



H₂-TRAINER *junior*

Experimente zur Wasserstofftechnik

Lösungen

Vervielfältigung nur
für Unterrichtszwecke in
Verbindung mit
dem H₂-Trainer
junior

Ausgabe 01/2015

IKS Photovoltaik GmbH
An der Kurhessenhalle 16 b
D-34134 Kassel
Tel. 0561 / 9538050
Fax 0561 / 9538051
www.iks-photovoltaik.de
info@iks-photovoltaik.de



Lehrsysteme
Messtechnik
Sonderentwicklungen

Grundlage

Experimente zur Wasserstofftechnik
Arbeitskreis Schulinformation Energie
Frankfurt / Main
Autoren
Viola Franke Johannes Lemke
Thomas Niebur

Autoren

Dipl.-Ing. Holger Kunsch
Michael Schröder

Inhaltsverzeichnis

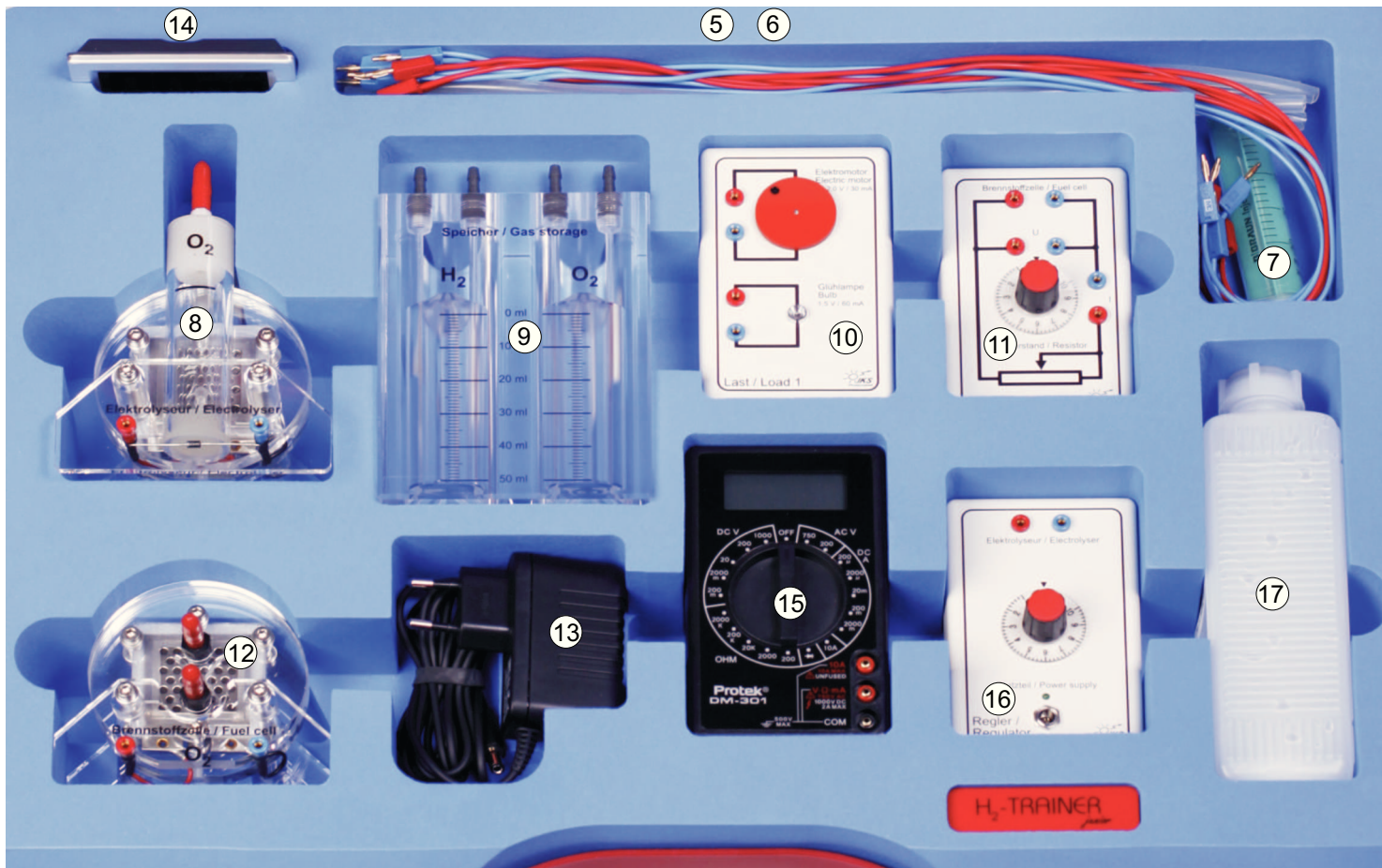
Inhalt und Anordnung im Koffer	1
Vorstellung der einzelnen Komponenten	2
Aufbau des Systems	7
Bestimmungsgemäße Verwendung / Sicherheitshinweise	8
Experimente zur Wasserstofftechnik	
Inbetriebnahme Vorbereitung der einzelnen Geräte für die Experimente	9
Experiment 1 Messung des Volumenverhältnisses der erzeugten Gase	11
Experiment 2 Messung der produzierten Gasmengen pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Stromstärke	12
Experiment 3 Bestimmung von Energie- und Faraday-Wirkungsgrad des Elektrolyseurs	14
Experiment 4 Bestimmung der Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs	16
Experiment 5 Bestimmung von Energie- und Faraday-Wirkungsgrad der Brennstoffzelle	17
Experiment 6 Bestimmung der Spannungs-Strom-Kennlinie der Brennstoffzelle	19
Experiment 7 Betrieb des Elektrolyseurs mit Solarzellen	20

Experiment 8	Betrieb des Elektrolyseurs mit einer Windenergieanlage	22
Außerbetriebnahme	Vorbereitung der einzelnen Geräte für die Aufbewahrung im Koffer	23
Demonstrationsmodelle	25
Weiterführende Experimentiervorschläge	27
Schaltsymbole und Begriffe	28

Inhalt und Anordnung im Koffer

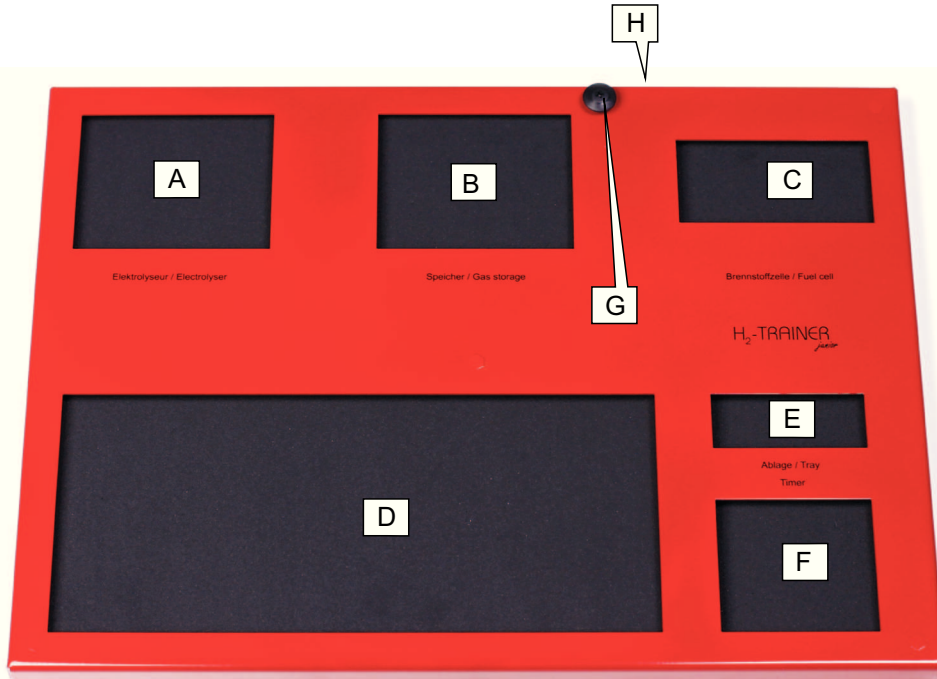


- ① Grundplatte
- ② Halteknopf für Gummischnur (Heftfixierung)
- ③ Anleitungen
- ④ Lösungen
- ⑤ Aufhängung für Grundplatte



- ⑤ 8 Messkabel, 4x rot, 4x blau
- ⑥ 4 Silikonschläuche
- ⑦ Spritze mit Tülle
- ⑧ Elektrolyseur
- ⑨ Gasspeicher
- ⑩ Last 1
- ⑪ Last 2
- ⑫ Brennstoffzelle
- ⑬ Netzteil
- ⑭ Timer
- ⑮ 2 Multimeter (übereinander)
- ⑯ Regler
- ⑰ Flasche mit destilliertem Wasser

Vorstellung der einzelnen Komponenten



Grundplatte ①

Dient zur Aufnahme des Elektrolyseurs ⑧, des Gasspeichers ⑨, der Brennstoffzelle ⑫ sowie der Ablage der Experimentiermodule ⑩, ⑪, ⑯, der Messgeräte ⑮ und des Timers ⑭.

- A Ausparung zum Einsetzen des Elektrolyseurs ⑧
- B Ausparung zum Einsetzen des Gasspeichers ⑨
- C Ausparung zum Einsetzen der Brennstoffzelle ⑫
- D Ablage für Experimentiermodule ⑩ ⑪ ⑯ und Messgeräte ⑮
- E Ablage für Verschlusskappen des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle
- F Ausparung zum Einsetzen des Timers ⑭
- G Halteknopf für Gummischnur zur Fixierung der Hefte ③ ④ im Kofferdeckel
- H Schlitz zur Aufhängung der Grundplatte im Kofferdeckel

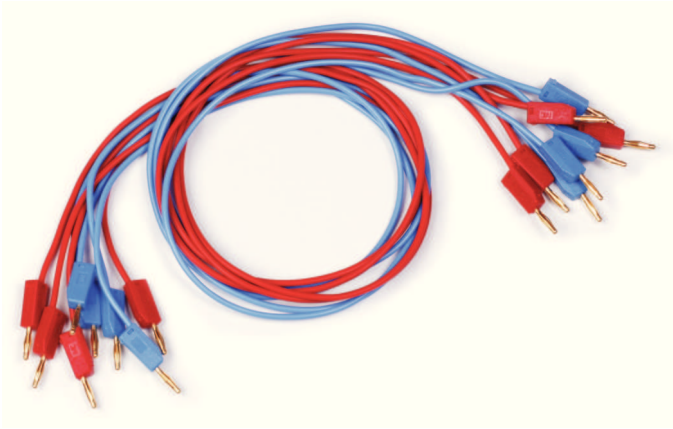


Anleitung ③

Beschreibung der Experimente.

Lösung ④

Hintergrundinformationen und Lösungen.



Messkabel ⑤

4 Stück rot, 4 Stück blau, hochflexible Verbindungsleitungen mit 2 mm Steckern und Abgriffbuchsen. Kontaktflächen vergoldet, Bemessungsstrom max. 10 A.

Maximal zulässige Betriebsspannung 25 V Wechselstrom, 60 V Gleichstrom!



Silikonschläuche ⑥

4 Stück, transparent.

Dienen zur Verbindung des Elektrolyseurs ⑧ mit dem Gasspeicher ⑨ sowie der Brennstoffzelle ⑫ mit dem Gasspeicher ⑨.

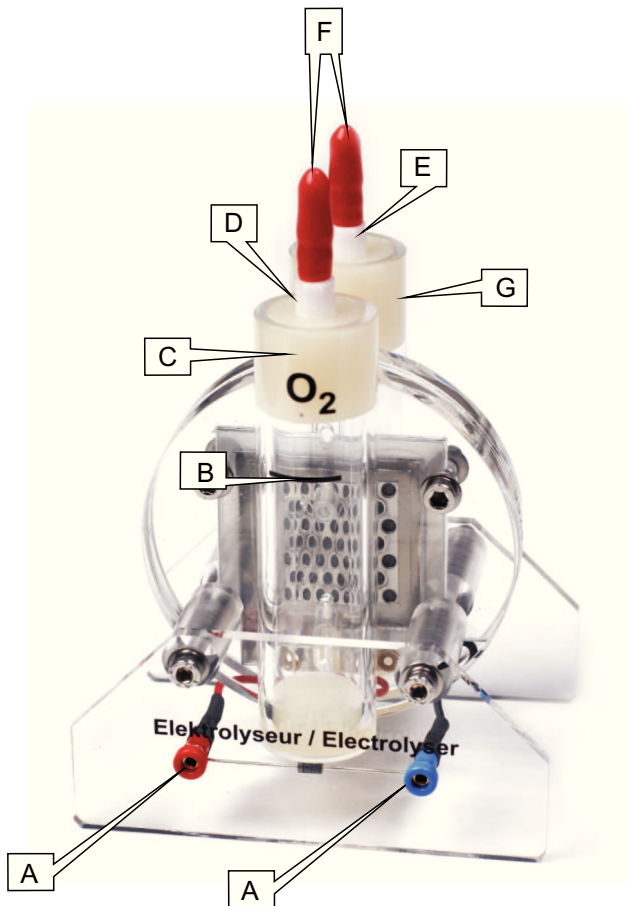


Spritze mit Tülle ⑦

Dient als Saugheber zur Wasserstandsregulierung im Elektrolyseur ⑧ und im Gasspeicher ⑨. Die aufgesetzte Tülle kann in den Anschlussstutzen des Elektrolyseurs ⑧ eingeführt werden. Nur destilliertes Wasser verwenden.

Inhalt 20 ml.

Vorstellung der einzelnen Komponenten



Elektrolyseur (PEM) ⑧

Durch Anlegen einer Spannung an die elektrischen Anschlüsse **A** wird die Elektrolyse in Gang gesetzt. Reines Wasser wird in gasförmigen Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Wasserstoff entsteht an der Kathode (Minus), der Sauerstoff an der Anode (Plus).

Als Kernstück besitzt der Elektrolyseur eine Nafion-Membran, auf der beidseitig die Elektroden als dünne poröse Schichten aufgebracht sind. Auf diese Schichten folgt jeweils ein Metallnetz, das mit einem elektrischen Anschluss verbunden ist (2 mm Anschlussbuchsen **A**).

Die Netzstruktur gewährleistet den Wasser- und Gasaustausch an den Elektroden bei gleichzeitiger, flächiger Verteilung des Stromes. Die Membran dient als fester Elektrolyt, der für Wasserstoffionen durchlässig ist, so dass der Elektrolyseur mit reinem Wasser arbeiten kann.

Die an den Elektroden entstehenden Gase steigen durch das Wasser in den Vorlagebehälter auf und können an den Anschlussstutzen **D** und **E** entnommen werden.

Der Elektrolyseur wird mit destilliertem Wasser gefüllt (**siehe Inbetriebnahme Seite 9**). Das Wasser kann auch nach dem Betrieb im Elektrolyseur verbleiben. Die beiden Anschlussstutzen **D** und **E** sind vor dem Einpacken des Elektrolyseurs in den Koffer sorgfältig mit den Verschlusskappen **F** zu verschließen, damit das destillierte Wasser nicht ausläuft.

Während der Elektrolyse nimmt der Wasservorrat auf der Kathodenseite zu und auf der Anodenseite ab. Sobald der Wasserpegel ca. 5 mm von dem angegebenen Füllstand **B** abweicht, sollte er wieder auf den Füllstand eingestellt werden. Hierzu die Tülle auf die mitgelieferte Spritze aufsetzen, in den Anschlussstutzen **D/E** einführen und destilliertes Wasser bis zum Füllstand **B** absaugen oder auffüllen.

Bitte beachten Sie:

Das destillierte Wasser kann im Elektrolyseur bleiben. Bei Lagerung, Betrieb und Transport vor Frost schützen!

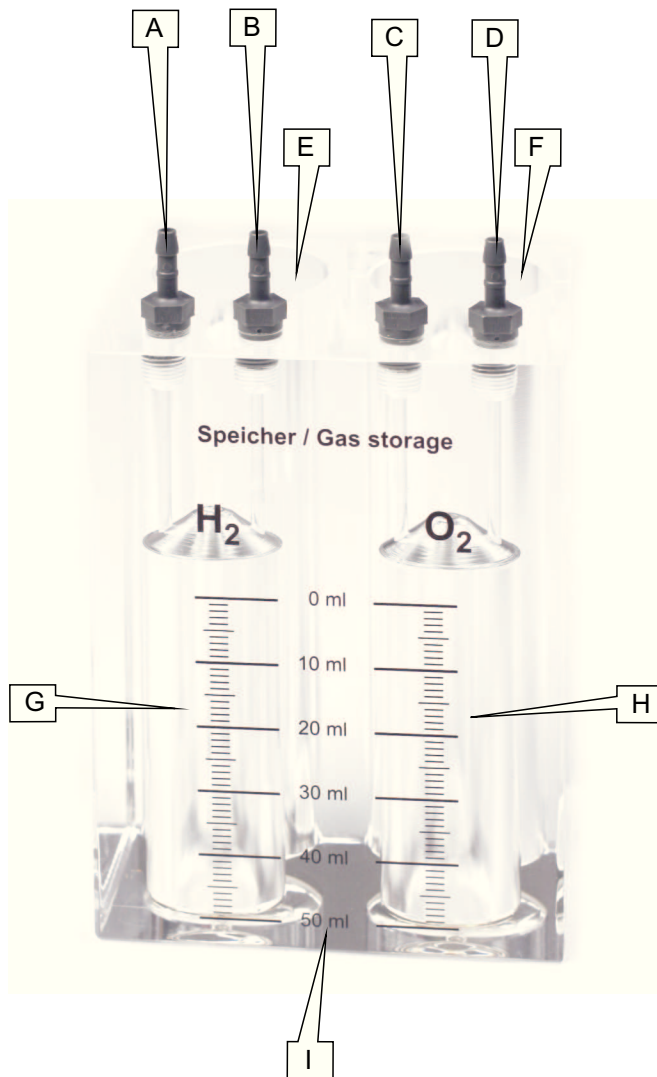
Der Wasserstand darf höchstens + / - 5 mm vom Füllstand **B abweichen.**

Zum Betrieb n u r destilliertes Wasser verwenden!

Der Elektrolyseur darf nicht verkehrt gepolt betrieben werden. Zur Sicherheit befindet sich eine Diode zwischen den Anschlüssen **A.**

Betriebsspannung 1,4-1,9 V Gleichstrom, Betriebsstrom maximal 550 mA.

- A** Anschlussbuchse Plus (Sauerstoffseite O₂) und Anschlussbuchse Minus (Wasserstoffseite H₂)
- B** Füllstandmarke für destilliertes Wasser
- C** Sauerstoffseite O₂ (Anode +)
- D** Anschlussstutzen zur Ableitung des Sauerstoffs
- E** Anschlussstutzen zur Ableitung des Wasserstoffs
- F** Verschlusskappen (2 Stück)
- G** Wasserstoffseite H₂ (Kathode -)



Gasspeicher ⑨

Dient zur Speicherung des mit dem Elektrolyseur ⑧ erzeugten Wasserstoffs und Sauerstoffs. In die Öffnungen **E** und **F** wird destilliertes Wasser bis zum Füllstand **0 ml** aufgefüllt. An den Anschlussstutzen **A** wird die Wasserstoffseite des Elektrolyseurs ⑧, an den Anschlussstutzen **B** wird die Wasserstoffseite der Brennstoffzelle ⑫ angeschlossen. Der Anschlussstutzen **C** wird mit der Sauerstoffseite des Elektrolyseurs, der Anschlussstutzen **D** wird mit der Sauerstoffseite der Brennstoffzelle verbunden.

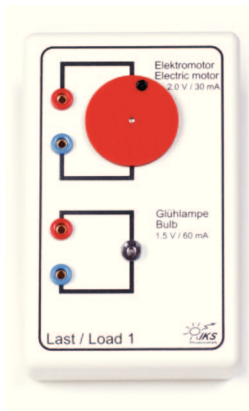
Die Hohlzylinder **G** und **E** (bzw. **H** und **F**) sind am unteren Ende mit einer Bohrung verbunden. Das erzeugte Gas sammelt sich im Hohlzylinder **G** (bzw. **H**) und verdrängt die dort befindliche Wassersäule. Auf der Skala **I** kann die Menge des erzeugten Gases abgelesen werden.

Bitte beachten Sie:

**Wenn eine Füllmenge von 50 ml erreicht ist, den Gaserzeugungsvorgang abbrechen!
Nach Gebrauch Gasspeicher wieder entleeren.**

- A** Anschlussstutzen zur Wasserstoffseite des Elektrolyseurs (H_2)
- B** Anschlussstutzen zur Wasserstoffseite der Brennstoffzelle (H_2)
- C** Anschlussstutzen zur Sauerstoffseite des Elektrolyseurs (O_2)
- D** Anschlussstutzen zur Sauerstoffseite der Brennstoffzelle (O_2)
- E** Einfüllöffnung für destilliertes Wasser
- F** Einfüllöffnung für destilliertes Wasser
- G** Gassammelraum für Wasserstoff (H_2)
- H** Gassammelraum für Sauerstoff (O_2)
- I** Skala Gasmenge

Vorstellung der einzelnen Komponenten



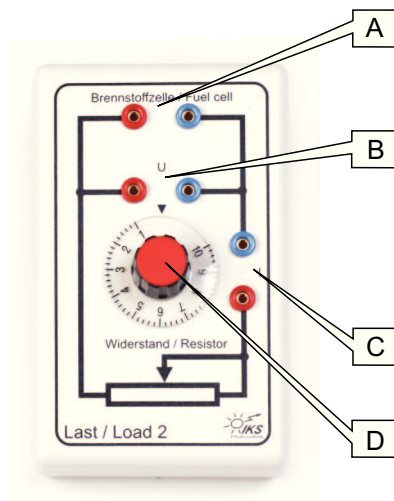
Last 1 ⑩

Elektromotor:

Betriebsspannung max. 2,0 V Gleichstrom
Leerlaufstrom ca. 15 mA bei 1,5 V

Glühlampe:

Betriebsspannung max. 1,5 V Gleichstrom
Stromaufnahme ca. 60 mA bei 1,5 V



Last 2 ⑪

Zur Belastung der Brennstoffzelle ⑫ mit dem Lastwiderstand und zur Messung der Spannung und des Stromes.

