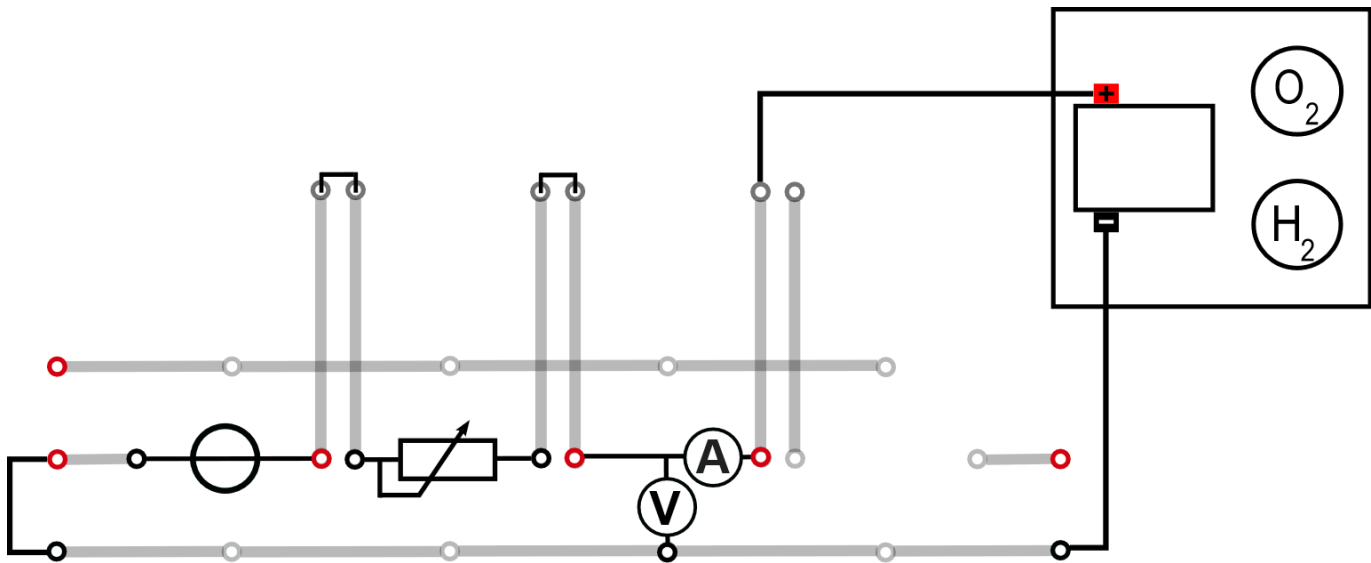
Welche Beobachtung machen Sie beim Betrachten der Füllstände?

2.2 U-I Kennlinie des Elektrolyseurs

Aufgabe

Nehmen Sie die U-I Kennlinie des Doppelzellenelektrolyseurs auf.

Aufbau



Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Elektrolyseur
- Kabel + Kurzschlussstecker
- Potentiometer
- Powermodul
- AV- Modul
- Außerdem benötigt: destilliertes Wasser



2.2 U-I Kennlinie des Elektrolyseurs

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Befüllen Sie die Vorratsgefäße des Elektrolyseurs mit destilliertem Wasser.
3. Stellen Sie die Spannung am Powermodul auf 4,5 V und schalten Sie es ein.
4. Geben Sie sich sinnvolle Werte für die Spannung vor und messen Sie die Stromstärke. Ändern Sie dazu zunächst den 100 Ω Widerstand und zur Feineinstellung den 10 Ω Widerstand.
5. Tragen Sie Ihre Messwerte in eine Tabelle ein.

Aufgabe

1. Tragen Sie die Werte in die Tabelle und das abgebildete Diagramm ein.
2. Interpretieren Sie die U-I Kennlinie des Elektrolyseurs.

Auswertung

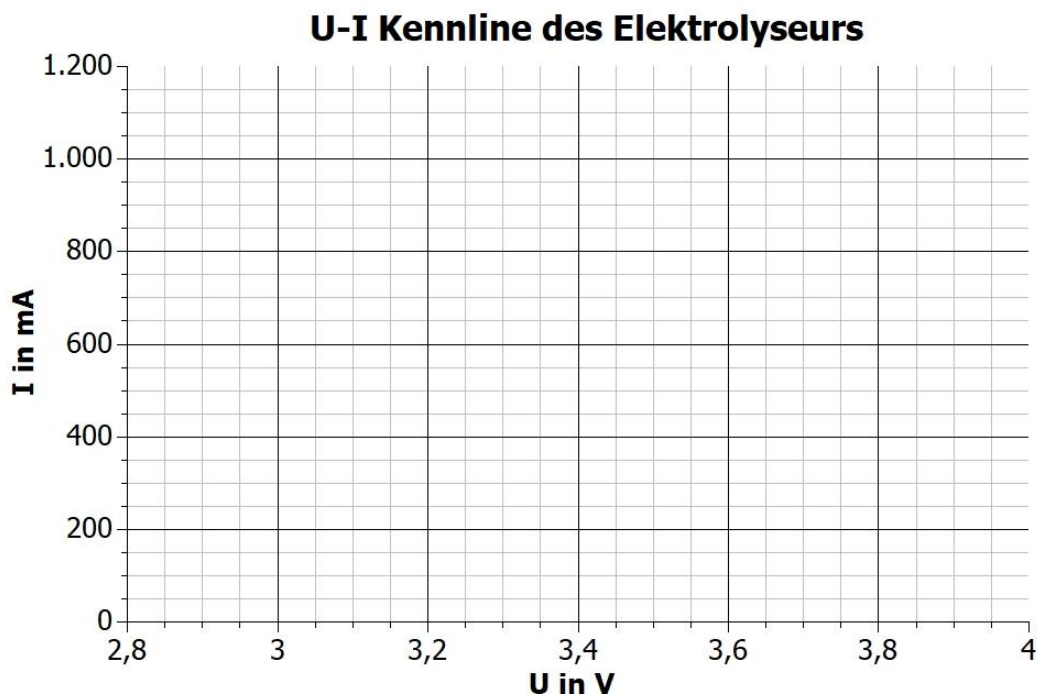
| | | | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | | |



