

UNIVERSITÄT REGENSBURG

F-Praktikum

VERSUCH:
SOLAR- UND BRENNSTOFFZELLE

Prof. Dr. J. Zweck

Prof. Dr. C. Strunk, Dr. S. Giglberger, J. Gründmayer, R. Völkl



16.11.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Solar- und Brennstoffzelle	3
1.1	Grundsätzliches zum Versuch	3
1.2	Lernziele	4
1.3	Vorkenntnisse	4
1.4	Literatur	5
1.5	Einführung in die spezielle Problematik	6
1.5.1	Solarzellen	6
1.5.2	Brennstoffzelle	12
1.6	Fragen zum Versuch	14
1.7	Versuchsaufbau und Anleitung	15
1.7.1	Aufgabenstellung	15
1.8	Anhang	17
1.8.1	Beschreibung und Verwendungszweck der Wasserstofftechnologie - Demonstrationsanlage "PEMPower1-XL"	17
1.8.2	Inbetriebnahme	18
1.8.3	Betrieb des Elektrolyseurs	20
1.8.4	Betrieb der Brennstoffzelle	21
1.8.5	Demonstrations- und Praktikumsbetrieb	23
1.8.6	Nach dem Betrieb	24
1.8.7	Wartung	26

1 Solar- und Brennstoffzelle

1.1 Grundsätzliches zum Versuch

Bei den "alternative Energieträgern" wird häufig Wasserstoff als Energieträger der Zukunft diskutiert. Dies bedingt den Aufbau einer neuen Technologie, da Wasserstoff zwar relativ einfach in herkömmlichen Verbrennungsmotoren verwendet werden kann, die Gewinnung von Wasserstoff jedoch völlig anders geschehen muss, als die Förderung und Raffinierung von Erdöl. Darüber hinaus bietet Wasserstoff als Energieträger auch völlig neue Möglichkeiten der Nutzung, die über die Nutzung in Verbrennungsmaschinen mit relativ geringem Wirkungsgrad hinausgehen. Bei einem herkömmlichen mobilen Stromgenerator auf Basis eines Diesellaggregates wird aus fossilen Brennstoffen durch Verbrennung zunächst mit schlechtem Wirkungsgrad mechanische Energie und viel Abwärme erzeugt.

Die mechanische Energie wird dabei eingesetzt, um einen Stromgenerator anzutreiben, der wiederum die mechanische Energie mit nur mäßigem Wirkungsgrad in elektrische Energie umwandelt. Der ganze Vorgang ist dabei laut, es entstehen Abwärme und Abgase. Dies lässt sich bei der Verwendung von Wasserstoff als Energieträger und bei Verwendung von Brennstoffzellen weitgehend vermeiden. Bei diesem Prozess wird Wasserstoff in der Brennstoffzelle direkt mit dem Luftsauerstoff zu Wasser "verbrannt", wobei als Abgas eben nur Wasserdampf entsteht.

Die Umwandlung der im Wasserstoff chemisch gespeicherten Energie in elektrische Energie geschieht ohne komplizierte Umwege mit hohem Wirkungsgrad und praktisch ohne Abwärme.

Diese Brennstoffzelle ist Gegenstand des Versuches "*Solar - und Brennstoffzelle*". Darüber hinaus sollen Sie auch mit der Solarzellentechnologie vertraut gemacht werden. Durch die sog. Photovoltaik wird Licht (z.B. Sonnenlicht) direkt in einem Halbleiter in elektrische Energie umgewandelt, also ohne den oben beschriebenen komplizierten und stark verlustbehafteten Umweg über mechanische Bewegung und Stromgenerator. Erst der so erzeugte Strom kann dann eingesetzt werden, um z.B. durch Elektrolyse Wasser in seine Bestandteile H_2 und O_2 zu trennen.

Die Photovoltaik bietet hier eine elegante Alternative: der direkt aus Licht gewonnene Strom kann zur Elektrolyse verwendet werden, um Wasserstoff von Wassermolekülen abzutrennen, und der so gewonnene Wasserstoff kann relativ leicht gespeichert und damit für einen späteren Einsatz als Energiequelle aufbewahrt werden. Besonders elegant ist diese Lösung aus mehreren Gründen:

1. Der Wasserstoff wird ständig ohne besonderes Zutun erzeugt. Dadurch kann ein H_2 -Reservoir ständig wiederaufgefüllt werden. Anders als beim Kraftwerk muss die Energie nicht dann bereitgestellt werden, wenn sie aktuell gebraucht wird, sondern kann über einen längeren Zeitraum akkumuliert werden.

2. Die enorme Verschwendung von Primärenergie durch dreimalige verlustbehaftete Wandlung des Energieträgers in eine andere Energieform (chemische Energie bzw. Kernenergie - thermische Energie- mechanische Energie - elektrische Energie) entfällt.
3. Es entstehen keine Abfallprodukte, die aufwendig "entsorgt", also schadenfrei beseitigt werden müssen, wie dies bei anderen Energieträgern häufig der Fall ist. Das Endprodukt ist elektrische Energie und Wasser

Dabei soll natürlich auch nicht verschwiegen werden, daß die Solarenergie noch eine relativ teure Energie darstellt, insbesondere deshalb, weil die Solarzellen (u.a. auch wegen der geringen Produktionszahlen) noch sehr teuer sind. Der Vergleich dieser Energiekosten mit den Kosten für konkurrierende Technologien sei Ihnen selbst überlassen, hier ist die gesellschaftliche Diskussion noch in Gange. Informieren Sie sich in den allgemein zugänglichen Medien und Quellen und bilden Sie sich selbst ein Urteil.

1.2 Lernziele

Sie sollen

- Solarzellen und Brennstoffzellen kennenlernen
- den p-n- Übergang verstehen
- Wirkungsgrade für Solarzellen und Brennstoffzellen bestimmen
- einen Überblick über die spezielle Problematik der Wasserstoffenergie bekommen
- die Physik der Schwarzkörperstrahlung kennenlernen
- sich mit Begriffen der Halbleiterphysik vertraut machen wie z.B.
 - Gapenergie, Dotierung, "Elektronen und Löcher", Paarerzeugung und Rekombination
 - sich in groben Zügen die Funktionsweise einer Halbleiterdiode klarmachen
 - die Anwendung einer Diode als Solarzelle kennenlernen
 - sich einen Überblick verschaffen, welche Größen den Wirkungsgrad einer Solarzelle bestimmen

1.3 Vorkenntnisse

- Strahlungsgesetze
- Grundkenntnisse Halbleiter und Festkörperphysik
- p- und n-Dotierung von Halbleitern

- der p-n+- Übergang
- der photoelektrische Effekt
- Begriffe aus der physikalischen Chemie: Massenwirkungsgesetz, Boltzmannverteilung
- Grundbegriffe der Halbleiterphysik: "Elektronen und Löcher", Dotierung, Raumladungszone, Majoritätsladungsträger, Minoritätsladungsträger, Rekombination, Photostrom

1.4 Literatur

Die Literatur zur Halbleiterphysik ist in der Handbibliothek Physik sehr reichhaltig. Als Auswahl wird empfohlen:

- *Kurzprogramm:*
F. Voit: Die Halbleiter im Unterricht, UP 2800 V 898
- *Pflicht:*
K. Hesse: Halbleiter I, UP 2800 H 587
- *Kür:*
E.J. Cassagnol: Halbleiter I, UP 2800 C 345

Zum Thema Brennstoffzellen: Beginnen Sie mit folgenden Artikeln aus der Zeitschrift *Bild der Wissenschaft* und folgen Sie den dort angegebenen weiteren Literaturempfehlungen. Artikel mit dem Thema Brennstoffzelle finden Sie in folgenden Ausgaben:

- 25.10.96: Durchbruch zum Öko - Kraftwerk geschafft
- 12.06.97: Neue Folie macht Brennstoffzellen günstiger
- 01.09.97: Schonende Energie aus Brennstoffzellen
- 29.10.97: Erste Brennstoffzellen - Versuchsanlage in Deutschland in Betrieb
- 17.12.97: Brennstoffzellen - Entwicklung im Vormarsch
- 18.02.98: Erneuerbare Energien im Internet
- 02.03.98: Preiswerte Erzeugung von Wasserstoff mit neuen Katalysatoren
- 19.03.98: Wasserstoff im Handy
- 02.04.98: Neue Supersäuren brechen Kohlenwasserstoffe auf
- 15.04.98: Reaktor gewinnt Wasserstoff aus Biomasse
- 05.05.98: Erstes Brennstoffzellen - Auto der Welt fährt erfolgreich

Darüber hinaus finden Sie auch im Internet eine Menge an Informationen zum Thema Brennstoffzelle (Warnung: Jeder darf praktisch alles im Internet veröffentlichen! Lesen Sie alle angebotenen Informationen kritisch!)

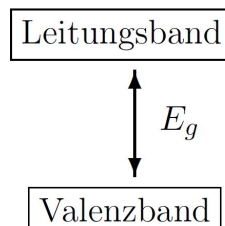
Versuchen Sie z.B. unter der Suchmaschine <http://www.google.de> den Suchbegriff "Brennstoffzelle"!

1.5 Einführung in die spezielle Problematik

1.5.1 Solarzellen

Die Bestimmung aller relevanten Eigenschaften einer Solarzelle übersteigt den Rahmen eines Praktikumsversuchs, deshalb sollen hier nur bestimmte Kenngrößen untersucht werden, wie z.B. die Strom - Spannungs - Kennlinie und der Füllfaktor. Neben der spektralen Empfindlichkeit der Solarzelle kann auch die Gapenergie bestimmt werden.

