

UNIVERSITÄT REGENSBURG

FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM

## Versuch: Solar- und Brennstoffzelle

*Jona Nägerl, Fabian Tanzer*



21. April 2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Fragen zum Versuch</b>	<b>2</b>
1.1 Gefahren beim Umgang mit reinem Sauerstoff und Wasserstoff . . . . .	2
1.2 Funktionsweise Membran für Brennstoffzelle . . . . .	2
1.3 Maximal mögliche Spannung . . . . .	2
1.4 Funktionsweise der Solarzelle . . . . .	2
1.5 Dotierung . . . . .	3
1.6 Füllfaktor . . . . .	3
1.7 Aufheizung Solarzelle $P(T)$ . . . . .	4
1.8 Schwarzer Strahler . . . . .	4
1.9 Wien'sches Verschiebungsgesetz . . . . .	5
1.10 Typische Halbleitermaterialien . . . . .	5
1.11 Gap-Energie bestimmen . . . . .	5
1.12 Diffusionslänge . . . . .	6
1.13 Gleichrichterwirkung . . . . .	6
1.14 Strom-Spannungskennlinien für verschiedene Temperaturen I-U (T) . . . . .	8
1.15 Abhängigkeit des Photostroms von der Temperatur $I(T)$ . . . . .	8
1.16 Abhängigkeit der Leistung von der Wellenlänge $P(\lambda)$ . . . . .	8
1.17 Effizienz von Photozellen . . . . .	8
1.18 Emissionsspektrum eines schwarzen Strahlers . . . . .	9
1.19 Abhängigkeit des Photostroms von der Temperatur $I(T)$ . . . . .	9
<b>2 Durchführung</b>	<b>10</b>
2.1 Solarzelle . . . . .	10
2.1.1 Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom . . . . .	10
2.1.2 I/U- und P/I-Kennlinie der verdunkelten Solarzelle . . . . .	10
2.1.3 I/U- und P/I-Kennlinie der beleuchteten Solarzelle . . . . .	11
2.1.4 Abhängigkeit der Leistung von der beleuchteten Fläche . . . . .	12
2.1.5 Füllfaktor der Solarzelle . . . . .	13
2.1.6 Parallel- und Reihenwiderstand . . . . .	13
2.2 Elektrolyseur . . . . .	13
2.2.1 I/U-Kennlinie des Elektrolyseur . . . . .	13
2.2.2 Wirkungsgrad des Elektrolyseur . . . . .	14
2.2.3 Faraday'scher Wirkungsgrad . . . . .	15
2.3 Brennstoffzelle . . . . .	15
2.3.1 I/U-Kennlinie . . . . .	15
2.3.2 P/I-Kennlinie . . . . .	16
2.3.3 Faraday'sches Gesetz und Wirkungsgrad . . . . .	16
2.3.4 Elektrischen Wirkungsgrad . . . . .	17
<b>3 Fazit</b>	<b>17</b>

# 1 Fragen zum Versuch

## 1.1 Gefahren beim Umgang mit reinem Sauerstoff und Wasserstoff

Wasserstoff brennt mit reinem Sauerstoff oder Luft mit heißer Flamme. Ab einer Konzentration von 18 % in Luft ist das Gemisch sogar explosiv [5]. Wird Wasserstoff durch eine Zündquelle auf eine Temperatur von 560 °C erhitzt, so kommt es zu einer Knallgasreaktion. Aufgrund dessen wird Wasserstoff und Sauerstoff häufig als Raketentreibstoff benutzt. Wasserstoff ist jedoch ungiftig und schädigt somit nicht die Umwelt. Deswegen wird in der Politik oft über Hybridelektrofahrzeuge, kurz Hybridauto, diskutiert.

## 1.2 Funktionsweise Membran für Brennstoffzelle

Eine **PEM** (= Proton Exchange Membrane) ist eine semipermeable<sup>1</sup> Membran, die Protonen durchlässt, jedoch keine Gase wie Sauerstoff oder Wasserstoff. Meistens werden PEM aus Ionomer<sup>2</sup> hergestellt [2].

## 1.3 Maximal mögliche Spannung

Die maximal mögliche Spannung einer Solarzelle ist durch das verwendete Halbleitermaterial gegeben. So hat zum Beispiel Germanium eine Gapenergie von 0,7 eV und Silizium 1,1 eV. Die maximal mögliche Spannung einer Brennstoffzelle ist durch das chemische Potential zwischen Wasser- und Sauerstoff gegeben. Diese Spannung kann durch Wechselrichter oder Transformatoren den technischen Erfordernissen (z. B. 230 V / 50 Hz) angepasst werden.

## 1.4 Funktionsweise der Solarzelle

Eine photovoltaische Zelle, umgangssprachlich auch Solarzelle genannt, ist ein elektrisches Bauteil, das Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandelt. Trifft auf den p-Typ ein Photon (z. B. vom Sonnenlicht), dessen Energie größer ist als die Bandlücke bzw. Gap-Energie, so wird ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt. Im Valenzband bleibt ein Loch zurück. Manche Elektronen, die durch die Photonen angeregt wurden, rekombinieren mit den Löchern, andere wiederum gehen durch das Übergangsgebiet. Da die Ladungsdoppelschicht ein Feld hervorruft, werden die Elektronen zur n-Seite hin beschleunigt. Auf der n-Seite entsteht also ein Überschuss an negativer Ladung und auf der p-Seite ein Überschuss an positiver Ladung. Es entsteht also eine Potentialdifferenz bzw. Spannung. Da n- und p- Seite durch den Widerstand  $R_V$  verbunden sind, fließt Strom<sup>3</sup>.

