

# Erneuerbare Energien

## Stichworte zur Vorbereitung:

Brennstoffzelle, Elektrolyse und kalte Verbrennung, Solarzelle, Windrad und -kraftanlagen, pn-Übergang, Photodiode, Strömungen, Bernoulli-Gleichung

Als Teil der Vorbereitung sind **Schaltpläne** für die Verschaltung von Netzteil, Messgeräten und den im Versuch verwendeten Geräte (Brennstoffzelle, Solarzelle, Windmaschine, Windrad, diverse Widerstände und Kapazitäten) gemäß aller **Teilaufgaben** anzufertigen und zum Praktikum mitzubringen.

### Sicherheitshinweise Brennstoffzelle:

Die protonenleitenden Membranen der Brennstoffzellen können bei unsachgemäßem Gebrauch, durch Austrocknen, Kurzschluss oder aggressive Flüssigkeiten zerstört werden.

Die reversible PEM-Brennstoffzelle nur verwenden, wenn sie feucht ist!

Auf richtige Polung achten! Bei falscher Polung wird die reversible Brennstoffzelle zerstört!

Brennstoffzelle nur kurzzeitig kurzschließen.

Nach Gebrauch die Schlauchanschlüsse auf jeder Seite mit einem kurzen Schlauchstück verbinden. Zelle in einer luftdichten Plastiktüte aufbewahren. So wird verhindert, dass die Zelle austrocknet.

Bei der Bestimmung der Kennlinie ist von hohen zu niedrigen Spannungen zu messen (Start:  $\sim 1,7 \text{ V}$  / **500 mA**).

Geladene Kapazitäten sind Spannungsquellen, daher sollten die Anschlüsse während des Ladevorgangs nicht berührt werden.

### Allgemein:

Die Messgeräte sollten nicht in Sättigung betrieben werden, um das Durchbrennen der Sicherungen zu verhindern.

Im Zweifel ist immer der hohe Messbereich auszuwählen, der dann bei Bedarf langsam verkleinert werden kann.

## 1 Grundlagen

Als erneuerbare Energien werden Energiequellen bezeichnet, die sich für eine nachhaltige Energieversorgung eignen und damit entweder unerschöpflich oder schnell erneuerbar sind. Damit grenzen sie sich zu fossilen Energiequellen wie Erdgas oder Erdöl ab. In diesem Versuch werden die nachhaltigen Energieversorgungsmöglichkeiten über Brennstoffzellen, Solarzellen und Windrädern untersucht.

## 1.1 Brennstoffzelle

Die reversible PEM-Brennstoffzelle erzeugt bei der kalten Verbrennung elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff, d.h. aus chemischer Energie. Wird elektrische Energie angelegt, so ist sie in der Lage Elektrolyse zu betreiben und produziert aus Wasser Sauerstoff und Wasserstoff. Sie besitzt eine protonenleitende Membran (PEM: proton exchange membrane) und kommt daher ohne Säuren oder Laugen aus.

### Brennstoffzelle zur Stromerzeugung:

Bei der Elektrolyse wird an der Anode Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) in Protonen ( $\text{H}^+$ ) und Elektronen ( $e^-$ ) aufgeteilt. Die Elektronen fließen im äußeren Stromkreis von der Anode zur Kathode und können elektrische Arbeit leisten. Die Protonen wandern durch die Membran und reagieren auf der Kathodenseite mit Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) und Elektronen zu Wasser. Die Reaktionsgleichungen lauten:

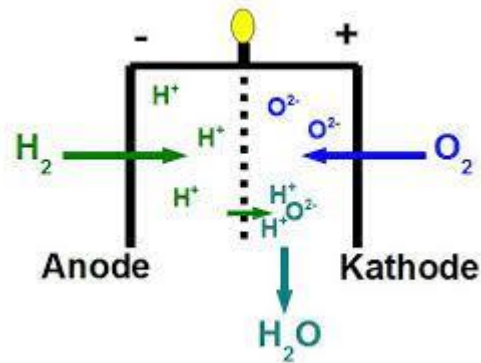
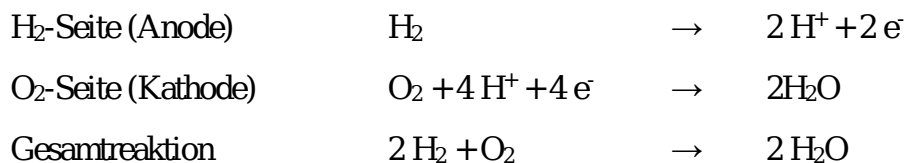