Die folgende Einführung folgt im Wesentlichen der Darstellung von K. Hesse: Halbleiter I. Germanium und Silizium sind Elemente, die als Kristalle ideale Valenzverbindungen eingehen. Das gilt allerdings nur für den Grundzustand minimaler Energie, d.h. für $T = 0$ K. Bei Zimmertemperatur beträgt die mittlere Energie pro Atom $3 kT$ oder $0,07$ eV. Die Mindestenergie, die benötigt wird, um eine Bindung aufzubrechen, nennt man **Gapenergie** E_g .



Die Gapenergie beträgt bei Germanium etwa 0.7 eV, bei Silizium etwa 1.1 eV. Im Bändermodell der Halbleiter ist die Gapenergie gleich der Breite der verbotenen Zone, d.h. gleich dem Abstand von Valenz - und Leitungsband. Im Grundzustand bei $T = 0$ K ist das Valenzband mit Ladungsträgern vollständig besetzt, das Leitungsband ist leer. Der Kristall ist ein vollkommener Isolator.

Bei endlichen Temperaturen $T > 0$ K werden Bindungen im Halbleiter aufgebrochen, d.h. Elektronen werden ins Leitungsband angeregt. Im Valenzband bleiben aus Gründen der Ladungsneutralität die gleiche Anzahl von Löchern zurück (Elektronen - Loch - Bildung). Damit entsteht eine thermisch bedingt Leitfähigkeit. Die Dichte n der freien Elektronen im Leitungsband und die Dichte p der Löcher im Valenzband werden durch die Boltzmannverteilung gegeben:

$$n = p = N_0 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (5.1)$$

N_0 ist darin die Dichte der Si-Si-Bindungen. Die durch (5.1) beschriebene Konzentration der Ladungsträger bedingt die Eigenleitung oder intrinsische Leitfähigkeit eines Halbleiters.

Die Leitfähigkeit eines Halbleiters kann durch den Einbau von Fremdatomen (**Dotierung**) wesentlich erhöht werden. Baut man in das Gitter des vierwertigen Si fünfwertiges P oder dreiwertiges B ein, so ergibt sich im Falle des P ein schwächer gebundenes Überschusselektron, welches an das Leitungsband abgegeben werden kann (**Donator**). Im Falle des B fehlt ein Elektron, das aus dem Valenzband aufgenommen wird (**Akzeptor**). Die zugehörigen Energien E_{St} sind kleiner als die Gapenergie E_g . Die Fremdatome stellen dann ionisierte Störstellen dar, deren Dichte ebenfalls durch eine Boltzmann-Verteilung beschrieben wird.

Für die ionisierten Donatoren gilt

$$D^{(P)} = D e^{-\frac{E_{St}}{2kT}} \quad (5.2)$$

$D^{(P)}$ ist die Dichte der eingebauten Donatoratome (P). E_{St} ist die Energie, die für die Ionisation eines Donatoratoms aufgewendet werden muss ($E_{St} \approx 0.05$ eV). Es gibt somit zwei Mechanismen zur Erzeugung freier Ladungsträger:

Aufbrechen von Si-Si-Bindungen (intrinsische Anregung ins Leitungsband) und Ionisierung von Störstellen. Der zweite Mechanismus ist mit geringerer Energie verbunden und deshalb bereits bei tieferer Temperatur zu beobachten. In einem n -dotierten Halbleiter (z.B. P in Si) wird bei hinreichend großer Dotierung die Leitfähigkeit durch die Dichte der ionisierten Störstellen (= Dichte der freien Elektronen) bestimmt:

$$n \approx D^{(P)} \quad (5.3)$$

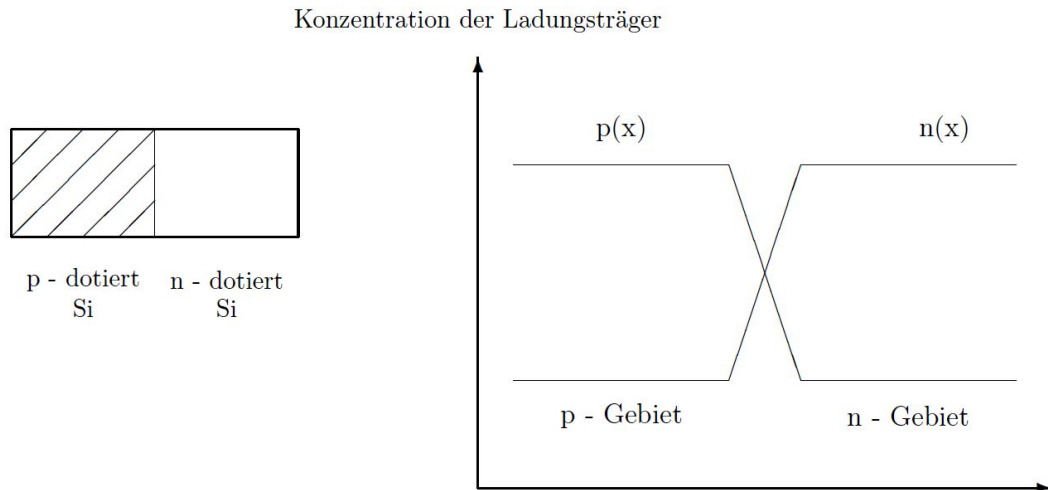
Das Massenwirkungsgesetz ergibt dann

$$n \cdot p = N_0^2 e^{\frac{E_g}{kT}} = N_i^2 \quad (5.4)$$

woraus folgt

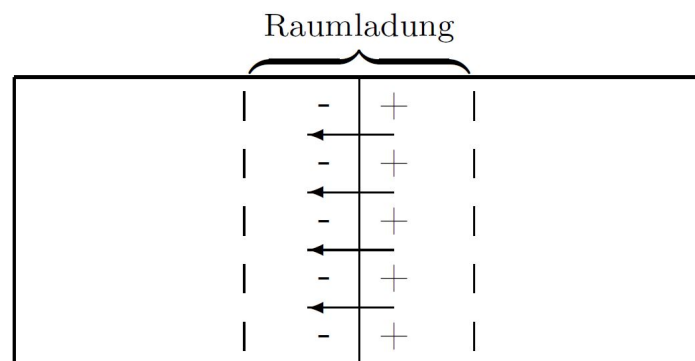
$$p = \frac{N_i^2}{D^{(P)}} \quad (5.5)$$

In dem Maße, wie durch Dotierung die Dichte der ionisierten Störstellen vergrößert wird, nimmt die Dichte p der Löcher im Valenzband ab. Bringt man einen n -dotierten Halbleiter (P in Si) mit einem p -dotierten Halbleiter (B in Si) zusammen, so entsteht eine Diode:



Im p -Gebiet sind die Löcher **Majoritätsladungsträger** und die Elektronen **Minoritätsladungsträger**, während im n -Gebiet die Elektronen Majoritätsladungsträger und die Löcher Minoritätsladungsträger sind.

An der Grenzfläche zwischen p - und n -Gebiet treten starke Konzentrationsgradienten der beiden Ladungsträgersorten auf. Dies führt zur **Diffusion** der Elektronen ins p -Gebiet und der Löcher ins n -Gebiet. Zurück bleiben die unbeweglichen ionisierten Störstellen, die eine **Raumladungszone** in der Grenzschicht aufbauen.



In der Raumladungszone entsteht ein elektrisches Feld, das so gerichtet ist, dass es schließlich die Diffusion der Ladungsträger aufgrund des Konzentrationsgradienten unterbindet. Im stromlosen Gleichgewicht sind Diffusionsspannung und Raumladungsspannung entgegengesetzt gleich groß.

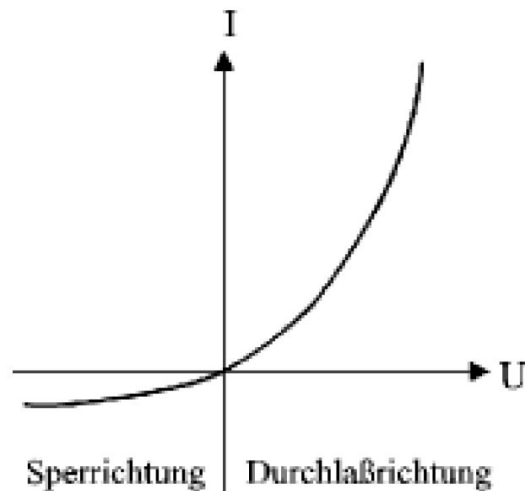
Legt man an das p -Gebiet den positiven Pol einer Spannungsquelle und an das n -Gebiet den negativen Pol, so wird durch diese Spannung im Raumladungsgebiet ein Feld aufgebaut, das das Raumladungsfeld schwächt. Als Folge kann wieder ein Diffusionsstrom fließen. Die Diode ist in **Durchlassrichtung** gepolt.

Keht man die Polung um, so wird das Raumladungsfeld vergrößert. Die Diode sperrt.

Der Diodenstrom ist gegeben durch

$$I = I_{\text{sp}}(e^{\frac{eU}{kT}}) \quad (5.6)$$

I_{sp} ist der Sperrstrom, der sich im Grenzfall $U \rightarrow -\infty$ bei Polung in **Sperrichtung** ergibt. Bei einer Spannung $U = 0$ V erhält man $I = 0$, aus (5.6) ergibt sich die Kennlinie der Diode wie folgt:



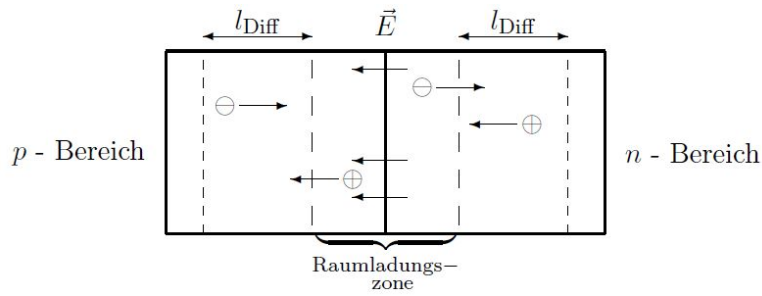
Die freien Ladungsträger werden durch thermische Aktivierung (Ionisation von Störstellen, Bildung von Elektron - Loch - Paaren) erzeugt. Sie diffundieren im Halbleiter bis sie durch Rekombination (Einfang von ionisierten Störstellen, Wiedervereinigung von Elektron und Loch) verschwinden.