Kennwerte Lastwiderstand:

Widerstand 5Ω
Belastbarkeit max. 2 W

- A Anschluss Brennstoffzelle
- B Anschluss Multimeter zur Spannungsmessung
- C Anschluss Multimeter zur Strommessung
- D Drehknopf, Rechtsdrehung erhöht den Widerstand

Brennstoffzelle (PEM) ⑫

Durch Umsetzung von Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt die Brennstoffzelle eine elektrische Spannung, die an den Anschlüssen **A** und **D** abgenommen werden kann. Auf der Seite der Wasserstoffzuleitung (Kathode) entsteht ein negatives, auf der Seite der Sauerstoffzuleitung (Anode) ein positives Potential. Wird an den Anschlüssen ein elektrischer Verbraucher angelegt, fließt elektrischer Strom.

Als Kernstück besitzt die PEM-Brennstoffzelle eine Nafion-Membran-Elektrodeneinheit. An beiden Seiten dieser Einheit befindet sich je ein Metallnetz, das durch seine Struktur den Wasser- und Gasaustausch an den Elektroden sowie die flächige Verteilung des Stroms gewährleistet. Die Metallnetze sind mit den 2 mm Anschlussbuchsen **A** bzw. **D** verbunden.

Auf beiden Seiten der Brennstoffzelle befinden sich je zwei Anschlussstutzen. Die oberen Anschlussstutzen **C** und **E** dienen der Zuleitung der Gase und werden durch Schläuche mit dem Wasserstoff- bzw. Sauerstoffspeicher des Gasspeichers verbunden. Die oberen Anschlussstutzen dienen zum Entlüften der Brennstoffzelle. Die Brennstoffzelle kann in zwei Betriebsarten arbeiten:

Im offenen Betrieb bleiben die Ableitungsstutzen **B** und **F** geöffnet. Dies ist z.B. bei der Entlüftung des Systems während der Inbetriebnahme notwendig.

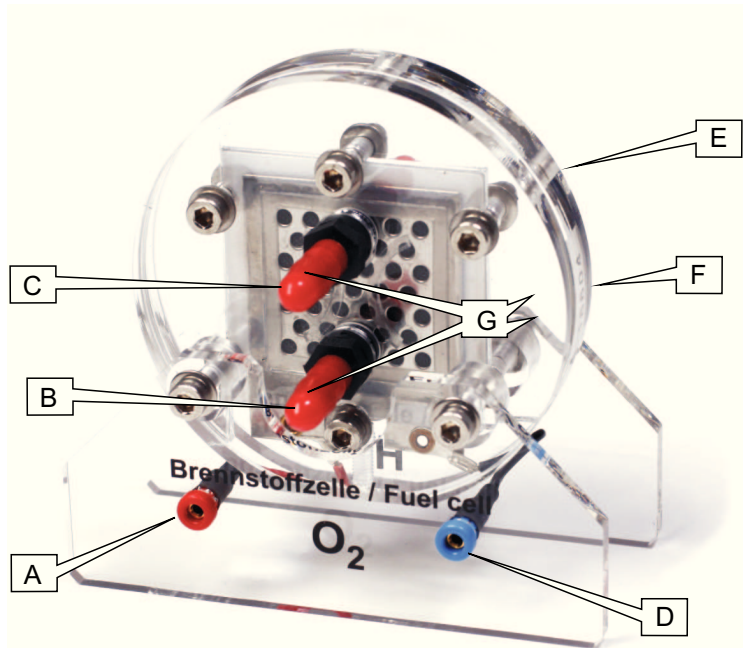
Im geschlossenen Betrieb werden die Ableitungsstutzen **B** und **F** mit den Verschlusskappen **G** abgedichtet. Überschüssig erzeugtes Gas wird im Gasspeicher gespeichert und steht bei Bedarf der Brennstoffzelle zur Verfügung.

Falls sich bei längerem Betrieb Reaktionswasser in der Brennstoffzelle ansammelt, muss dies durch kurzes Abziehen und wieder Aufstecken der Schläuche von den Abschlussstutzen **C** und **E** abgelassen werden. Danach muss die Brennstoffzelle wieder nach Anleitung auf Seite 10 entlüftet werden.

Bitte beachten Sie:

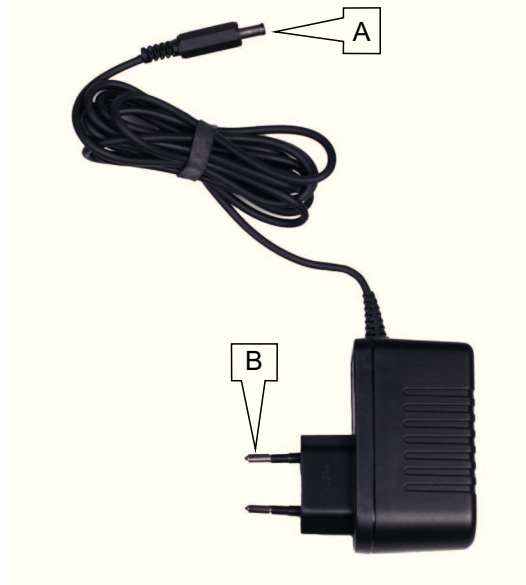
Während des Betriebs sammelt sich ein wenig Feuchtigkeit in der Brennstoffzelle, dies ist normal, deshalb sind die Anschlussstutzen **B, **C**, **E** und **F** vor dem Einpacken der Brennstoffzelle in den Koffer sorgfältig mit den Verschlusskappen **G** zu verschließen.**

Bei Lagerung, Betrieb und Transport vor Frost schützen!



- A** Anschlussbuchse Plus
- B** Anschlussstutzen zur Zuleitung von Sauerstoff aus dem Gasspeicher Sauerstoff (O₂)
- C** Anschlussstutzen zur Ableitung von Sauerstoff beim Entlüften
- D** Anschlussbuchse Minus
- E** Anschlussstutzen zur Ableitung von Wasserstoff beim Entlüften
- F** Anschlussstutzen zur Zuleitung von Wasserstoff aus dem Gasspeicher Wasserstoff (H₂)
- G** Verschlusskappen (4 Stück)

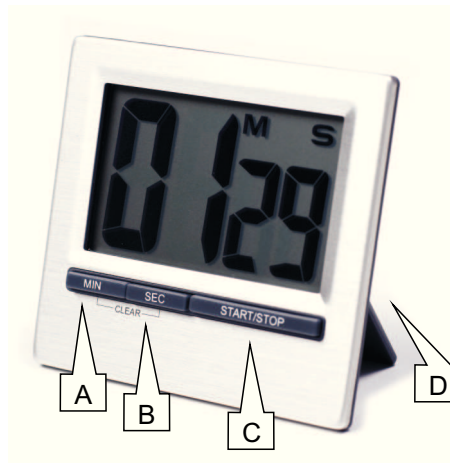
Vorstellung der einzelnen Komponenten



Netzteil ⑬

Zum Betrieb des Elektrolyseurs ⑧ über den Regler ⑯.

- A** Niedervoltausgang, Anschluss an Buchse **D** des Reglers ⑯
- B** Netzstecker, Betriebsspannung 100-240 V ~ / 50-60 Hz



Timer ⑭

Dient zur Messung von voreingestellten Zeitintervallen.

Die Zeitvorgabe erfolgt durch die Tasten **A** (MIN) und **B** (SEC), die Count-down Zählung beginnt mit Drücken der Taste **C** (START/STOP).

Bei Ablauf ertönt ein Signalton welcher mit der Taste **C** (Start/Stop) beendet werden kann. Rücksetzen der Anzeige durch gleichzeitiges Drücken der Tasten **A** (MIN) und **B** (SEC).

- A** Taste Eingabe Minuten, Rücksetzfunktion durch zusätzliches Betätigen der Taste **B**
- B** Taste Eingabe Sekunden, Rücksetzfunktion durch zusätzliches Betätigen der Taste **A**
- C** Taste Start/Stop
- D** Batteriefach rückseitig, Batterie Typ AAA
Altbatterie fachgerecht entsorgen!



Multimeter 15

A	Anzeigefeld (3 ½ -stellig, 7 Segmente, Ziffernhöhe 13 mm)	
B	Funktions- und Messbereichswahlschalter In der Stellung: OFF ist das Gerät ausgeschaltet. Bei Nichtgebrauch in diese Position schalten (Batterieschonung) Vor dem Umschalten der Messbereiche Messkabel herausziehen! Gewünschten Messbereich wählen:	
	AC V Wechselfspannung	Anschlussbuchsen D und E max. 500 V Genauigkeit 1,2% +10 Digit
	DC A Gleichstrom	Anschlussbuchsen D und E max. 2000 mA Sicherung 2 A / 250 V Genauigkeit 1,0% +2 Digit im Bereich 200uA bis 20 mA, Genauigkeit 1,2% +2 Digit im Bereich 200 mA Genauigkeit 1,5% +2 Digit im Bereich 2000 mA
	10 A Gleichstrom	Anschlussbuchsen C und E max. 10A Anschluß ungesichert Genauigkeit 1,5 % +2 Digit
	Diodentest	-
	Ω Widerstandsmessung	Anschlussbuchsen D und E nur spannungslos messen Genauigkeit 0,7% +2 Digit im Bereich 200 Ω bis 200 kΩ, Genauigkeit 1,0% 2 Digit im Bereich 2000 kΩ
	DC V Gleichspannungsmessung	Anschlussbuchsen D und E max. 500 V Genauigkeit 0,7% +2 Digit in allen Bereichen
C	2 mm Anschlussbuchse +	10 A Gleichstrom
D	2 mm Anschlussbuchse +	V / Ω / mA
E	2 mm Anschlussbuchse -	für alle Messbereiche

Vorstellung der einzelnen Komponenten

Batteriewechsel

Messkabelanschlüsse trennen, Gerät ausschalten (Pos. OFF), rückseitigen Deckel abschrauben.
Nur auslaufsichere Batterie Typ: 9 V Blockbatterie verwenden.
Auf Polarität achten!
Fachgerecht entsorgen!

Sicherungswechsel

rückseitigen Deckel abschrauben,
nur Typ 2 A /250 V verwenden.

Multimeter nur in Verbindung mit den Experimenten des SOLARTRAINER junior, WINDTRAINER junior und H₂-TRAINER junior verwenden!



Regler ⑩

Dient zur Regelung des Stromes, mit dem der Elektrolyseur betrieben wird.

- A** Anschluss Elektrolyseur ⑧
- B** Einstellknopf für die Stromstärke
- C** Kontrolllampe für Betriebsbereitschaft
- D** Anschlussbuchse für Netzteilstecker **A**



Flasche mit destilliertem Wasser ⑰

Zum Betrieb des Systems **nur** destilliertes Wasser verwenden.

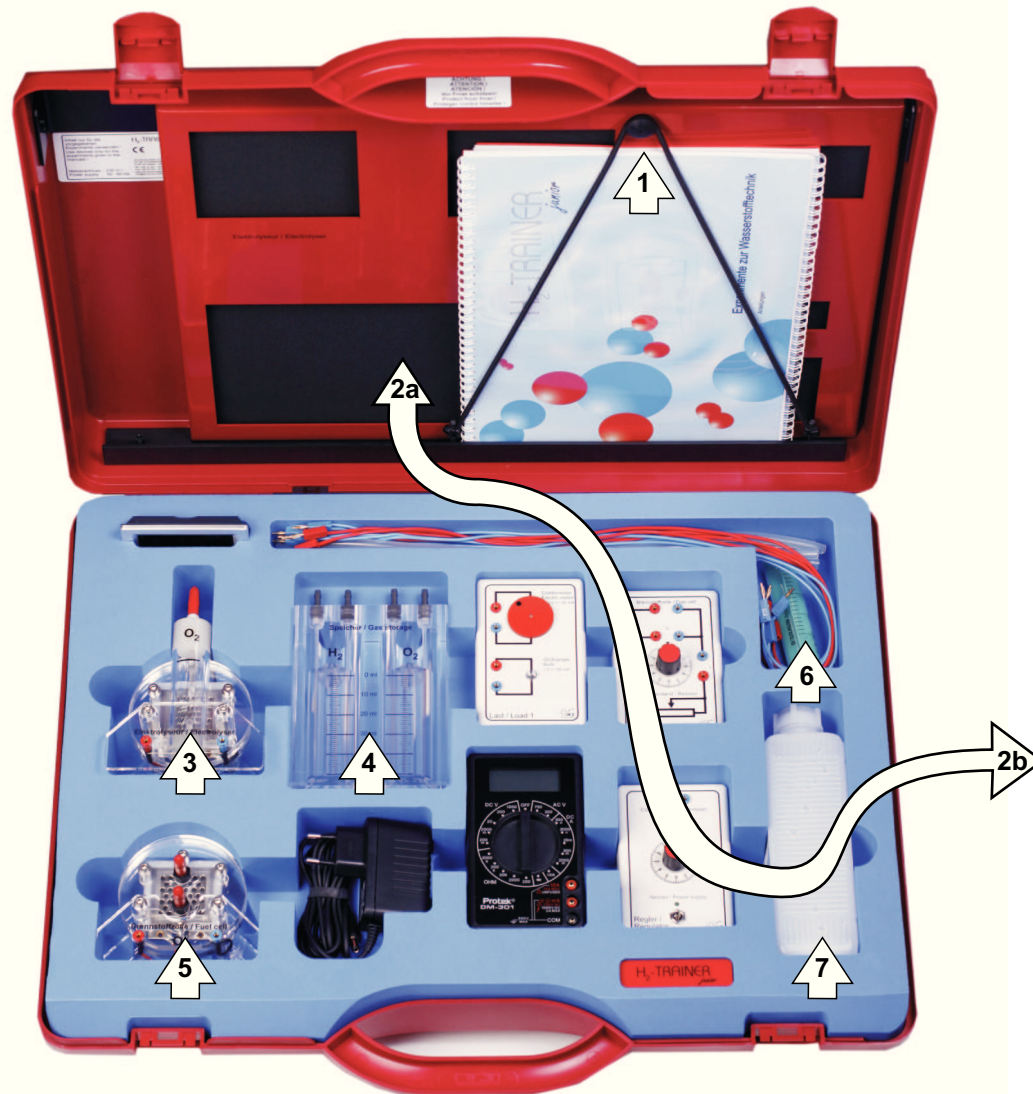
Nachfüllung der Flasche **nur** mit destilliertem Wasser.

Inhalt 500 ml

Hinweis:

Destilliertes Wasser nicht als Trinkwasser verwenden!
Bei Lagerung, Betrieb und Transport vor Frost schützen!

Aufbau des Systems



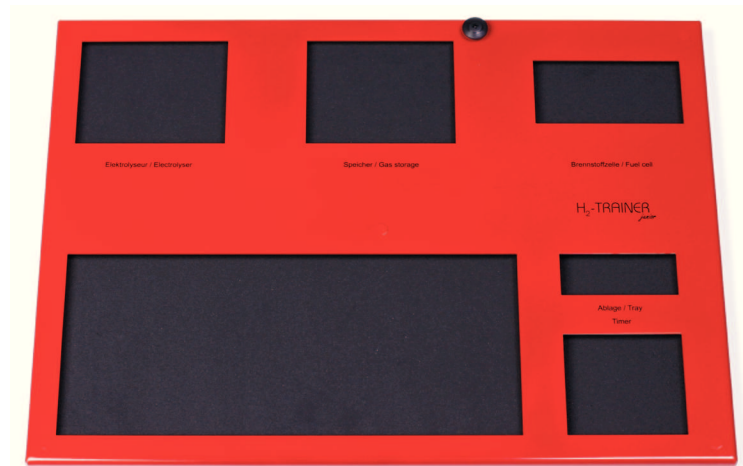
8 Inbetriebnahme gemäß Anleitung S. 9 und 10 vornehmen

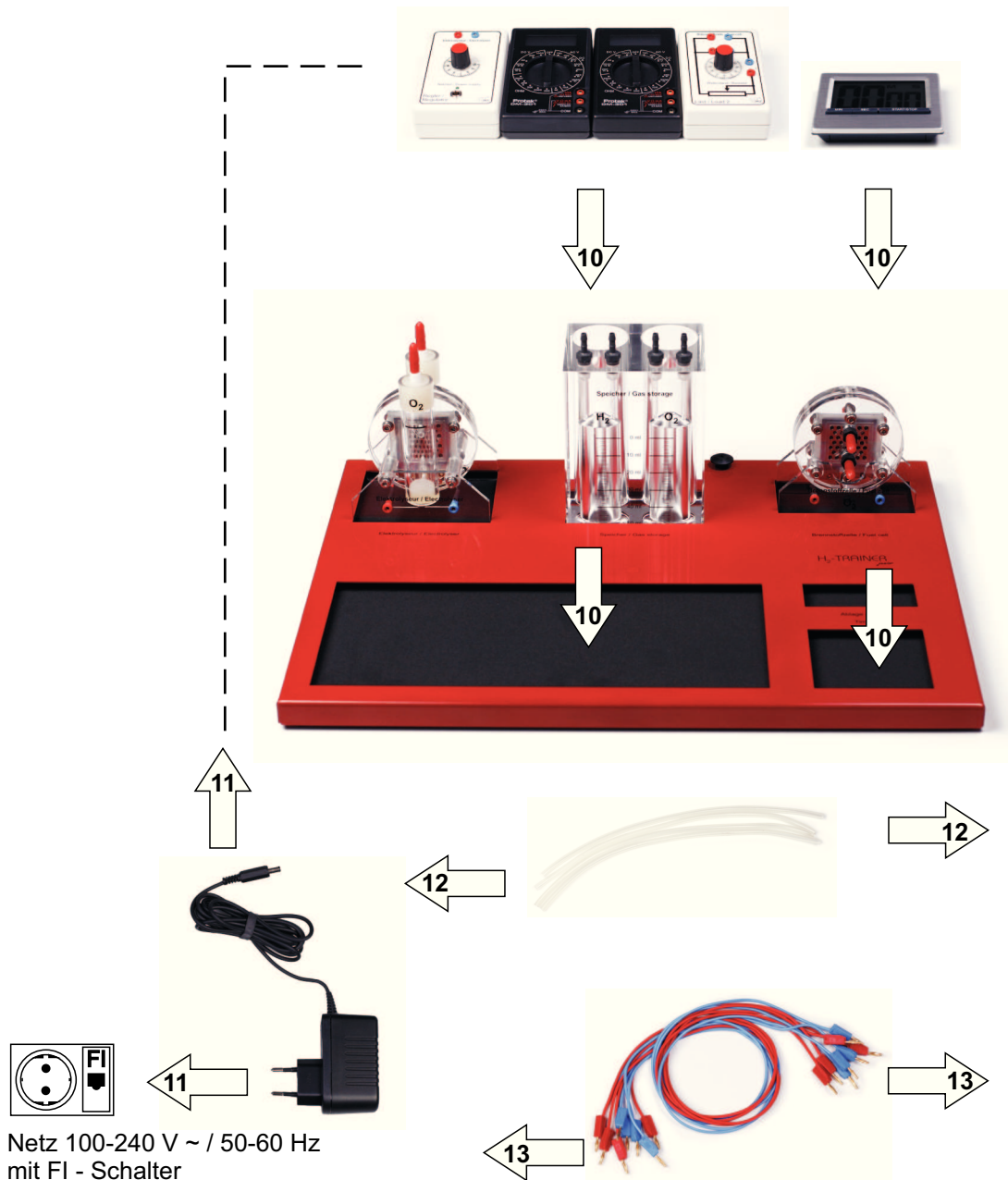


9

9

9





Netz 100-240 V ~ / 50-60 Hz
mit FI - Schalter

- 1 Gummischnur aushängen und Hefte herausnehmen.
- 2a /2b Grundplatte anheben, herausnehmen und aufstellen.
- 3,4,5 Elektrolyseur, Speicher und Brennstoffzelle entnehmen.
- 6,7 Spritze mit Tülle und Flasche mit destilliertem Wasser entnehmen.
- 8 Elektrolyseur, Speicher und Brennstoffzelle gemäß Inbetriebnahmeanweisung Seite 9 und 10 vorbereiten.
- 9 Elektrolyseur, Speicher und Brennstoffzelle auf der Grundplatte platzieren.
- 10 Die in den Anleitungen angegebenen Module und Multi-
meter in der Ablage der Grundplatte anordnen.
- 11 Netzteil an Steckdose mit FI-Schalter anschließen und
Niederspannungsstecker in Regler einstecken.
Regelknopf auf Minimum einstellen.
- 12 Aufbau nach Anleitung mit Silikonschläuchen verbinden.
Schläuche nicht knicken!
- 13 Aufbau nach Anleitung mit Messkabeln verbinden.
- 14 **Sicherheitshinweise auf Seite 8 beachten!**

Vorsicht!

























**Beim Betrieb des Systems entsteht Wasserstoff.
Gefahr der Entstehung von Knallgas! Vermeiden Sie
Umgang mit offenem Feuer, heißen Gegenständen
sowie elektrischen Funken in der Nähe des Aufbaus!**

Es herrscht Rauchverbot!