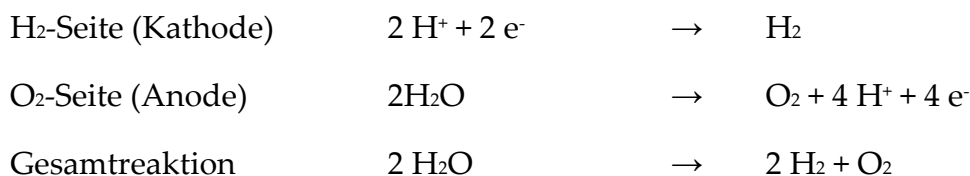
Abb. 1.1.1 Schema einer Brennstoffzelle [5]



Das bei der Reaktion entstehende Wasser verdunstet auf der  $\text{O}_2$ -Seite. Aus 1 l Wasserstoff (bei RT ca. 0,04 mol  $\text{H}_2$ ) entstehen nur 2  $\mu\text{l}$  Wasser (ca. 0,04 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ).

### Elektrolyseur zur Wasserstoffproduktion:

Wird die reversible Brennstoffzelle als Elektrolyseur eingesetzt, kehren sich die Reaktionen um. Es wird elektrische Energie ins System hineingegeben, die die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff antreibt. Die Reaktionsgleichungen sind:



## 1.2 Solarzelle

Die Solarzelle entspricht einer großflächigen Photodiode, die die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umwandelt und somit als Stromquelle (Photovoltaik) dient. Eine Photodiode besteht aus einem n- und p-dotiertem Halbleiter. In n-dotierten Halbleitern

werden Atome mit 5 Valenzelektronen (z.B. P) in ein Gitter aus Atomen mit 4 Valenzelektronen (z.B. Si) eingebracht (Abbildung 1.2.1).

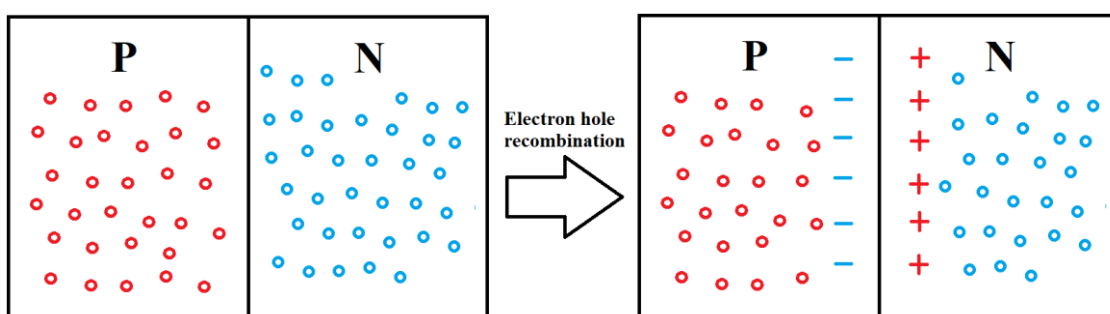
Durch die dadurch entstehenden Bindungen mit den Nachbaratomen sind 4 der 5 Elektronen des P fest in der Gitterstruktur gebunden, während eines der Elektronen nur leicht an den P-Kern gebunden ist. Wird diese Bindung durch Energiezufuhr gelöst (z.B. thermische Energie durch Raumtemperatur), entsteht ein frei bewegliches Elektron, das zur Leitung von elektrischem Strom beitragen kann und ein „Loch“ zurücklässt (eine Position im Gitter an der die negative Ladung fehlt). Dadurch entsteht ein sogenanntes Valenzband (das Elektron ist gebunden) und ein energetisch knapp darüberliegendes Leitungsband (das Elektron ist nicht mehr gebunden) (Abbildung 1.2.2).