Die mittlere Diffusionsstrecke heißt **Diffusionslänge** l_{Diff} . Im Gleichgewicht ist die Erzeugungsrate gleich der Rekombinationsrate.

Freie Ladungsträger können auch durch Einstrahlung von Licht erzeugt werden. Wenn die Energie $h\nu$ der Photonen größer ist als die Gapenergie E_g

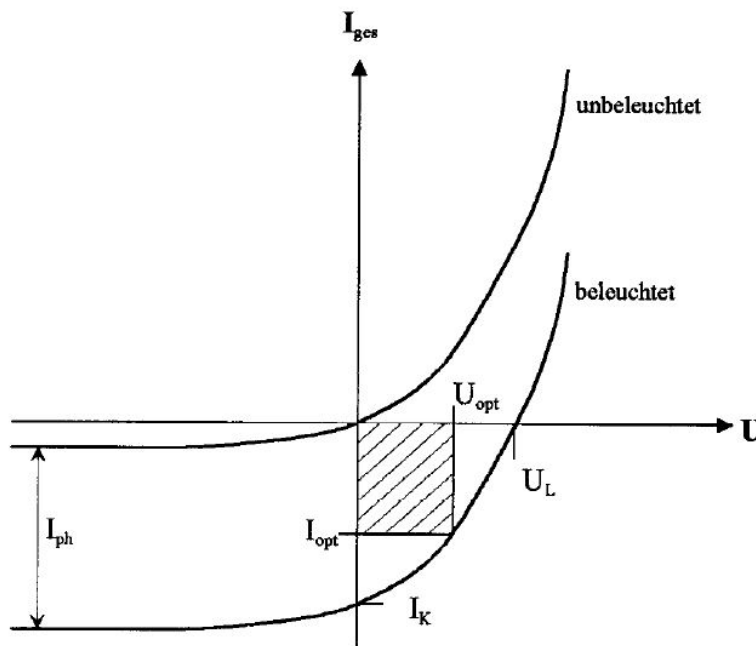
$$h\nu > E_g$$

so werden Elektron - Loch - Paare erzeugt, deren Dichte proportional zur Intensität des einfallenden Lichtes ist. Werden in einer Diode die Elektron+- Loch - Paare in der Raumladungszone erzeugt, so werden sie aufgrund des Raumladungsfeldes getrennt und können nicht mehr rekombinieren.



Ebenso werden Elektron - Loch - Paare noch getrennt, wenn sie innerhalb der Diffusionslänge von der Raumladungszone entfernt erzeugt werden.

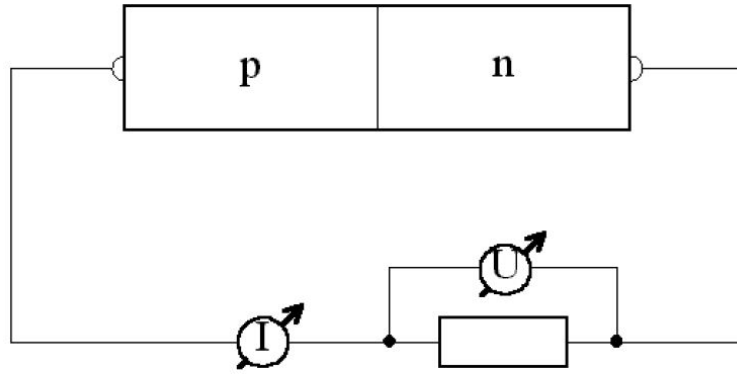
Aufgrund der Elektron - Loch - Bildung und der Ladungstrennung tritt bei offener Diode ($I = 0$) zwischen p - und n -Bereich eine Spannung auf. (Überlegen Sie sich das Vorzeichen!). Dies ist die **Leerlaufspannung** U_L der Photodiode. Schließt man p - und n -Bereich kurz ($U = 0$), so fließt ein Strom (Überlegen Sie sich die Richtung!). Dies ist der **Kurzschlussstrom** I_K der Photodiode. Damit wird die Diode zum Generator. Das ist in folgender Abbildung dargestellt:



Der so entstehende Photostrom überlagert sich dem durch Anlegen einer Spannung entstehenden Diodenstrom

$$I_{\text{ges}} = I_{\text{sp}}(e^{\frac{eU}{kT}} - 1) - I_{\text{ph}} \quad (5.7)$$

Im vierten Quadranten der $I_{\text{ges}}-U$ -Kennlinie wirkt die Photodiode als Generator (warum?).



Verbindet man das p - und n -Gebiet über einen Verbraucherwiderstand R , so fließt bei Beleuchtung der Diode durch R ein Strom I . Die optimale Leistung L_{opt} erhält man bei geeigneter Wahl von R , so dass

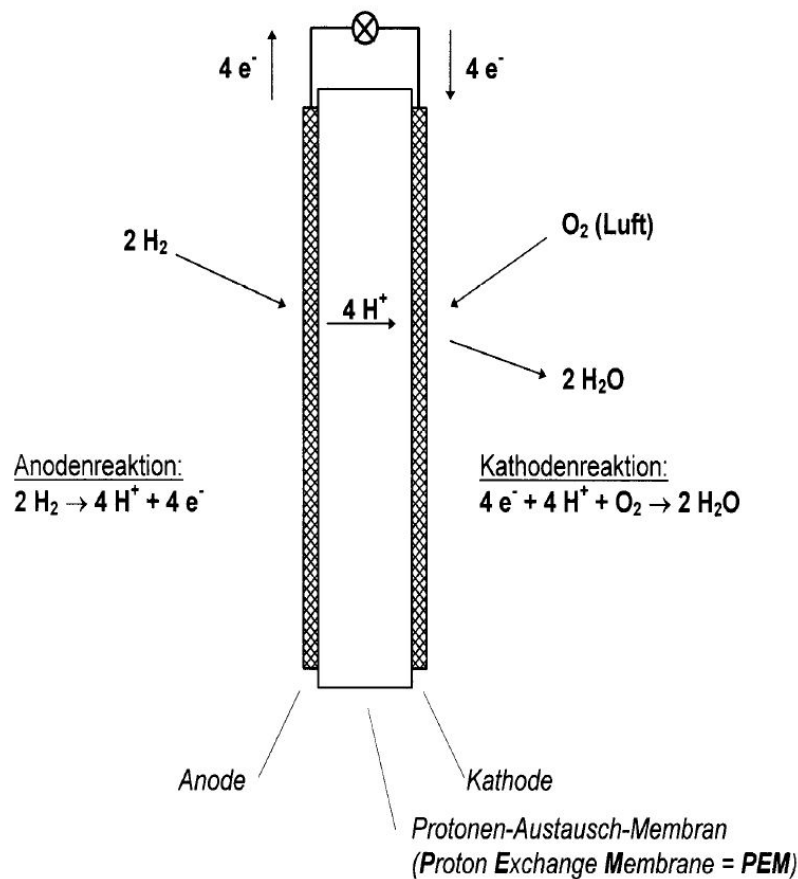
$$U \cdot I_{\text{ges}} = U_{\text{opt}} \cdot I_{\text{opt}}$$

(siehe Diodenkennlinie). Wie erhält man U_{opt} , I_{opt} , R_{opt} ? Die Kenngrößen U_L , I_L definieren den **Füllfaktor** f gemäß

$$L_{\text{opt}} = U_{\text{opt}} \cdot I_{\text{opt}} = f U_L I_L$$

1.5.2 Brennstoffzelle

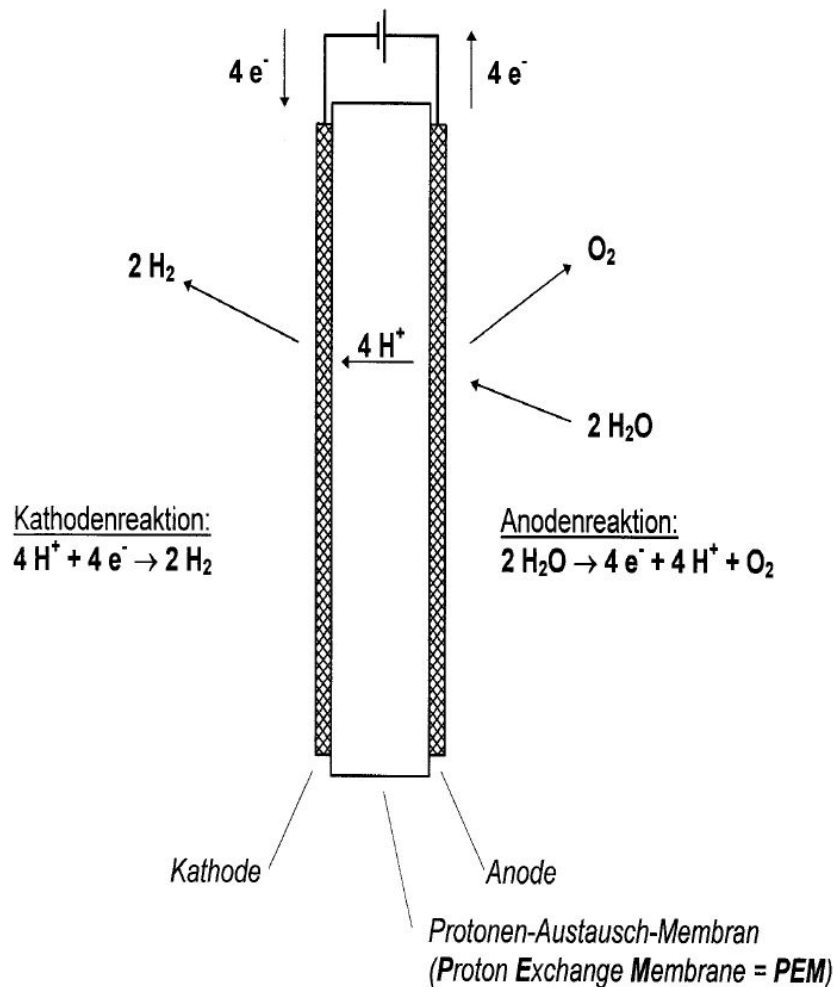
Die chemischen Reaktionen bei der Elektrolyse und bei der Brennstoffzelle sind unten dargestellt. Das Kernstück des jeweils verwendeten Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle stellt eine **PEM** Membran - Elektrodeneinheit dar (PEM = *Proton Exchange Membrane*). Sie besteht aus einer dünnen protonenleitenden Polymermembran, auf die auf beiden Seiten eine Schicht Katalysatormaterial aufgebracht wurde. Diese Schichten bilden die Anode und Kathode der elektrochemischen Zelle.