2.2 U-I Kennlinie des Elektrolyseurs

Diagramm



Auswertung

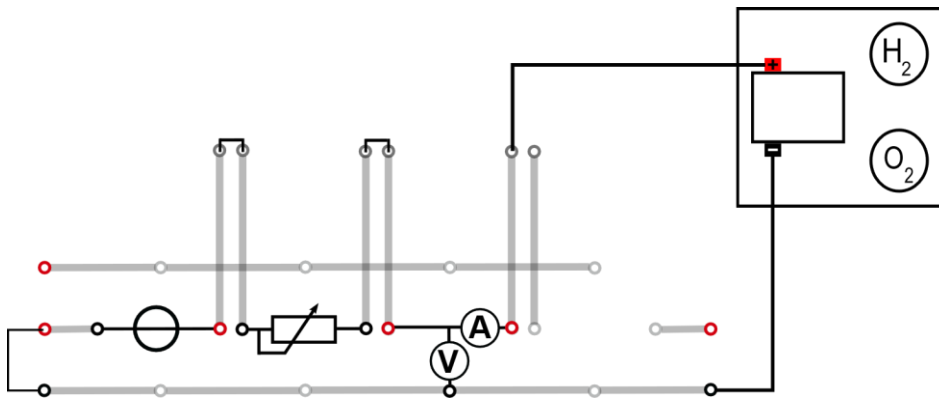
2.3 Faraday und Energiewirkungsgrad des Elektrolyseurs

Aufgabe

Ermitteln Sie den Faraday und Energiewirkungsgrad des Elektrolyseurs.

Aufbau

Benötigte Geräte



- Grundeinheit
- Elektrolyseur
- Powermodul
- Potentiometer
- AV- Modul
- Kabel + Kurzschlussstecker
- Stoppuhr

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Befüllen Sie die Vorratsgefäße des Elektrolyseurs mit destilliertem Wasser.
3. Stellen Sie am Powermodul 4,5 V ein und am Potentiometer 5 Ω .
4. Messen Sie Stromstärke, Spannung und Zeit, um 10 ml Wasserstoff herzustellen.

Messwerte

t =
U =
I =
 V_{H_2} = 10 ml



2.3 Faraday und Energiewirkungsgrad des Elektrolyseurs

Auswertung

1. Der FARADAY-Wirkungsgrad wird mit Hilfe folgender Formel berechnet:

$$\eta = V_{\text{H}_2} / V_{\text{H}_2\text{theoretisch}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{theoretisch}} = I \cdot t \cdot V_m / Q_m$$

$V_m = 24 \text{ l mol}^{-1}$ (molares Volumen H₂ bei 20 °C, Normaldruck)

$Q_m = 192\,968 \text{ C mol}^{-1}$ (stoffbezogene Ladung)

2. Der Energiewirkungsgrad wird mit Hilfe folgender Formel berechnet:

$$\eta = H_{0,\text{H}_2} \cdot V_{\text{H}_2} / U \cdot I \cdot t$$

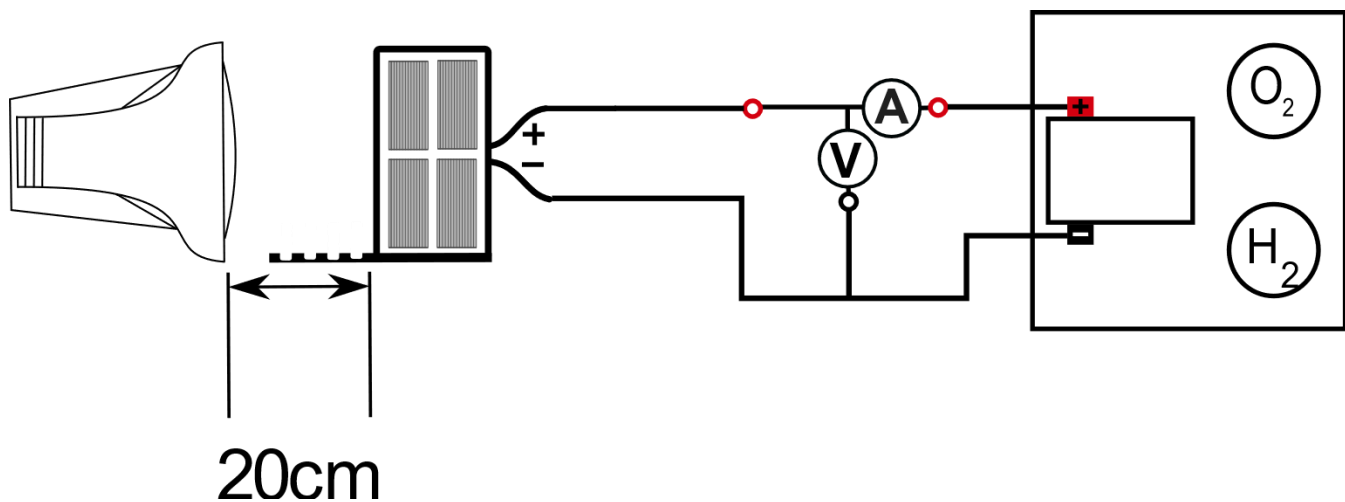
$$H_{0,\text{H}_2} = 11920 \text{ kJ m}^{-3}.$$

2.4 Betreiben des Elektrolyseurs mit der Solarzelle

Aufgabe

Betreiben Sie den Elektrolyseur mit Hilfe der Solarzelle und stellen Sie grünen Wasserstoff her.

Aufbau



Benötigte Geräte

- Elektrolyseur
- AV- Modul
- Lampe
- Solarzelle
- Kabel

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend des Schaltplanes auf.
2. Befüllen Sie den Elektrolyseur mindestens bis zu den angegebenen Markierungen mit destilliertem Wasser.
3. Bescheinigen Sie die Solarzelle und notieren Sie die erzeugte Stromstärke und Spannung.
4. Erstellen Sie eine Tabelle zur Wasserstoff- und Sauerstoffproduktion über die Zeit.