Ein p-dotierter Halbleiter ist ähnlich aufgebaut wie ein n-dotierter Halbleiter, allerdings werden anstatt Atomen mit 5 Valenzelektronen Atome mit 3 Valenzelektronen eingebracht (z.B. B) (Abbildung 1.2.1). Dadurch entstehen Positionen, an denen ein Elektron leicht binden kann, um die Symmetrie des Gitters zu erhalten. Solche Positionen werden auch als Löcher bezeichnet.[7]



**Abbildung 1.2.1** Beispiele für ein n-dotiertes (A) und ein p-dotiertes (B) Si-Gitter [4]

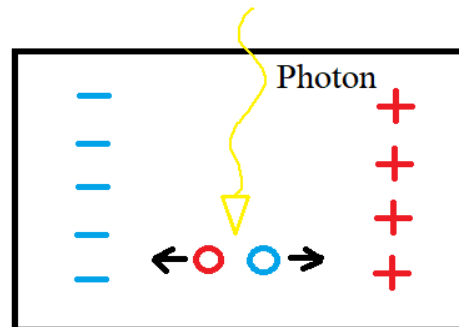
Um nun eine Solarzelle zu bauen, werden n- und p-dotierte Halbleiter wie in Abbildung 1.2.2 übereinandergelegt und auf beiden Seiten kontaktiert.



**Abbildung 1.2.2** P-N-Übergang mit aufgebauter Raumladungszone rechts.

Wenn ein Photon mit ausreichender Energie ein Elektron in der Raumladungszone aus dem Valenzband ins Leitungsband hebt, dann entsteht ein Elektron-Loch-Paar. Wegen dem statischen elektrischen Feld werden Elektron und Loch voneinander getrennt (siehe Abbildung 1.2.3). Werden beide Seiten mit einem elektrischen Leiter verbunden, fließt ein

Strom. Elektron-Loch-Paare, die nicht in der ladungsfreien Zone erzeugt werden, haben erhöhte Wahrscheinlichkeit direkt wieder zu rekombinieren, was zu verringerter Effizienz führt.

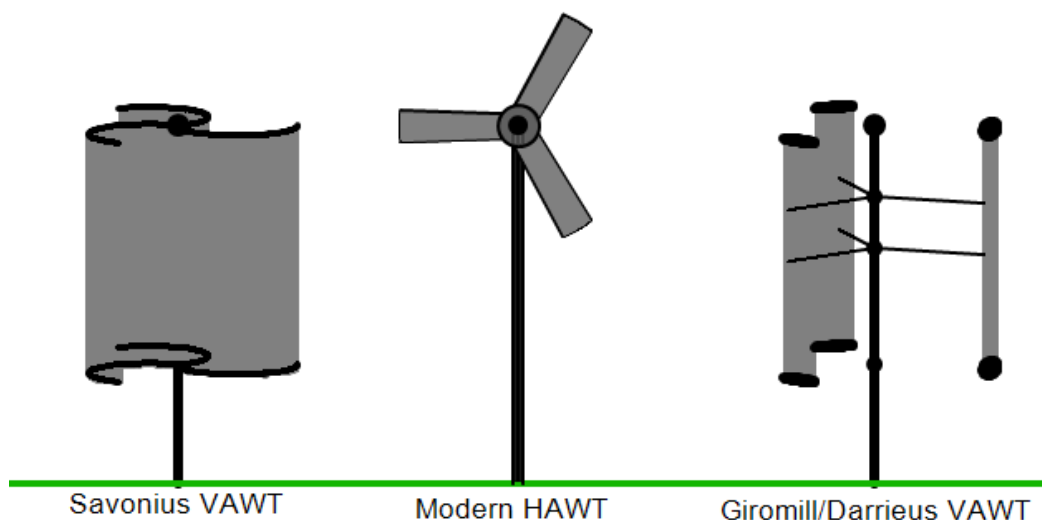


**Abbildung 1.2.3** Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares durch einfallende Photonen.

### 1.3 Windkraft

Bei der Windkraft wird die Bewegungsenergie des Windes genutzt, um elektrische Energie zu erzeugen. Früher wurde dieses Konzept hauptsächlich genutzt, um mechanische Energie zu erzeugen (Windmühle), heute wird es hauptsächlich zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet.