Dabei geschehen folgende Reaktionen:

Anode	$2\text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow 4\text{e}^- + 4\text{H}^+ + \text{O}_2$
Kathode	$4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2$
Gesamtreaktion	$2\text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow \text{O}_2$

Auf der Anodenseite entstehen bei angelegter äußerer Spannung nach obiger Gleichung direkt gasförmiger Sauerstoff, Elektronen und H^+ -Ionen. Die H^+ -Ionen wandern durch die protonenleitende Membran zur Kathode und bilden dort mit den über den äußeren Leiterkreis fließenden Elektronen Wasserstoffgas.



Die Funktionsweise einer Brennstoffzelle entspricht dem umgekehrten Prinzip der Elektrolysezelle. Während mit Hilfe des Elektrolyseprozesses elektrische Energie in chemische Energie, z.B. in Form von Wasserstoff und Sauerstoff, gespeichert werden kann, wird in einer Brennstoffzelle chemische Energie in Form von Wasserstoff und Sauerstoff (oder auch Luft) direkt, d.h. ohne Verbrennungsprozess, in elektrische Energie umgewandelt. Von außen zugeführter Wasserstoff und Sauerstoff reagieren wieder zu Wasser unter Abgabe von Strom und Wärme. Das Kernstück einer PEM Brennstoffzelle ist wie beim PEM Elektrolyseur die Membran - Elektroden - Einheit. Diese besteht aus einer dünnen protonenleitenden Polymermembran, auf die auf beiden Seiten eine Schicht Katalysatormaterial aufgebracht ist. Diese beiden Schichten bilden Anode und Kathode der elektrochemischen Zelle. Diese Anordnung unterstützt folgende Reaktionen:

Anode	2H_2	$\rightarrow 4\text{e}^- + 4\text{H}^+$
Kathode	$4\text{e}^- + 4\text{H}^+ + \text{O}_2$	$\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Gesamtreaktion	$\text{H}_2 + \text{O}_2$	$\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Das an die Anode geführte Wasserstoffgas wird oxidiert, es zerfällt durch die katalyti-

sche Wirkung der Elektrode (z.B. Platin) in Protonen und Elektronen. Die H^+ -Ionen gelangen durch die protonenleitende Membran auf die Kathodenseite. Die Elektronen wandern bei geschlossenem äußeren Stromkreis zur Kathode und verrichten auf diesem Weg elektrische Arbeit. Der an die Kathode geführte Sauerstoff wird reduziert, wobei zusammen mit den Protonen Wasser gebildet wird.

Der konkrete Aufbau sowie die Beschreibung zur korrekten Inbetriebnahme, Betrieb von Elektrolyseur und Brennstoffzelle, Maßnahmen nach dem Betrieb sowie nötige Wartung sind im Anhang beschrieben.

1.6 Fragen zum Versuch

1. Welche Gefahren entstehen beim Umgang mit reinem Sauerstoff und Wasserstoff?
2. Wie funktioniert eine Membran für eine Brennstoffzelle, aus welchem Material besteht sie?
3. Wodurch ist die maximal mögliche Spannung einer Brennstoffzelle / einer Solarzelle gegeben? Wie kann diese Spannung technischen Erfordernissen (z.B. 230 V / 50 Hz) angepasst werden?
4. Wie funktioniert eine Solarzelle? Welche Anteile des Sonnenspektrums werden durch eine Solarzelle in elektrischen Strom verwandelt?
5. Was bedeuten die Begriffe *p*- und *n*-Dotierung, Akzeptoren und Donatoren? Wie erzielt man Dotierungen? Wie funktioniert ein *p-n*-Übergang?
6. Was versteht man unter dem Füllfaktor einer Solarzelle? Was bedeutet er anschaulich?
7. Warum sinkt die Leistung einer Solarzelle, wenn sie aufgeheizt wird?
8. Was versteht man unter einem schwarzem Strahler? Wie sieht das Spektrum aus? Wovon hängt das Spektrum ab?
9. Was versteht man unter dem Wien'schen Verschiebungsgesetz?
10. Nenne Sie typische Halbleitermaterialien.
11. Wie kann man die Größe einer Bandlücke (Gapenergie) bestimmen?
12. Erläutern Sie die Diffusionslänge.
13. Wie entsteht die Gleichrichterwirkung der Halbleiterdiode?
14. Geben Sie die Strom - Spannungskennlinien für verschiedene Temperaturen an.
15. Wird der Photostrom I_{phot} durch die Temperatur beeinflusst?

16. Die Leistung einer Solarzelle hängt von der Wellenlänge des einfallenden Lichts ab. Nennen Sie Gründe dafür.
17. Die Effizienz (Verhältnis von abgegebener elektrischer Energie zu eingestrahelter Lichtenergie) von Photozellen liegt bei etwa 10%. Sie kann theoretisch etwa 28% betragen. Welche Faktoren bestimmen die Effizienz?
18. Zeichnen Sie auf einfach logarithmischen Papier das Emissionsspektrum eines schwarzen Strahlers der Temperatur 2500 K im Energiebereich $0.5 \text{ eV} \leq E \leq 3 \text{ eV}$. Tragen Sie in die Abbildung die Gapenergien von Ge (0.7 eV), Si (1.1 eV), GaAs (1.4 eV), GaAsP (1.9 eV) und GaP (2.3 eV) ein. Was folgt daraus?
19. Wenn Sie die Temperatur des schwarzen Strahlers ändern, so ändern Sie auch den Photostrom einer beleuchteten Solarzelle. Begründen Sie mit dem Wien'schen Gesetz, dass der Photostrom proportional zu $\exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$ ist.

1.7 Versuchsaufbau und Anleitung

Der Versuchsaufbau ist in der nächstfolgenden Abbildung gegeben. Bitte beachten Sie die Anleitungen zur Inbetriebnahme, die Betriebsanleitungen des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle sowie die Anleitung zum Stilllegen des Versuches genau, um Beschädigungen zu vermeiden! Nehmen Sie im Zweifelsfall keine Aktionen vor, wenn Sie sich nicht ganz sicher sind, zu welchem Ergebnis dies führt.

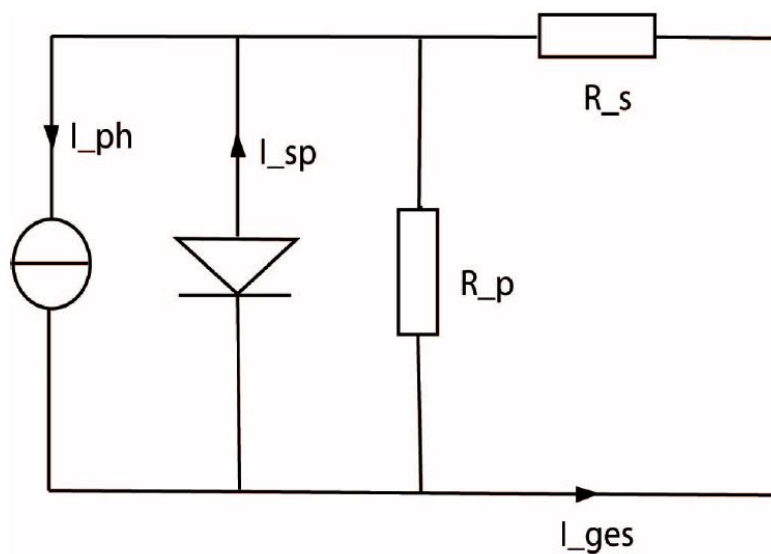
Lesen Sie vor der Versuchsdurchführung die Merkblätter über den Umgang mit Sauerstoff und Wasserstoff durch und richten Sie sich danach!

Der Versuchsaufbau besteht aus einem kommerziell erhältlichen Demonstrationsaufbau, er besteht aus einem Satz parallelgeschalteter Solarzellen mit einer Ausgangsspannung von ca. 2 V (Warum sind mehrere Solarzellen parallelgeschaltet?), dem Elektrolyseur, Wasser - Deionisationsflaschen, Gasvorratsbehälter und Brennstoffzelle. Zusätzlich finden sie am Versuchsplatz ein regelbares Netzgerät sowie zwei Messgeräte (Multimeter) und einem Satz von Lastwiderständen vor. Folgen Sie der beigefügten Versuchsanleitung, benutzen Sie das Netzgerät **nur mit Vorwiderstand** als Spannungsquelle für den Elektrolyseur.