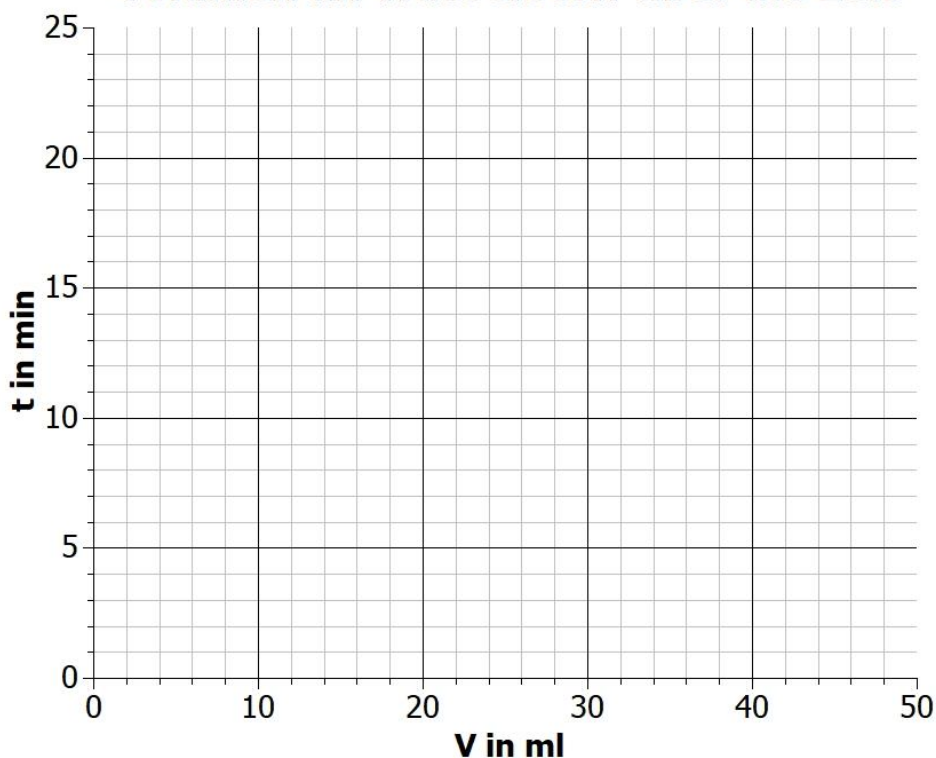
2.4 Betreiben des Elektrolyseurs mit der Solarzelle

Messwerte

| | | | | | | | | | | |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| t in min | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| U in V | | | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | | | |
| V in ml | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| t in min | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| U in V | | | | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | | | | |
| V in ml | | | | | | | | | | |

Volumen an Wasserstoff über die Zeit

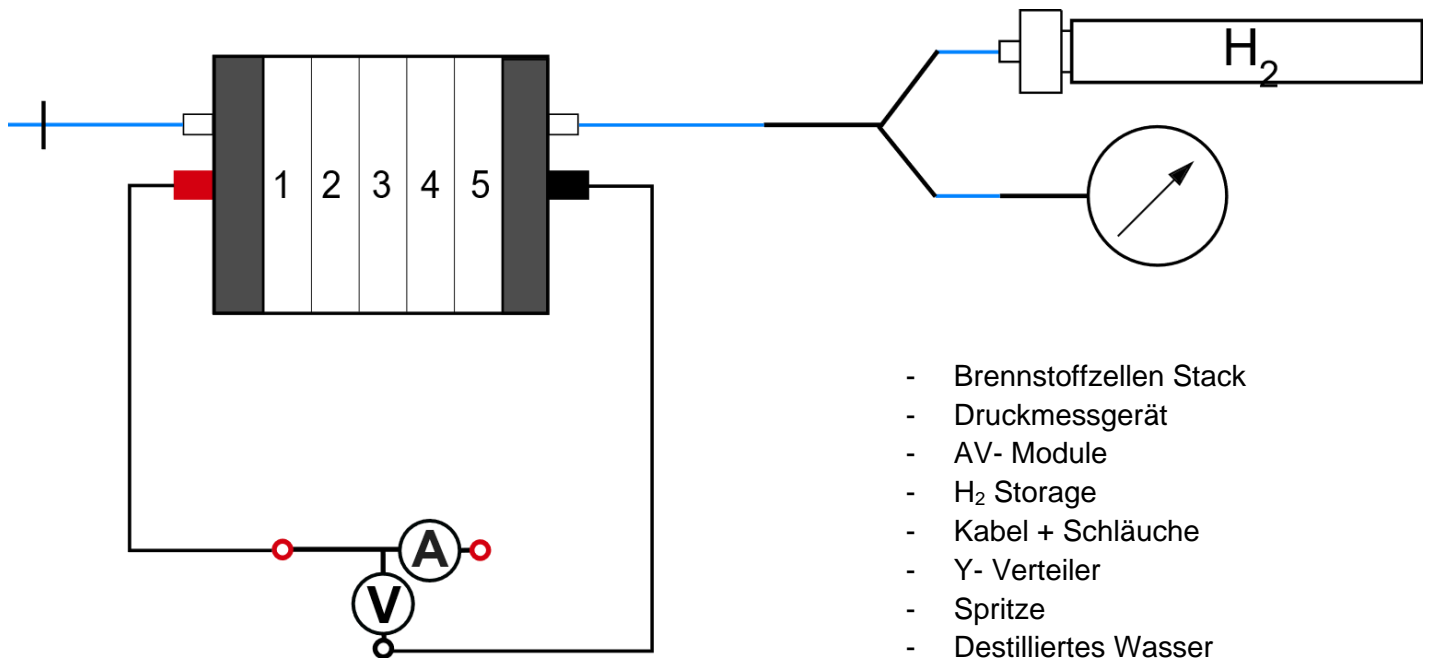


3.1 Einrichten, Anschließen und Überprüfen des Brennstoffzellen Stacks

Aufgabe

Kontrollieren Sie den Aufbau und die Funktionsweise des Brennstoffzellen Stacks.

Aufbau



Benötigte Geräte

- Brennstoffzellen Stack
- Druckmessgerät
- AV- Module
- H₂ Storage
- Kabel + Schläuche
- Y- Verteiler
- Spritze
- Destilliertes Wasser

Durchführung

1. Schrauben Sie den Brennstoffzellen Stack auseinander und kontrollieren Sie den richtigen Sitz und die Anordnung der Einzelzellen.
2. Schrauben Sie den Stack wieder zusammen.
3. Über den Y- Verteiler werden das Druckmessgerät und der Druckminderer des H₂ Storage an die Brennstoffzelle angeschlossen.
4. Verschließen Sie die andere Seite der Brennstoffzelle mit einem Schlauch und der Schlauchklemme.
5. Schließen Sie den H₂ Storage an und Öffnen Sie kurz den Verschluss der Brennstoffzelle auf der anderen Seite.
6. Überprüfen Sie den erreichten Druck.
7. Überprüfen Sie die erreichte Spannung.
8. Spülen Sie den Stack mit destilliertem Wasser und wiederholen Sie Schritt 3-6.