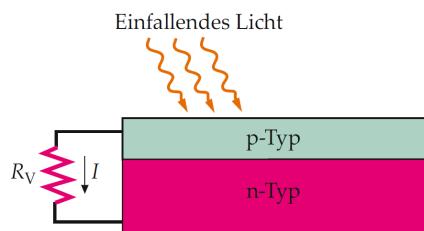


Abb. 1: pn-Halbleiterübergang als Solarzelle. Wenn Licht auf den p-Bereich des Übergangs fällt, werden Elektron-Loch-Paare erzeugt, die zu einem Strom durch den Lastwiderstand  $R_V$  führen. [8]

<sup>1</sup>halbdurchlässige

<sup>2</sup>thermoplastische Kunststoffe

<sup>3</sup> $I \sim$  Zahl der pro Zeiteinheit einfallenden Photonen

## 1.5 Dotierung

Der Einbau von Fremdatome in einen Halbleiter zur Erhöhung der Leitfähigkeit wird **Dotierung** genannt. Hat das Fremdatom mehr Valenzelektronen als das Atom, das substituiert wird, so spricht man von **Donatoren** bzw. **n-Dotierung**. Hat das Fremdatom weniger Valenzelektronen als das Atom, das substituiert wird, so spricht man von **Akzeptoren** bzw. **p-Dotierung**.

Wird nun ein n- und p-dotierter Halbleiter in Kontakt gebracht, so entsteht ein **p-n-Übergang**. Durch den Konzentrationsgradienten im Übergangsbereich kommt es zu einer Diffusion der Elektronen in die p-Zone und der Löcher in die n-Zone. Dies wird als **Diffusionsstrom** bezeichnet. Im Übergangsbereich im p-Halbleiter bildet sich also ein Überschuss an negativer Raumladung, im n-Halbleiter ein Überschuss an positiver Raumladung. In dieser sogenannten **Raumladungszone** bildet sich also ein elektrisches Feld. Dieses wirkt einer weiteren Diffusion von Ladungsträgern entgegen. Nach außen hin ist die Raumladungszone jedoch feldfrei bzw. ladungsneutral.

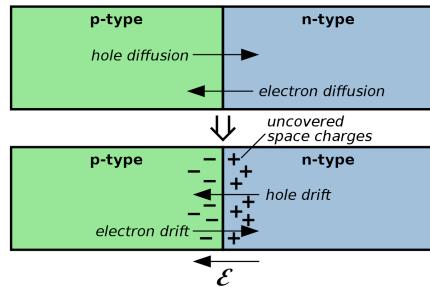


Abb. 2: Oben: Vor dem Diffusionsprozess, Unten: Nach dem Diffusionsprozess, im Gleichgewicht und aufgebauten elektrischen Feld im Bereich der Raumladungszone [3]

## 1.6 Füllfaktor

Der **Füllfaktor**  $f$  beschreibt das Verhältnis zwischen maximalen Leistungsabgabe MPP (= maximum power point)  $U_{\max}I_{\max}$  und der theoretisch erzielbaren Leistung  $U_L I_K$ :

$$f = \frac{U_{\max}I_{\max}}{U_L I_K} \quad (1)$$

wobei folgende Größen verwendet wurden:

$U_L$ : Leerlaufspannung

$I_K$ : Kurzschlussstrom

$U_{\max}$ : Spannung, bei der die Solarzelle die maximale Leistung abgibt (oft auch als  $U_{\text{opt}}$  bezeichnet)

$I_{\max}$ : Stromstärke, bei der die Solarzelle die maximale Leistung abgibt (oft auch als  $I_{\text{opt}}$  bezeichnet)

Der Füllfaktor beschreibt also anschaulich das Verhältnis zweier Rechteckflächen.

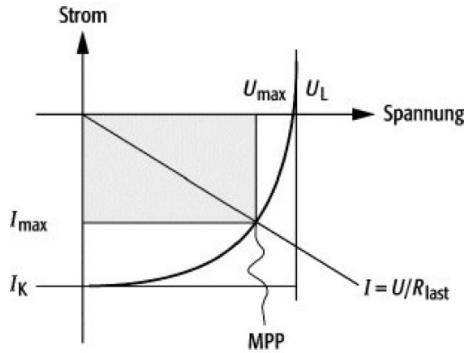


Abb. 3: Füllfaktor einer Solarzelle [1]

Da die Leistung  $P = UI$  im vierten Quadranten negativ ist, wirkt die Photodiode dort als Generator.

Je rechteckiger die Form der Kennlinie, desto mehr nähert sich die Leistung  $U_{\max}I_{\max}$  dem Wert  $U_L I_K$  an. Bei einer idealen Solarzelle ist der Füllfaktor 1, bei einer realen zwischen 0,5 und 0,85. Für den Wirkungsgrad gilt

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_L} = \frac{U_L I_K f}{P_L} \quad (2)$$

wobei  $P_L$  die einfallende Lichtleistung ist.

Je niedriger also der Füllfaktor ist, desto niedriger ist auch der Wirkungsgrad und umgekehrt.

## 1.7 Aufheizung Solarzelle $\mathbf{P(T)}$

Steigt die Temperatur, so nimmt auch die Anzahl der freien Ladungsträger im Halbleiter zu. Es steigt der Driftstrom und in der Sperrsicht entsteht ein Diffusionsstrom, der Sperrstrom. Dieser reduziert die Leerlaufspannung und damit die Leistung der Solarzelle.

## 1.8 Schwarzer Strahler

Ein Schwarzer Körper bzw. Schwarzer Strahler ist ein Körper, der die gesamte auftreffende elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert.