1.7.1 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom der Solarzelle für verschiedene Beleuchtungsstärken. Richten Sie die Solarzellen direkt in Richtung Sonne bzw. vom Fenster weg aus. Erklären Sie Ihre Beobachtungen!
2. Messen Sie die Dunkel I/U -Kennlinie indem sie die Solarzelle abdecken (Netzteil). Erstellen Sie auch ein P/I -Diagramm. Welches Vorzeichen hat die Leistung? Was kann man daraus erkennen?

3. Messen Sie bei konstanter Beleuchtung der Solarzelle die I/U -Kennlinie der Solarzelle aus, indem Sie verschiedene Lastwiderstände an die Solarzelle anschließen. Erstellen Sie wiederum ein P/I -Diagramm. Bestimmen Sie den MPP (Maximum Power Point). Wie groß ist der optimale Lastwiderstand ?
4. Bestimmen Sie die Leistung in Abhängigkeit von der beleuchteten Fläche.
5. Bestimmen Sie den Füllfaktor der Solarzelle ($P_{\text{opt}} = 1000 \text{ W/m}^2$)
6. Unten sehen Sie das Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle. Den Widerstand R_{textp} kommt durch Verunreinigungen und Kristallfehler and der Grenzfläche der n - p leitenden Schicht zustande. Die e-h Paare rekombinieren vorzeitig und tragen nicht zum Photostrom bei. R_{texts} kommt durch den Ohmschen Widerstand der Kontakte zustande. Bestimmen Sie aus Ihrer I/U -Kennlinie R_p und R_s .



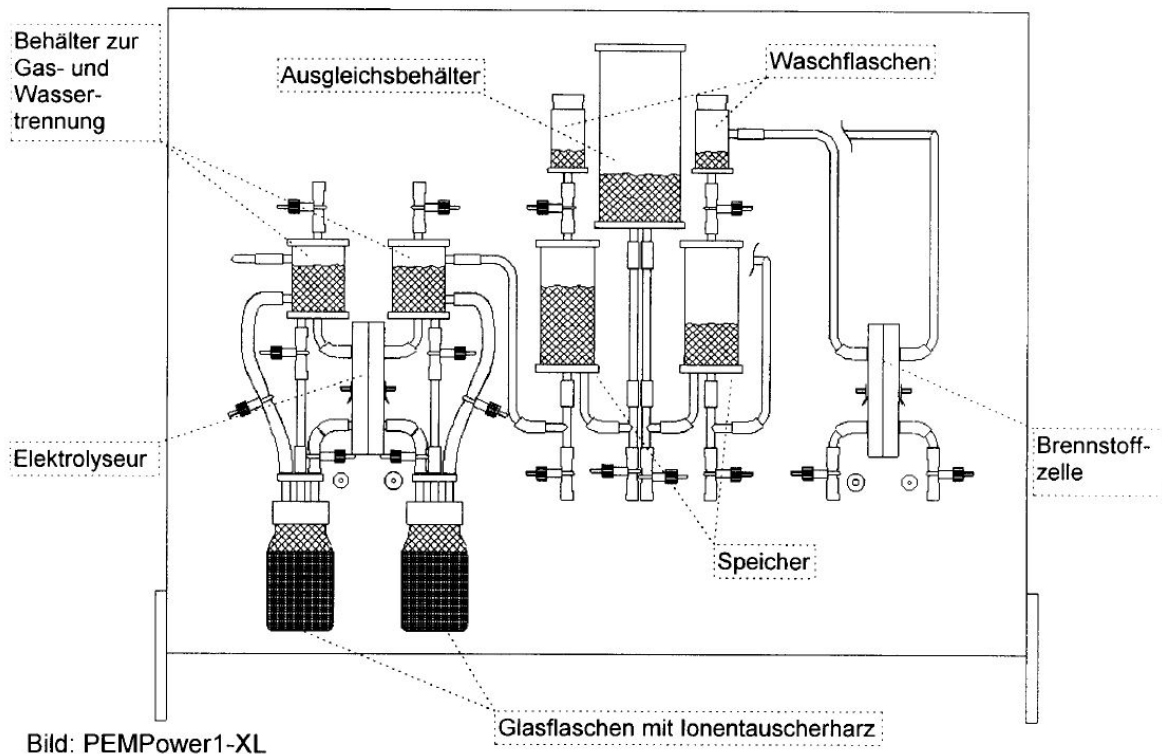
7. Bestimmen Sie die I/U -Kennlinie des Elektrolyseurs durch Regelung der Elektrolysespannung. Interpretieren Sie die erhaltene Kurve.
8. Bestimmen Sie anhand der erzeugten Gasmenge und der verrichteten elektrischen Arbeit den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs im gewählten Arbeitspunkt. Brennwert von Wasserstoff?
9. Bei konstanter Spannung am Elektrolyseur: Messen Sie die erzeugte Gasmenge in Abhängigkeit von der Zeit. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Faraday'schen Gesetz! Bestimmen Sie den Faradayschen Wirkungsgrad (Verhältnis von theoretisch errechneter zu tatsächlich erzeugter Gasmenge).
10. Nehmen Sie die I/U -Kennlinie der Brennstoffzelle auf. Beginnen Sie mit der Leerlaufspannung, schließen Sie dann sukzessive erst große, dann immer kleinere Wi-

derstände an die Brennstoffzelle an. **Kleinsten zulässiger Widerstand ist 0.5 Ω .**
Für maximal 10 s können Sie auch den Kurzschlussstrom messen!

11. Stellen Sie die Leistung in Abhängigkeit des Stroms graphisch dar. Bestimmen Sie MPP und den idealen Lastwiderstand
12. Bei konstanter Last an der Brennstoffzelle: Messen Sie die verbrauchte Gasmenge in Abhängigkeit von der Zeit. Vergleichen Sie mit dem Faraday'schen Gesetz! Bestimmen Sie den Faradayschen Wirkungsgrad.
13. Bestimmen Sie anhand der verbrauchten Gasmenge und der geleisteten elektrischen Arbeit den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im gewählten Arbeitspunkt!

1.8 Anhang

1.8.1 Beschreibung und Verwendungszweck der Wasserstofftechnologie - Demonstrationsanlage "PEMpower1-XL"

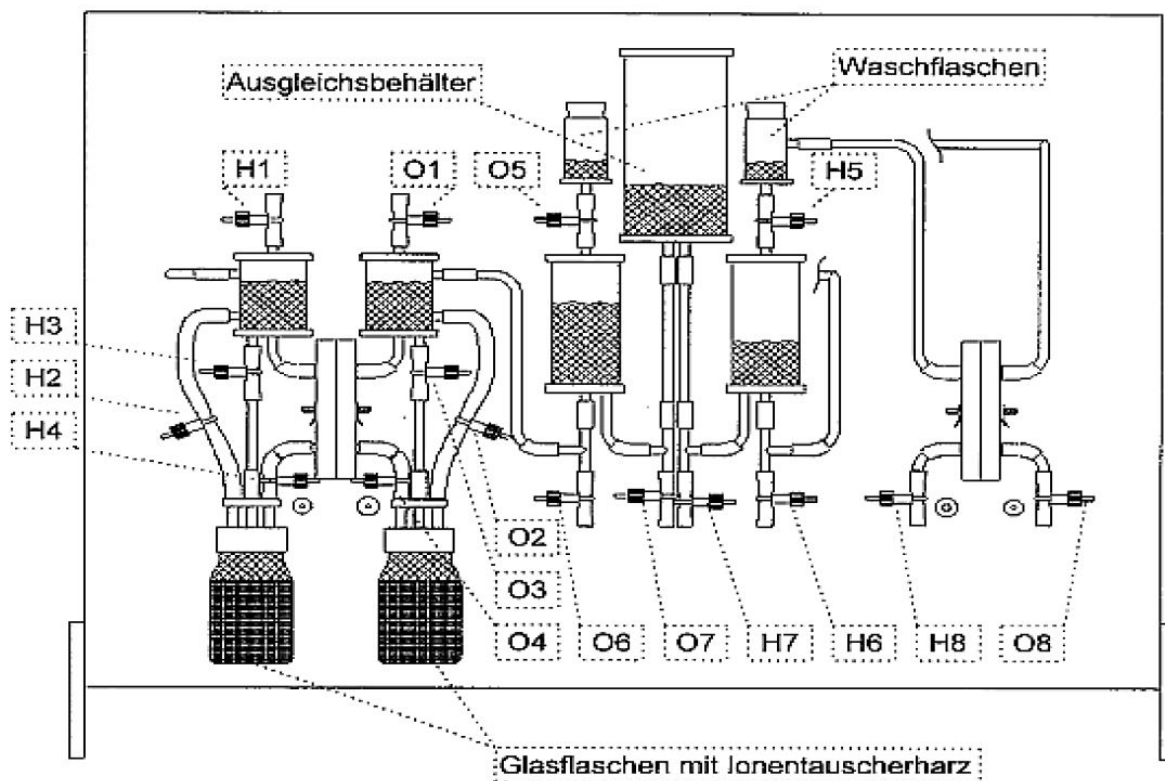


Die Wasserstofftechnologie - Demonstrationsanlage "PEMpower1-XL" ist ausschließlich für Lehr- und Demonstrationszwecke entwickelt worden. Mit dieser Anlage lassen sich die Funktionsweisen von PEM - Elektrolyseuren und PEM - Brennstoffzellen (PEM = Proton Exchange Membrane = Protonen Austausch Membran) zeigen und auch messtechnisch erfassen.

Jede andere Verwendung ist unzulässig!