3.1 Einrichten, Anschließen und Überprüfen des Brennstoffzellen Stacks

Aufgabe

1. Wie hoch ist der angezeigte Druck und die Spannung der BSZ?
2. Warum ist es wichtig den Druck zu überprüfen?
3. Welche Probleme haben Sie während der Inbetriebnahme festgestellt?
4. Was für Folgen ergeben sich für BSZ in der industriellen Anwendung?
5. Was für eine Veränderung bemerken Sie am H₂ Storage, wenn Sie den Verschluss der Brennstoffzelle für kurze Zeit öffnen?

Auswertung



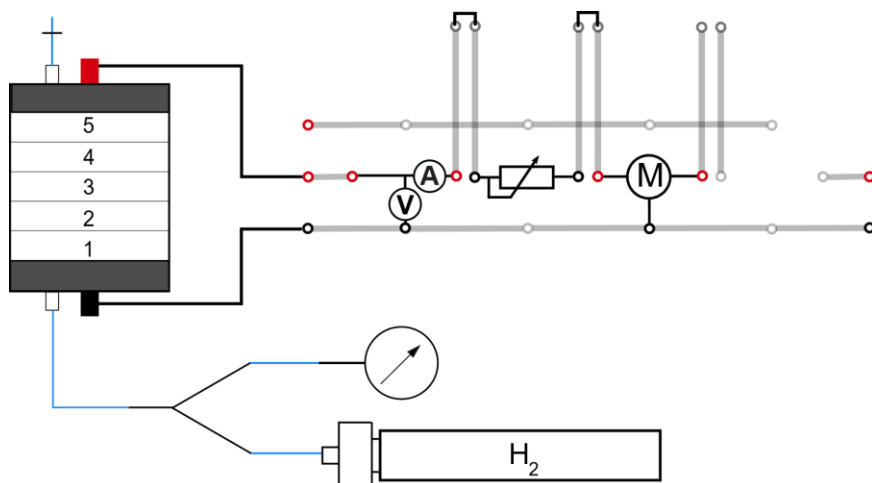
3.2 Betrieb eines Verbrauchers mit dem Brennstoffzellen Stack

Aufgabe

Betreiben Sie das Motormodul mit dem Brennstoffzellen Stack

Aufbau

Benötigte Geräte



- Grundeinheit
- Potentiometer
- AV-Modul
- Motormodul
- Kabel + Kurzschlussstecker
- H₂ Storage
- Druckmesser
- Brennstoffzellen Stack
- Schläuche + Klemme

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch nach dem Schaltplan auf und kontrollieren Sie die Dichtigkeit des Brennstoffzellen Stacks über den Druck.
2. Stellen Sie den Widerstand am Potentiometer Modul auf 20 Ω.
3. Notieren Sie, ob sich der Propeller des Motormoduls dreht.
4. Wiederholen Sie den Versuch mit einer, zwei, drei und vier Zellen im Stack und notieren Sie ihre Ergebnisse.

Auswertung

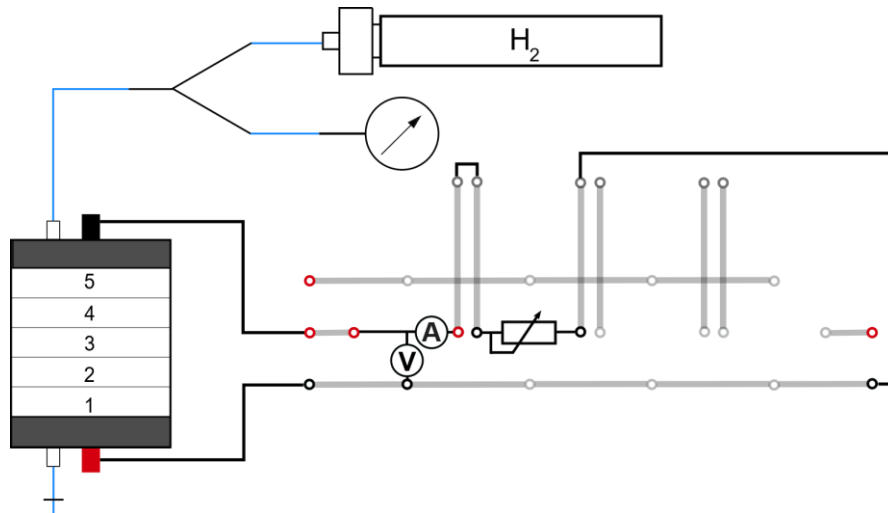
| Anzahl der Zellen | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|-------------------|---|---|---|---|---|
| Motor dreht sich | | | | | |

3.3 U-I Kennlinie des Brennstoffzellen Stacks

Aufgabe

Bestimmen Sie die U – I Kennlinie für den Brennstoffzellen Stack

Aufbau



Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Potentiometermodul
- AV- Modul
- Einzelzelle
- H2 Storage
- Druckmesser
- Kabel+ Kurzschlussstecker

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch nach dem Schaltplan auf und kontrollieren Sie die Dichtigkeit des Brennstoffzellen Stacks über den Druck.
2. Messen Sie die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom, indem Sie den Brennstoffzellen Stack direkt an das AV-Modul anschließen.
3. Stellen Sie den Widerstand am Potentiometer Modul auf 110 Ω .
4. Verringern Sie nun den Widerstand am Potentiometer Modul und notieren Sie die Spannung und die Stromstärke.