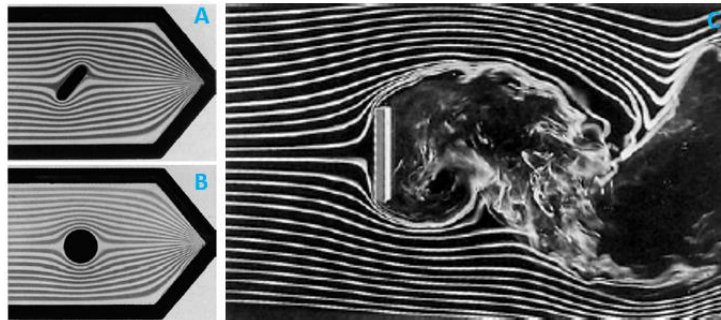
Um die Windenergie in elektrische Energie umzuwandeln, benötigt man eine Windkraftanlage bestehend aus einem Rotor und einem Generator, die entlang einer horizontalen oder vertikalen Achse ausgerichtet sein können. Die gebräuchlichsten Typen von Windenergieanlagen mit vertikaler Achse (VAWT) sind nach ihren Erfindern benannt: Savonius und Darrieus (Abb. 1.3.1):



**Abbildung 1.3.1** Die drei primären Typen von Windkraftanlagen [6]

Der Hauptvorteil von VAWT ist die Unabhängigkeit von der Windrichtung, horizontal ausgerichtete Windturbinen (HAWT) müssen entsprechend der Windrichtung ausgerichtet werden. Allerdings ist der maximale Wirkungsgrad der Stromumwandlung bei HAWT höher, wobei die häufigste Konfiguration mit drei verstellbaren Flügeln Wirkungsgrade von mehr als 50 % mit einer Ausgangsleistung im Megawattbereich erreichen.

Wind ist eine Luftströmung. Strömungen können laminar, bei denen sich Stromfäden nebeneinander bewegen (der Weg von zwei Teilchen in einem solchen Strom wird nie gekreuzt) oder turbulent sein (Abbildung 1.3.2). Eine weitere Einteilung erfolgt in stationäre und dynamische Strömungen (in einer stationären Strömung ist die Geschwindigkeit an jedem Ort zeitlich konstant), reale Flüssigkeiten und Gase sind zwischen diesen beiden Extremen einzuordnen.

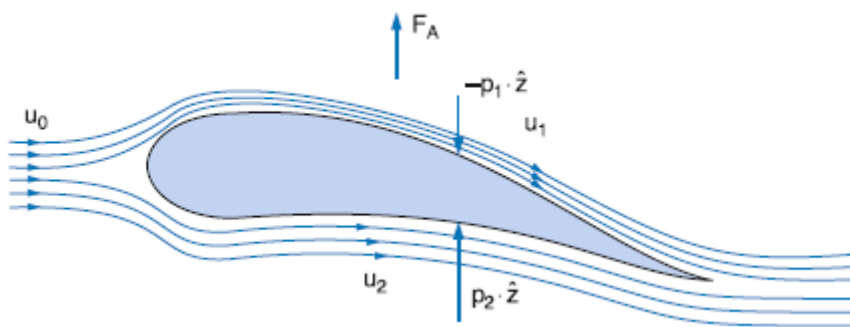


**Abbildung 1.3.2** A und B sind Beispiele für laminare Strömungen um verschiedene Objekte, C zeigt eine turbulente Strömung [2]

Die Drücke  $p$  innerhalb einer laminaren stationären Strömung können mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung beschrieben werden, wobei  $\rho$  der Dichte und  $u$  der Geschwindigkeit entspricht:

$$p + \frac{1}{2}\rho u^2 = p_0 = \text{konst.} \quad (1)$$

Die **Bernoulli-Gleichung** bildet die Grundlage für den **aerodynamischen Auftrieb**. Dieser entsteht durch unsymmetrische Formen der Tragflächen die zu unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und, wie von der Bernoulli-Gleichung beschrieben, zu unterschiedlichen Drücken über und unter der Tragfläche führen (Abbildung 1.3.3).