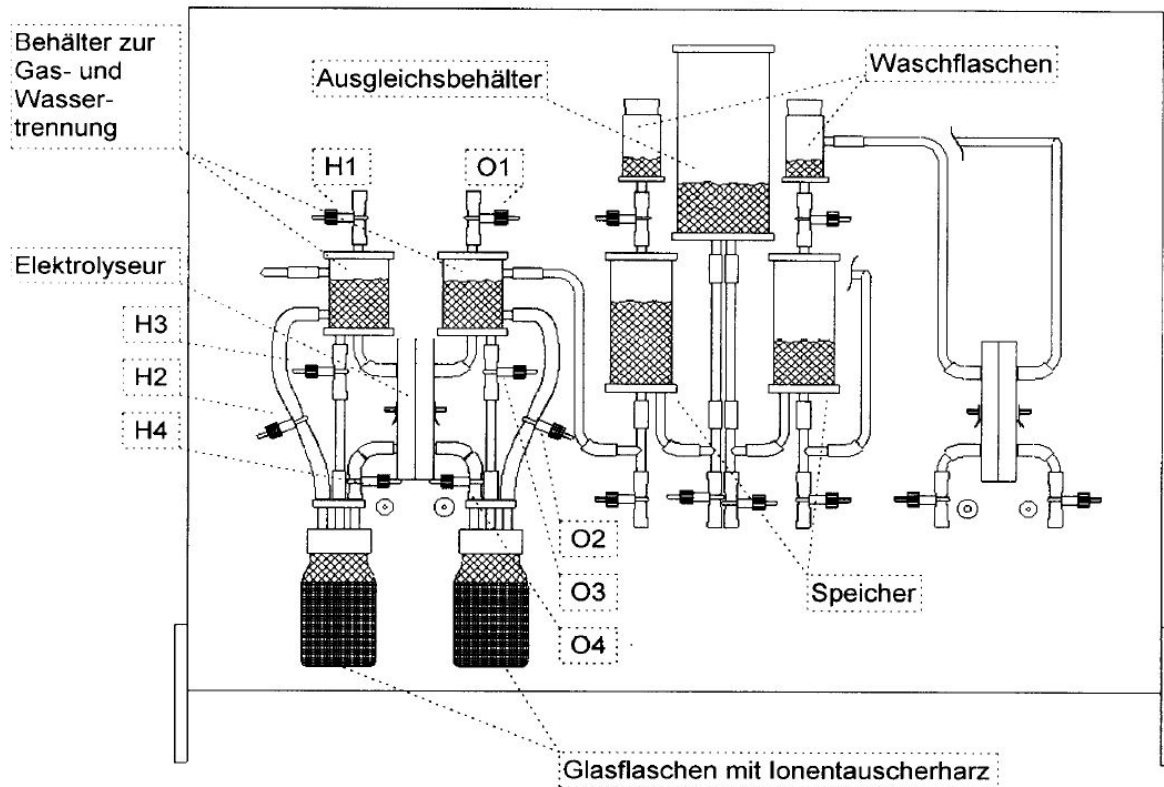
Bei Anlegen einer Gleichspannung an den Elektrolyseur (siehe "Betrieb des Elektrolyseurs") zerlegt dieser deionisiertes Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Oberhalb des Elektrolyseurs befinden sich Behälter, in denen sich das Gas vom Wasser trennt. Unterhalb des Elektrolyseurs befinden sich zwei Gasflaschen mit Ionentauscherharz zur Aufrechterhaltung der Wasserqualität. Die Gase werden über Rohre zum mittleren Teil der Anlage geführt und gelangen dort in die Speicher. Gasblasen, die in die Speicher gelangen, verdrängen das dort vorhandene Wasser in den Ausgleichsbehälter über den Speicher. Der Ausgleichsbehälter muss zum Druckausgleich immer geöffnet sein. Sollte einmal zuviel Gas produziert werden, so entweicht auch dieses über den Ausgleichsbehälter. Ein sicheres Ableiten muss in diesem Fall gewährleistet sein. Die Entnahme der Gase erfolgt durch teilweise mit Wasser befüllte Waschflaschen. Durch diese Maßnahme wird verhindert, dass Flammen – durch welchen Umstand auch immer erzeugt – bis in den Speicher vordringen können. Die Gase gelangen dann zur Brennstoffzelle, welche aus ihnen wieder Wasser und Strom erzeugt, welcher genutzt werden kann (siehe "Betrieb der Brennstoffzelle").

1.8.2 Inbetriebnahme



- Klebestreifen (Transportschutz) vom Ausgleichsbehälter entfernen
- Ventile öffnen: H2 / H3 / H4 / H8 / O2 / O3 / O4 / O8
- Ventile schließen: H1/ H5 / H6 / H7 / O1 / O5 / O6 / O7
- Gasflaschen mit einem Kunststofflöffel zu 3/4 mit Ionenaustauscherharz befüllen, dabei mit den Gasflaschen leicht auf den Untergrund klopfen (Harz verdichtet sich)
- ggf. Gewinde der Gasflaschen von Harz reinigen
- Gasflaschen soweit mit deionisiertem Wasser ($2\ \mu\text{S}/\text{cm}$ z.B. destilliertes Wasser für Bügeleisen) befüllen, bis Harz bedeckt ist
- vergewissern, daß Dichtringe für Gasflaschen korrekt sitzen
- Gasflaschen vorsichtig anschrauben
- Ausgleichsbehälter mit deionisiertem Wasser befüllen. Während der nachfolgenden Punkte ggf. weiteres deionisiertes Wasser nachfüllen.
- Ventil H5 solange öffnen, bis Waschflasche zur Hälfte mit Wasser befüllt ist. Im Speicher darf maximal eine Gasblase verbleiben.
- Ventil O5 solange öffnen, bis Waschflasche zur Hälfte mit Wasser befüllt ist. Im Speicher darf maximal eine Gasblase verbleiben.
- Ventil H1 solange öffnen, bis Behälter mit Wasser befüllt ist.
- Schlauch an Ventil H2 solange drücken, bis senkrechtes Rohr an Ventil H3 frei von Gasblasen ist. Der Elektrolyseur sollte auch möglichst frei von Gasblasen sein.
- Ventil H1 nochmals öffnen, um neu hinzugekommene Gasblasen entweichen zu lassen. Es darf maximal eine Blase im Behälter verbleiben.
- Ventil H2 schließen, Ventile H3 und H4 bleiben geöffnet.
- Ventil O1 solange öffnen, bis Behälter mit Wasser befüllt ist.
- Schlauch an Ventil O2 solange drücken, bis senkrechtes Rohr an Ventil O3 frei von Gasblasen ist. Der Elektrolyseur sollte möglichst auch frei von Gasblasen sein.
- Ventil O1 nochmals öffnen, um neu hinzugekommene Gasblasen entweichen zu lassen. Es darf maximal eine Blase im Behälter verbleiben.
- Ventil O2 schließen, Ventile O3 und O4 bleiben geöffnet.
- Ventile H8 und O8 schließen.

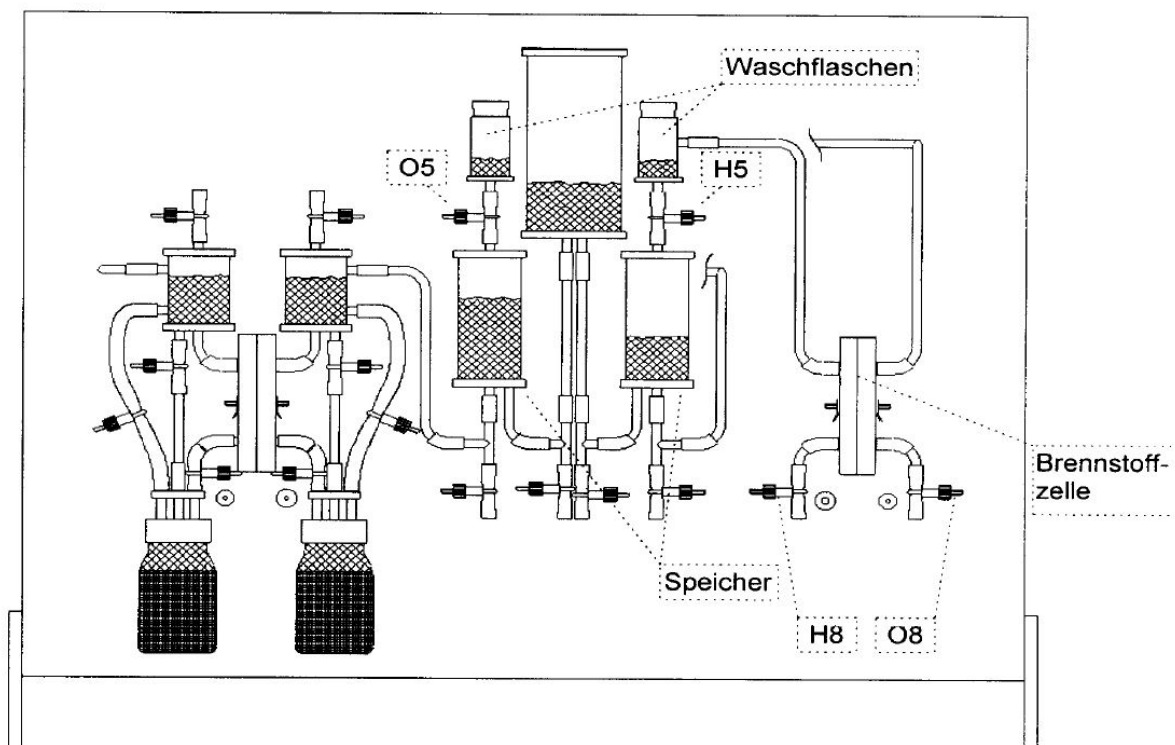
1.8.3 Betrieb des Elektrolyseurs



- Voraussetzung
 1. Gasflaschen sind mit Ionenaustauscherharz befüllt
 2. Elektrolyseur-Seite der Anlage ist mit deionisiertem Wasser befüllt
 3. Ventile H1 / H2 / O1 / O2 sind geschlossen
 4. Ventile H3 / H4 / O3 / O4 sind geöffnet
 5. Bei komplett mit Wasser befüllter Anlage sollte noch ca. 2 - 4 cm Füllhöhe im Ausgleichsbehälter vorhanden sein.
 6. Waschflaschen sind bis zur Hälfte mit Wasser befüllt.
- Gleichspannungsversorgung an die beiden zum Elektrolyseur gehörenden 4mm - Buchsen anschließen.
 - Schwarzer Pol = -, Roter Pol = +
 - Achtung
 - * Falsche Polung führt zur Zerstörung des Elektrolyseurs
 - * maximale Spannung = 2.0 V (Überschreitung kann zur Zerstörung führen)
 - Empfohlene Spannung ca. 1.8 - 2.0 V