**Die für Schullabore geltenden Schutzvorschriften
sind zu beachten.**

Bestimmungsgemäße Verwendung

Sicherheitshinweise

-  Der Betrieb der Baugruppen darf nur an der dafür vorgeschriebenen Spannung erfolgen.
-  Falls das Netzkabel beschädigt ist, darf es nur von einem Fachmann ausgetauscht werden.
-  Beim Herausziehen des Netzkabels ausschließlich am Stecker und niemals am Kabel anfassen. Stellen Sie niemals schwere Gegenstände auf das Netzkabel und biegen Sie es nicht in einem zu engen Radius oder um scharfe Ecken.
-  Die zulässige Umgebungstemperatur (Raumtemperatur) darf während des Betriebes 10 °C und 40 °C nicht unter- bzw. überschreiten.
-  Das System ist für den Gebrauch in trockenen und sauberen Räumen bestimmt.
-  Bei Bildung von Kondenswasser muss eine Akklimatisierungszeit von bis zu 5 Stunden abgewartet werden.
-  Ein Betrieb des Systems im Freien bzw. in Feuchträumen ist unzulässig.
-  Schützen Sie das System vor Feuchtigkeit, Spritzwasser und Hitzeeinwirkung.
-  Das System darf nicht in Verbindung mit leicht entflammaren und brennbaren Flüssigkeiten, Gasen oder Stäuben verwendet werden.
-  Die Module dürfen nur unter Aufsicht und Anleitung eines fachkundigen Lehrers in Betrieb genommen werden.
In Schulen bzw. Ausbildungseinrichtungen ist das Betreiben des Systems durch geschultes Fachpersonal verantwortlich zu überwachen.
-  In gewerblichen Einrichtungen sind die Unfallverhütungsvorschriften des Verbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften für elektrische Anlagen und Betriebsmittel zu beachten.
-  Falls ein Modul repariert werden muss, dürfen nur Original-Ersatzteile verwendet werden ! Die Verwendung abweichender Ersatzteile kann zu ernsthaften Sach- und Personenschäden führen !
-  Eine Reparatur darf nur vom Fachmann durchgeführt werden !
-  Das System ist nach Gebrauch stets von der Versorgungsspannung zu trennen.
-  Dringt irgendeine Flüssigkeit in ein Modul ein, so könnte es dadurch beschädigt werden. Sollten Sie irgendwelche Flüssigkeiten in oder über die Baugruppe verschüttet haben, so muss das Gerät vom Netz getrennt und von einem qualifizierten Fachmann überprüft werden.
-  Im Umgang mit Produkten, die mit elektrischer Spannung in Berührung kommen, müssen die gültigen VDE-Vorschriften beachtet werden, insbesondere VDE 0100, VDE 0550/0551, VDE 0700, VDE 0711 und VDE 0860.
-  Vor Öffnen eines Modules stets den Netzstecker ziehen oder sicherstellen, dass das Gerät stromlos ist.
-  Der netzseitige Anschluss sollte nur über einen FI-Schalter und einen Stromkreis mit Not-Aus-Funktion betrieben werden.
-  Verkabelung darf nur mit beiliegenden Messleitungen erfolgen.
-  Bei Betrieb der Module ist stets auf die strikte Einhaltung der in der zugehörigen Beschreibung genannten Kenndaten für elektrische Größen zu achten.
-  Bei Versuchsaufbauten ist vor der Inbetriebnahme der Module generell von fachkundigem Lehr- oder Aufsichtspersonal zu prüfen, ob diese ordnungsgemäß verkabelt/angeschlossen sind.
-  Bei Verwendung der Module für Versuchsaufbauten, die nicht in den Anleitungen beschrieben sind, ist grundsätzlich zu prüfen, ob die entsprechenden Module für diese Anwendung geeignet sind.
Im Zweifelsfalle ist unbedingt Rückfrage bei dem Hersteller notwendig.
-  Die Reinigung der Komponenten darf nicht mit Lösungsmitteln erfolgen. Reinigung mit weichem, trockenem oder mit ganz schwach feuchtem Tuch durchführen.
-  Die werkseitigen Schilder und Kennzeichnungen dürfen nicht verändert, entfernt oder unkenntlich gemacht werden.

Haftungsausschluss

Sowohl das Einhalten dieser Anleitung und der Versuchsanleitungen als auch die Bedingungen und Methoden bei Verschaltung, Betrieb, Verwendung und Wartung des Systems können von der IKS Photovoltaik GmbH nicht überwacht werden.

Bitte beachten Sie, dass Bedien- und Anschlussfehler außerhalb unseres Einflussbereiches liegen.

Eine unsachgemäße Ausführung der Zusammenschaltung oder falsche Bedienung kann zu Sachschäden führen und in Folge Personen gefährden.

Daher übernehmen wir keinerlei Verantwortung und Haftung für Verluste, Schäden oder Kosten, die sich aus fehlerhafter Verkabelung, unsachgemäßem Betrieb sowie falscher Verwendung und Wartung ergeben, oder in irgendeiner Weise damit zusammenhängen.

Wir behalten uns das Recht vor, ohne vorherige Mitteilung Änderungen bezüglich Produkt, technischer Daten oder Bedienungs- und Versuchsanleitung vorzunehmen.

Bestimmungsgemäße Verwendung

Der bestimmungsgemäße Einsatz der einzelnen Module ist in den vorhergehenden Seiten und den Anleitungen beschrieben. Ein anderer Einsatz als vorgegeben ist nicht zulässig, bzw. geschieht auf eigene Gefahr des Anwenders.

Garantie

1. Das Liefergut ist unverzüglich nach Eintreffen am Bestimmungsort vom Auftraggeber auf Transportschäden zu prüfen. Beanstandungen wegen unvollständiger oder unrichtiger Lieferung sind uns spätestens innerhalb von 8 Werktagen nach Ankunft der Lieferung am Bestimmungsort mit begründeter Information anzuzeigen. Nach Ablauf dieser Frist gilt die Lieferung als vertragsgemäß ausgeführt.
2. Für verborgene Mängel, die bei unverzüglicher Untersuchung nicht festzustellen sind, stehen wir 24 Monate ab Versandtag in der Weise ein, dass wir das fehlerhafte Material nach unserer Wahl nachbessern oder mangelfrei ersetzen. Ist dies unmöglich, fehlgeschlagen oder unzumutbar, so kann der Auftraggeber nur Herabsetzung des Kaufpreises oder Rücktritt von dem mangelhaften Teil des Vertrages verlangen. Das mangelhafte Teil ist in jedem Fall zum Zwecke der Nachbesserung oder Ersatzteillieferung und bei Vertragsrücktritt vom Auftraggeber an unsere Anschrift zurückzusenden. Für wesentliche Fremderzeugnisse beschränkt sich die Haftung des Lieferers auf die Abtretung der Haftungsansprüche, die ihm gegen den Lieferer des Fremderzeugnisses zustehen.
3. Das Recht des Auftraggebers, Ansprüche aus Mängeln geltend zu machen, verjährt in allen Fällen vom Zeitpunkt der rechtzeitigen Anzeige an in 24 Monaten, frühestens jedoch mit Ablauf der Gewährleistung.
4. Natürlicher Verschleiß, unsachgemäße Behandlung, Fahrlässigkeit, schädigende Einwirkungen Unbefugter, unbeaufsichtigte Benutzung sowie Änderungen am Liefergut, die durch den Auftraggeber oder durch Dritte ohne unsere schriftliche Zustimmung erfolgen, schließen unsere Mängelhaftung und Gewährleistungspflicht ohne Einschränkung aus.
5. Für die Beseitigung von Mängeln hat uns der Auftraggeber die erforderliche Zeit und Gelegenheit einzuräumen. Ist der Auftraggeber hierzu nicht oder nur mit unzumutbaren Auflagen bereit, entfällt für uns jede Gewährleistungspflicht. Das gilt auch bei Mängelanzeigen gemäß Punkt 1.
6. Für das Ersatzstück und die Ausbesserung beträgt die Gewährleistungsfrist drei Monate, sie läuft mindestens aber bis zum Ablauf der ursprünglichen Gewährleistungsfrist für den Liefergegenstand. Die Frist für Mängelhaftung an dem Liefergegenstand wird um die Dauer der durch die Nachbesserungsarbeiten verursachten Betriebsunterbrechung verlängert. Weitere Gewährleistungs- und Schadensersatzansprüche des Auftraggebers in jeglicher Form sind ausgeschlossen; insbesondere ein Anspruch auf Ersatz von Schaden, der nicht an dem Liefergegenstand selbst entstanden ist, sowie Ansprüche des Auftraggebers aus unerlaubter Handlung des Lieferers sind, soweit gesetzlich zulässig, ausgeschlossen. Soweit der vorstehende Haftungsausschluss gesetzlich nicht zulässig ist, ist unsere Haftung unabhängig vom Rechtsgrund begrenzt auf maximal 5% des Kaufpreises desjenigen Materials, das den Schaden verursacht hat oder Gegenstand des Anspruchs ist oder in direktem Bezug dazu steht

Die in den Lösungen angegebenen Werte können aufgrund von Toleranzen der Bauteile und verschiedenen Betriebsbedingungen von den aktuell gemessenen Werten abweichen. Besondere Sorgfalt gilt der genauen Ablesung der Gasmengen des Gasspeichers. Bereits geringe Fehler können zu einer Fehlinterpretation des Ergebnisses führen. Achten Sie bei der Ermittlung der Stromwerte unbedingt auf die angegebenen Messbereiche für die Multimeter. Der Bereich: 10 A hat einen kleineren Innenwiderstand als der Messbereich: DCA 2000mA. Während der Messung muss auf ein Umschalten auf einen anderen Messbereich verzichtet werden, da sonst die Messreihe verfälscht wird.

Achten Sie darauf, dass zum Betrieb des gesamten Systems nur destilliertes Wasser verwendet werden darf.

Auf richtige Polung beim Elektrolyseur achten. Der Wasserstand im Elektrolyseur darf höchstens + / - 5 mm vom Pegel abweichen.

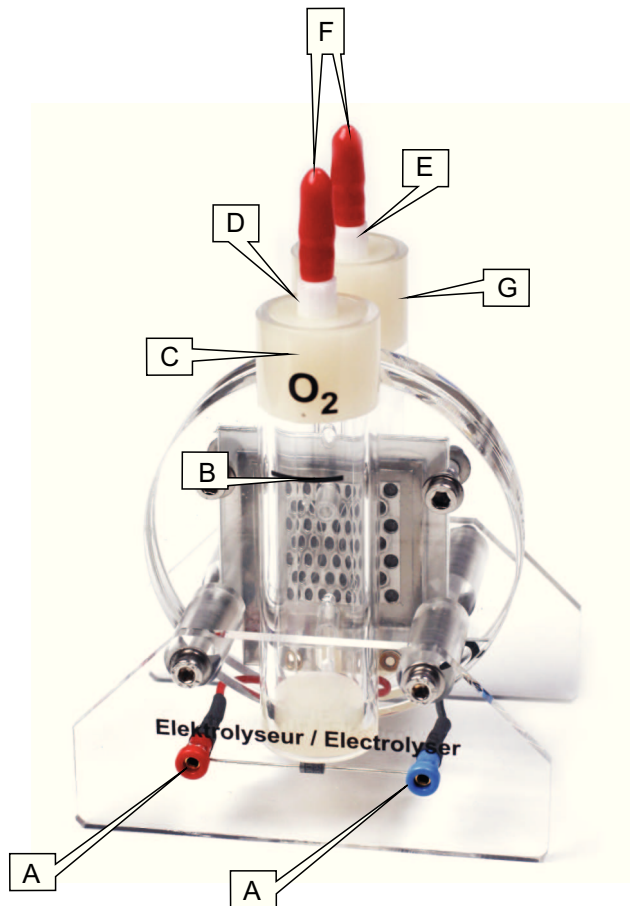
Der Gasspeicher darf nicht überfüllt werden.

Beim Betrieb des Systems entsteht Wasserstoff. Vermeiden Sie Umgang mit offenem Feuer, heißen Gegenständen sowie elektrischen Funken in der Nähe des Aufbaus!

Es herrscht Rauchverbot!

Die für Schullabore geltenden Schutzvorschriften sind zu beachten.

Elektrolyseur

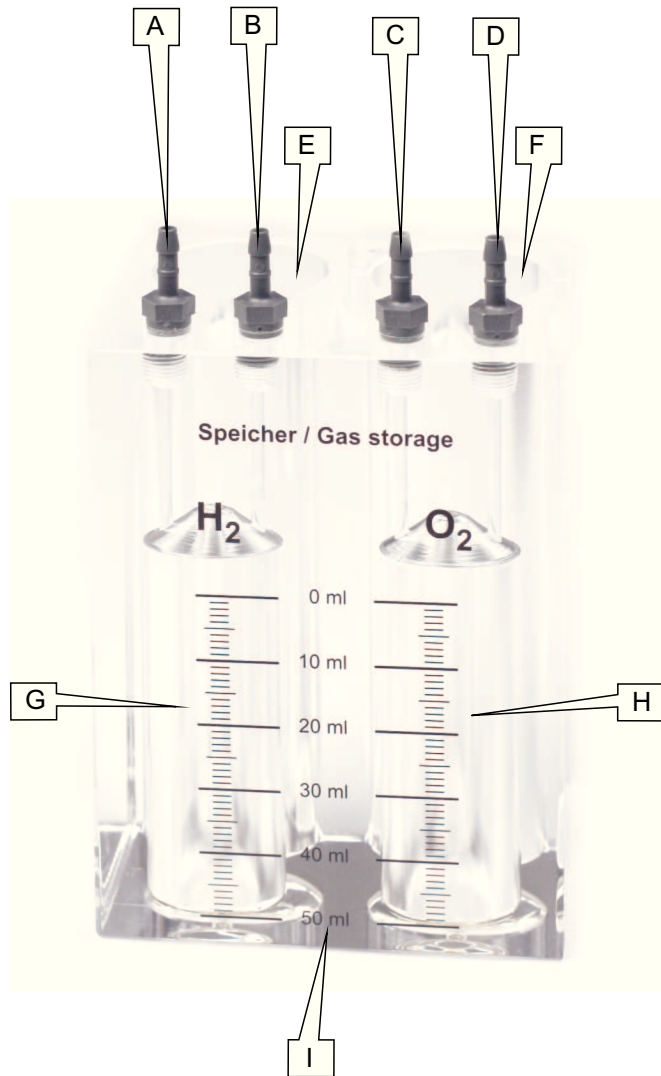


1. Nehmen Sie die Verschlusskappen **F** von den Anschlussstutzen **D** und **E** und legen Sie diese in das Ablagefach **E** der Grundplatte **(1)**.
2. Prüfen Sie den Füllstand auf der Sauerstoff- und Wasserstoffseite (**C** und **G**). Der Wasserstand muss sich in Höhe der Füllmarken **B** befinden. Falls dies nicht der Fall ist, setzen Sie auf die beiliegende Spritze **(7)** die Tülle auf. Diese können Sie in die Anschlussstutzen **D/E** einführen. Saugen Sie Wasser ab oder füllen Sie Wasser aus der Vorratsflasche **(17)** auf.

Zum Betrieb n u r destilliertes Wasser verwenden!

Achten Sie auf die richtige Polung an den Anschlüssen **A.
Der Elektrolyseur darf nicht verkehrt gepolt betrieben werden.
Bei Lagerung, Betrieb und Transport vor Frost schützen!**

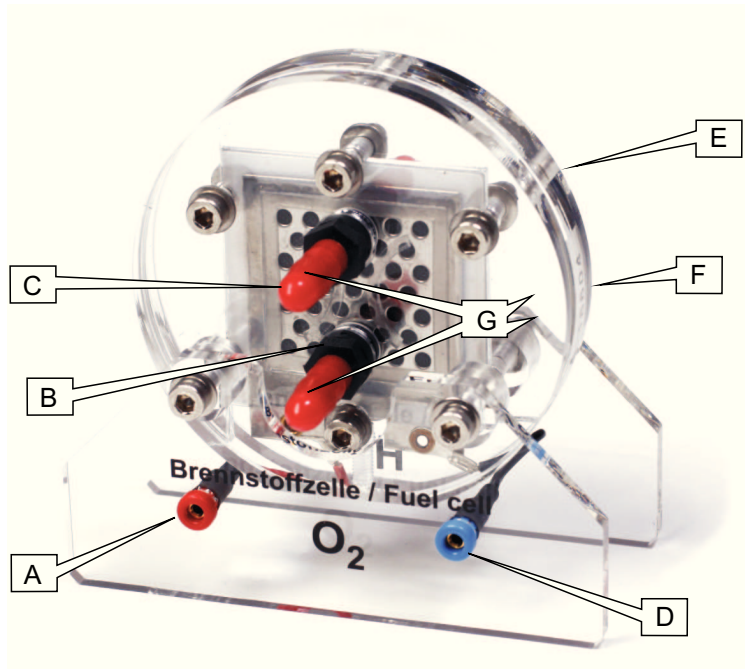
Gasspeicher



Füllen Sie in die Öffnungen **E** und **F** des Gasspeichers **⑨** destilliertes Wasser, bis der Wasserpegel im Gassammelraum **G** und **H** genau die **0 ml**-Füllmarke auf der Skala **I** erreicht. Wird die Füllmarke überschritten, nehmen Sie das überschüssige Wasser mit der beiliegenden Spritze **⑦** wieder ab.

Zum Befüllen n u r destilliertes Wasser verwenden!

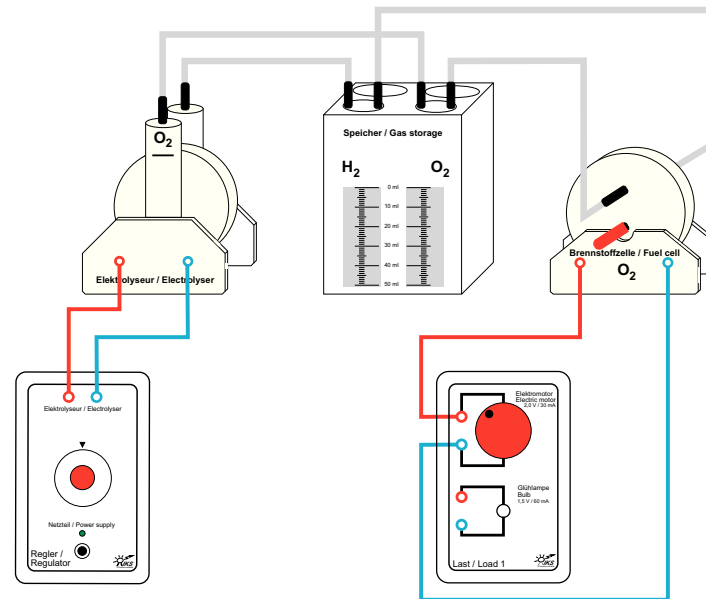
Brennstoffzelle



Entfernen Sie die Verschlusskappen **G** von den Anschlussstutzen **B** und **F** und legen Sie diese auf das Ablagefach **E** der Grundplatte ①.

Bei Lagerung, Betrieb und Transport vor Frost schützen!

Entlüften des Systems zur Vorbereitung der Experimente 5 und 6



Achtung:

Werden Experimente mit der Brennstoffzelle durchgeführt, ist es extrem Wichtig vorher die atmosphärische Luft aus dem Versuchsaufbau zu entfernen. Andernfalls würde sie sich vor der Membran der Brennstoffzelle ansammeln und die Brennstoffzelle hätte keine oder nur sehr geringe Leistung. Mit dieser Entlüftungsanweisung stellen Sie sicher, dass sich nur Wasserstoff bzw. Sauerstoff vor der Membran befindet.

Bauen Sie die Komponenten gemäß obiger Darstellung auf. Die Verschlusskappen sind auf die **unteren** Anschlussstutzen **B** und **F** aufgesteckt. Beachten Sie die Polung am Elektrolyseur!

Nach dem Zusammenbau sind der Elektrolyseur, der Gasspeicher, die Brennstoffzelle und die Schläuche mit Luft gefüllt. Zum entlüften der Apparatur müssen Sie wie folgt vorgehen:

Füllen Sie in die Öffnungen **E** und **F** des Gasspeichers destilliertes Wasser, bis der Wasserpegel im Gassammelraum **G** und **H** genau die **0 ml**-Marke auf der Skala **I** erreicht.

Wird die Marke überschritten, nehmen Sie das überschüssige Wasser mit der beiliegenden Spritze wieder ab.

Stellen Sie den Regler auf Maximum. Warten Sie, bis der Speicher **50 ml H₂ / 25 ml O₂** enthält.

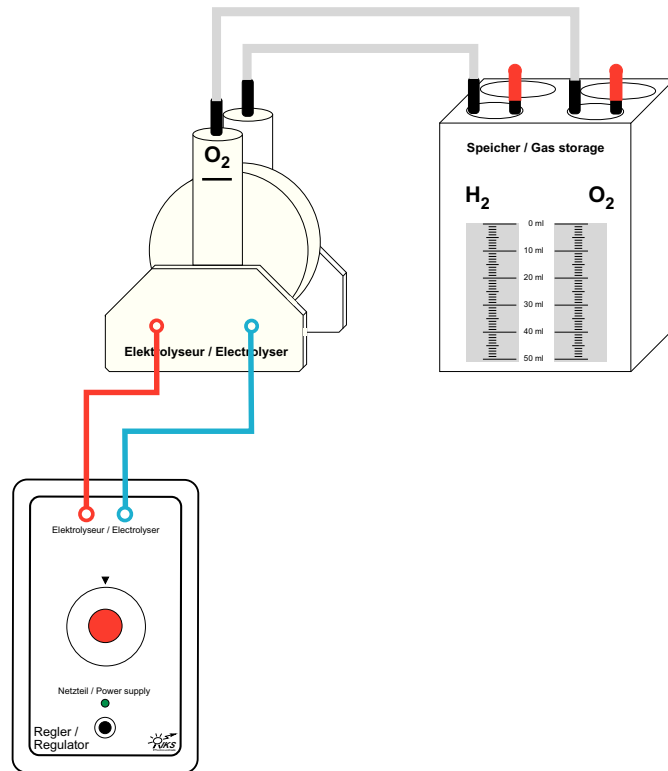
Entfernen Sie dann die Verschlusskappen **G** von den **unteren** Anschlussstutzen **B** und **F** der Brennstoffzelle und lassen Sie die Gase fast vollständig, bis **kurz vor** der Füllmarke: **0 ml** ausströmen. Der Elektromotor der Last 1 dreht sich als Nachweis für die Energieumwandlung. Anschließend die Verschlusskappen sofort wieder aufsetzen.

Stellen Sie den Regler auf **0** und entfernen Sie die Messkabel zur Last 1.

Falls die Brennstoffzelle, bei den weiteren Experimenten, nicht genügend Leistung bringt, wiederholen Sie die Entlüftungsanweisung.

Der Aufbau ist nun für die Experimente mit der Brennstoffzelle vorbereitet.