**Abbildung 1.3.3** Aerodynamischer Auftrieb an einer Tragfläche [2]

Die Auftriebskraft  $F$  kann mit Hilfe der klassischen Relation zwischen Druck und Kraft und der Bernoulli-Gleichung beschrieben werden:

$$F = (p_2 - p_1) \cdot A \approx \frac{1}{2}\rho_L(u_1^2 - u_2^2) \cdot A \quad (2)$$

Durch die Position der Tragflächen als Flügel eines Windrades führt diese Kraft zu einem Drehmoment, welches das Windrad antreibt und die Energiegewinnung ermöglicht.

## 2 Versuchsaufbauten

Die folgenden Abbildungen sollen einen Überblick über die Versuchsaufbauten geben.

### 2.1 Brennstoffzelle

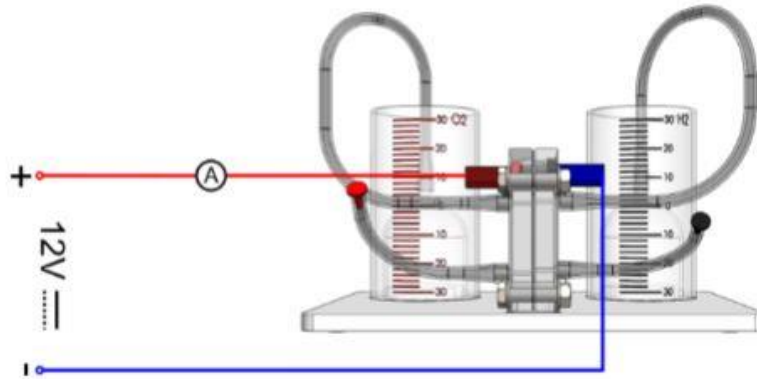


Abbildung 2.1.1 Aufbau der Brennstoffzelle [1]

### 2.2 Solarzelle

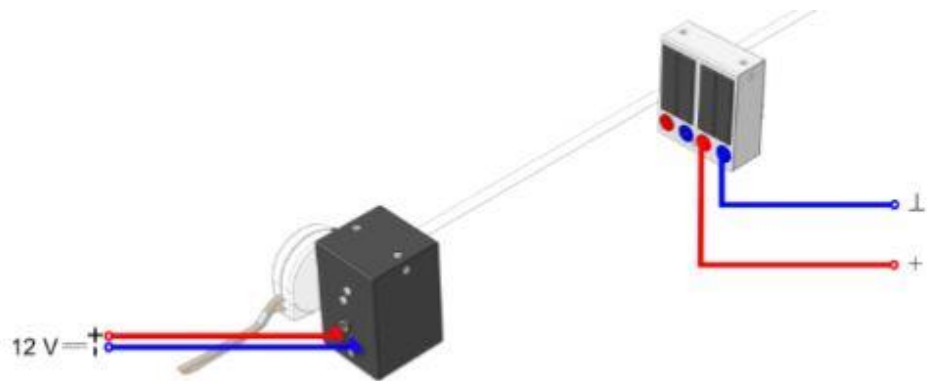


Abbildung 2.2.1 Aufbau der Solarzelle [1]