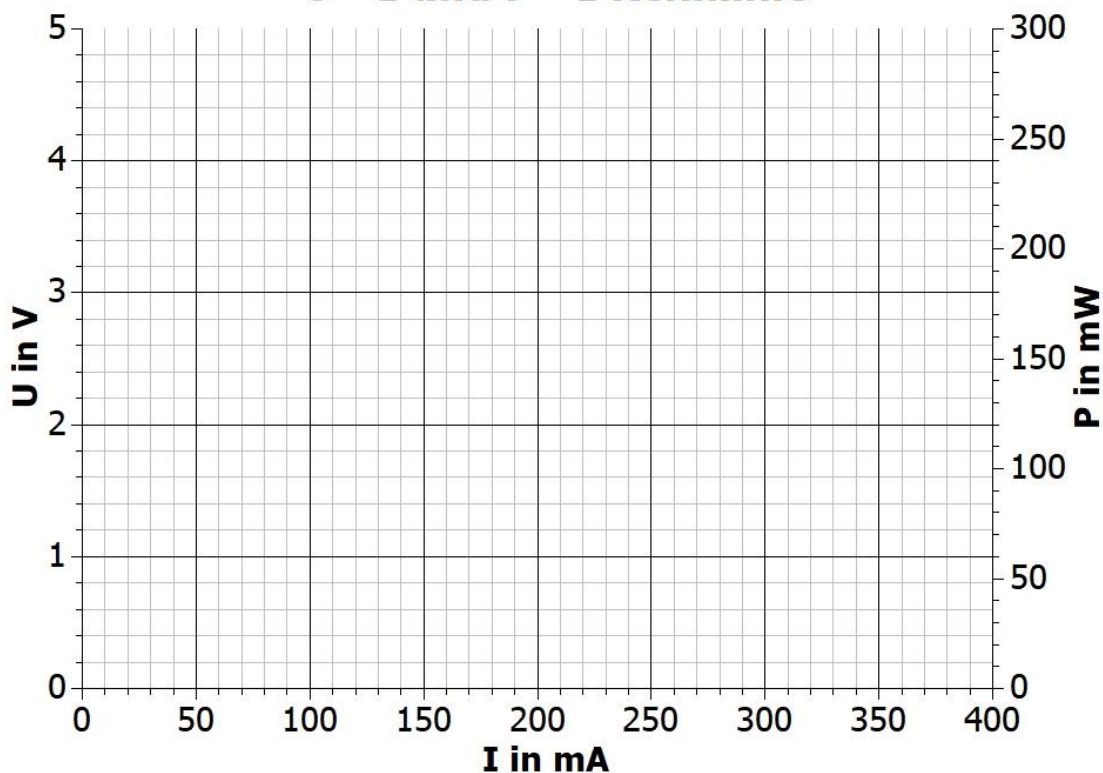
3.3 U-I Kennlinie des Brennstoffzellen Stacks

Auswertung

| | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|
| U in V | | | | | | | |
| I in mA | | | | | | | |
| P in mW | | | | | | | |

U - I und P - I Kennlinie



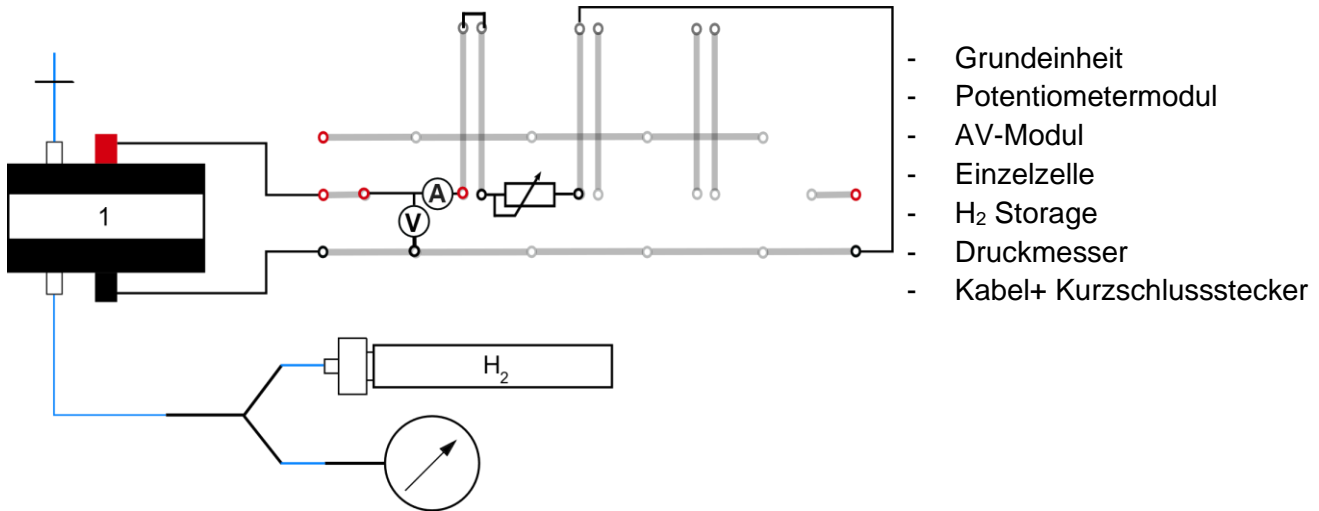
3.4 Untersuchung an der Einzelzelle

Aufgabe

Untersuchen Sie die Stromstärke und Spannung, die mit einer Einzelzelle erzeugt werden kann.

Aufbau

Benötigte Geräte



Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch nach dem Schaltplan auf und kontrollieren Sie die Dichtigkeit des Brennstoffzellen Stacks über den Druck.
2. Über das Potentiometer Modul kann die Spannung in 10 Ω Schritten reduziert und die jeweilige Stromstärke notiert werden.
3. Berechnen Sie die Leistung der Einzelzelle.