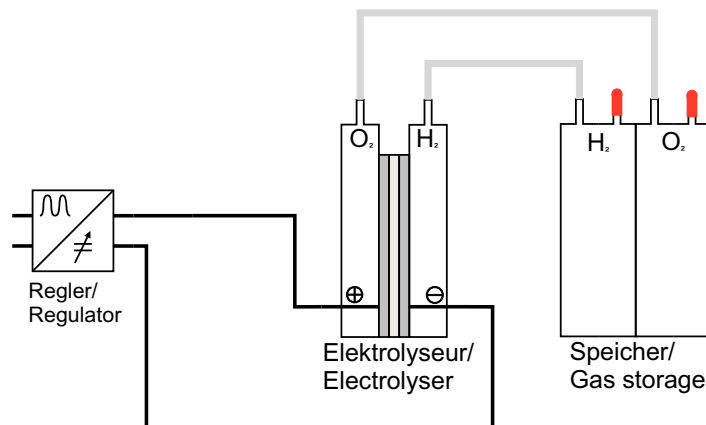
Aufbau



Messzeit: ca. 5 min
 Lernziele: Gesetz der festen Massenverhältnisse,
 Avogadro'sches Gesetz,
 anodische und kathodische Reaktionsgleichung

Experiment 1 ist bereits für jüngere Schüler geeignet. Es werden keine elektrischen Messwerte aufgenommen, da ausschließlich die bei der Elektrolyse von Wasser erzeugten Gasvolumina von Interesse sind. Sie können an der Messskala des Gasspeichers abgelesen werden. Das ermittelte Gasverhältnis von 2:1 verdeutlicht anschaulich eine Reihe von grundlegenden Theorien und Gesetzen der Chemie. So ist Wasser kein Element, sondern aus zwei Substanzen aufgebaut, die im Gegensatz zu Wasser unter Normalbedingungen gasförmig sind. Das Gesetz der festen Massenverhältnisse und das Avogadro'sche Gesetz dienen zur Erklärung des Gasverhältnisses. Die Diskussion kann auf die allgemeine Gasgleichung ausgedehnt werden. Die Formulierung der Anoden- und Kathodenreaktion leitet zur Elektrochemie über.

Schaltplan



Information

Bei der Elektrolyse werden aus flüssigem Wasser die Gase Sauerstoff und Wasserstoff gewonnen. In diesem Experiment wird untersucht, in welchem Verhältnis die produzierten Gasvolumina entstehen.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf.

Beachten Sie die Polung am Elektrolyseur!

Der Gasspeicher muss jeweils bis zur **0 ml**-Füllmarke mit destilliertem Wasser gefüllt sein.

Verschließen Sie die jeweils rechten Anschlussstutzen des Gasspeichers mit den Verschlusskappen, damit die Gase nicht entweichen können.

Stellen Sie den Regler auf Maximum. Warten Sie, bis ca. **20 ml** Wasserstoff erzeugt wurden. Lesen Sie die erzeugten Gasvolumina für Wasserstoff und Sauerstoff ab und tragen die Werte in die Tabelle ein.

	Erzeugtes Gasvolumen V in ml
Wasserstoff	20
Sauerstoff	10

1. In welchem Verhältnis stehen die erzeugten Gasvolumina ?

$$\frac{V(\text{H}_2)}{V(\text{O}_2)} = \frac{20}{10} = \frac{2}{1}$$

2. Wie lässt sich dieses Verhältnis erklären ?

Ein Wassermolekül besteht aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff.

Damit ergeben sich bei der Elektrolyse genau doppelt so viele Wasserstoffmoleküle wie

Sauerstoffmoleküle (Gesetz der festen Massenverhältnisse) und somit bei gleichem Druck

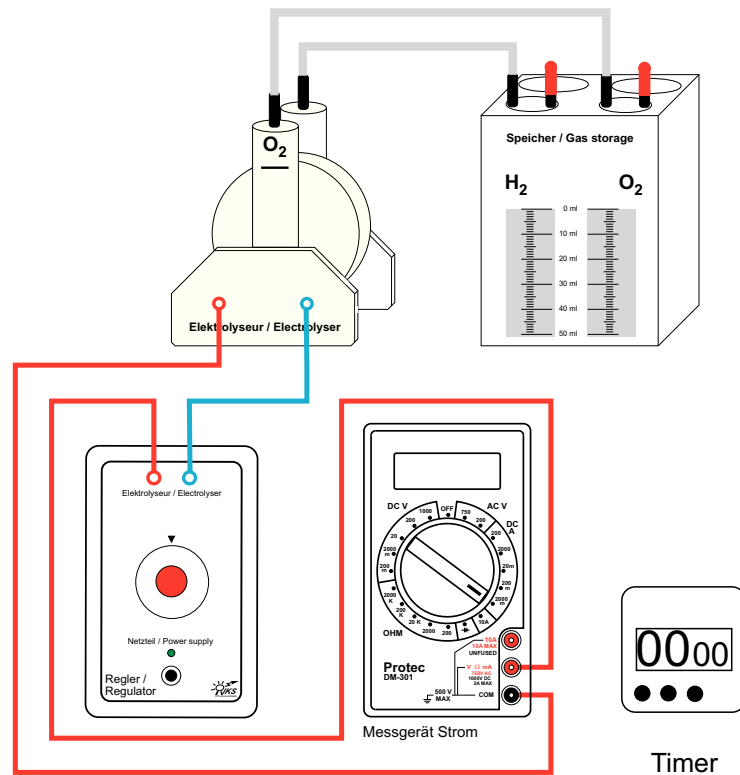
und gleicher Temperatur auch das doppelte Volumen an Wasserstoffgas.

(Avogadro'sches Gesetz)

3. Formulieren Sie die an der Anode und Kathode stattfindenden Reaktionen und die Gesamtreaktionsgleichung.



Aufbau



Messzeit: ca. 20 min

Lernziele: 1. und 2. Faraday'sches Gesetz, Faraday-Konstante

In diesem Experiment werden die Zusammenhänge zwischen erzeugter Gasmenge, eingesetztem Strom und Zeit näher untersucht.

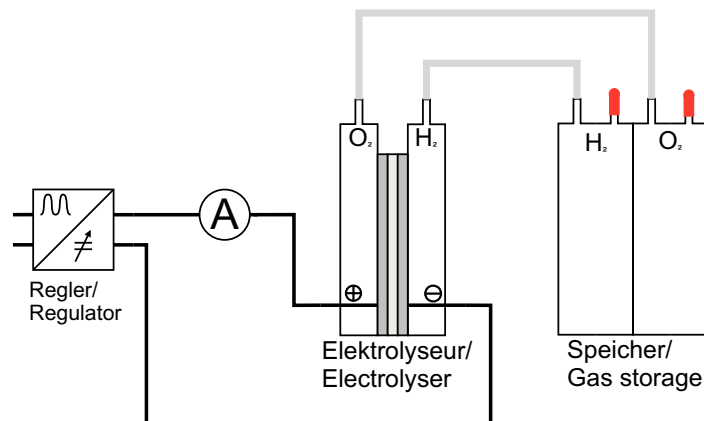
Dazu werden für verschiedene Stromstärken die innerhalb einer gewissen Zeit erzeugten Gasvolumina gemessen. Damit die Gasvolumina genau abgelesen werden können, sind jeweils mehrere Milliliter Wasserstoff und Sauerstoff zu erzeugen.

Für geringe Stromstärken (**0,1 A**) beträgt die Messzeit ca. 6 Minuten, für hohe Stromstärken (**0,5 A**) reichen 2 Minuten aus. Die grafische Auswertung der Messpunkte führt zum 1. Faraday'schen Gesetz.

Grundlage für die Berechnung der Faraday-Konstanten sind die Steigung der Ausgleichsgeraden und die Vorgabe des molaren Volumens von Wasserstoff.

Die entsprechende Berechnung für das entstandene Sauerstoffgas verdeutlicht das 2. Faraday'sche Gesetz.

Schaltplan



Information

Bei der Elektrolyse bestimmt die Stromstärke die erzeugten Gasmengen pro Zeiteinheit.

Dieser Zusammenhang wird durch das 1. Faradaysche Gesetz beschrieben.

Das 2. Faradaysche Gesetz behandelt die Abscheidung unterschiedlicher Stoffe. Beide Gesetze werden in diesem Experiment untersucht.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung auf.

Beachten Sie die Polung am Elektrolyseur!

Der Gasspeicher muss jeweils bis zur **0 ml**-Füllmarke mit destilliertem Wasser gefüllt sein.

Verschließen Sie die jeweils rechten Anschlussstutzen des Gasspeichers mit den Verschlusskappen, damit die Gase nicht entweichen können.

Stellen Sie den Regler zu Beginn auf **0 mA** und das Multimeter als Amperemeter auf den Messbereich **DC A 2000 m**.

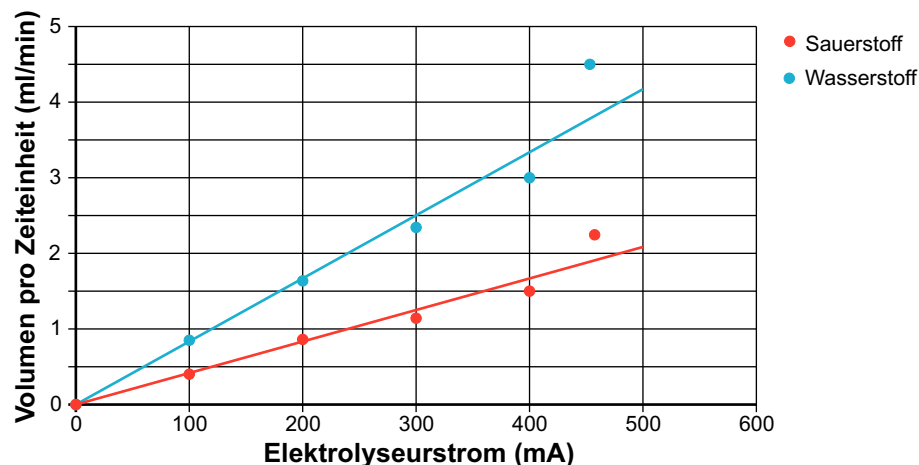
Es sind mehrere Messungen bei verschiedenen Stromstärken durchzuführen.

Stellen Sie die vorgegebene Stromstärke über den Regler ein und notieren Sie die anfänglichen Füllstände in der Tabelle. Geben Sie die zugehörigen Zeitintervalle in den Timer ein und starten Sie die Zeitmessung.

Notieren Sie nach Ablauf der Zeit die neuen Füllstände und fahren Sie mit der nächsten Stromstärke fort.

Strom I in mA	Zeit t in min	Wasserstoff				Sauerstoff			
		Volumen H ₂ in ml		Δ V in ml	ΔV/t in ml/min	Volumen O ₂ in ml		Δ V in ml	Δ V/t in ml/min
		Start	Ende			Start	Ende		
0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0,00
100	6	0	5	5	0,83	0	2,5	2,5	0,41
200	5	5	13	8	1,60	2,5	6,5	4	0,80
300	3	13	20	7	2,33	6,5	10	3,5	1,16
400	2	20	26	6	3,00	10	13	3	1,50
500	2	26	35	9	4,50	13	17,5	4,5	2,25

Gasmenge pro Zeiteinheit zur Stromstärke



- Berechnen Sie die erzeugten Gasvolumina ΔV für Wasserstoff aus den Start - und Endfüllständen des Gasspeichers sowie die pro Minute erzeugten Gasvolumina $\Delta V / t$. Tragen Sie die berechneten Werte in das Diagramm ein und diskutieren Sie das Ergebnis.

Die Messwerte liegen auf einer Geraden. Das produzierte Gasvolumen V ist demnach der

Stromstärke I und der Zeit t , d.h. der Ladungsmenge Q , proportional

(1. Faraday'sches Gesetz). ... $V \sim I \times t$, mit $I \times t = Q$ ergibt sich $V \sim Q$

Fortsetzung der Aufgaben nächste Seite →

Aufgabe

2. Wieviel Milliliter Wasserstoff werden in einer Minute pro Ampere gebildet und wieviel in einer Sekunde?

$$a = \frac{4,2 \text{ ml / min}}{0,5 \text{ A}} = 8,4 \frac{\text{ml}}{\text{A min}} = 0,14 \frac{\text{ml}}{\text{A s}}$$

3. Die Abscheidung eines Mols eines einwertigen Stoffes benötigt unabhängig von der Natur des Stoffes immer die gleiche Elektrizitätsmenge Q . Diese Größe heißt Farady-Konstante F . Berechnen Sie die Konstante mit dem in Aufgabe 2 ermittelten Wert. Beachten Sie: Ein Mol Wasserstoff hat ein Volumen von $V_m = 22414 \text{ ml}$ (bei 1 bar und 0° C) bzw. $V_m = 24414 \text{ ml}$ (bei 1 bar und 20° C) und entsteht aus zwei Mol Wasserstoffionen.

1 As scheidet 0,14 ml H_2 - Gas ab.

Die Elektrizitätsmenge zur Abscheidung von 1 ml H_2 - Gas beträgt:

$$\frac{Q}{V} = \frac{1 \text{ As}}{0,14 \text{ ml}} = 7,14 \frac{\text{AS}}{\text{ml}}$$

1 mol H^+ - Ionen bildet 0,5 mol H_2 - Gas

$$V_m = \frac{22414 \text{ ml / mol}}{2} = 11207 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}$$

Die Elektrizitätsmenge zur Abscheidung von 1 mol H^+ - Ionen beträgt:

$$Q_{m(\text{H}^+)} = \frac{Q}{n} \text{ mit } n = \frac{V}{V_m} = \frac{Q \times V_m}{V} = \frac{7,14 \text{ As} \times 11207 \text{ ml/mol}}{1 \text{ ml}} = 80018 \frac{\text{As}}{\text{mol}}$$

$$\text{bzw. } m = \frac{M \times Q}{z \times F} \text{ mit } m = M \times n, n = \frac{V}{V_m}, z = 1$$

$$F = \frac{Q \times V_m}{z \times V} = \frac{7,14 \text{ As} \times 11207 \text{ ml / mol}}{1 \times 1 \text{ ml}} = 80018 \frac{\text{As}}{\text{mol}}$$

4. Berechnen Sie die Farady-Konstante F auf Grund der Überlegung, dass zur Entladung eines Mols einfach positiv geladener Wasserstoffionen ein Mol Elektronen benötigt wird.

$$\text{Avogadro-Konstante : } N_A = 6,0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{Elementarladung: } e = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$F = N_A \times e = 6,0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \times 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$= 96486 \text{ mit } 1 \text{ C} = 1 \text{ As}$$

5. Ermitteln Sie die Elektrizitätsmenge Q , die für die Abscheidung eines Mols Sauerstoffionen benötigt wird. Gehen Sie analog zu den Aufgaben 1, 2 und 3 vor und diskutieren Sie anschließend das Ergebnis.

1 As scheidet 0,07 ml O_2 - Gas ab.

$$\frac{Q}{V} = \frac{1 \text{ As}}{0,07 \text{ ml}} = 14,28 \frac{\text{AS}}{\text{ml}}$$

1 mol O^{2-} - Ionen bildet 0,5 mol O_2 - Moleküle:

$$V_m = \frac{22414 \text{ ml / mol}}{2} = 11207 \frac{\text{ml}}{\text{mol}}$$

Die Elektrizitätsmenge zur Abscheidung von 1 mol O^{2-} - Ionen beträgt:

$$Q_{m(\text{O}^{2-})} = \frac{Q}{n} \text{ mit } n = \frac{V}{V_m} = \frac{Q \times V_m}{V} = \frac{14,28 \text{ As} \times 11207 \text{ ml/mol}}{1 \text{ ml}} = 160036 \frac{\text{As}}{\text{mol}}$$

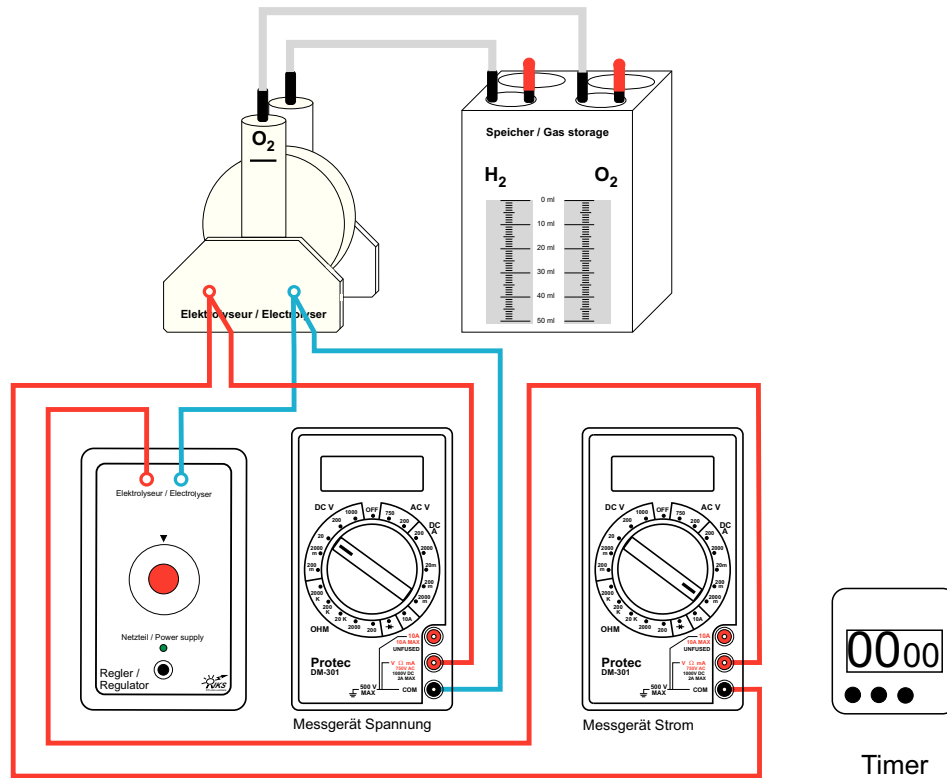
$$\text{bzw. } m = \frac{M \times Q}{z \times F} \text{ mit } m = M \times n, n = 1 \text{ mol}, z = 2$$

$$Q = n \times z \times F = 1 \text{ mol} \times 2 \times 96486 \frac{\text{As}}{\text{mol}} = 192972 \text{ As}$$

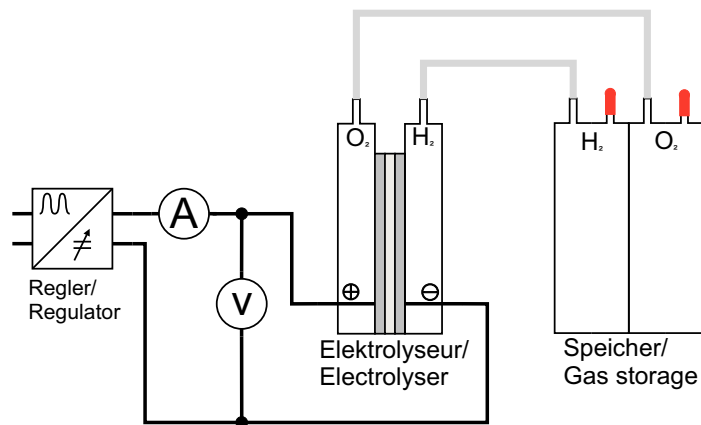
Für die Entladung von einem Mol Sauerstoffionen wird im Vergleich zu den Wasserstoffionen die doppelte Ladungsmenge benötigt, da die Sauerstoffionen die Ionenwertigkeit $z = 2$ besitzen (2. Faraday'sches Gesetz).

$$Q = z \times F$$

Aufbau



Schaltplan



Messzeit: ca. 15 min
 Lernziel: Abhängigkeit des Energie- und des Faraday Wirkungsgrades von der Stromstärke

Dieses Experiment beschäftigt sich mit dem Energie- und Faraday-Wirkungsgrad des Elektrolyseurs. Im ersten Schritt werden die Wirkungsgrade definiert und in entsprechende Formeln gefasst. Diese Formeln dienen im zweiten Schritt zur Berechnung der Wirkungsgrade des eingesetzten Elektrolyseurs.

Für den Energie-Wirkungsgrad werden die eingesetzte elektrische Energie und die im erzeugten Wasserstoff gespeicherte chemische Energie benötigt.

Erstere kann über $E_{el} = U \times I \times t$ berechnet werden.

Für die Berechnung der chemischen Energien wird das molare Volumen und der Brennwert des Wasserstoffs angegeben. Sollte die Berechnung der chemischen Energie noch nicht Lernziel der Schüler sein, kann dieser Wert vorgegeben werden.

Für den Faraday-Wirkungsgrad muss das mit der eingesetzten Elektrizitätsmenge theoretisch zu erzeugende Wasserstoffvolumen berechnet werden.

Dies erfolgt mit Hilfe der Faraday'schen Gesetze über die Gleichung $V = (Q \times V_m) / (z \times F)$.

Im Anschluss werden die für die beiden Stromstärken ermittelten Energie- bzw. Faraday-Wirkungsgrade miteinander verglichen und das Ergebnis diskutiert (siehe auch Exp. 4).

Information

Zur elektrolytischen Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff wird elektrischer Strom benötigt. Über das erzeugte Gasvolumen und die eingesetzte Strommenge lassen sich der Energie- und der Faraday-Wirkungsgrad des Elektrolyseurs berechnen.

Aufgabe

Bauen Sie den Versuch entsprechend der obigen Darstellung auf.

Beachten sie die Polung am Elektrolyseur!

Verschließen Sie die jeweils rechten Anschlussstutzen des Gasspeichers mit den Verschlusskappen, damit die Gase nicht entweichen können.

Stellen Sie das Multimeter als Amperemeter auf den Bereich **DC A 2000 m** und das Multimeter als Voltmeter auf den Bereich **DC V 20** ein.

Es sind zwei Messungen bei unterschiedlichen Stromstärken durchzuführen.

Stellen Sie die vorgegebene Stromstärke (**0,1 A**) über den Regler ein und notieren Sie den anfänglichen Füllstand des Wasserstoffspeichers in der Tabelle.

Geben Sie das zugehörige Zeitintervall (**12 min**) in den Timer ein und starten Sie die Zeitmessung.

Messen Sie die Spannung und notieren Sie nach Ablauf der Zeit den neuen Füllstand.

Geben Sie das zugehörige Zeitintervall (**4 min**) in den Timer ein und starten Sie die Zeitmessung.

Fahren Sie dann von diesem Füllstand aus mit der nächsten Stromstärke (**0,5 A**) fort.

Messen Sie die Spannung und notieren Sie nach Ablauf der Zeit den neuen Füllstand.

Berechnen Sie die erzeugten Gasvolumina aus den Start- und Endfüllständen des Wasserstoffgasspeichers.