Die spektrale Strahldichte  $L_{S,\lambda}$  eines schwarzen Körpers wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben:

$$L_{S,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (3)$$

mit den Strahlungskonstanten:

$$c_1 = 2\pi h c_0^2 = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2 \quad (4)$$

$$c_2 = \frac{hc_0}{k_B} = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m K} \quad (5)$$

wobei folgende Größen verwendet wurden:

$\lambda$ : Wellenlänge

$T$ : Temperatur

$h$ : Planck'sche Wirkungsquantum

$k_B$ : Stefan-Boltzmann Konstante

$c_0$ : Lichtgeschwindigkeit in Vakuum

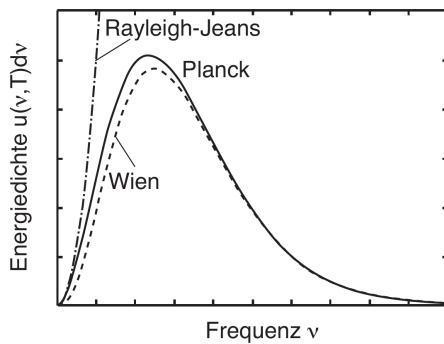


Abb. 4: Vergleich der Strahlungsgesetze: Während das Wien'sche Strahlungsgesetz bei hohen Frequenzen den realen Verlauf des Hohlraumstrahlers (Planck'sches Strahlungsgesetz) korrekt wieder gibt, stellt das klassische Rayleigh-Jeans-Gesetz den Verlauf bei niedrigen Frequenzen korrekt dar. [9]

Also hängt das Spektrum von der Temperatur ab.

### 1.9 Wien'sches Verschiebungsgesetz

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Temperatur eines schwarzen Körpers und der Wellenlänge des Maximums:

$$\lambda_{\max} T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m K} \quad (6)$$

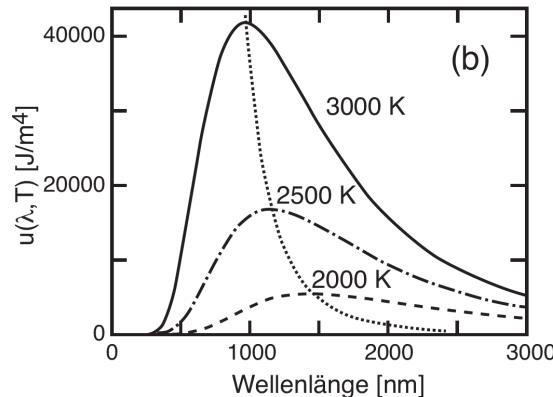


Abb. 5: In diesem Diagramm erkennt man, dass mit steigender Temperatur die Wellenlänge der maximalen Energiedichte kleiner wird, was genau das Wien'sche Verschiebungsgesetz aussagt [9]

### 1.10 Typische Halbleitermaterialien

Typische Halbleitermaterialien bestehen aus Elementen wie Silizium (Si), Germanium (Ge), Selen (Se), Bor (B), Tellur (Te) oder Kohlenstoff (C). Es gibt auch **Verbindungshalbleiter**, wie zum Beispiel Galliumarsenid (GaAs), Galliumphosphid (GaP) oder Zinksulfid (ZnS).

### 1.11 Gap-Energie bestimmen

Um die Größe einer Bandlücke (Gap-Energie) zu bestimmen, bestrahlt man einen Halbleiter mit Photonen unterschiedlicher Frequenz und misst währenddessen den Widerstand. Ab einer mate-

ialspezifischen Grenzfrequenz sinkt der Widerstand sprungartig. Photonen mit dieser Frequenz haben mindestens die Gap-Energie.

$$E_{\text{Ph}} = h\nu > E_g \quad (7)$$

## 1.12 Diffusionslänge

Die mittlere Diffusionsstrecke wird als **Diffusionslänge**  $l_{\text{Diff}}$  bezeichnet. Sie gibt die durchschnittliche Strecke an, die ein Elektron-Loch-Paar zurücklegt, bevor es rekombiniert:

$$l_{\text{Diff}}^2 = D\tau \quad (8)$$

wobei folgende Größen verwendet wurden:

D: Diffusionskoeffizient

$\tau$ : Lebensdauer

## 1.13 Gleichrichterwirkung

Führt man den n-Halbleiter mit den p-Halbleiter zusammen, so entsteht eine Raumladungszone, in der am Anfang keine beweglichen Ladungsträger sind, weil sich die beweglichen Elektronen der n-Schicht mit den beweglichen Löchern der p-Schicht ausgleichen (**Diffusion**). In der n-Schicht bleibt ein Bereich mit unbeweglichen positiven Ladungen zurück und in der p-Schicht ein Bereich mit unbeweglichen negativen Ladungen. Somit können sich die beweglichen Ladungsträger nicht vollständig ausgleichen.

Schließt man den positiven Pol einer Spannungsquelle an das p-Gebiet und den negativen Pol an das n-Gebiet (**Durchlassrichtung**), so wird ein Feld aufgebaut und die beweglichen Ladungsträger werden in die Raumladungszone gedrückt. Schließlich wird die Raumladungszone so schmal, dass die Halbleiterdiode (oberhalb einer Grenzspannung) leitend wird.

Dreht man die Polung (**Sperrrichtung**), so vergrößert sich die Raumladungszone und die Diode sperrt.

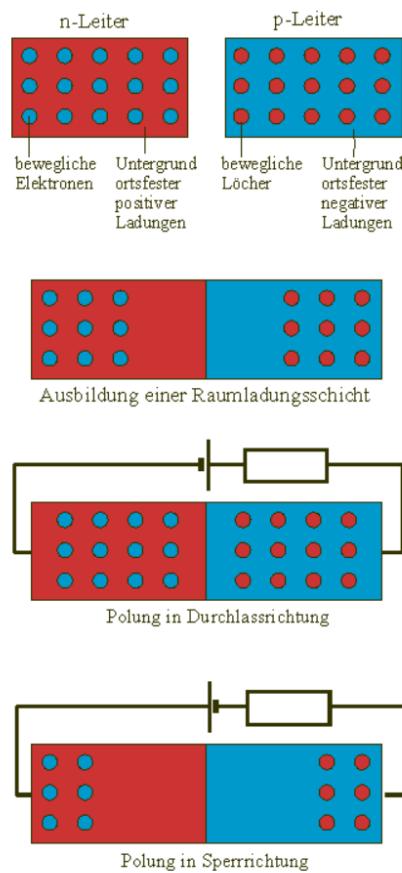


Abb. 6: Skizze zur Gleichrichterwirkung [6]

Da die Diode also nur in eine Richtung leitet, kann von der sogenannten Gleichrichterwirkung der Halbleiterdiode gesprochen werden.