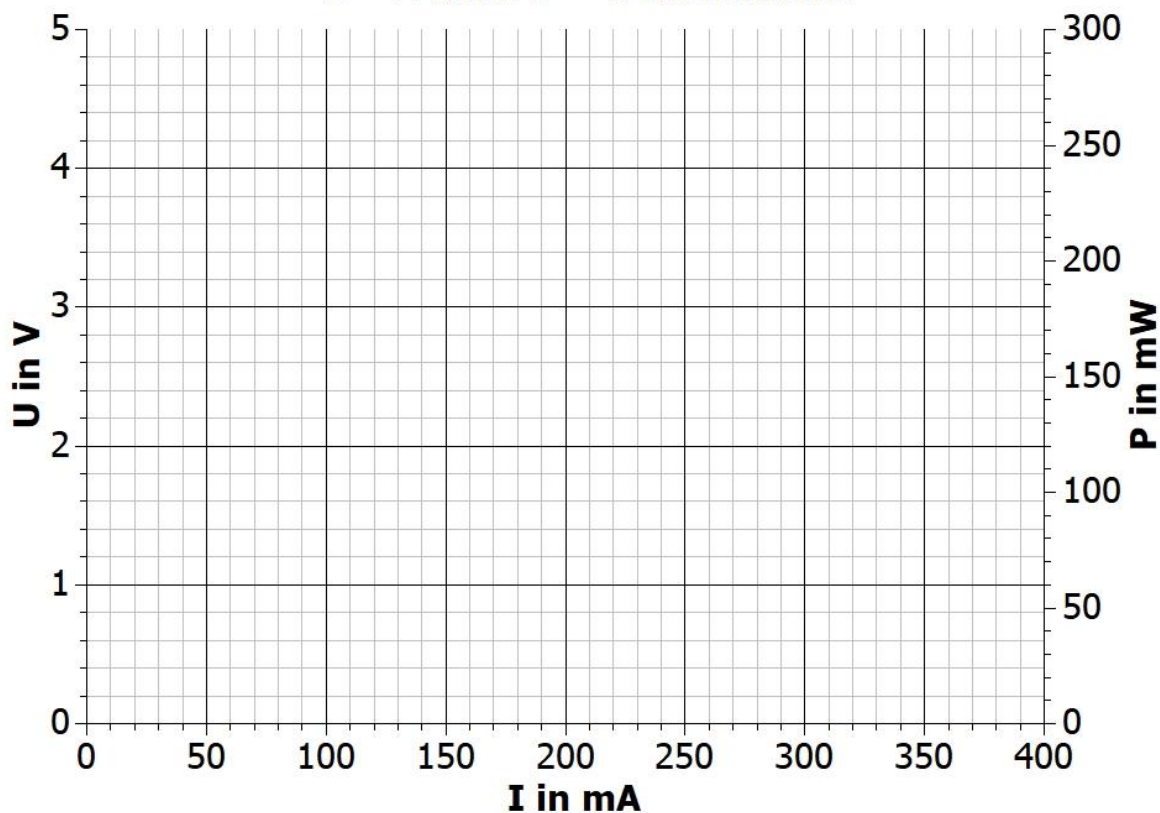
3.4 Untersuchung an der Einzelzelle

Messwerte

| | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|
| U in mV | | | | | | |
| I in mA | | | | | | |
| P in mW | | | | | | |

| | | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|--|
| U in mV | | | | | | |
| I in mA | | | | | | |
| P in mW | | | | | | |

U - I und P - I Kennlinie

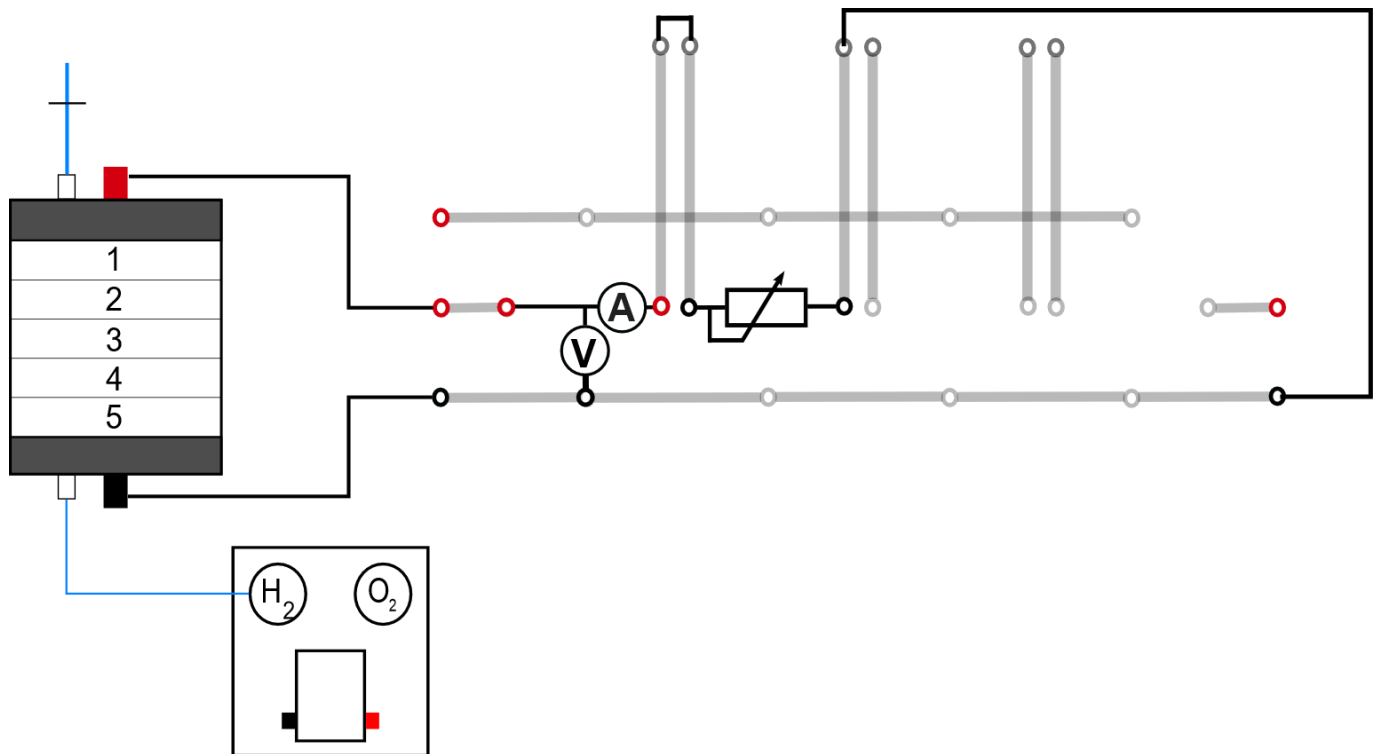


3.5 Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellen Stacks

Aufgabe

Untersuchen Sie den Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzelle.

Aufbau



Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- AV- Modul
- Potentiometermeter
- Elektrolyseur
- Brennstoffzellen Stack
- Powermodul
- Schläuche + Schlauchklemmen
- Kabel + Kurzschlussstecker



3.5 Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellen Stacks

Durchführung

1. Stellen Sie 80 ml Wasserstoff mit dem Elektrolyseur her. Verwenden Sie dazu den Aufbau aus Experiment 2.2.
2. Nachdem Sie den Wasserstoff hergestellt haben, folgen sie dem oben dargestellten Versuchsaufbau.
3. Achten Sie unbedingt darauf, dass der produzierte Wasserstoff nicht entweicht, indem Sie das Vorratsgefäß mit dem langen Silikonschlauch und einer Schlauchklemme verschließen.
4. Spülen (flushen) Sie den Brennstoffzellen Stack kurz mit Wasserstoff und verschließen Sie die Schlauchklemme wieder
5. Kontrollieren Sie die Dichtigkeit des Aufbaus und beobachten Sie für eine Minute, ob sich das Wasserstoffvolumen auch mit geschlossenen Schlauchklemmen verändert.
6. Stellen Sie mit dem Potentiometer einen konstanten Stromfluss von ca. 50 mA ein.
7. Messen Sie nun mit einer Stoppuhr wie lange die Brennstoffzelle benötigt, um ein gewisses Volumen (5 ml oder 10 ml) an Wasserstoff zu verbrauchen.
8. Wiederholen Sie den Versuch mit anderen eingestellten Stromstärken.
9. Zeichnen Sie in ein Diagramm die Abhängigkeit des Volumenstroms an Wasserstoff von der Stromstärke.
10. Was folgt aus der beobachteten Abhängigkeit?