Strom I in mA	Spannung U in V	Zeit t in min	Volumen H ₂ in ml Start	Volumen H ₂ in ml Ende	Δ V in ml
100	1,56	12	0	9	9
500	1,85	4	9	25	16

1. Definieren Sie den Energiewirkungsgrad η_E des Elektrolyseurs.

Der Energiewirkungsgrad η_E ist das Verhältnis zwischen der gespeicherten chemischen Energie E_{ch} des Wasserstoffgases und der zugeführten elektrischen Energie E_{el} :

$$\eta_E = \frac{E_{ch}}{E_{el}}$$

2. Berechnen Sie den Energiewirkungsgrad η_E des Elektrolyseurs. Die chemische Energie wird über den Brennwert von Wasserstoff berechnet. Er beträgt 286 kJ / mol. Ein Mol Wasserstoff hat ein Volumen von $V_m = 22414$ ml (bei 1 bar und 0° C) bzw. $V_m = 24414$ ml (bei 1 bar und 20° C).

Die elektrische Energie E_{el} wird über $E_{el} = U \times I \times t$ berechnet. Zur Berechnung der chemischen Energie H_0 wird der Brennwert des H₂- Gases auf Volumen bezogen:

$$H_{0(V)} = H_0 \times \frac{1}{V_m} = 286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{24414 \text{ ml}} = 0,01171 \frac{\text{kJ}}{\text{ml}} = 11,71 \frac{\text{J}}{\text{ml}}$$

$$E_{ch} = H_{0(V)} \times V_{exp}$$

Fortsetzung der Aufgaben nächste Seite →

Aufgabe

Strom I in mA	Elektrische Energie E _{el} in J	Chemische Energie E _{ch} in J	Energiewirkungsgrad η _E in %
100	1,56 V x 0,1 A x 720 s = 112,3 J	9 ml x 11,7 $\frac{J}{ml}$ = 105,3 J	$\frac{105,3 J}{112,3 J} \times 100 = 93,8 \%$
500	1,85 V x 0,5 A x 240 s = 222,0 J	16 ml x 11,7 $\frac{J}{ml}$ = 187,2 J	$\frac{187,2 J}{222,0 J} \times 100 = 84,3 \%$

3. Vergleichen Sie die beiden Energiewirkungsgrade η_E des Elektrolyseurs miteinander. Welche Vorgänge bei der Elektrolyse beeinflussen den Wirkungsgrad?

Der Wirkungsgrad nimmt mit steigender Stromstärke ab. Für die Elektrolyse wird eine höhere

Spannung erforderlich.

Ursache sind Verluste (Überspannungen) durch chemische Reaktionen sowie den damit

verbundenen Änderungen an den Elektrolyten:

Konzentrationsunterschiede, Hemmung der Elektrodenreaktion, ohmsche Widerstände im

Elektrolyten.

Die Elektrolyseapparatur selbst besitzt ebenfalls einen ohmschen Widerstand.

Ein Zeichen für die Verluste ist die Wärmeentwicklung.

4. Definieren Sie den Faraday-Wirkungsgrad η_F des Elektrolyseurs.

Der Faraday-Wirkungsgrad η_F ist das Verhältnis zwischen der tatsächlich hergestellten Gasmenge

V_{exp} und der theoretisch erwarteten Gasmenge V_{theo}:

$$\eta_F = \frac{V_{exp}}{V_{theo}}$$

5. Berechnen Sie den Faraday-Wirkungsgrad η_F des Elektrolyseurs für die verwendeten Stromstärken. Beachten Sie: Ein Mol Wasserstoff hat ein Volumen von $V_m = 22414 \text{ ml}$ (bei 1 bar und 0° C) bzw. $V_m = 24414 \text{ ml}$ (bei 1 bar und 20° C) und besteht aus zwei Mol Wasserstoffionen.

$$Q = n \cdot z \cdot x \cdot F \quad \text{Ionenwertigkeit } z = 1$$

$$I \cdot t = \frac{V_{\text{theo}} \cdot z \cdot x \cdot F}{V_m}$$

$$V_{\text{theo}} = \frac{I \cdot t \cdot V_m}{z \cdot x \cdot F}$$

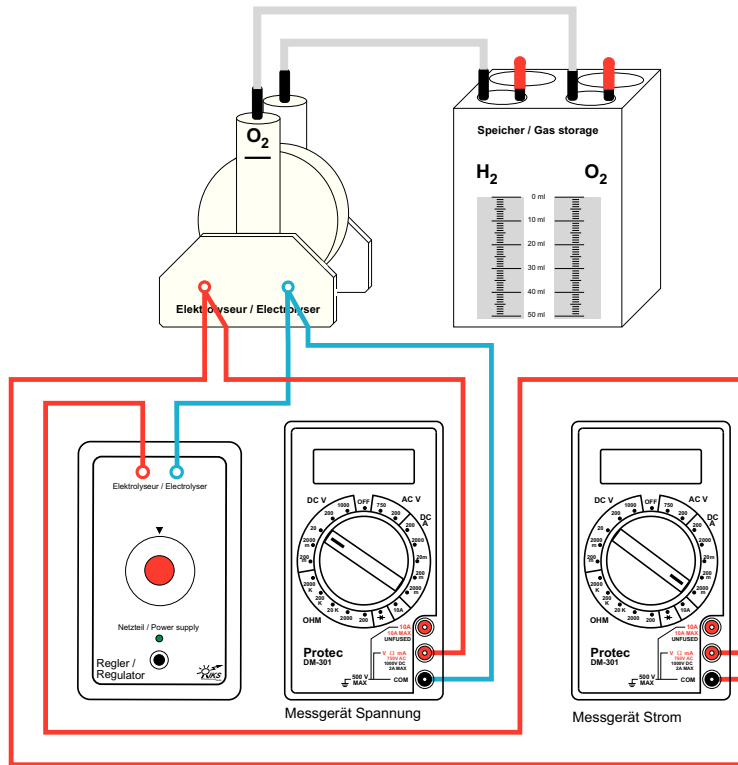
Strom I in mA	theoretisch herstellbare Gasmenge V_{theo} in ml	Faraday-Wirkungsgrad η_F in %
100	$\frac{0,1 \text{ A} \times 720 \text{ s} \times 24414 \text{ ml / mol}}{2 \times 96486 \text{ As / mol}} = 9,1 \text{ ml}$	$\frac{9 \text{ ml}}{9,1 \text{ ml}} \times 100 \sim 100 \%$
500	$\frac{0,5 \text{ A} \times 240 \text{ s} \times 24414 \text{ ml / mol}}{2 \times 96486 \text{ As / mol}} = 15,2 \text{ ml}$	$\frac{16 \text{ ml}}{15,2 \text{ ml}} \times 100 \sim 100 \%$

6. Welche Vorgänge beeinflussen den Faraday-Wirkungsgrad η_F des Elektrolyseurs?

Der Faraday-Wirkungsgrad, auch Umsatzwirkungsgrad genannt, gibt an, welcher Anteil des eingesetzten Stromes tatsächlich in die Elektrodenreaktion eingesetzt wird.

Bei technischen Elektrolyseuren muss der Faraday-Wirkungsgrad nahe bei 100 % liegen. Wäre dieser kleiner, würden im System Nebenreaktionen ablaufen (z.B. Korrosion).

Aufbau



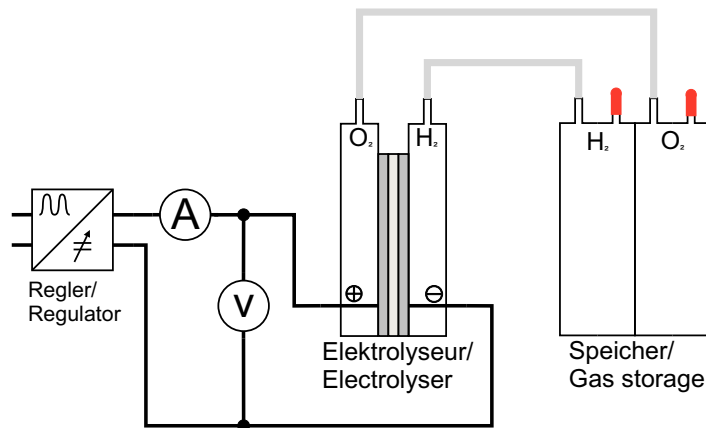
Messzeit: ca. 10 min
 Lernziele: I/U-Kennlinie, elektrische Eigenschaften des Elektrolyseurs

Die I/U-Kennlinie gibt die elektrischen Eigenschaften des Elektrolyseurs wieder. Für jeden Messpunkt wird mit dem Regelmodul die Stromstärke vorgegeben und am Spannungsmessgerät die zugehörige Spannung abgelesen. Da die Kennlinie bei niedrigen Stromstärken gekrümmt ist, sollten von 0 bis 100 mA mehrere Messwerte aufgenommen werden, darüber hinaus reicht ein Messwert pro 100 mA.

Bemerkenswert ist, dass die Kennlinie nicht wie z.B. bei anderen elektrischen Verbrauchern (Widerstand, Elektromotor, Glühlampe) durch den Nullpunkt geht. Es muss eine Mindestspannung, die sogenannte praktische Zersetzungsspannung, aufgebracht werden, bevor die Elektrolyse einsetzt und ein Strom fließt.

Die Kennlinie zeigt weiterhin, dass die Spannung mit der Stromstärke steigt. Dies verdeutlicht das in Experiment 3 gefundene Ergebnis und ermöglicht eine Abschätzung des Wirkungsgrades.

Schaltplan



Information

An der Strom-Spannungs-Kennlinie lassen sich die elektrischen Eigenschaften des Elektrolyseurs am genauesten ablesen.
Sie wird in diesem Experiment näher untersucht.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der obigen Darstellung auf.

Beachten Sie die Polung am Elektrolyseur!

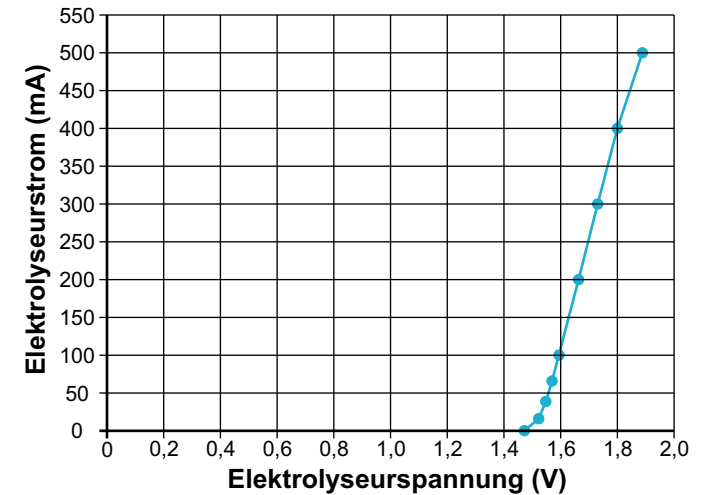
Verschließen Sie die jeweils rechten Anschlussstutzen des Gasspeichers mit den Verschlusskappen, damit die Gase nicht entweichen können.
Stellen Sie das Multimeter als Amperemeter auf den Messbereich **DC A 2000 m** und das Multimeter als Voltmeter auf den Bereich **DC V 20** ein.

Es sind Messungen bei unterschiedlichen Stromstärken durchzuführen.

Stellen Sie die vorgegebene Stromstärke über den Regler ein und notieren Sie die zugehörige Spannung in nebenstehende Tabelle.

Strom I in mA	Spannung U in V
0	1,47
20	1,52
40	1,54
60	1,55
100	1,57
200	1,65
300	1,73
400	1,82
500	1,90

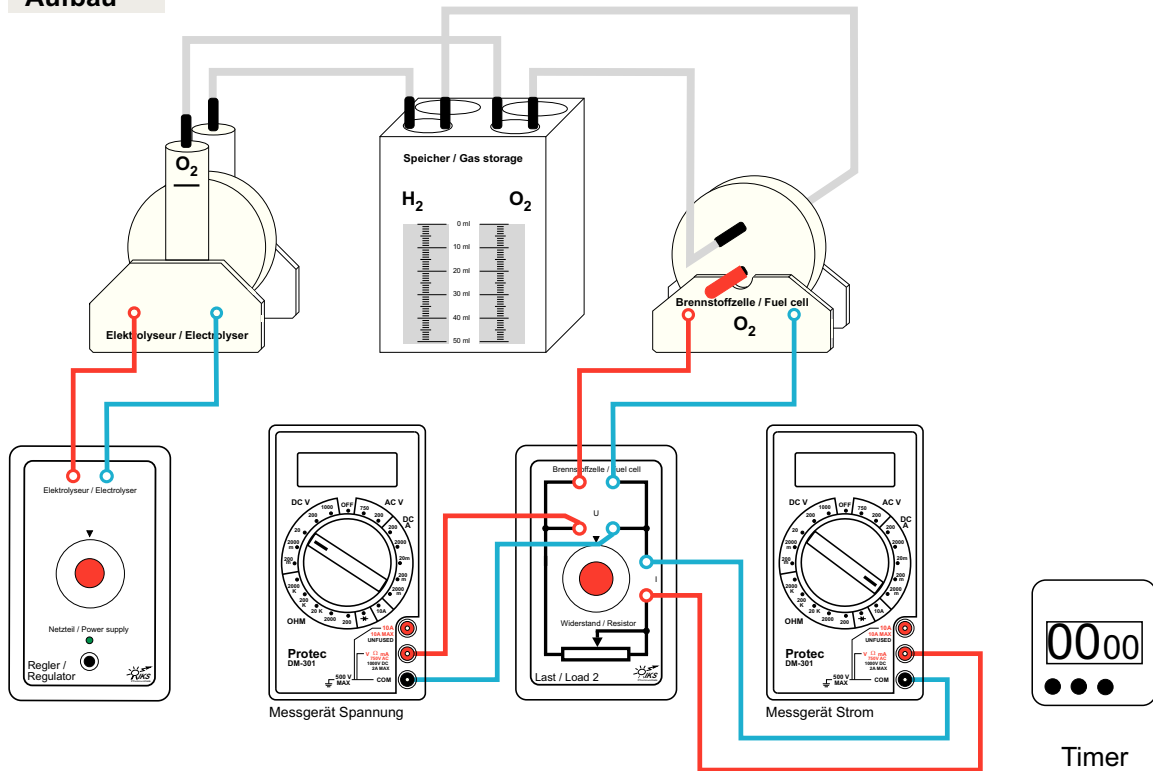
Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs



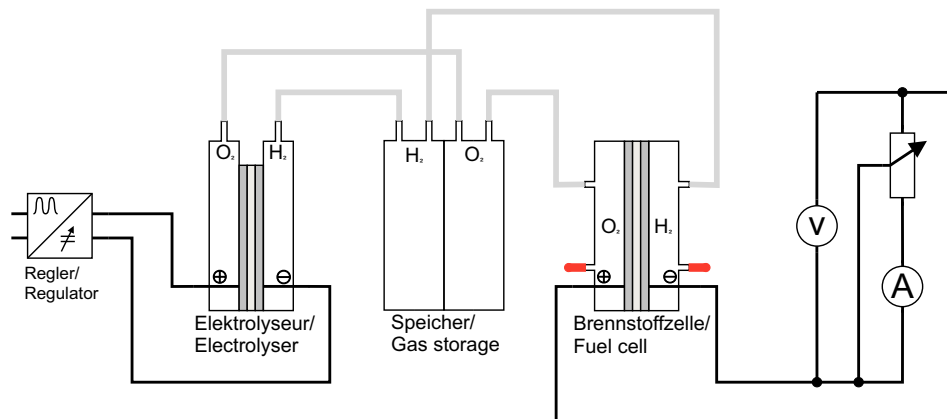
1. Tragen Sie die Werte in das Diagramm ein und zeichnen Sie eine Ausgleichskurve.
2. Was ist an der Strom-Spannungs-Kennlinie auffällig? Begründen Sie dies.

*Die I/U-Kennlinie verläuft nicht durch den Nullpunkt, erst ab ca. 1,4 V setzt die Elektrolyse...
ein. Mit zunehmender Stromstärke steigt die Spannung an. Unterhalb einer Spannung von...
ca. 1,4 V findet keine Elektrolyse statt, da das elektrische Potential für die Zerlegung von...
Wasser nicht ausreicht. Die Elektrolyse erfolgt erst, wenn die Spannung die praktische Zer-...
setzungsspannung von ca. 1,4 V erreicht. Diese setzt sich zusammen aus den einzelnen...
Redoxpotentialen (1,23 V, theoretische Zersetzungsspannung) und den Verlusten (Überspan-
nung) in der Zelle. Mit steigender Stromstärke nehmen die Verluste zu und damit einher-...
gehend auch die Spannung.*

Aufbau



Schaltplan



Messzeit: ca. 10 min
 Lernziele: Abhängigkeit des Energie- und des Faraday-Wirkungsgrades von der Stromstärke

Experiment 5 behandelt den Energie- und Faraday-Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Vor dem eigentlichen Beginn des Experimentes wird der Gaspeicher durch Elektrolyse mit Wasserstoff und Sauerstoff gefüllt, indem das Regelmodul auf Maximum gestellt wird.

Während der Messung muss das Regelmodul auf Null stehen, damit das umgesetzte Gasvolumen gemessen werden kann.

Mit dem Potentiometer des Messmoduls wird die Brennstoffzelle belastet und darüber die Stromstärke eingestellt. Zur Ermittlung genauer Werte sollte solange gewartet werden, bis mehrere Milliliter Gas umgesetzt sind (ca. 2 bis 3 Minuten). Die Vorgehensweise in der Auswertung des Experimentes entspricht der des Experimentes 3. Zunächst werden die Wirkungsgrade definiert und anschließend berechnet. Danach erfolgt die Diskussion über die jeweils zu den beiden Stromstärken ermittelten Wirkungsgraden.

An dieser Stelle kann auch der Gesamtwirkungsgrad der Energieübertragungskette elektrische Energie-chemische Energie-elektrische Energie diskutiert werden. Dieser berechnet sich aus den Teilwirkungsgraden des Systems:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Elektrolyse}} \times \eta_{\text{Brennstoffzelle}}$$

Information

Die Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie des Wasserstoffs und des Sauerstoffs in nutzbare elektrische Energie um.

Über das verbrauchte Gasvolumen und den gewonnenen Strom wird in diesem Experiment der Energie- und der Faraday-Wirkungsgrad berechnet.

Aufgabe

Hinweis: vor diesem Experimenten die Brennstoffzelle bitte noch einmal sorgfältig entlüften. Siehe: Inbetriebnahme Seite 9 - 10.

Bauen Sie das Experiment entsprechend der obigen Darstellung auf.

Beachten Sie die Polung am Elektrolyseur!

Stellen Sie ein Multimeter als Amperemeter auf den Messbereich **DC A 2000 m** und ein Multimeter als Voltmeter auf den Bereich **DC V 20** ein.

Vor dem eigentlichen Experiment wird der Gasspeicher mit Gas gefüllt.

Stellen Sie dazu den Regler auf Maximum.

Während der Messung darf keine Elektrolyse stattfinden. Der Regler muss auf **0** stehen. Sollte der Gasvorrat knapp werden, wird der Speicher zwischen den Messungen wieder aufgefüllt.

Es sollen Messungen bei zwei verschiedenen Belastungswiderständen durchgeführt werden. Stellen Sie die vorgegebene Stromstärke (**0,5 A**) über den Belastungswiderstand der Last 2 ein und halten Sie den anfänglichen Füllstand des Wasserstoffgasspeichers in der Tabelle fest.

Geben Sie das zugehörige Zeitintervall in den Timer ein und starten Sie die Zeitmessung.

Die eingestellte Stromstärke, bitte bei Bedarf, durch vorsichtiges Nachregeln konstant halten.

Messen Sie die Spannung und notieren Sie nach Ablauf der Zeit den neuen Füllstand.

Fahren Sie dann mit der nächsten Stromstärke (**0,2 A**) fort.

Die eingestellte Stromstärke, bitte bei Bedarf, durch vorsichtiges Nachregeln konstant halten.

Berechnen Sie aus der Differenz von Start- und Endfüllstand einer Messung jeweils das verbrauchte Gasvolumen.

Strom I in mA	Spannung U in V	Zeit t in min	Volumen H ₂ in ml		Δ V in ml
			Start	Ende	
500	0,61	2	35	26	9
200	0,72	3	40	35	5

1. Definieren Sie den Energiewirkungsgrad η_E der Brennstoffzelle.

Der Energiewirkungsgrad η_E ist das Verhältnis zwischen der gewonnenen elektrischen Energie E_{el} und der gespeicherten chemischen Energie E_{ch} des verbrauchten Wasserstoffgases:

$$\eta_E = \frac{E_{el}}{E_{ch}}$$

2. Berechnen Sie den Energiewirkungsgrad η_E der Brennstoffzelle. Die chemische Energie wird über den Brennwert von Wasserstoff berechnet. Er beträgt 286 kJ / mol. Ein Mol Wasserstoff hat ein Volumen von $V_m = 22414$ ml (bei 1 bar und 0° C) bzw. $V_m = 24414$ ml (bei 1 bar und 20° C).

Die elektrische Energie E_{el} wird über $E_{el} = U \times I \times t$ berechnet. Zur Berechnung der chemischen Energie E_{ch} wird der Brennwert H_0 des H₂-Gases auf Volumen bezogen:

$$H_{0(V)} = H_0 \times \frac{1}{V_m} = 286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{24414 \text{ ml}} = 0,01171 \frac{\text{kJ}}{\text{ml}} = 11,71 \frac{\text{J}}{\text{ml}}$$

$$E_{ch} = H_{0(V)} \times V_{exp}$$

Fortsetzung der Aufgaben nächste Seite →

Aufgabe

Strom I in mA	Elektrische Energie E _{el} in J	Chemische Energie E _{ch} in J	Energiewirkungsgrad η _E in %
500	0,61 V x 0,5 A x 120 s = 36,6 J	9 ml x 11,7 $\frac{J}{ml}$ = 105,3 J	$\frac{36,6 J}{105,3 J} \times 100 = 34,8 \%$
200	0,72 V x 0,2 A x 180 s = 25,9 J	5 ml x 11,7 $\frac{J}{ml}$ = 58,5 J	$\frac{25,9 J}{58,5 J} \times 100 = 44,3 \%$

3. Vergleichen Sie die beiden Energiewirkungsgrade η_E der Brennstoffzelle miteinander. Welche Vorgänge in der Brennstoffzelle beeinflussen den Wirkungsgrad?