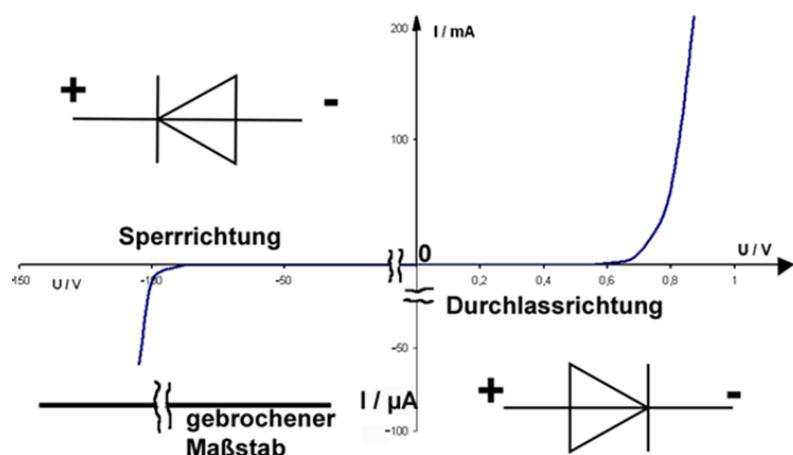


Abb. 7: Diagramm der Diode [7]

## 1.14 Strom-Spannungskennlinien für verschiedene Temperaturen I-U (T)

Die Abhängigkeit der Strom-Spannungskennlinie einer Halbleiterdiode von der Temperatur wird durch die **Shockley-Gleichung** beschrieben:

$$I_D = I_S(T) \left[ \exp \left( \frac{U_F}{nU_T} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

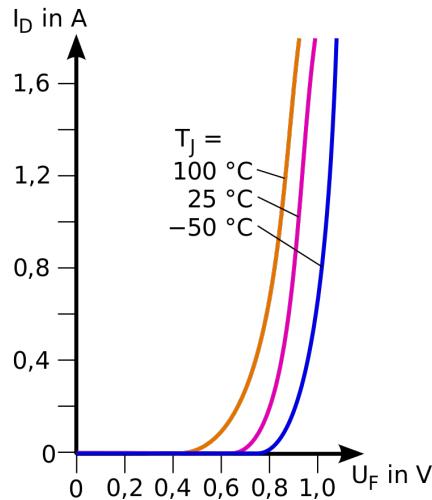


Abb. 8: Temperaturabhängigkeit der Kennlinien [4]

## 1.15 Abhängigkeit des Photostroms von der Temperatur I(T)

Steigt die Temperatur, so sinkt die Bandlücke des Materials und damit entstehen mehr Elektron-Loch-Paare. Nach (14) steigt der Photostrom ein wenig.

## 1.16 Abhängigkeit der Leistung von der Wellenlänge P(λ)

Die Leistung einer Solarzelle hängt von der Wellenlänge des einfallenden Lichts ab, da:

- Elektronen-Loch-Paare nur entstehen, falls die Energie der Photonen, die ja von deren Wellenlänge abhängt, größer als die Gap-Energie ist.
- bei einer zu großen Energie der Photonen die überschüssige Energie zur Erwärmung der Solarzelle führt. Steigt die Temperatur, so nimmt auch die Anzahl der freien Ladungsträger im Halbleiter zu. Durch diese Ladungsträger entsteht in der Sperrsicht ein Diffusionsstrom. Dieser reduziert die Leistung der Solarzelle. (s. auch 1.7)

## 1.17 Effizienz von Photozellen

Die Effizienz einer Photozellen wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Wellenlänge des eingestrahlten Lichts
- Temperatur des Halbleiters (hängt wiederum von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts ab)
- Dicke der Schichten der Photozelle

- Material der Schichten der Photozelle
- (Der Wechselrichter, der anschließend den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt)

Die Effizienz bzw. der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{elektrisch}}}{P_{\text{Licht}}} \quad (10)$$

von Photozellen liegt bei etwa 10 %. Sie kann theoretisch etwa 28 % betragen.

### 1.18 Emissionsspektrum eines schwarzen Strahlers

Bei dieser Aufgabe soll das Emissionsspektrum eines schwarzen Strahlers der Temperatur 2500 K berechnet werden:

$$\begin{aligned} L(\lambda, T = 2500 \text{ K}) &\stackrel{1.8}{=} \frac{3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2}{\left(\frac{hc}{E}\right)^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK}}{\frac{hc}{E}T}\right) - 1} \\ &= \frac{3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2}{(6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^5} \frac{E^5}{\exp\left(\frac{1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2500 \text{ K}} \cdot E\right) - 1} \\ &= 1,2056 \cdot 10^{108} \frac{W}{J^5 m^3} \frac{E^5}{\exp(2,8953 \cdot 10^{-19} \frac{1}{J} \cdot E) - 1} \\ &= 1,2056 \cdot 10^{108} \frac{W}{(6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV})^5 m^3} \frac{E^5}{\exp(2,8953 \cdot 10^{-19} \frac{1}{6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV}} \cdot E) - 1} \\ &= 1,2743 \cdot 10^{14} \frac{W}{(\text{eV})^5 m^3} \frac{E^5}{\exp(4,6399 \frac{1}{\text{eV}} \cdot E) - 1} \\ &= 7,9516 \cdot 10^{32} \frac{\text{eV}}{(\text{eV})^5 m^3 s} \frac{E^5}{\exp(4,6399 \frac{1}{\text{eV}} \cdot E) - 1} \end{aligned}$$

### 1.19 Abhängigkeit des Photostroms von der Temperatur I(T)

Jedes Photon oberhalb der Gap-Energie erzeugt ein Elektron-Loch-Paar.