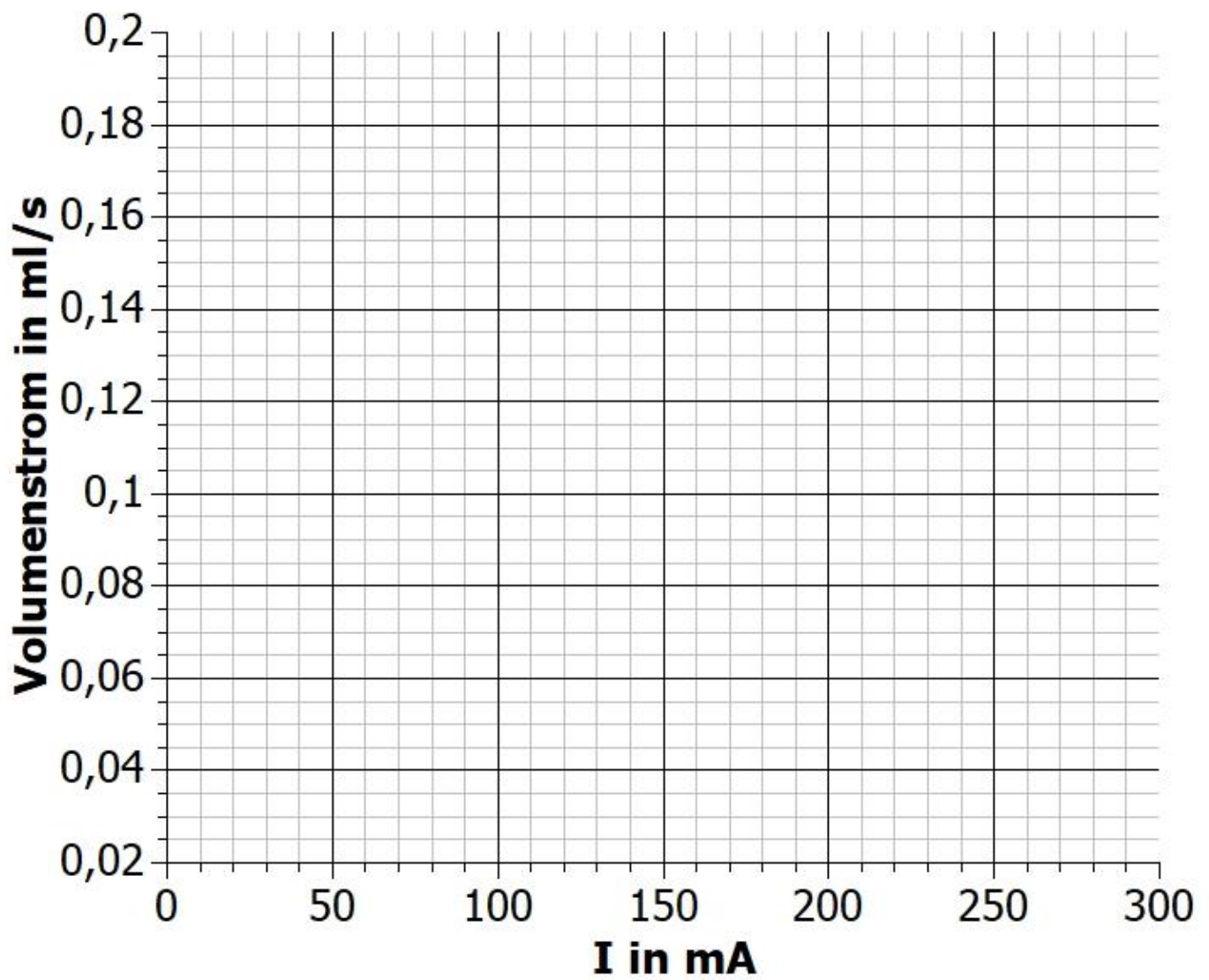
Hinweis: Schließen Sie niemals das PowerModul direkt an den Elektrolyseur an. Verwenden Sie immer das Potentiometer und das AV-Modul, um den Elektrolyseur zu betreiben.

Auswertung

| | | | | | |
|-------------------------|-----|------|------|------|------|
| V in ml | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| I in mA | 254 | 209 | 152 | 103 | 50 |
| t in s | 50 | 70 | 95 | 130 | 130 |
| Volumenstrom in ml/s | 0,2 | 0,14 | 0,11 | 0,08 | 0,04 |



3.5 Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellen Stacks

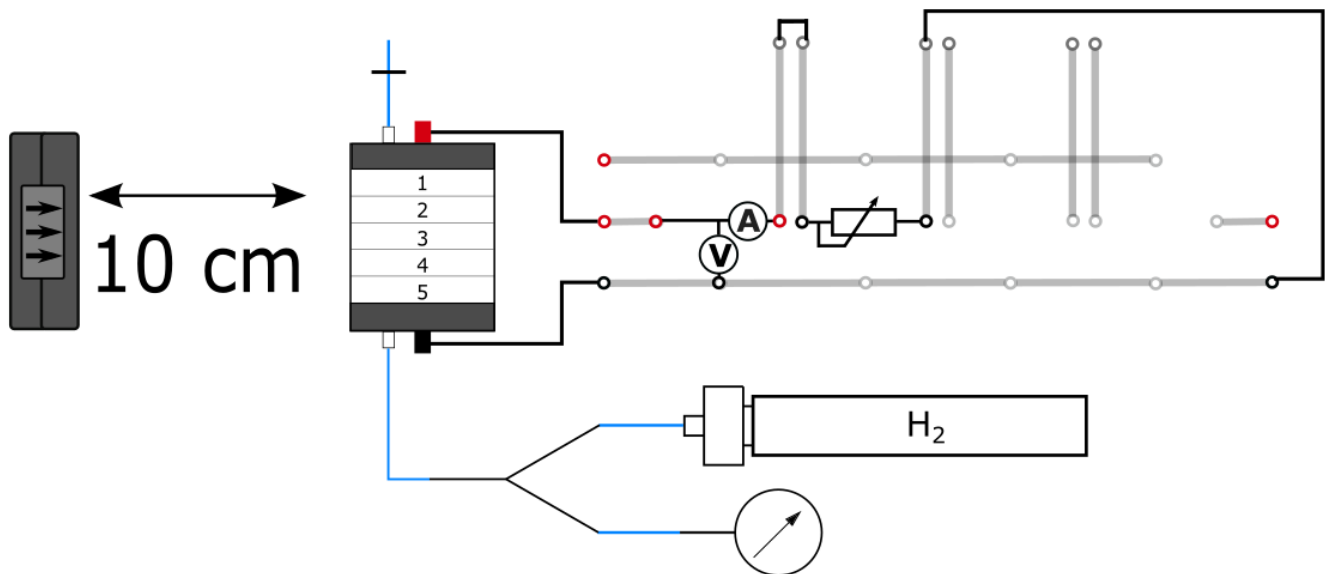


3.6 Untersuchen Sie den Kamineffekt

Aufgabe

Untersuchen Sie die Auswirkung einer aktiven Belüftung auf den Brennstoffzellen Stack.