### 2.3 Windrad

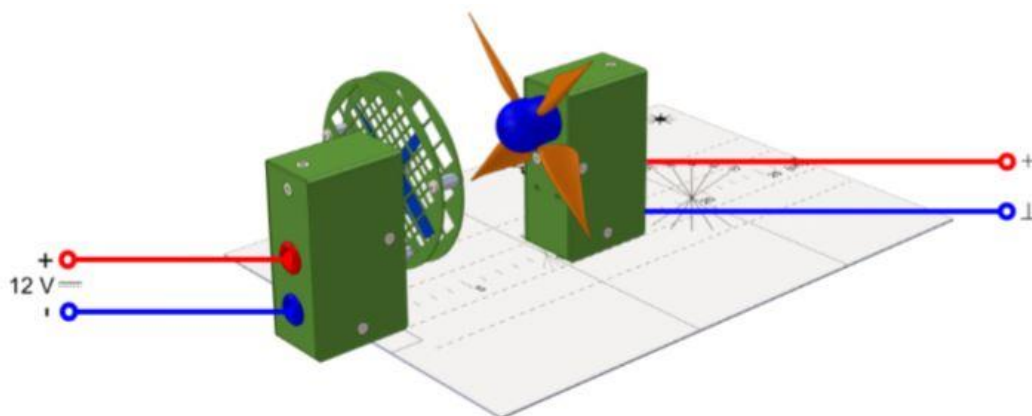


Abbildung 2.3.1 Aufbau des Windrades [1]

### 3 Kontrollfragen

Brennstoffzelle:

- Wie funktioniert eine Brennstoffzelle?
- Welche Faktoren haben Einfluss auf den Wirkungsgrad?
- Was sagt die Stromdichte aus?
- Warum kann bei einer schlechten Stromdichte ein guter Wirkungsgrad vorliegen?

Solarzelle:

- Wie funktioniert eine Solarzelle?
- Was bedeuten die Begriffe Valenz- und Leitungsband?
- Was ist eine n- und eine p-Dotierung?
- Erkläre den n-p Übergang.

Windkraft:

- Welche Strömungsformen gibt es?
- Was besagt die Bernoulli-Gleichung?
- Warum dreht sich das Windrad im Luftstrom?
- Wie hängt die Windkraft von der Windgeschwindigkeit ab?

### 4 Aufgaben

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die durchzuführenden Aufgaben und ihre ungefähre Dauer. **Bitte diskutieren Sie bei allen Teilaufgaben anfallende Unsicherheiten, gegebenenfalls nach der Größtunsicherheitsmethode.**

**Tabelle 1** Aufgabenüberblick mit Durchführungsdauer

Kapitel-nummer	Aufgabe	Dauer ca. / Minuten
4.1	Photovoltaik-Versuch	30
4.2	Vorbereitung der Zelle (falls nicht schon vorbereitet)	10
4.3	Bestimmung des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle	25
4.4	Kennlinie der Brennstoffzelle	25
4.5	Windkraft-Versuch	30
4.6	Speicherung der durch Windkraft gewonnenen Energie in Form eines elektrischen Potentials	20
4.7	Speicherung der durch Windkraft gewonnenen Energie in Form eines chemischen Potentials	30
	<b>GESAMT</b>	<b>170</b>

#### 4.1 Photovoltaik-Versuch

In diesem Versuchsteil werden die Leerlaufspannungen und Kurzschlussströme einer PV-Zelle unter unterschiedlichen Lichtbedingungen ermittelt.

**Durchführung:** Der Versuch soll wie in Abb. 2.2.1 mit einem Abstand von 30 cm zwischen Solarmodul und Lichtquelle aufgebaut werden. Schließen Sie das linke Solarmodul an das Messgerät an (max. Messbereich auswählen) und wählen Sie am Netzgerät eine Spannung von 12 V aus (Achtung die Lichtquelle wird heiß). Notieren Sie sich die gemessene Spannung. Wiederholen Sie die Messung für das rechte Solarmodul, für eine Parallelschaltung der Solarmodule und eine Reihenschaltung. Nun sollen dieselben vier Messungen für den Kurzschlussstrom durchgeführt werden. Dafür müssen die Buchsen entsprechend umgesteckt werden und am Messgerät der max. Messbereich für den Strom ausgewählt werden. Die vier Kurzschlussströme sind zu notieren. Weiters sollen die Leerlaufspannung und der Kurzschlussstrom für unterschiedliche Abstände zwischen Solarmodul und Lichtquelle für eine ausgewählte Schaltung ermittelt werden. Die Einstellungen am Messgerät bleiben gleich, zusätzlich wird ein Maßband am Tisch aufgelegt mit Hilfe dessen die Abstände  $d$  zwischen 10 cm und 100 cm in 10er Schritten verändert werden können und die Messwerte dokumentiert werden können.