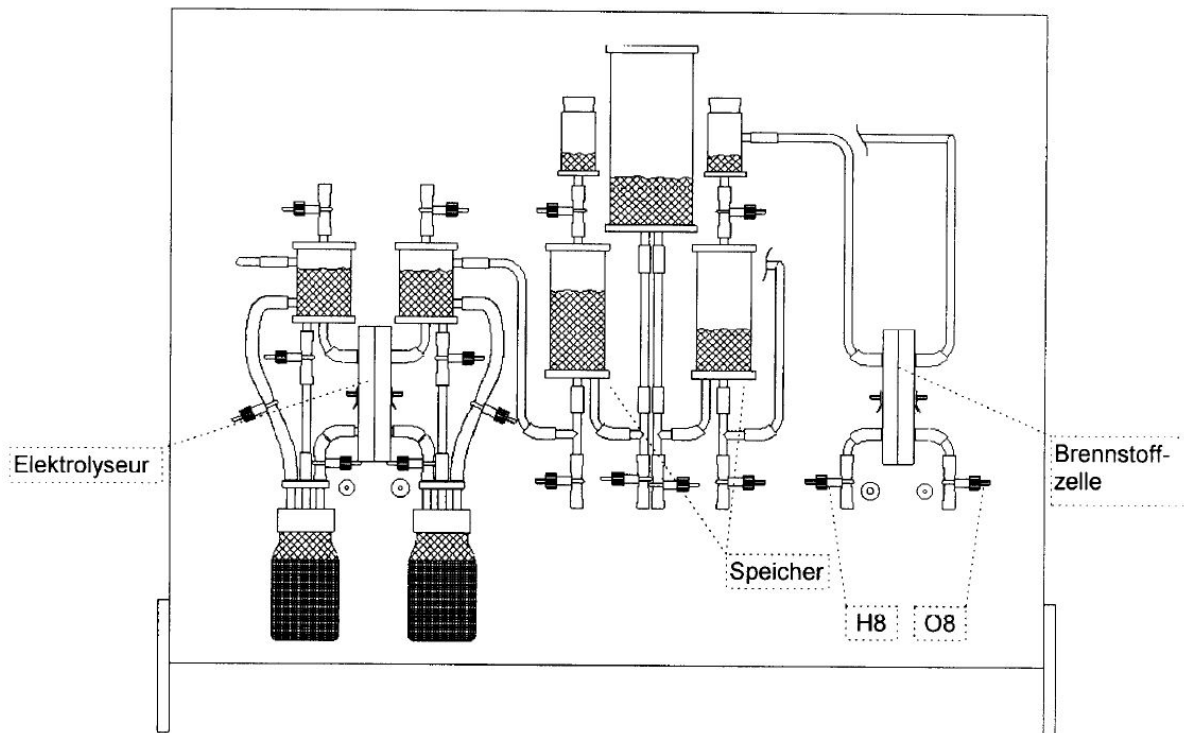
- Wir empfehlen, die Spannung mittels Multimeter zu überwachen
- Niemals direkt an die Gehäusedurchführung des Elektrolyseurs anschließen oder an dieser die Mutter verändern: die Verbindung ist empfindlich gegenüber mechanischer Beanspruchung!
- Es entsteht nun auf der negativen Seite des Elektrolyseurs Wasserstoff und auf der positiven Seite Sauerstoff. Die Blasen gelangen in die Behälter oberhalb des Elektrolyseurs und sammeln sich oberhalb des Wassers. Dieses wird zum Teil zu den Speichern hin verdrängt.
- Kontrollieren Sie, ob von unten dem Elektrolyseur frisches Wasser zufließt.
- Nach Erreichen einer ausreichenden Gasmenge über dem Elektrolyseur wird das Gas automatisch zu den Speichern übergeleitet und dort gesammelt.
- Die Gase verdrängen das in den Speichern vorhandene Wasser in den Ausgleichsbehälter hinein. Sind die Speicher mit Gas befüllt, so kann auch überschüssiges Gas durch den Ausgleichsbehälter hindurch entweichen. Stellen Sie sicher, dass das Gas gefahrlos entweichen kann und verhindern Sie, dass es sich ansammelt.

1.8.4 Betrieb der Brennstoffzelle



- Voraussetzungen:
 1. Waschflaschen sind etwa zur Hälfte mit deionisiertem Wasser befüllt.
 2. Beide Speicher sind mindestens mit 20 cm³ Gas befüllt.
 3. Ventile H5 / H8 / O5 / O8 sind geschlossen.
- Ventile H5 und O5 öffnen.
- Ventil O8 solange öffnen, bis ein Großteil des Sauerstoffs über die Brennstoffzelle entwichen ist. Auf diese Art wird die Leitung von der Waschflasche zur Brennstoffzelle von der vorher in ihr vorhandenen Luft befreit. Danach Ventil O8 wieder schließen.
- Ventil H8 solange öffnen, bis ein Großteil des Wasserstoffs über die Brennstoffzelle entwichen ist. Auf diese Art wird die Leitung von der Waschflasche zur Brennstoffzelle von der vorher in ihr vorhandenen Luft befreit. Danach Ventil H8 wieder schließen.
- Ventile H5 und O5 bleiben geöffnet, H8 und O8 bleiben geschlossen.
- Die Brennstoffzelle baut nun eine Spannung auf, welche genutzt werden kann (z.B. *H - TEC* Fan). Kurzzeitige Kurzschlüsse (maximal 10 Sekunden) schaden der Zelle nicht. Dauerhaft sollte sie jedoch nicht unter 0.3 V Zellspannung betrieben werden.
- Wir empfehlen, den Elektrolyseur gleichzeitig laufen zu lassen, so dass das von der Brennstoffzelle verbrauchte Gas dem Speicher neu hinzugeführt wird.
- Als Reaktionsprodukt entsteht in der Brennstoffzelle Wasser. Bei normaler Betriebsweise sind dies ca. 1 - 2 Tropfen bei einem 8-stündigen Betrieb. Diese stören den Betrieb der Brennstoffzelle nicht und brauchen während des Betriebs auch nicht abgelassen zu werden.

1.8.5 Demonstrations- und Praktikumsbetrieb



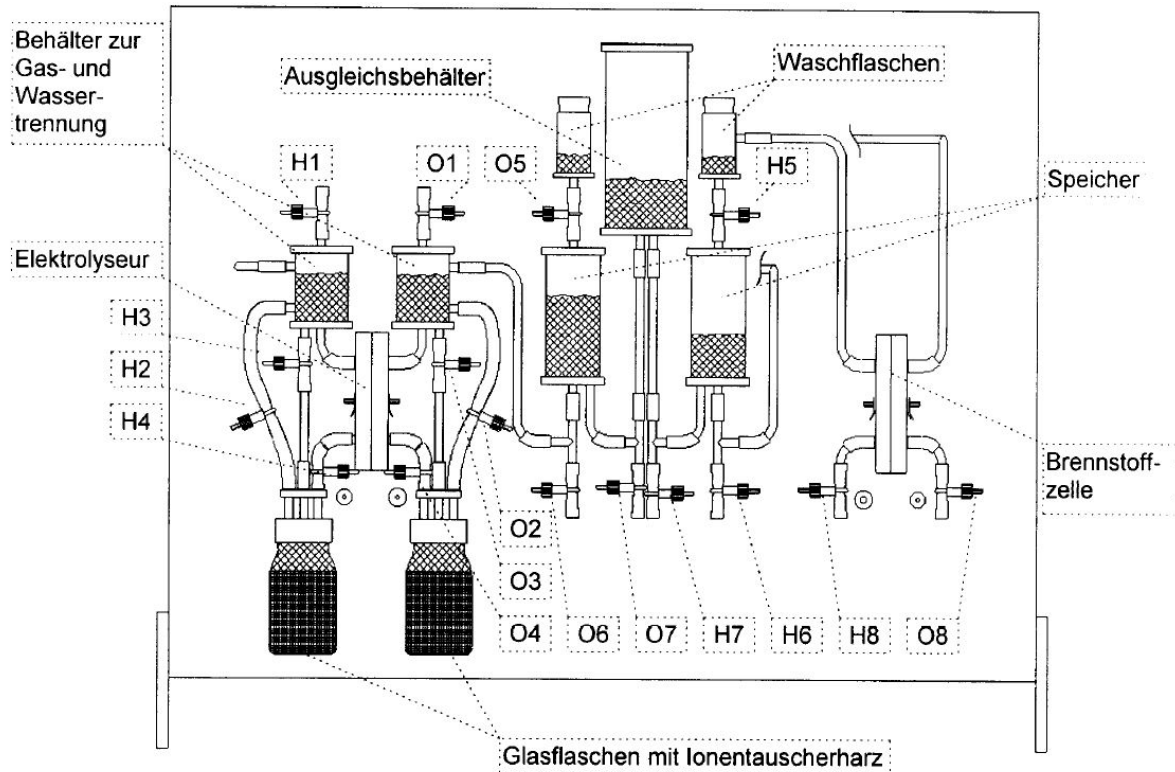
Demonstrationsbetrieb:

- Nehmen Sie den Elektrolyseur und nach einiger Zeit auch die Brennstoffzelle, wie in den vorherigen Kapiteln geschildert, in Betrieb.
- Stellen Sie die Spannungsversorgung des Elektrolyseurs so ein, daß dieser geringfügig mehr Gas erzeugt, als die Brennstoffzelle verbraucht. Indem Sie hin und wieder die Ventile H8 und O8 öffnen, halten Sie die gespeicherte Gasmenge auf dem gewünschten Niveau. Die Spannungsversorgung bei den *H - TEC* - Solarmodulen *Solar 1* und *Solar 2* lässt sich durch Änderung der Einstrahlung variieren (Abstand Solarmodul – Scheinwerfer bzw. Ausrichtung zur Sonne).