Der Wirkungsgrad nimmt mit steigender Stromstärke ab. Ursache sind Verluste durch Überspannungen in der Brennstoffzelle. Diese kommen durch die chemischen Reaktionen und den damit verbundenen Veränderungen an den Elektroden und im Elektrolyten zustande: Konzentrationsunterschiede, Hemmung der Elektrodenreaktion, ohmsche Widerstände im Elektrolyten. Dadurch sinkt die Spannung (nutzbare Klemmenspannung).

4. Definieren Sie den Faraday-Wirkungsgrad η_F der Brennstoffzelle.

Der Faraday-Wirkungsgrad η_F ist das Verhältnis zwischen dem theoretisch zu erwartenden Gasverbrauch V_{theo} und dem tatsächlichen Gasverbrauch V_{exp}:

$$\eta_F = \frac{V_{theo}}{V_{exp}}$$

5. Berechnen Sie den Faraday-Wirkungsgrad η_F der Brennstoffzelle für die verwendeten Stromstärken. Beachten Sie: Ein Mol Wasserstoff hat ein Volumen von $V_m = 22414 \text{ ml}$ (bei 1 bar und 0° C) bzw. $V_m = 24414 \text{ ml}$ (bei 1 bar und 20° C) und besteht aus zwei Mol Wasserstoffionen.

$$Q = n \times z \times F \quad \text{Ionenwertigkeit } z = 1$$

$$I \times t = \frac{V_{\text{theo}} \times z \times F}{V_m}$$

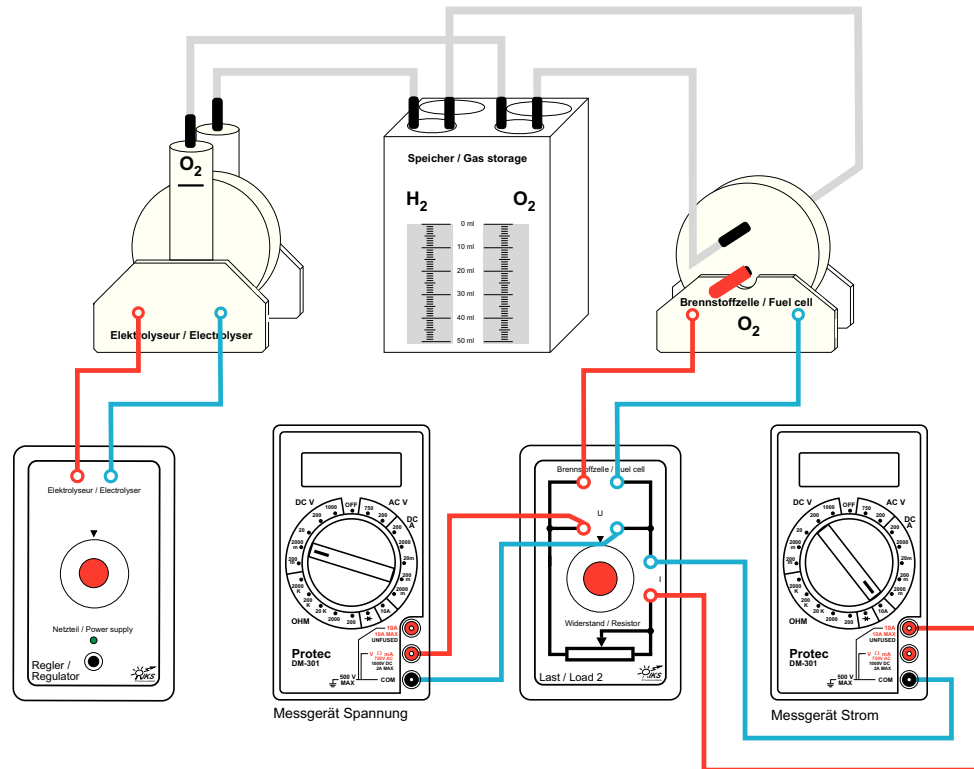
$$V_{\text{theo}} = \frac{I \times t \times V_m}{z \times F}$$

Strom I in mA	theoretisch herstellbare Gasmenge V_{theo} in ml	Faraday-Wirkungsgrad η_F in %
500	$\frac{0,5 \text{ A} \times 120 \text{ s} \times 24414 \text{ ml / mol}}{2 \times 96486 \text{ As / mol}} = 7,6 \text{ ml}$	$\frac{7,6 \text{ ml}}{9 \text{ ml}} \times 100 = 84 \%$
200	$\frac{0,2 \text{ A} \times 180 \text{ s} \times 24414 \text{ ml / mol}}{2 \times 96486 \text{ As / mol}} = 4,6 \text{ ml}$	$\frac{4,6 \text{ ml}}{5 \text{ ml}} \times 100 = 92 \%$

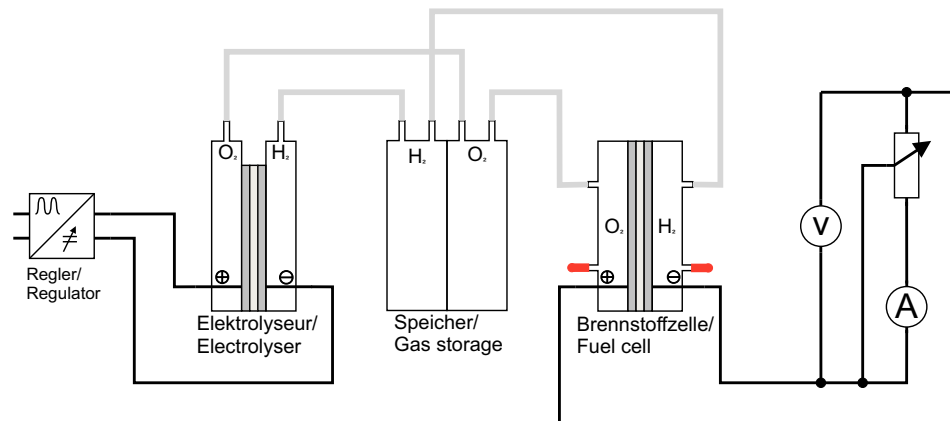
6. Welche Vorgänge beeinflussen den Faraday-Wirkungsgrad η_F der Brennstoffzelle?

Der Faraday-Wirkungsgrad, auch Umsatzwirkungsgrad genannt, gibt den Anteil des Brennstoffes an, der in der Elektrodenreaktion umgesetzt wird. Der höhere Verbrauch kommt durch Nebenreaktionen, katalytische Verbrennungen des Brennstoffes und Diffusion durch Lecks zustande.

Aufbau



Schaltplan



Messzeit: ca. 15 min

Lernziele: I/U- und P/I-Kennlinie, elektrische Eigenschaften der Brennstoffzelle, Leistungsanpassung.

Die I/U-Kennlinie zeigt die elektrischen Eigenschaften der Brennstoffzelle: über die P/I-Kennlinie wird ihr Leistungsmaximum bestimmt.

Der erste Messpunkt ist die Leerlaufspannung, die gemessen wird, solange das Strommessgerät noch nicht angeschlossen ist.

Für die Stromstärkemessungen wird der 10 A-Messbereich eingestellt, da er einen geringeren Innenwiderstand als der 2000 mA-Messbereich besitzt.

So können die Messungen möglichst nahe an den Wert für die Kurzschlussstromstärke gelangen.

Sollte während des Experimentes die Leistung der Brennstoffzelle einbrechen, wurde das System nicht vollständig entlüftet. Kurzzeitiges Entfernen der Verschlusskappen an der Brennstoffzelle behebt das Problem.

Die Leistung errechnet sich aus dem Produkt aus Spannung und Stromstärke.

Über die Ausgleichskurve der P/I-Kennlinie lässt sich das Leistungsmaximum ermitteln. In diesem Arbeitspunkt spricht man von Leistungsanpassung.

Während die Leerlaufspannung der hier eingesetzten Brennstoffzelle bei etwa 0,9 V liegt, kann ihre Kurzschlussstromstärke je nach Toleranz variieren, so dass die gemessenen Ergebnisse von den Messbeispielen abweichen können.

Information

Die Strom-Spannungs-Kennlinie ist ein wichtiges Charakteristikum für stromerzeugende Systeme. In diesem Experiment wird die Kennlinie der Brennstoffzelle untersucht und in Beziehung zur Leistungskurve der Zelle gesetzt.

Aufgabe

Hinweis: Bei Experimenten mit der Brennstoffzelle siehe Inbetriebnahme Seite **9-10**.

Bauen Sie das Experiment entsprechend der obigen Darstellung auf.

Beachten Sie die Polung am Elektrolyseur!

Stellen Sie das Multimeter als Amperemeter auf den Messbereich **DC A 10A** ein. Das Plus-Kabel von Last 2 wird jedoch erst zu Beginn des Experimentes mit der obersten Messbuchse des Stromstärkemessgerätes verbunden, andernfalls würde die Brennstoffzelle bereits Gas verbrauchen.

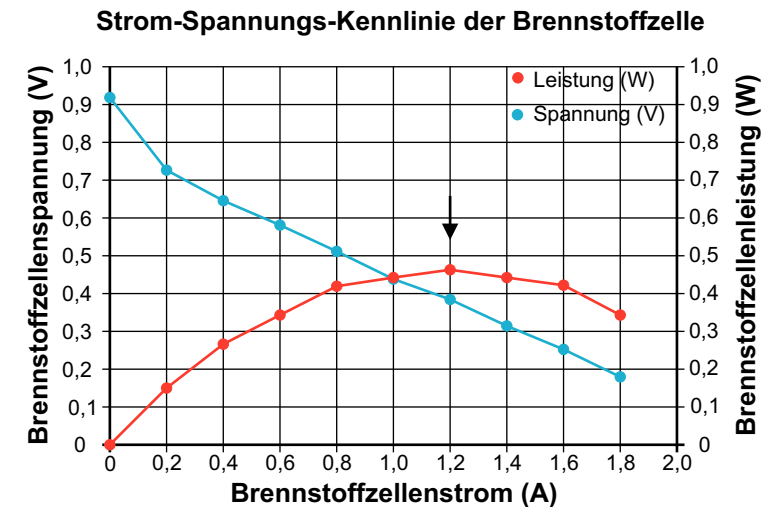
Vor dem eigentlichen Experiment wird die Anlage nach (Inbetriebnahme Seite **10**) entlüftet. Danach wird der Gasspeicher mit Gas gefüllt. Stellen Sie dazu den Regler auf Maximum. Während der Messung kann der Elektrolyseur weiter in Betrieb sein.

Stellen Sie das Multimeter als Voltmeter auf den Bereich **DC V 2000 m** ein und messen Sie die Leerlaufspannung (Strom $I = 0$). Schließen Sie danach das Stromstärkemessgerät an.

Stellen Sie nun über das Potentiometer von Last 2 die Stromstärken ein. Beginnen Sie mit einem großen Widerstand und reduzieren ihn so, dass jeweils im Abstand von **0,2 A** ein Messpunkt erhalten wird. Messen Sie die dazugehörige Spannung und tragen Sie die Werte in die Tabelle ein.

Die letzten Messpunkte sollten zügig aufgenommen werden, damit der Gasspeicher nicht leer läuft.

Strom I in A	Spannung U in V	Leistung P in W
0,0	0,92	0,00
0,2	0,73	0,15
0,4	0,66	0,26
0,6	0,59	0,35
0,8	0,52	0,42
1,0	0,44	0,44
1,2	0,39	0,47
1,4	0,31	0,43
1,6	0,26	0,42
1,8	0,19	0,34



1. Tragen Sie die gemessenen Werte für die Stromstärken I und die Spannungen U in das Diagramm ein und zeichnen Sie eine Ausgleichskurve. Diskutieren Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle.

Die Leerlaufspannung beträgt 0,9 V. Aufgrund der Verluste durch Überspannungen liegt sie unter der theoretischen Zellspannung von 1,23 V.

Mit zunehmender Stromstärke nehmen die Überspannungen zu, und die Spannung fällt erst stark, anschließend weniger stark ab.

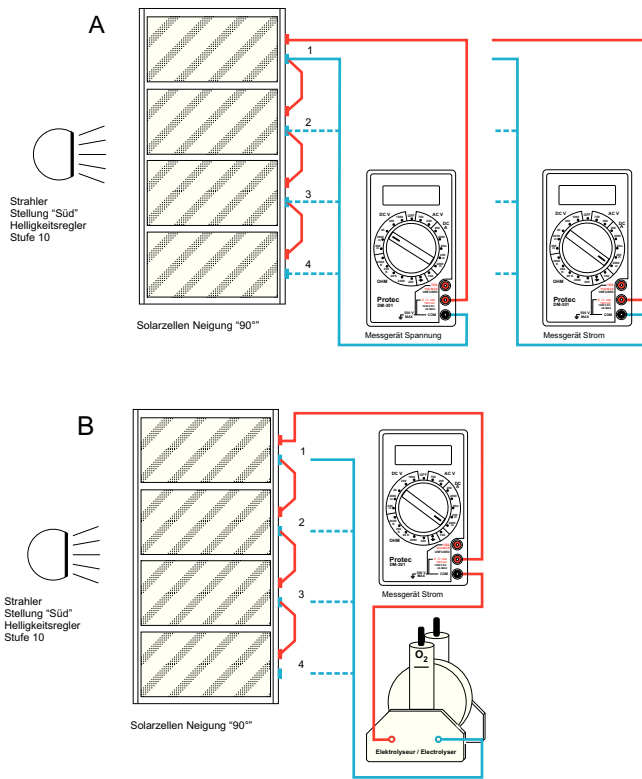
Überspannungen kommen durch die chemische Reaktion und die damit verbundenen Änderungen an den Elektroden und im Elektrolyten zustande:

Konzentrationsunterschiede, Hemmung der Elektrodenreaktion, ohmsche Widerstände im Elektrolyten.

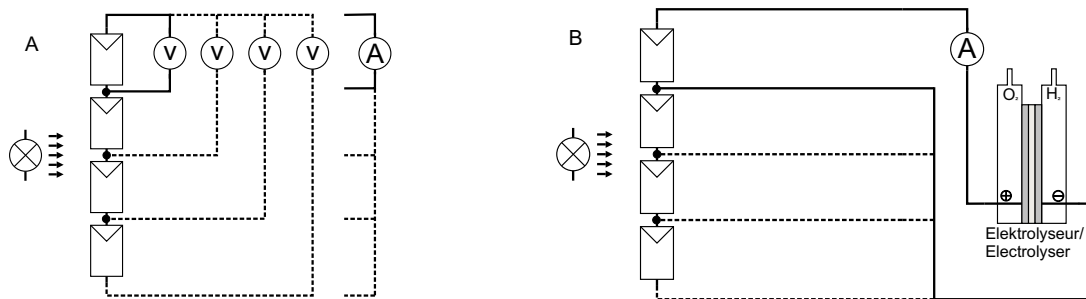
2. Berechnen Sie aus der Stromstärke I und der Spannung U die jeweilige Leistung P . Tragen Sie die berechneten Werte in das Diagramm ein und zeichnen Sie eine Ausgleichskurve. An welchem Punkt wird die größte Leistung der Brennstoffzelle entnommen (Leistungsanpassung)? Warum wird die Brennstoffzelle jedoch meist nicht in diesem Punkt, sondern bei einer geringeren Stromstärke betrieben?

Die maximale Leistung wird bei ca. 1,2 A entnommen. Bei geringeren Stromstärken besitzt die Brennstoffzelle jedoch einen höheren Wirkungsgrad, da die Verluste durch Überspannungen geringer sind als bei höheren Stromstärken. Die Zellspannung liegt näher an der theoretischen Zellspannung.

Aufbau



Schaltplan



Messzeit: ca. 10 min
 Lernziele: Erzeuger-/Verbraucher-Anpassung,
 Reihenschaltung von Solarzellen

Der Elektrolysestrom wird in diesem Experiment durch eine Reihenschaltung von Solarzellen aus dem Experimentiersystem SOLARTRAINER junior geliefert. Zunächst werden Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke der Solarzellen ermittelt. Mit den Kenntnissen des Experimentes 10 des SOLARTRAINER junior lassen sich die I/U-Kennlinien der Solarzellen direkt skizzieren. Zur Auswertung wird zudem die I/U-Kennlinie des Elektrolyseurs (Experiment 4) benötigt.

Erst bei einem Modul aus drei Solarzellen ergibt sich ein Stromfluss; bei vier Solarzellen stellt sich ein ausreichender Strom ein. Dies lässt sich durch die Kennlinien des Diagramms begründen. Der Schnittpunkt der Kennlinie des Solarmoduls mit der des Elektrolyseurs stellt den Arbeitspunkt dar (A, B).

Überschneiden sich die Kennlinien nicht, z.B. bei zwei Solarzellen, findet keine Elektrolyse statt.

Wird der Gesamtwirkungsgrad der Energieübertragungskette diskutiert, muss der Wirkungsgrad der Solarzellen mit einbezogen werden:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Solarzellen}} \times \eta_{\text{Elektrolyse}} \times \eta_{\text{Brennstoffzelle}}$$

Dazu sind weitere Vorkenntnisse aus der Photovoltaik, z.B. durch die Experimente mit dem SOLARTRAINER junior, nötig.

Information

Die Wasserstofftechnik wird insbesondere dann interessant, wenn zur Erzeugung des Wasserstoffs regenerative Energien, z.B. Solarenergie, zum Einsatz kommen. In diesem Experiment wird der Betrieb des Elektrolyseurs mit Solarzellen untersucht.

Hinweis: Für die Durchführung dieses Experimentes wird das Experimentiersystem SOLARTRAINER junior benötigt.

Aufgabe

A: Bauen Sie das Experiment zunächst entsprechend der obigen Darstellung **A** auf.

Messen Sie jeweils die Leerlaufspannung und die Kurzschlussstromstärke für eine Solarzelle bzw. zwei, drei und vier in Reihe geschaltete Solarzellen.

Verwenden Sie zur Spannungsmessung ein Multimeter als Voltmeter mit dem Messbereich **DC V 20** und zur Stromstärkemessung ein Multimeter als Amperemeter mit dem Messbereich **DC A 2000 m**.

Tragen Sie die Werte in die Tabelle **1** ein.

B: Bauen Sie das Experiment dann nach der obigen Darstellung **B** auf.

Messen Sie nun für eine Solarzelle bzw. für zwei, drei und vier in Reihe geschaltete Solarzellen die Stromstärke, die durch den Elektrolyseur fließt und halten Sie die Messwerte ebenfalls in der Tabelle **1** fest.

Beachten Sie zusätzlich die Gasentwicklung.

Tabelle 1

Zahl der in Reihe geschalteten Solarzellen	1	2	3	4
Leerlaufspannung des Solarmoduls U_{LL} in V	0,53	1,07	1,62	2,14
Kurzschlussstrom des Solarmoduls I_k in mA	146	148	150	148
Strom durch den Elektrolyseur	0	0	60	140

Fortsetzung der Aufgaben nächste Seite →

Aufgabe

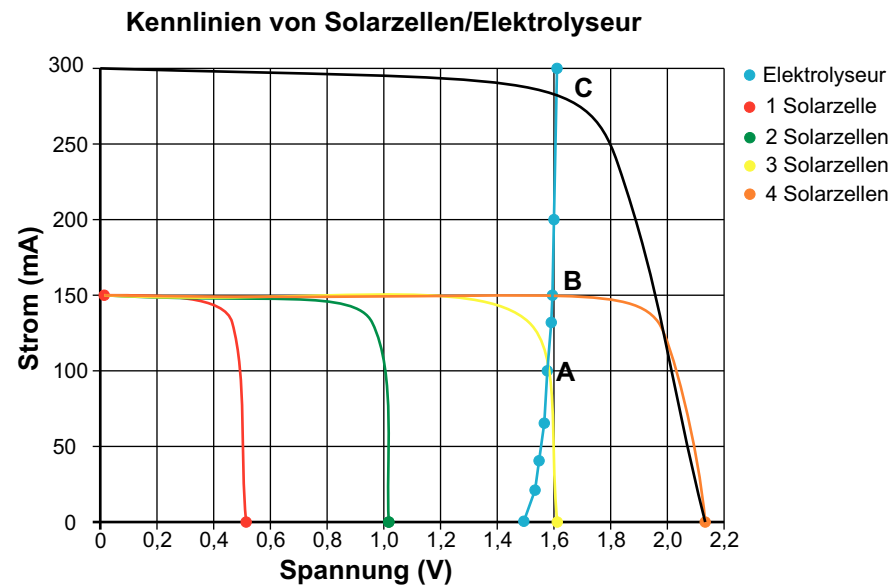
1. Verwenden Sie die Messwerte für die I/U-Kennlinie des Elektrolyseurs bitte von Experiment 4 Seite 16 und übertragen sie in die Tabelle 2. Dann zeichnen Sie die I/U-Kennlinie des Elektrolyseurs in das Diagramm ein.
2. Zeichnen Sie die Kennlinien der Module aus einer, zwei, drei und vier Solarzellen in das Diagramm ein.

Hinweis:

Die Kennlinien für die Solarzellenmodule entsprechen von der Form, denen einer einzelnen Solarzelle. Verwenden Sie die gemessenen Leerlaufspannungen U_{LL} und die Kurzschlussstromstärken I_{KS} aus Tabelle 1 als Eckpunkte und tragen die Kurvenform anhand dieser in das Diagramm ein.

Tabelle: 2 (Werte von Experiment 4)

Elektrolyseur: I/U Kennlinie	
Strom I in mA	Spannung U in V
0	1,47
20	1,52
40	1,54
60	1,55
100	1,57
130	1,58
150	1,59
200	1,60
300	1,62



3. Wie viele Solarzellen werden mindestens benötigt, damit sich im Elektrolyseur eine Stromstärke I größer **null** einstellt? Kennzeichnen Sie die Stelle auf der Elektrolyseur-kennlinie mit **A**. Lohnt es sich weitere Solarzellen in Reihe zu schalten? Wenn ja, kennzeichnen Sie die Stelle auf der Elektrolyseurkennlinie mit **B**. Begründen Sie Ihre Antwort mit Hilfe der skizzierten Kennlinien.