Bei welchen Messungen addieren sich die Einzelspannungen und -ströme? Welche Leerlaufspannung haben die in dem Solarmodul verbauten Solarzellen und wie sind die Solarzellen daher im Inneren geschaltet? Für die Abstandsmessungen soll jeweils ein  $U, d$  und ein  $I, d$  Diagramm angefertigt werden. Welche Abhängigkeiten sind zu erkennen?

## 4.2 Vorbereitung der Zelle

In diesem Versuchsteil wird die PEM-Brennstoffzelle für die folgenden Versuche vorbereitet.

**Durchführung:** Reines Wasser in ein Becherglas füllen und eine Spritze davon aufziehen. Auf einer Seite der Brennstoffzelle die Stoppel an den Schlauchenden entfernen, die Spritze in das kurze Schlauchstück stecken und die Zelle mit frischem Wasser befüllen. Dasselbe Prozedere auf der anderen Seite der Brennstoffzelle wiederholen.

## 4.3 Bestimmung des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle

In diesem Versuchsteil soll der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bestimmt werden, um Aussagen über die Effizienz einer solchen treffen zu können.

**Durchführung:** Die Gastanks sollen unter Verwendung der Sicherung mit 10 ml Wasserstoff und Sauerstoff bei einer Spannung von  $U = 2,30$  V befüllt werden. Um die Brennstoffzelle als solche charakterisieren zu können, wird sie mit einem Potenziometer (auf Markierung g eingestellt), einem  $5,1 \Omega$  Widerstand und einem Voltmeter parallel (d.h. diese 4 sind parallelgeschaltet), sowie einem Amperemeter in Serie geschaltet. (**Ein skizzierter Schaltplan muss zur Vorbesprechung mitgebracht werden**). Für die Messungen soll sowohl für den Spannungs- als auch für den Strommessbereich, der maximal mögliche DC ausgewählt werden, und bei Bedarf verringert werden. Mit diesem Aufbau soll die Volumsänderung im Wasserstofftank pro Zeit gemessen werden (Minimalvolumen 6 ml). Sobald das Minimalvolumen erreicht ist, werden auch Strom und Spannung aufgezeichnet, um die Leistung sowie die von der Zelle geleistete elektrische Arbeit bestimmen zu können.



Auswertung: Strom, Spannung, Leistung, Energie (die die Zelle liefert) pro Volumeneinheit des Wasserstoffs, Wirkungsgrad durch Vergleich mit dem Brennwert von Wasserstoff (aus Reaktionsenthalpie und Molvolumen zu berechnen).

#### 4.4 Kennlinie der Brennstoffzelle

In diesem Versuchsteil werden die Kennlinie und die von der Brennstoffzelle gelieferte Leistung bestimmt.

**Durchführung:** Die Brennstoffzelle wird, wie in Versuchsteil 4.3 aufgebaut, wobei anfangs der  $5,1\ \Omega$  Widerstand aus dem Schaltkreis entfernt wird. Zu Beginn wird der maximale Gleichstrommessbereich gewählt und die ersten Messwerte abgelesen. Nun wird der Widerstand am Potentiometer schrittweise reduziert und die Messwerte für Strom und Spannung notiert (mind. 12 Werte). Ein  $5,1\Omega$  Widerstand wird zum Potentiometer parallelgeschaltet und die Messung für 6 Werte zwischen der a und b Markierung am Potentiometer wiederholt. Im Protokoll soll ein Graph gezeigt werden, der die gemessene Spannung in Abhängigkeit des gemessenen Stroms darstellt und die Steigung im linearen Teil dieses Graphen bestimmt werden. Ein weiterer Graph soll die Leistung  $P$  in Abhängigkeit des Stromes zeigen und quadratisch genähert werden.

#### 4.5 Windkraft-Versuch

In diesem Versuchsteil soll die Abhängigkeit der Leerlaufspannung von steigender Spannung (= stärkerer Wind) und steigendem Abstand erklärt werden.