Mit dem Wien'schen Strahlungsgesetz lässt sich berechnen, wie der Photostrom einer beleuchteten Solarzelle von der Temperatur des schwarzen Strahlers abhängt:

$$L_{S,\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right)} \quad (11)$$

$$\stackrel{\lambda = \frac{c}{f}}{=} \frac{2\pi hf^5}{c^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right)} \quad (12)$$

$$\stackrel{E = hf}{=} \frac{2\pi hf^5}{c^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{E_g}{k_B T}\right)} \quad (13)$$

Der Photostrom ist direkt proportional zur Anzahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare:

$$I \sim \frac{2\pi hf^5}{c^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{E_g}{k_B T}\right)} \sim \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (14)$$

## 2 Durchführung

### 2.1 Solarzelle

Zunächst soll die Solarzelle näher untersucht werden.

#### 2.1.1 Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom

Wir messen die Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom der Solarzelle bei verschiedenen Beleuchtungen. Die Ergebnisse sind in Tabelle (s 9) aufgeführt. Man erkennt gut, dass je mehr Licht auf die Solarzelle fällt, desto höher die Leistung.

Ort	Leerlaufspannung [V]	Kurzschlussstrom [mA]
Auf dem Tisch	0,715	0,93
Unter dem Tisch	0,105	0,07
Direkt unter Lampe	1,795	7,1
Am Fenster	2,053	9,31
In sehr dunklem Raum	0	0

Abb. 9: Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom bei verschiedener Beleuchtung

#### 2.1.2 I/U- und P/I-Kennlinie der verdunkelten Solarzelle

Nun wird die Solarzelle abgedunkelt und die Kennlinie der Zelle aufgenommen (s. 10). Eine Solarzelle ist eine Halbleiterdiode, deshalb weiß sie eine ähnliche Kennlinie auf.

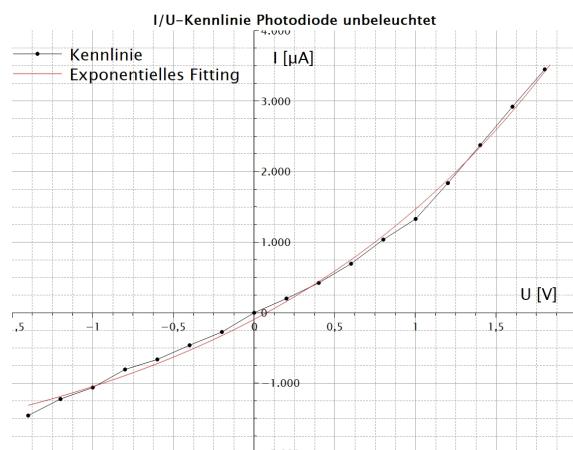


Abb. 10: I/U-Kennlinie der abgedunkelten Photodiode

Ohne Lichteinfluss ist sie ein Ohm'scher Widerstand. Aus diesem Grund ist die Leistung in der P/I-Kennlinie (s. 11) positiv.

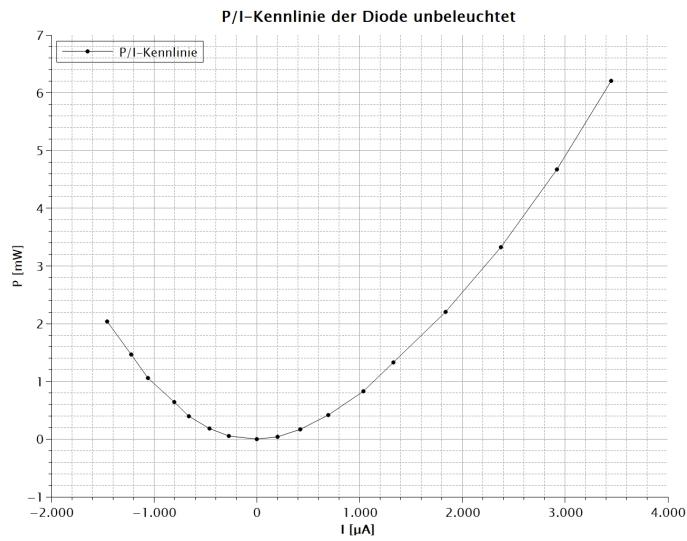


Abb. 11: P/I-Kennlinie der unbeleuchteten Photodiode

### 2.1.3 I/U- und P/I- Kennlinie der beleuchteten Solarzelle

Nun wird die Photodiode Leuchtstoffröhren beleuchtet und die I/U- und P/I-Kennlinie durch Schaltungen verschiedener Lastwiderstände aufgenommen. Auch in diesem Fall lässt sich eine exponentielle Abhängigkeit zwischen U und I erkennen. Diesmal jedoch ist der Aufnahmehbereich deutlich kleiner und die Kurve ist wie erwartet nach unten verschoben. (s. 12)