Es müssen mindestens drei Solarzellen in Reihe geschaltet werden, damit die zur Elektrolyse benötigte Mindestspannung erreicht wird (A).

Mit vier Solarzellen stellt sich eine ausreichende Stromstärke und somit die Wasserstoffproduktion ein (B).

Bei weiteren Reihenschaltungen erhöht sich die Leerlaufspannung des Solarmodules, die Kurzschlussstromstärke bleibt gleich. Die Stromstärke kann jedoch die Kurzschlussstromstärke nicht überschreiten.

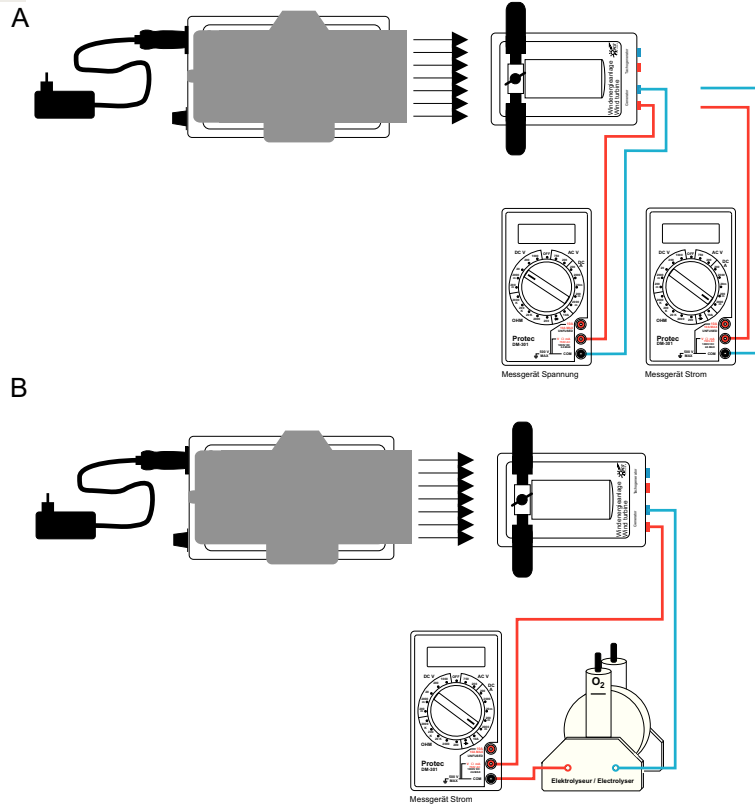
4. Wie könnte die Wasserstoffproduktion gesteigert werden?

Lohnt es sich, weitere Solarzellen parallel zu schalten? Begründen Sie Ihre Antwort mit einer zusätzlich eingezeichneten Kennlinie. Kennzeichnen Sie den Punkt auf der Elektrolyseurkennlinie mit **B**.

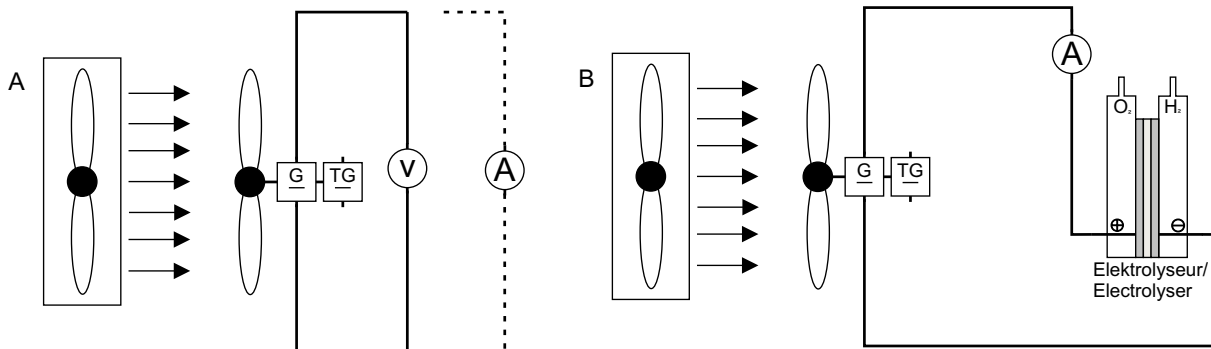
Werden zusätzlich vier in Reihe geschaltete Solarzellen parallel geschaltet, so verdoppelt sich die Kurzschlussstromstärke bei gleichbleibender

Leerlaufspannung und Punkt C stellt sich ein. Die Wasserstoffproduktion steigt.

Aufbau



Schaltplan



Messzeit: ca. 10 min
 Lernziele: Erzeuger-Verbraucher-Anpassung

In Experiment 8 wird der elektrische Strom für die Elektrolyse durch eine Windenergieanlage aus dem Experimentiersystem WINDTRAINER junior geliefert.

Für die Wahl geeigneter Parameter sind Kenntnisse aus den Experimenten des WINDTRAINER junior hilfreich, sie können den Schülern jedoch auch vorgegeben werden.

Zur Auswertung wird zudem die I/U-Kennlinie des Elektrolyseurs (Experiment 4) benötigt.

Zunächst werden Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke der Windenergieanlage für die gewählten Parameter gemessen und darüber eine als Gerade vereinfachte I/U-Kennlinie ermittelt.

Bei Anschluss der Windenergieanlage an den Elektrolyseur stellt sich ein Arbeitspunkt ein, der durch den Schnittpunkt dieser Kennlinie mit der Kennlinie des Elektrolyseurs wiedergegeben wird.

Nun wird die Windgeschwindigkeit reduziert, bis sich die Elektrolysestromstärke bei etwa null einstellt.

Die aufgenommenen elektrischen Eckwerte Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke geben die I/U-Kennlinie der Windenergieanlage bei der vorliegenden Windgeschwindigkeit wieder.

Da die Leerlaufspannung kleiner ist als die des Elektrolyseurs, findet keine Elektrolyse statt.

Wird der Gesamtwirkungsgrad der Energieübertragungskette diskutiert, muss der Wirkungsgrad der Windenergieanlage mit einbezogen werden:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Windenergieanlage}} \times \eta_{\text{Elektrolyse}} \times \eta_{\text{Brennstoffzelle}}$$

Dazu sind weitere Vorkenntnisse aus der Windenergietechnik, z.B. durch die Experimente mit dem WINDTRAINER junior, nötig.

Information

Zur Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Energien eignet sich neben der Solar- auch die Windenergie. In diesem Experiment wird der Betrieb des Elektrolyseurs mit einer Windenergieanlage untersucht.

Hinweis: Für die Durchführung dieses Experimentes wird das Experimentiersystem WINDTRAINER junior benötigt.

Aufgabe

Bauen Sie das Experiment entsprechend der oben gezeigten Darstellung und den unten aufgeführten Einstellungen auf. Verwenden Sie zur Spannungsmessung das Multimeter als Voltmeter mit dem Messbereich **DC V 20** und zur Stromstärke-messung das Multimeter als Amperemeter mit dem Messbereich **DC A 2000 m**.

- A:** Messen Sie jeweils die Leerlaufspannung und die Kurzschlussstromstärke der Windenergieanlage. Tragen Sie die Messwerte in Tabelle 1 ein.
- B:** Schließen Sie nun den Elektrolyseur an die Windenergieanlage an. Beachten Sie die Polung! Messen Sie, bei Windgeschwindigkeit **10 m/s**, die Stromstärke, die durch den Elektrolyseur fließt und tragen sie in Tabelle 1 ein. Beachten Sie zusätzlich die Gasentwicklung. Verringern Sie die Windgeschwindigkeit, bis die Stromstärke durch den Elektrolyseur auf **null** zurückgeht. Messen Sie die Windgeschwindigkeit, die dazugehörige Leerlaufspannung, die Kurzschlussstromstärke der Windenergieanlage und tragen die Werte in Tabelle 2 ein.
- C:** Zeichnen Sie die I/U-Kennlinien des Elektrolyseurs (Werte bitte von Experiment 4 S. 16 übernehmen) und die der Windenergieanlage für beide Windgeschwindigkeiten in das Diagramm ein. Nehmen Sie für die Kennlinien der Windenergieanlage näherungsweise eine Gerade an.

Einstellungen:

Windenergieanlagentyp: Auftrieb
 Flügelanzahl: 4
 Flügelform: gewölbt
 Einstellwinkel: 75°
 Windgeschwindigkeit: 10 m/s (maximal)

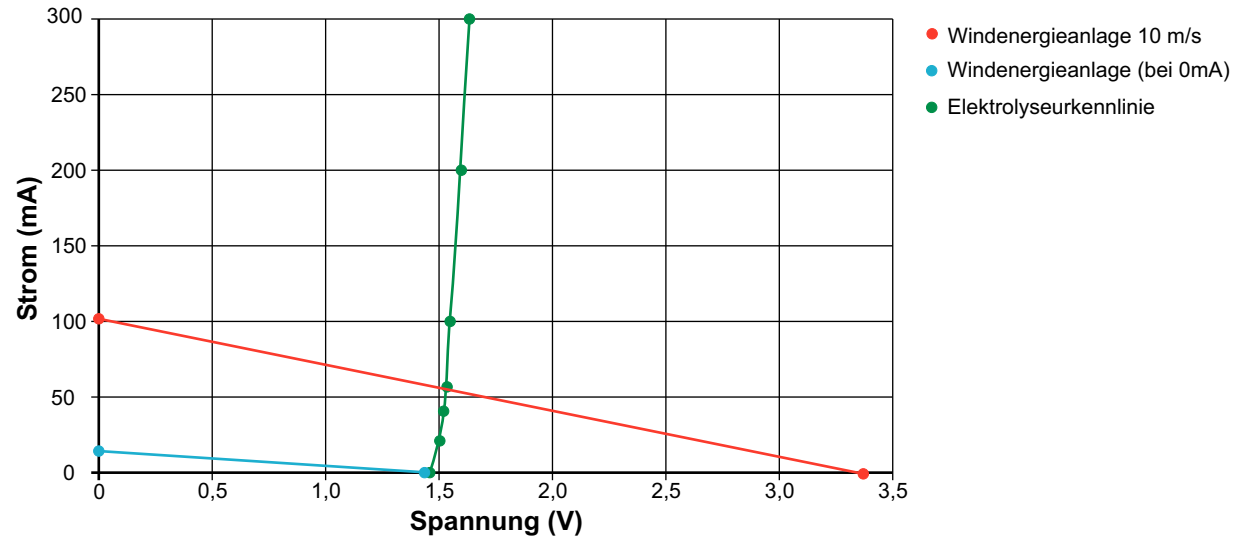
Tabelle 1

Leerlaufspannung der Windenergieanlage U_{LL} in V	3,3
Kurzschlussstrom der Windenergieanlage I_k in mA	106
Strom durch den Elektrolyseur in mA	106

Tabelle 2

Grenzfall ($I=0$)	
Grenz-Windgeschwindigkeit in m/s	4,9
Leerlaufspannung der Windenergieanlage U_{LL} in V	1,41
Kurzschlussstrom der Windenergieanlage I_{KS} in mA	10

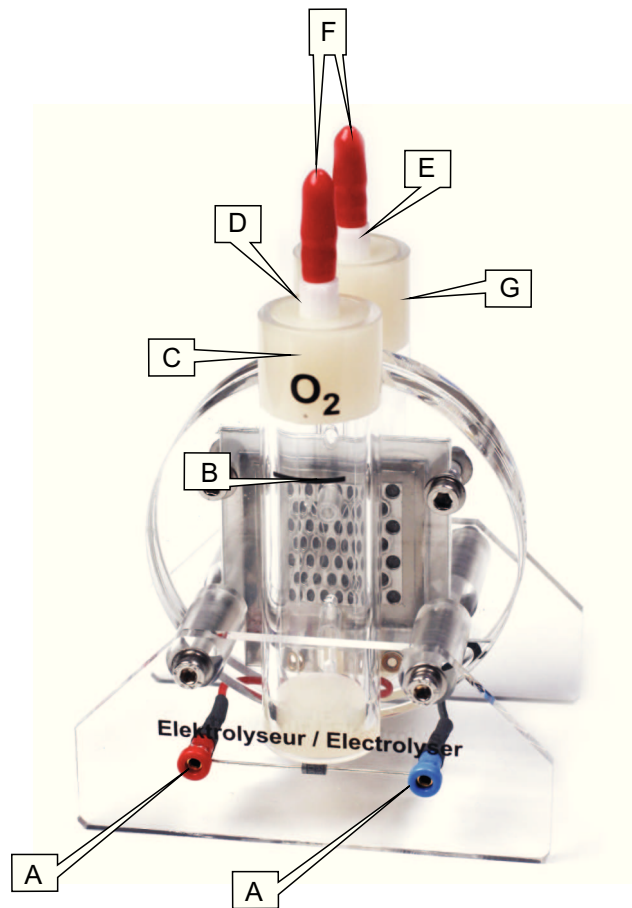
Kennlinien von Windenergieanlage/Elektrolyseur



1. Wie erklärt es sich, dass die Stromstärke auf null sinkt, bevor die Windgeschwindigkeit gleich null ist? Verwenden Sie zur Erklärung das Diagramm mit den Kennlinien.

Der Arbeitspunkt für die Elektrolyse ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Kennlinien für die Windenergieanlage und dem Elektrolyseur. Die Leerlaufspannung des Generators sinkt mit abnehmender Windgeschwindigkeit. Im Grenzfall sinkt die Leerlaufspannung des Generators unter die zur Elektrolyse notwendige Mindestspannung (Zersetzungsspannung), der Schnittpunkt liegt bei 0 mA.

Elektrolyseur



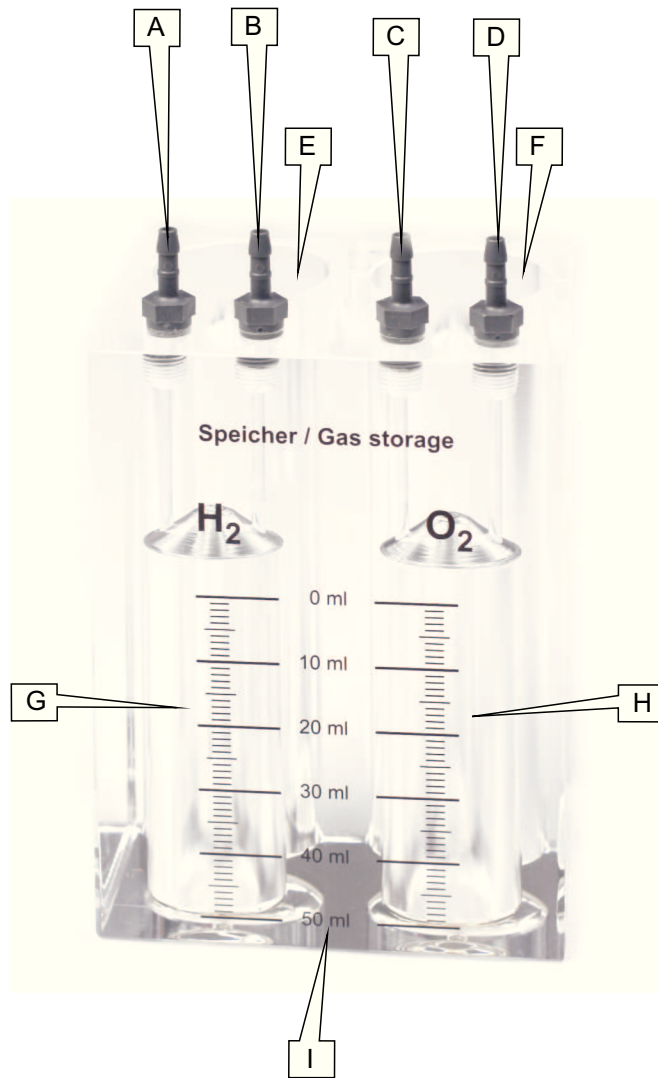
Das Wasser kann im Elektrolyseur verbleiben.

Verschließen Sie die Anschlussstutzen **D** und **E** sorgfältig mit den Verschlusskappen **F**, damit der Elektrolyseur im Koffer nicht ausläuft.

Bitte beachten Sie:

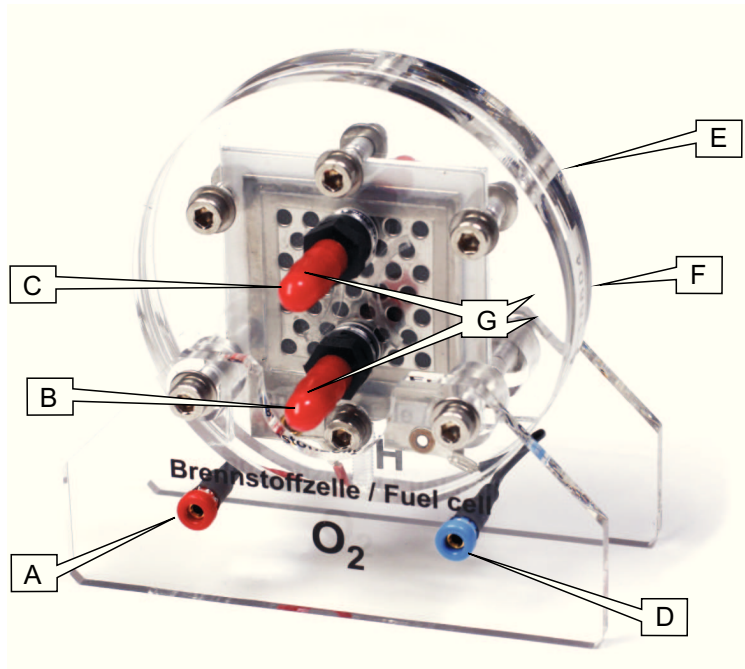
Bei Lagerung, Betrieb und Transport vor Frost schützen!

Gasspeicher



Entleeren Sie den Gasspeicher ⑨ vollständig mit Hilfe der beiliegenden Spritze ⑦. Wasserreste ggf. mit einem fusselfreien Tuch abwischen.

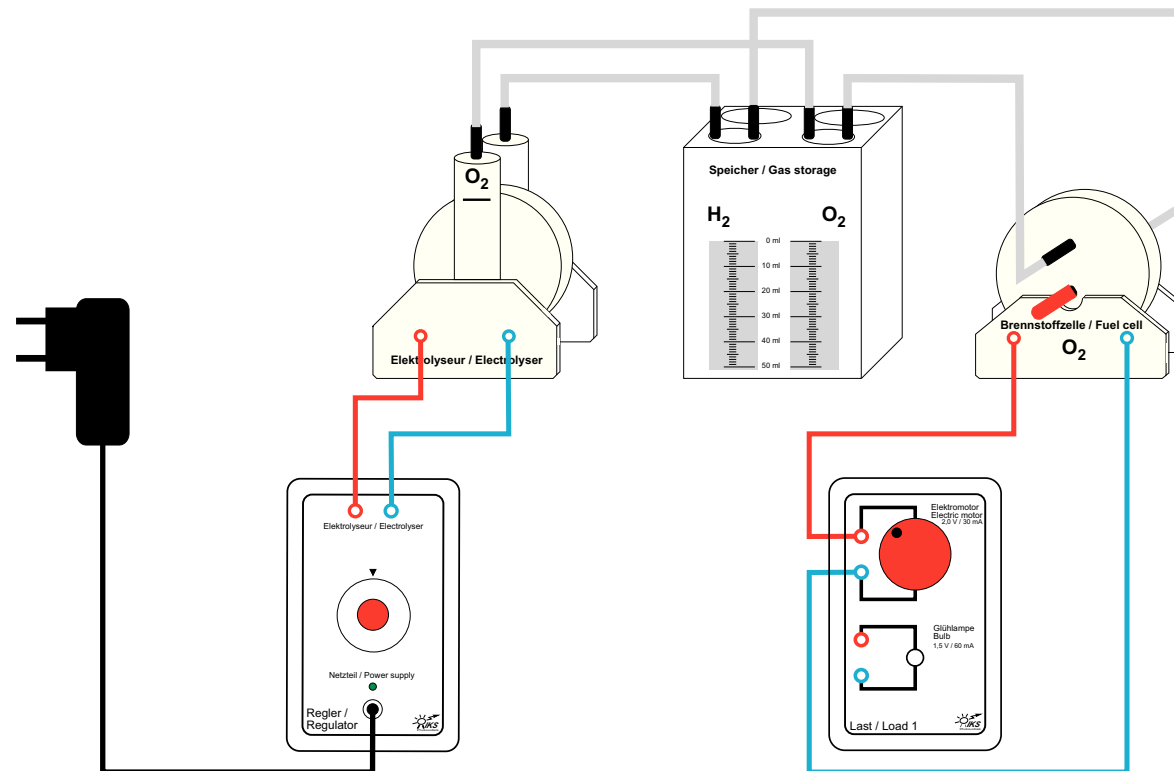
Brennstoffzelle



Weil sich in der Brennstoffzelle während des Betriebs Feuchtigkeit sammelt, sind die Anschlussstutzen B , C , E und F vor dem Einpacken der Brennstoffzelle in den Koffer sorgfältig mit den Verschlusskappen G zu verschließen.

Bitte beachten Sie:

Bei Lagerung, Betrieb und Transport vor Frost schützen!