**Durchführung:** Zuerst soll der Versuch mit Abb. 2.3.1 verglichen werden. Der Abstand zwischen Windmaschine und -rad beträgt 5 cm und die Windmaschine wird an das Netzteil mit Gleichspannung angeschlossen. Am Messgerät wird der maximale Messbereich eingestellt. Nun soll die Spannung  $U_M$  an der Windmaschine variiert werden und die Leerlaufspannung  $U$  am rotierenden Windrad abgegriffen werden (beides notieren, 10 Messwertpaare). Bei der nachfolgenden zweiten Messreihe wird eine fixe Windmaschinenspannung von  $U_M = 10\text{ V}$  gewählt und der Abstand zwischen Windmaschine und -rad variiert. Für jeden Abstandswert  $d$  soll die gemessene Leerlaufspannung am Windrad gemessen werden (10 Messwerte).

Beschreiben Sie wie sich die Leerlaufspannung am Windrad mit steigender Spannung und Abstand verändert und erklären Sie, warum das Maximum der Leerlaufspannung nicht beim geringsten Abstand liegt. Untermauern Sie Ihre Erklärung mit einer Rechnung und einem Graphen.

#### 4.6 Speicherung der durch Windkraft gewonnenen Energie in Form eines elektrischen Potentials

In diesem Versuchsteil wird die Speicherung der durch das Windrad gewonnenen Energie in einer Kapazität untersucht, um Schwankungen im Luftstrom (wie bei böigem Wind) auszugleichen.

**Durchführung:** Für diesen Versuchsteil wird das Windrad wie in Versuchsteil 4.5 aufgebaut (der Abstand kann beliebig gewählt werden, Spannung an der Windmaschine groß genug wählen). Mit diesem Aufbau sollen folgende Schritte durchgeführt werden:

1. Der Luftstrom wird abrupt unterbrochen
2. Das Verhalten der vom Windrad generierten Spannung wird beobachtet (Abfall mittels Videoaufnahme aufzeichnen und plotten).
3. Der Luftstrom wird abrupt freigegeben und 2. wiederholt.
4. Eine Kapazität wird zwischen Windrad und Multimeter geschaltet und 1-3 erneut durchgeführt.
5. Schritt 4 soll mit 3 verschiedenen Kapazitäten wiederholt werden. Der Wert der unbekannten Kapazitäten soll bestimmt werden.

Erstellen Sie einen Graphen (mit Fehlerbalken, der den zeitlichen Verlauf der Spannung für die Kapazitäten zeigt. Diese sollen exponentiell gefittet werden und die Zeitkonstanten bestimmt werden (welche Bedingungen müssen erfüllt werden, um mit Hilfe eines exponentiellen Fittes Informationen über die verwendete Kapazität zu erhalten?).

#### **4.7 Speicherung der durch Windkraft gewonnenen Energie in Form eines chemischen Potentials**

In diesem Versuchsteil wird die Umwandlung und Speicherung der durch das Windrad gewonnenen Energie als chemisches Potential untersucht.

**Durchführung:** Windmaschine und Windrad werden wie in 4.5 aufgebaut. Die vom Windrad generierte Spannung wird als Spannungsquelle genutzt um die Brennstoffzelle als Elektrolyseur zu betreiben. Die Abstände und Spannungen an der Windmaschine sollen mithilfe der Erkenntnisse aus den vorherigen Versuchsteilen sinnvoll gewählt und notiert werden (im Protokoll angegeben). Die Wasserstoffmenge in Abhängigkeit von der Zeit soll aufgezeichnet werden.

Stellen Sie den zeitlichen Verlauf graphisch dar und geben sie an, wie viel Energie (=Wasserstoff) im Mittel pro Minute in der Brennstoffzelle gespeichert werden kann. Die unterschiedlichen Speicherungsformen (4.6. und 4.7.) sind zu vergleichen.

#### **Literatur**

- [1] Leybold Didactic ScienceLab Erneuerbare Energien
- [2] Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme. Wolfgang Demtröder
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/B%C3%A4ndermodell>, 13.09.2023
- [4] <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/voraussetzung/photovoltaik-effekt>, 13.09.2023
- [5] [http://energie-strom.com/erneuerbare\\_energien/brennstoffzelle.html](http://energie-strom.com/erneuerbare_energien/brennstoffzelle.html), 13.09.2023
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine), 13.09.2023
- [7] Experimentalphysik 3 – Atome, Moleküle und Festkörper. Wolfgang Demtröder