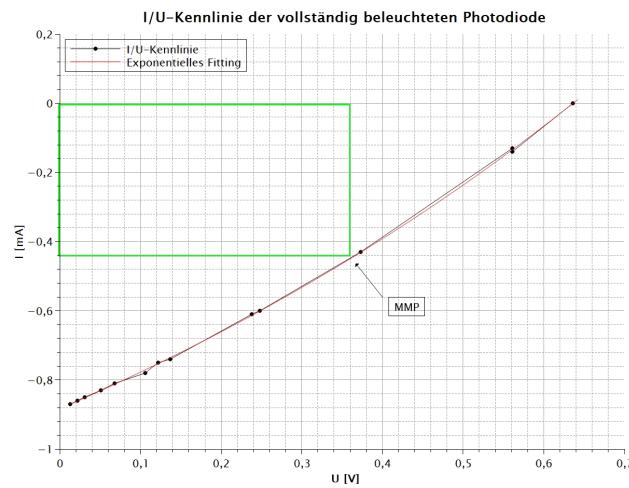


Abb. 12: I/U-Kennlinie der vollständig beleuchteten Photodiode

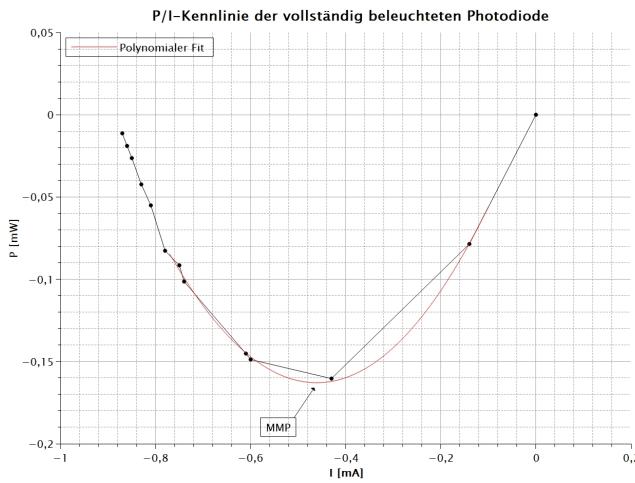


Abb. 13: P/I-Kennlinie der vollständig beleuchteten Photodiode

Aus Abb. 13 erkennt man, dass die maximale Leistung bei  $I_{\text{MMP}} = 0,43 \text{ mA}$  und  $U_{\text{MMP}} = 0,373 \text{ V}$  anliegt. Daraus folgt:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,373 \text{ V}}{0,43 \text{ mA}} \approx 867 \Omega$$

Dieser Wert liegt zwar höher als bei vergleichbaren Protokollen, lässt sich aber wahrscheinlich auf Messungenauigkeiten zurückführen, da die gemessenen Werte sehr klein sind.

#### 2.1.4 Abhängigkeit der Leisung von der beleuchteten Fläche

Nun wird bei konstantem Widerstand die Solarzelle nach und nach immer mehr verdeckt, um den Zusammenhang zwischen bestrahlter Fläche und Leistung zu detektieren. Dabei ergibt sich ein linearer Zusammenhang (s. 14).

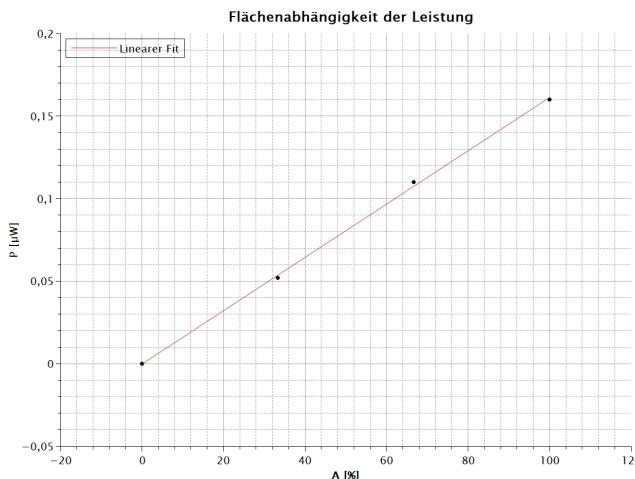


Abb. 14: Leistung der Photodiode in Abhängigkeit von der bestrahlten Fläche

### 2.1.5 Füllfaktor der Solarzelle

Der Füllfaktor (FF) einer Solarzelle lässt sich wie folgt berechnen:

$$(FF) = \frac{U_{MMP} \cdot I_{MMP}}{U_L \cdot I_K} \approx 24,1\%$$

Dieser Wert ist deutlich niedriger als erwartet, da dieser normalerweise über 50 % liegt. Diese Abweichung lässt sich wahrscheinlich durch Fehler bei der Bestimmung des MMP erklären. Außerdem haben wir Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom einige Zeit, bevor wir die Werte der beleuchteten Photodiode aufgenommen haben, aufgenommen. Es ist durchaus möglich, dass sich das Licht im Raum derweil geändert hat.

### 2.1.6 Parallel- und Reihenwiderstand

Für die Bestimmung des Parallel- und Reihenwiderstandes werden die zwei Tangenten aus der I/U-Kennlinie der beleuchteten Diode verwendet. Für den Parallelwiderstand nutzt man eine Tangente nahe des y-Achsenabschnitts; für den Reihenwiderstand nahe des x-Achsenabschnitts (s. 15). Die Widerstände lassen sich durch den Kehrbruch der Steigung dieser beiden Tangenten errechnen. Es ergibt sich also:

$$R_P = \frac{1 \text{ V}}{1,077844 \text{ mA}} \approx 928 \Omega$$

$$R_R = \frac{1 \text{ V}}{1,892193 \text{ mA}} \approx 528 \Omega$$

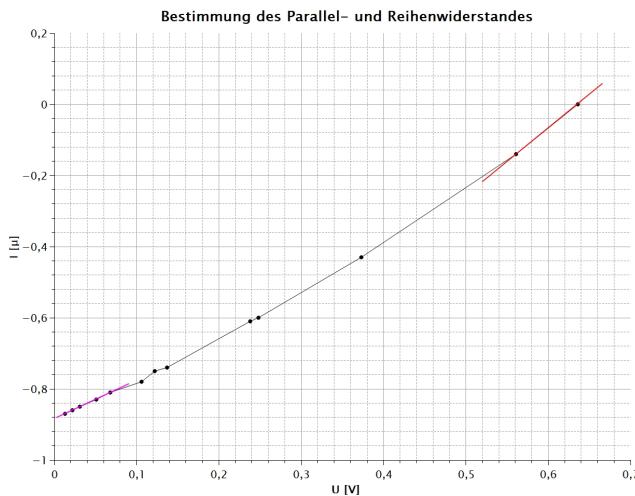


Abb. 15: Berechnung des Parallel- und Reihenwiderstands aus der I/U-Kennlinie der Diode

## 2.2 Elektrolyseur

Im Folgendem soll ein Elektrolyseur untersucht werden.