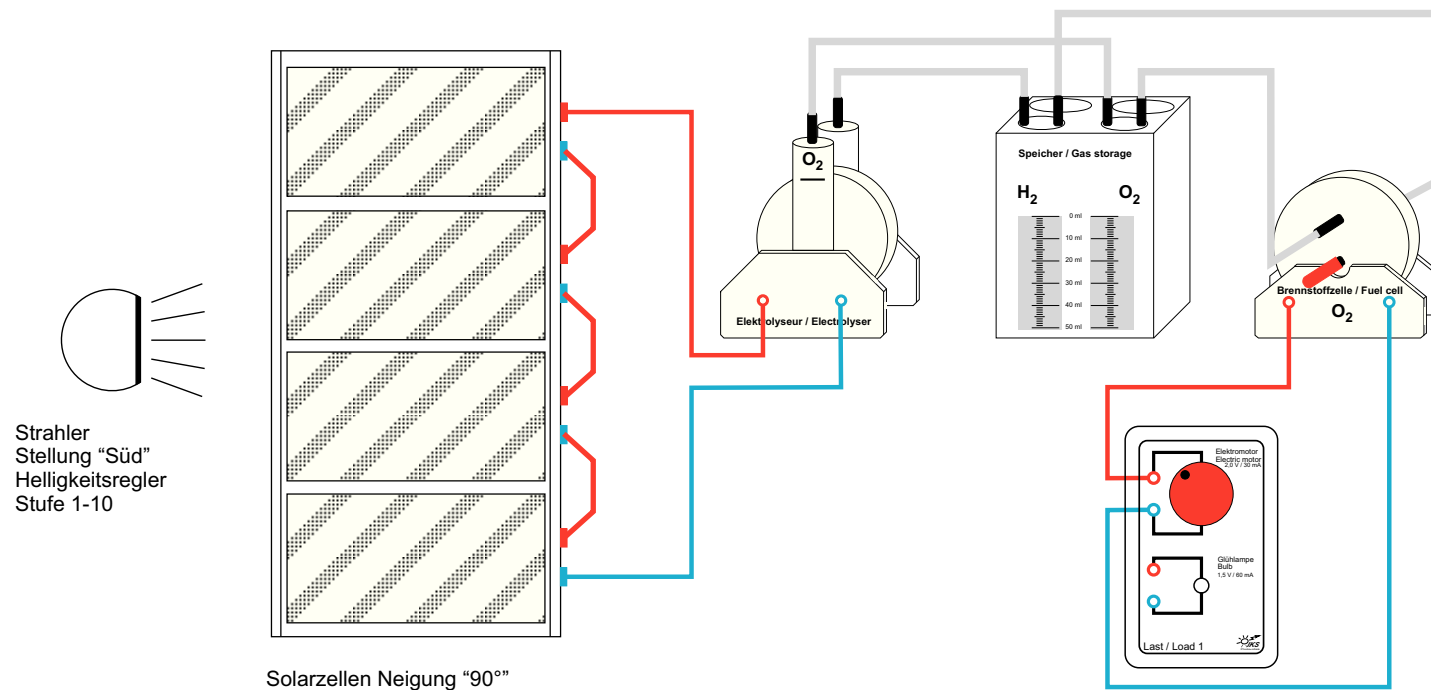


Information

Zur Demonstration der Wasserstofftechnologie-auch für den nicht naturwissenschaftlichen Unterricht-bietet sich der oben abgebildete, übersichtliche Aufbau der Komponenten an. Die für den Elektrolyseur benötigte elektrische Energie wird über das Netzteil der Steckdose entnommen und mit dem Regelmodul eingestellt. Der Gasspeicher fängt die entstehenden Gase Wasserstoff und Sauerstoff auf und leitet sie an die Brennstoffzelle weiter. Diese wiederum erzeugt durch Reaktion der Gase elektrische Energie und betreibt damit als Nachweis der Stromerzeugung den Elektromotor des Lastmoduls. Dieser Aufbau veranschaulicht die Energieübertragungskette: elektrische Energie-chemische Energie-elektrische Energie-mechanische Energie”.

Die Geräte des Demonstrationsmodelles werden gemäß der Inbetriebnahme-Anleitung **S. 9 - 10** vorbereitet, aufgebaut und entlüftet. Anschließend ist das Modell einsatzbereit. Im unbeaufsichtigten Betrieb ist das Regelmodul so einzustellen, dass mehr Gas erzeugt wird als benötigt. Im Gasspeicher sammeln sich die im Überschuss produzierten Gase Wasserstoff und Sauerstoff im Verhältnis 2:1 an. Der volle Speicher kann durch kurzzeitiges Entfernen der oberen Verschlusskappen an der Brennstoffzelle entleert werden.
Hinweis:

Während des Dauerbetriebs sammelt sich mit der Zeit Reaktionswasser in der Brennstoffzelle an. Zu viel Wasser hemmt die Reaktion der Membran, und der Elektromotor bleibt stehen. Durch Ablassen des Reaktionswassers über die unteren Anschlussstutzen der Brennstoffzelle wird das Wasser entfernt. Nach Entlüften, wie auf Seite **10** beschrieben, arbeitet die Brennstoffzelle wieder.

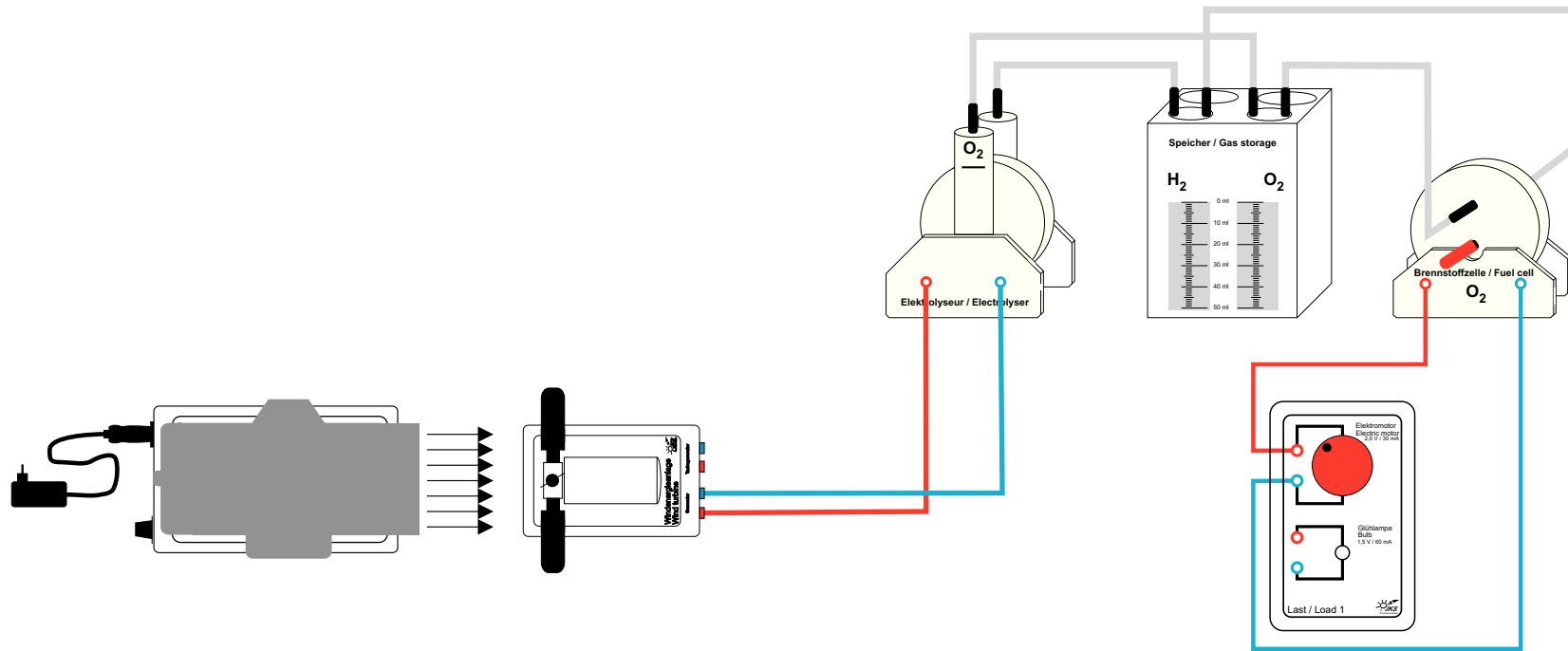


Information

Zur Demonstration der solaren Wasserstoffwirtschaft kann der Elektrolyseur mit Solarenergie betrieben werden. Für dieses Demonstrationsmodell werden Komponenten des Experimentiersystems SOLARTRAINER junior benötigt. Der Aufbau des Experimentes und die Inbetriebnahme entsprechen im Wesentlichen denen des vorigen Demonstrationsmodells. Allerdings wird diesmal die elektrische Energie nicht der Steckdose entnommen und über das Regelmodul geregelt. In diesem Demonstrationsmodell erzeugen vier in Reihe geschaltete Solarzellen den Strom für den Elektrolyseur aus Licht. Die Energieübertragungskette ist in diesem System um die Solarenergie, in diesem Fall Lampenlicht, erweitert:

Solarenergie-elektrische Energie-chemische Energie-elektrische Energie-mechanische Energie.

Über die Lampensteuerung lässt sich die Einstrahlungsstärke und somit die Gasproduktion des Elektrolyseurs beeinflussen. Weitere Einflussfaktoren sind der Neigungswinkel sowie Abschattung.



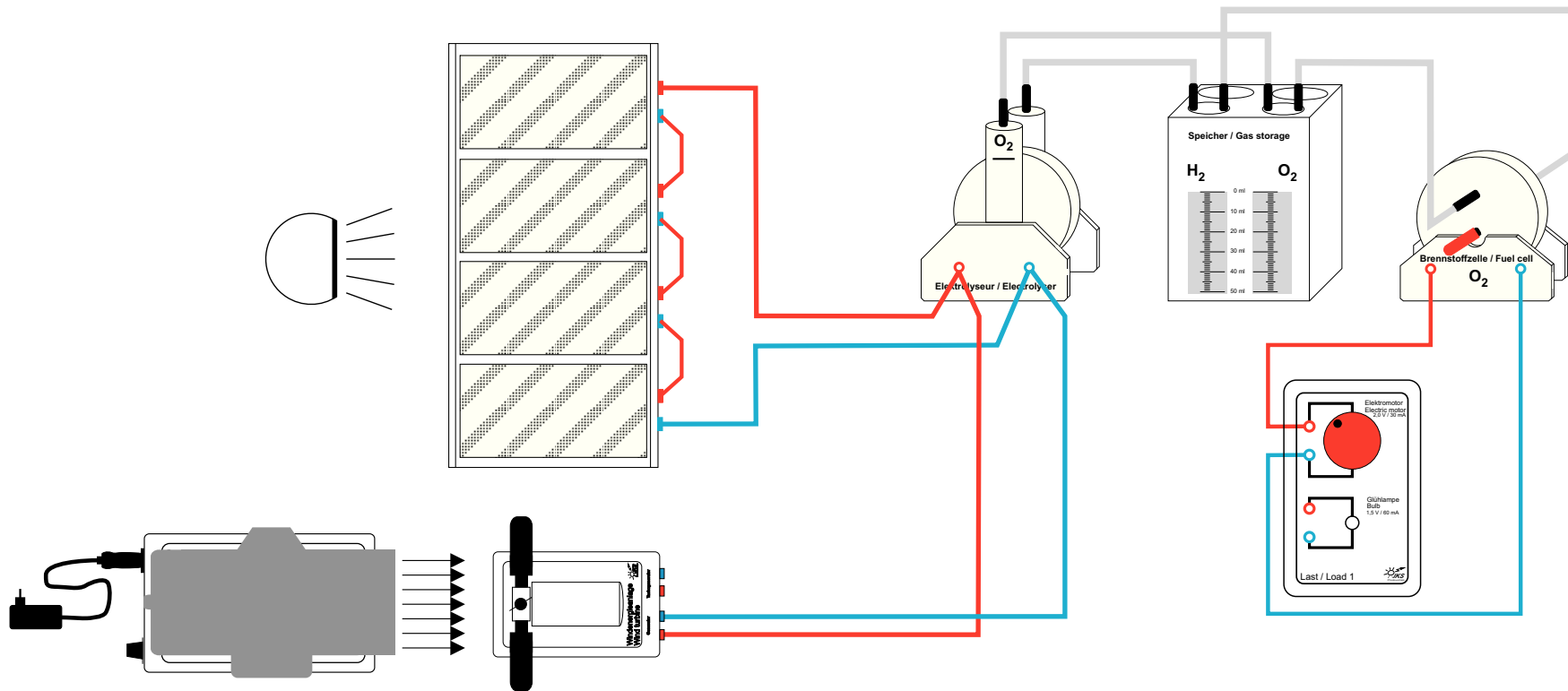
Information

Ein Demonstrationsmodell zur Wasserstoffwirtschaft kann auch mit Windenergie betrieben werden. Für den entsprechenden Aufbau eignen sich die Komponenten des Experimentiersystems WINDTRAINER junior. Auch hier entspricht der Aufbau des Experimentes weitgehend dem ersten Demonstrationsmodell. Doch erzeugt diesmal eine Windenergieanlage die für die Elektrolyse benötigte elektrische Energie. Ein Auftriebsläufer mit drei oder vier Flügeln und einem Einstellwinkel von 60 bis 75° liefert eine ausreichende Leistung, um den Elektrolyseur zu betreiben.

Die Energieübertragungskette ist in diesem Fall:

Windenergie-elektrische Energie-chemische Energie-elektrische Energie-mechanische Energie.

Über die Gebläseregelung lässt sich die Windgeschwindigkeit und somit die Gasproduktion des Elektrolyseurs beeinflussen.



Information

Die Wasserstofftechnologie kann in Kombination mit der Photovoltaik und der Windenergietechnik als autonomes Wasserstoffdorf im Inselbetrieb gezeigt werden.

Hierfür eignet sich insbesondere ein Demonstrationsmodell zur Wasserstoffwirtschaft oder ein Abschlussexperiment, nachdem Photovoltaik, Windenergie und Wasserstofftechnik einzeln untersucht wurden.

Der Aufbau des Experimentes stützt sich auf die Experimente 7 und 8 sowie auf die Demonstrationsmodelle 2 und 3.

Beim Betrieb des Elektrolyseurs gleichzeitig mit Solar- und Windenergie ist zu beachten, dass die beiden Energiequellen nicht gegeneinander arbeiten. Liefert die Windmaschine nicht genug Wind für die Windenergieanlage, wird diese durch die Solarzellen angetrieben (und arbeitet als Motor).

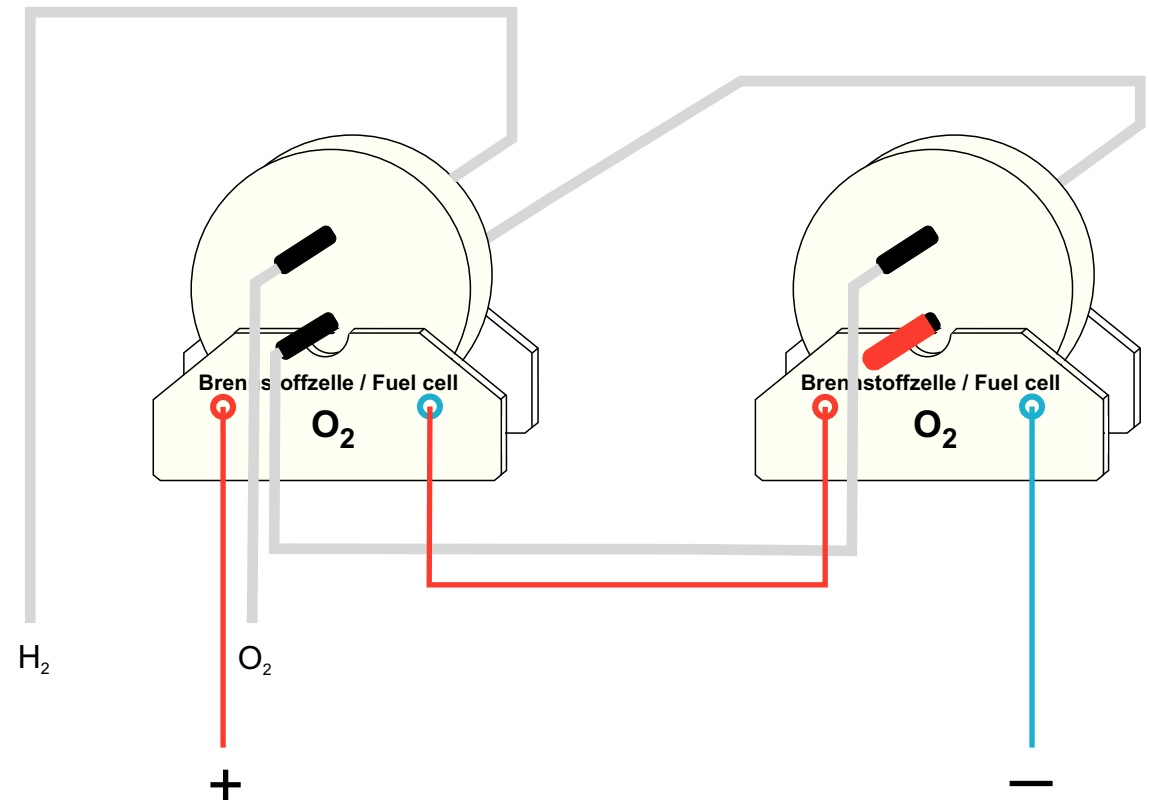
Information

Sind mehrere Brennstoffzellen vorhanden, so können Reihen- und Parallelschaltungen durchgeführt werden. Aufgrund der geringen Leerlaufspannung von Brennstoffzellen ist insbesondere die Reihenschaltung lohnend. Bei der technischen Nutzung der Brennstoffzelle werden eine Vielzahl von Zellen in Reihe geschaltet und bilden Stapel (Stacks). Für eine weitere Erhöhung der Leistung können diese Stacks parallel geschaltet werden.

Im Experiment reichen zur Versorgung von zwei Brennstoffzellen mit Wasserstoff und Sauerstoff jeweils ein Elektrolyseur und ein Gasspeicher aus. Mit zwei in Reihe geschalteten Brennstoffzellen lässt sich z.B. die Glühlampe im Lastmodul sehr viel heller zum Leuchten bringen als nur mit einer Brennstoffzelle.

Die erste Zelle wird analog zu den Experimenten 5 und 6 mit dem Elektrolyseur verbunden. Anschließend werden die oberen Anschlussstutzen der ersten Brennstoffzelle mit den jeweils unteren Anschlussstutzen der zweiten Brennstoffzelle verbunden. Nach dem Entlüften der Apparatur werden die oberen Anschlussstutzen der zweiten Zelle mit den Plastikstopfen verschlossen.

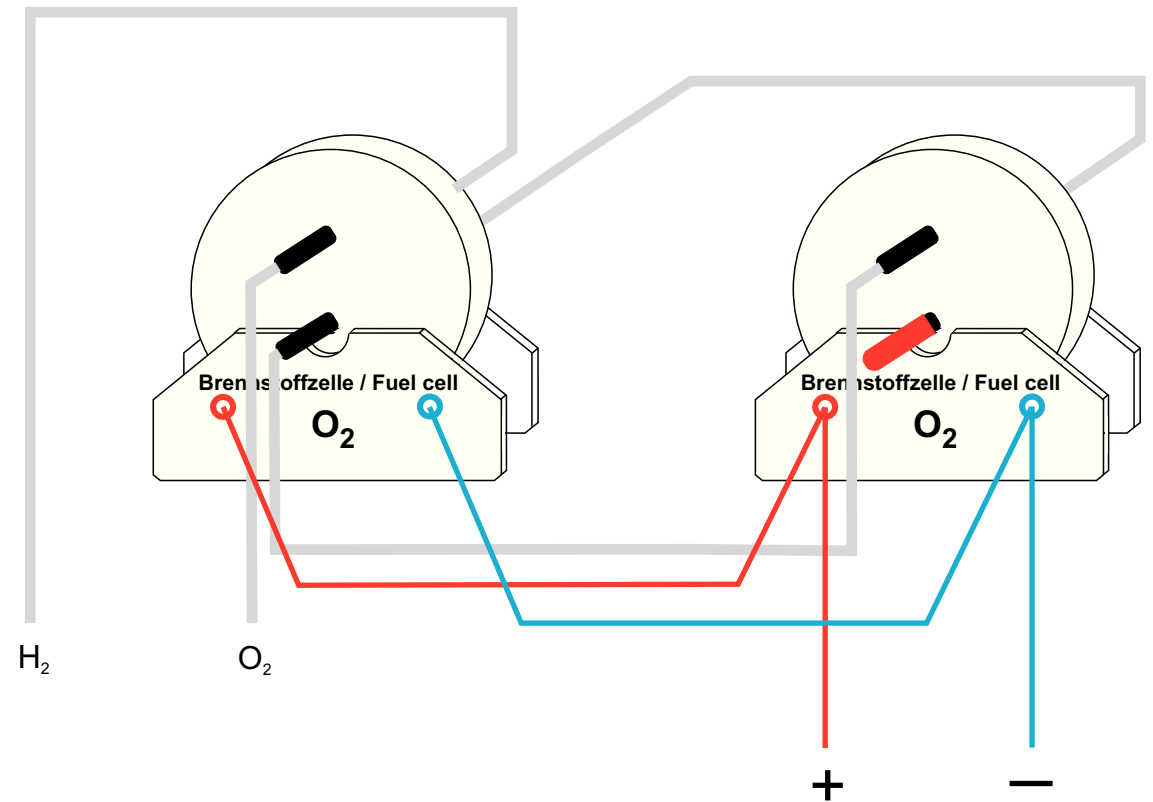
Für die elektrische Verschaltung wird die Kathode der ersten Brennstoffzelle direkt mit der Anode der zweiten Brennstoffzelle verbunden. Die Anode der ersten Zelle und die Kathode der zweiten Zelle werden mit dem Verbraucher verbunden.



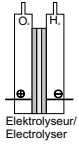
Information

Die Parallelschaltung von zwei Brennstoffzellen führt zur Erhöhung der Kurzschlussstromstärke, die Leerlaufspannung verändert sich hingegen nicht.

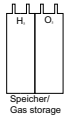
Diese Schaltung hat für einzelne Brennstoffzellen keine technische Bedeutung. Brennstoffzellenstacks werden jedoch häufig parallel geschaltet. Dieser modulare Aufbau ermöglicht den Einsatz der Brennstoffzelle in einem breiten Leistungsbereich.



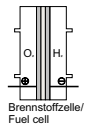
Schalt Symbole und Begriffe



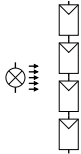
Elektrolyseur



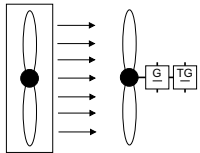
Gasspeicher



Brennstoffzelle



Halogenstrahler mit Solarzellen



Gebläse mit Windenergieanlage, bestehend aus Flügeln, Generator und Tachogenerator



Voltmeter



Amperemeter



regelbarer Widerstand



Glühlampe



Motor



Diode



Anschlussbuchse