Praktikumsbetrieb:

- Für den Praktikumsbetrieb können die Leistungen des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle im rahmen ihrer technischen Daten variiert werden.
- Wir empfehlen, den Elektrolyseur vor Versuchsbeginn schon etwa 10 Minuten bei 1.9 V laufen zu lassen, da sich seine Leistungskurve in dieser Zeit verändert.

1.8.6 Nach dem Betrieb



Für einen Stillstand bis zu 3 Tagen:

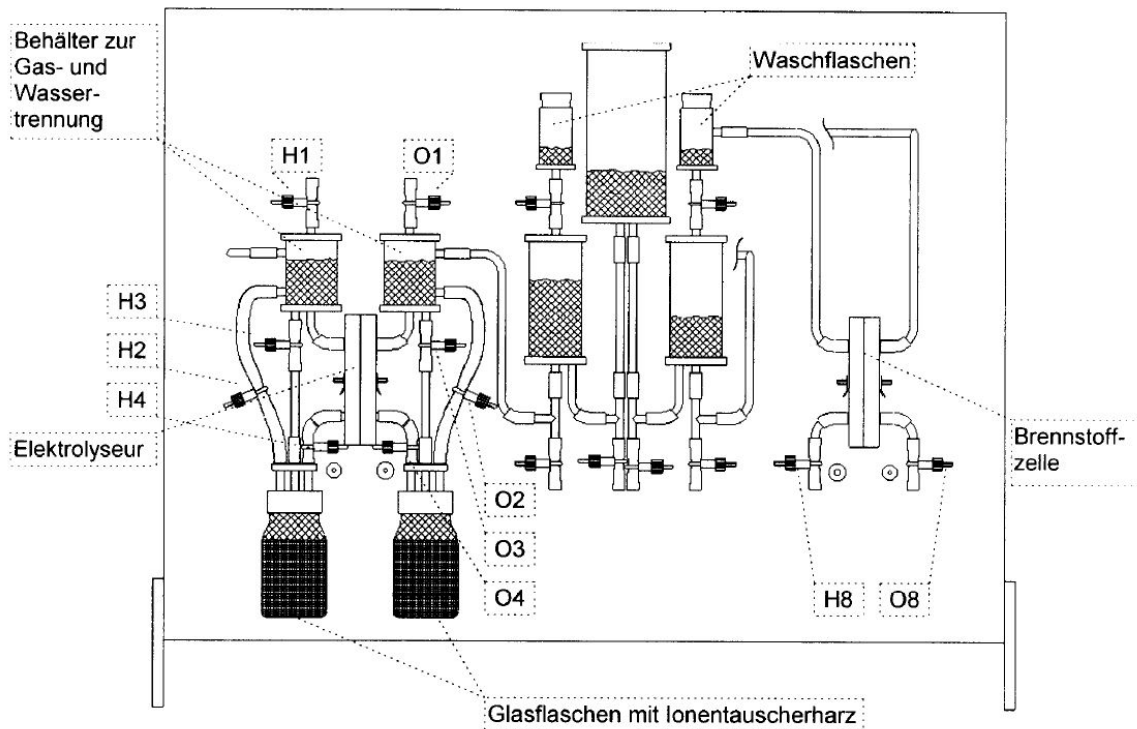
- Entfernen Sie den elektrischen Verbraucher von der Brennstoffzelle
- Wenn Sie das noch vorhandene Gas ablassen möchten:
 - Öffnen Sie das Ventil H8 so lange, bis der Wasserstoff aus dem Speicher entwichen ist.
 - Öffnen Sie das Ventil O8 so lange, bis der Sauerstoff aus dem Speicher entwichen ist. (Sie können das Gas auch als Vorrat für die nächsten Tage speichern – die Brennstoffzelle ist dann früher betriebsbereit.)
- Schließen Sie die Ventile H5 und O5
- Öffnen Sie die Ventile H8 und O8
- Führen Sie ggf. Wartungsarbeiten (Ionenaustauscherharz / Kapitel "Wartung") durch

Für einen Stillstand von mehr als 3 Tagen:

- Entfernen Sie den elektrischen Verbraucher von der Brennstoffzelle

- Öffnen Sie das Ventil H8 so lange, bis der Wasserstoff aus dem Speicher entwichen ist.
- Öffnen Sie das Ventil O8 so lange, bis der Sauerstoff aus dem Speicher entwichen ist.
- Öffnen Sie das Ventil H1 so lange, bis der Wasserstoff aus dem Behälter entwichen ist.
- Öffnen Sie das Ventil O1 so lange, bis der Sauerstoff aus dem Behälter entwichen ist.
- Stellen Sie die Anlage über eine Auffangmöglichkeit für das abzulassende Wasser
- Schließen Sie die Ventile H2 / H3 / H4 / O2 / O3 / O4
- Entfernen Sie die Gasflaschen mit Ionenaustauscherharz
- Entnehmen Sie die Gummistopfen aus den Waschflaschen
- Das Ablassen des Wassers erfolgt nun über das Öffnen aller Ventile
- Anschließend sind die Gummistopfen wieder in die Waschflaschen zu stecken
- Zur Verhinderung des Austrocknens der Brennstoffzelle sind die Ventile H8 und O8 zu schließen. Alle anderen Ventile bleiben geöffnet. Der Ausgleichsbehälter ist abzudecken (z.B. Klebestreifen)

1.8.7 Wartung



Elektrolyseur:

Der Elektrolyseur benötigt keine Wartung. Achten Sie jedoch auf folgende Punkte:

- Falsche Polung führt zur Zerstörung des Elektrolyseurs
- Nie über 2.0 V betreiben
- Bei Stillstand von mehr als drei Tagen muss das Wasser aus dem Elektrolyseur abgelassen werden. Verbleibende Wasserreste schaden jedoch nicht.

Brennstoffzelle:

Die Brennstoffzelle benötigt keine Wartung. Achten Sie jedoch auf folgende Punkte:

- Niemals eine äußere Spannung an die Brennstoffzelle anschließen! Dies kann zur sofortigen Zerstörung führen!
- Die Zelle sollte immer feucht sein. Ideal ist das Vorhandensein von Wassertropfen an den Plexiglasplatten. Um eine Austrocknung zu verhindern, sollten deshalb bei mehrtägigem Stillstand die Ventile H8 und O8 geschlossen sein. Zuviel Feuchtigkeit kann der Zelle jedoch schaden. Sollte bei Stillstand auf der Unterseite der Zelle Wasser stehen, so sind die Gummistopfen der Waschflaschen zu entfernen und das Wasser über die geöffneten Ventile H8 und O8 auszublasen.

Ionenaustauscherharz:

Das Ionenaustauscherharz ist für die Aufrechterhaltung der Wasserqualität verantwortlich. Insbesondere filtert es unerwünschte Metallionen aus dem Wasser. Wechseln des Ionenaustauscherharzes:

- Ventil H1 solange öffnen, bis Behälter ganz mit Wasser befüllt ist
- Ventil O1 solange öffnen, bis Behälter ganz mit Wasser befüllt ist
- Ventile H2 / H3 / H4 / O2 / O3 / O4 schließen
- Flaschen abschrauben und Ionenaustauscherharz gegen neues austauschen
- Gasflaschen mit einem Kunststofflöffel zu 3/4 mit Ionenaustauscherharz befüllen, dabei mit den Gasflaschen leicht auf den Untergrund klopfen (Harz verdichtet sich)
- Ggf. Gewinde der Gasflasche vom Harz reinigen
- Gasflaschen soweit mit deionisiertem Wasser ($< 2 \mu\text{S}/\text{cm}$ z.B. destilliertes Wasser für Bügeleisen) befüllen bis Harz bedeckt ist
- Vergewissern, dass Dichtringe für Gasflaschen korrekt sitzen
- Gasflaschen vorsichtig anschrauben
- Ventile H2 / H3 / H4 / O2 / O3 / O4 öffnen
- Schlauch an Ventil H2 solange drücken, bis vorhandenes Gas entwichen ist
- Schlauch an Ventil O2 solange drücken, bis vorhandenes Gas entwichen ist
- Ventil H2 schließen, Ventile H3 und H4 bleiben geöffnet
- Ventil O2 schließen, Ventile O3 und O4 bleiben geöffnet
- Gasblasen, die sich in den Behältern zur Gas- und Wassertrennung angesammelt haben, sind über die Ventile H1 und O1 zu entlassen
- Wir empfehlen den Austausch des Ionenaustauscherharzes alle 20 Betriebsstunden vorzunehmen
- Sammeln sie das verbrauchte Ionenaustauscherharz. Sie können es bei Ihrem örtlichen Laborbedarfshändler zur Regeneration geben

Reinigung:

Wir empfehlen die äußerliche Reinigung des Gerätes mit feuchten Einweg - Brillenputztüchern.