### 2.2.1 I/U-Kennlinie des Elektrolyseur

Als erstes wird die I/U-Kennlinie des Elektrolyseur aufgenommen (s. 16). Man sieht, dass erst ab einer gewissen Spannung überhaupt Strom fließt und der Elektrolyseur zu arbeiten beginnt. Sobald

die Spannung höher wird passt sich die Kennlinie einem linearen Verlauf an. Die Abweichungen nahe der Grenzspannung lassen sich vielleicht durch Inhomogenitäten in dem Elektrolyseur erklären.

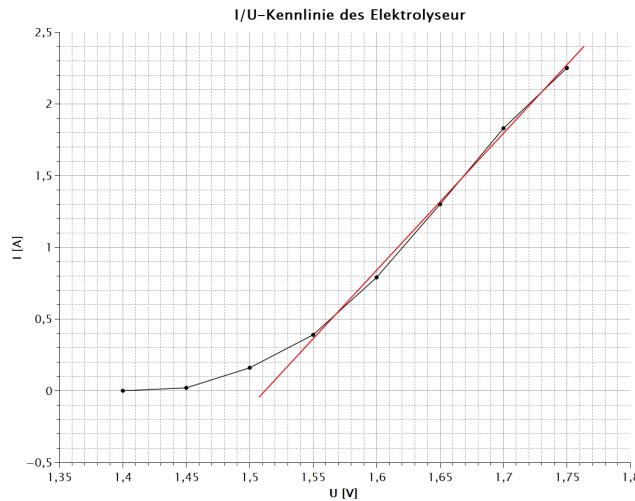


Abb. 16: I/U-Kennlinie des Elektrolyseurs

### 2.2.2 Wirkungsgrad des Elektrolyseur

Nun wird bei konstanter Spannung die produzierte Gasmenge pro Zeit aufgenommen (s. 17). Dabei wurde die erzeugte Gasmenge an Volumenbeschriftungen an den Waschflaschen abgelesen, wobei zu sagen ist, dass diese Messmethode vermutlich nicht sehr genau ist, da aufgrund des hohen Druchmessers sehr ungenau abgelesen werden kann.

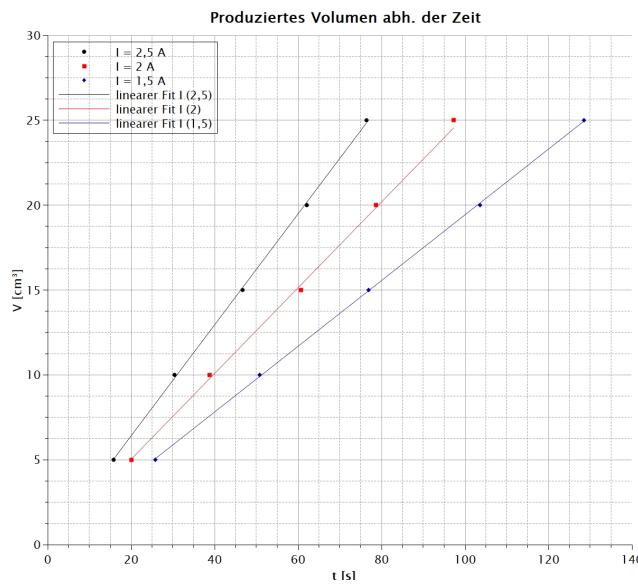


Abb. 17: Produzierte Wasserstoffmenge bei unterschiedlicher Leistung pro Zeit

Man erkennt den linearen Zusammenhang zwischen produzierter Gasmenge und Zeit, wie man ihn nach dem Faraday'schen Gesetz erwartet. Auch erkennt man, dass mit höherer Leistung mehr Gas produziert wird. Aus den gemessenen Werten lässt sich der Wirkungsgrad errechnen. Es wird die Zeit betrachtet, bis  $25 \text{ cm}^3$  Wasserstoff erzeugt worden ist. Die chemische Energie von Wasser beträgt  $285,8 \frac{\text{kJ}}{\text{Mol}}$  und das molare Volumen bei Raumtemperatur  $24,465 \frac{\text{l}}{\text{Mol}}$ . Daraus folgt:

$$1 \text{ Mol} = 24465 \text{ cm}^3$$

$$1,022 \cdot 10^{-3} \text{ Mol} = 25 \text{ cm}^3$$

$$E_{H_2} = 285,8 \frac{\text{kJ}}{\text{Mol}} \cdot 1,022 \cdot 10^{-3} \text{ Mol} = 292 \text{ J}$$

Den Wirkungsgrad (s. 18) erhält man indem man die Energie des Wasserstoffs ( $E_{H_2}$ ) durch die Energie des aufgewandten Stroms ( $W_I$ ) teilt.

Strom [A]	Zeit [s]	Elektrische Energie [J]	Wirkungsgrad
2,5	76,4	336,16	87%
2	97,3	332,766	88%
1,5	128,5	319,965	91%

Abb. 18: Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

### 2.2.3 Faraday'scher Wirkungsgrad

Für den Faraday'schen Wirkungsgrad nutzen wir die Formeln aus der Versuchsvorbereitung und betrachten das Volumen von  $5 \text{ cm}^3$ .

$$k_{\text{theo}} = \frac{V \cdot I}{Z \cdot f}$$

$$\eta = \frac{k_{\text{exp}}}{k_{\text{theo}}}$$

wobei  $Z = 2$  die Kernladungszahl und  $f = N_A \cdot e = 96485 \frac{\text{J}}{\text{Mol}}$ . Daraus ergibt sich:

Strom [A]	k(theo) [ $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ ]	k(exp) [ $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ ]	Wirkungsgrad
2,5	0,318	0,316	0,993710692
2	0,254	0,249	0,980314961
1,5	0,19	0,199	1,047368421

Abb. 19: Faraday'scher Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Man sieht, dass der Faraday'sche Wirkungsgrad wie erwartet nahe bei 100% liegt. Natürlich kann er nicht über 100% liegen. Dieses Ergebnis für  $I = 1,5 \text{ A}$  lässt sich nur dadurch erklären, dass die Messung zu ungenau ist.

## 2.3 Brennstoffzelle

Im letzten Versuchsteil soll die Brennstoffzelle untersucht werden.