Aufbau



Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- Potentiometermodul
- AV-Modul
- Brennstoffzellen Stack
- Halterung für BSZ
- H₂ Storage mit Druckminderer
- Druckmesser + Y Verteiler
- Kabel+ Kurzschlussstecker
- Schläuche + Schlauchklemmen
- Winderzeuger + Powermodul



3.6 Untersuchen Sie den Kamineffekt

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend des Versuchsplanes auf.
2. Stellen Sie den Winderzeuger 10 cm vor den Brennstoffzellen Stack auf und verbinden Sie das Powermodul mit dem Winderzeuger und einer Steckdose.
3. Stellen Sie am Powermodul eine Spannung von 8 V ein.
4. Schließen Sie das Druckmessgerät und das H₂ Storage Ventil mittels Y- Verteiler an die Brennstoffzelle an.
5. Verschließen Sie das andere Ende der Brennstoffzelle mit einem kurzen Schlauch und einer Schlauchklemme.
6. Stellen Sie den Brennstoffzellen Stack auf die schwarze Halterung (L2-01-126)
7. Platzieren Sie den Winderzeuger 10 cm vor dem Brennstoffzellen Stack.
8. Stellen Sie am Potentiometermodul einen Widerstand von 5 Ω ein.
9. Spülen Sie die Brennstoffzelle mit Wasserstoff, indem Sie das H₂ Storage Modul anschließen und die Schlauchklemme kurz öffnen.
10. Warten Sie ca. 30 s bis der Brennstoffzellen Stack eine konstante Leistung liefert.
11. Messen Sie die Stromstärke und die Spannung der Brennstoffzelle in waagerechter und in senkrechter Position, jeweils mit eingeschaltetem Winderzeuger und ohne.
12. Spülen Sie den Brennstoffzellen Stack nach jeder Messung kurz mit Wasserstoff.
13. Wiederholen Sie die Messung wenigstens dreimal.

Auswertung

| Abstand | 10 | | 10 | | 10 | |
|------------------|-----------|---|-----------|---|-----------|---|
| BSZ Stellung | waagrecht | | waagrecht | | waagrecht | |
| U in V | | | | | | |
| I in mA | | | | | | |
| U Wind | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 8 |
| P in mW | | | | | | |
| ΔP in mW | | | | | | |

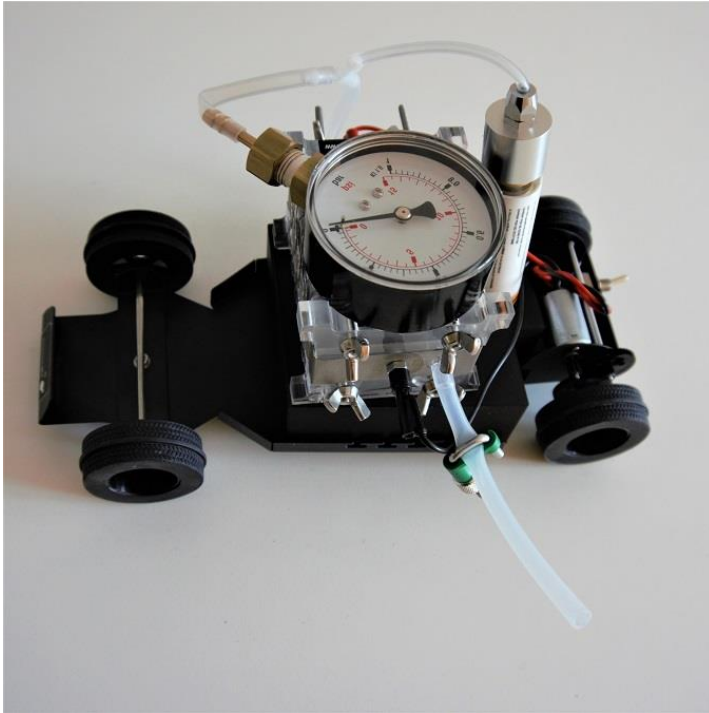
| Abstand | 10 | | 10 | | 10 | |
|------------------|-----------|---|-----------|---|-----------|---|
| BSZ Stellung | senkrecht | | senkrecht | | senkrecht | |
| U in V | | | | | | |
| I in mA | | | | | | |
| U Wind | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 8 |
| P in mW | | | | | | |
| ΔP in mW | | | | | | |

3.7 Betrieb des Automodells mit dem Brennstoffzellen Stack

Aufgabe

Betreiben Sie das Auto Chassis mit dem Brennstoffzellen Stack

Aufbau



Benötigte Geräte

- Auto Chassis
- H₂ Storage + Druckminderer
- Brennstoffzellen Stack
- Fuß für BSZ
- Manometer
- Y-Verteiler
- Schläuche + Schlauchklemme

Durchführung

1. Setzen Sie die BSZ auf die Halterung.
2. Verbinden Sie das Manometer und den Druckminderer mittels Y- Verteiler mit der BSZ.
3. Verschließen Sie den Ausgang des Brennstoffzellen Stack mit einem kurzen Schlauch und einer Schlauchklemme.
4. Schließen Sie den H2 Storage an den Druckminderer an und öffnen Sie kurz die Schlauchklemme.
5. Das Auto Chassis verfügt über einen eigenen „On/Off“ Schalter.

Hinweis:

Dieses Experiment dient in erster Linie zur Demonstration. Es handelt sich nicht um ein reales Modell zur Verbindung von Elektroantrieb und BSZ.

leXsolar GmbH
Strehleener Straße 12-14
01069 Dresden / Germany

Telefon: +49 (0) 351 - 47 96 56 0
Fax: +49 (0) 351 - 47 96 56 - 111
E-Mail: info@lexsolar.de
Web: www.lexsolar.de