### 2.3.1 I/U-Kennlinie

Zunächst wird wieder die I/U-Kennlinie der Brennstoffzelle aufgenommen (s. 20), man erkennt gut den exponentiellen Abfall.

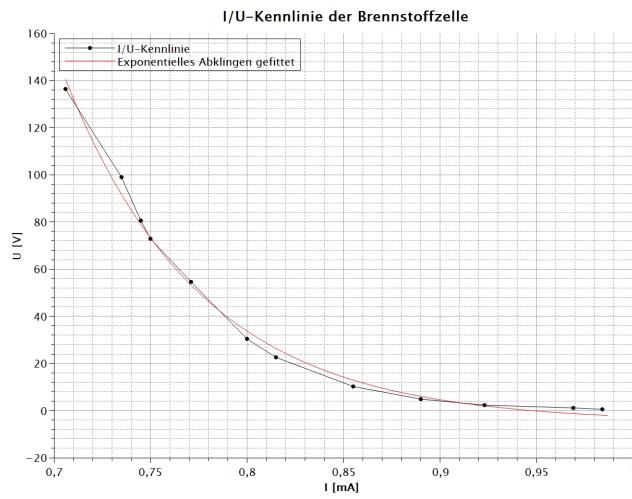


Abb. 20: I/U-Kennlinie der Brennstoffzelle

### 2.3.2 P/I-Kennlinie

Die P/I-Kennlinie hingegen steigt linear (s. 21). Daraus folgt, dass je kleiner der Lastwiderstand ist, desto mehr Leistung ergibt sich. Es existiert also kein MMP.

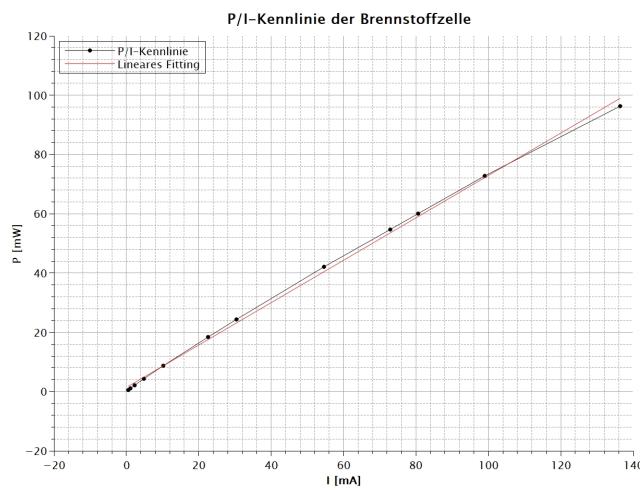


Abb. 21: P/I-Kennlinie der Brennstoffzelle

### 2.3.3 Faraday'sches Gesetz und Wirkungsgrad

Für die Verifizierung des Faraday'schen Gesetzes und die Bestimmung des Faraday'schen Wirkungsgrades wird der kleinste verfügbare Widerstand verwendet (s. 22). Die Leistung der Brennstoffzelle beträgt dann 52,5 mW.

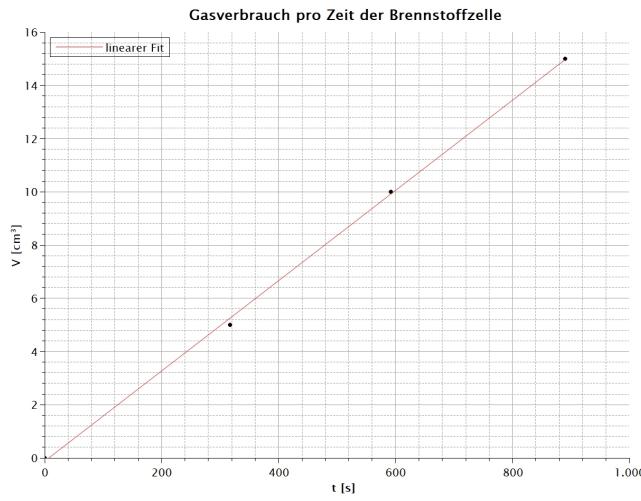


Abb. 22: Gasverbrauch der Brennstoffzelle

Wir erhalten den Faraday'schen Widerstand aus der Steigung der Geraden  $k_{\text{exp}}$  und dem theoretischen errechnetem Koeffizienten  $k_{\text{theo}}$ :

$$k_{\text{theo}} = \frac{V \cdot I}{Z \cdot f}$$

$$\eta_f = \frac{k_{\text{theo}}}{k_{\text{exp}}} = \frac{0,01577}{0,01818} \approx 86 \%$$

### 2.3.4 Elektrischen Wirkungsgrad

Der elektrische Widerstand lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\eta_{\text{el}} = \frac{W_{\text{el}}}{E_{\text{H}_2}} \approx 56 \%$$

## 3 Fazit

Der Versuch stellt sehr nachvollziehbar dar, wie Solarzellen, Elektrolyse und Brennstoffzelle funktionieren und ist somit sehr hilfreich diese Konzepte zu verstehen. Besonders da diese im politischem Alltag und in den Medien präsent sind, ist es hilfreich ein Gefühl für die Wissenschaft dahinter zu bekommen. Der Versuch ist deshalb sehr empfehlenswert!

## Abbildungsverzeichnis

1	pn-Halbleiterübergang als Solarzelle. Wenn Licht auf den p-Bereich des Übergangs fällt, werden Elektron-Loch-Paare erzeugt, die zu einem Strom durch den Lastwiderstand $R_V$ führen. [8]	2
2	Oben: Vor dem Diffusionsprozess, Unten: Nach dem Diffusionsprozess, im Gleichgewicht und aufgebauten elektrischen Feld im Bereich der Raumladungszone [3]	3
3	Füllfaktor einer Solarzelle [1]	4
4	Vergleich der Strahlungsgesetze: Während das Wien'sche Strahlungsgesetz bei hohen Frequenzen den realen Verlauf des Hohlraumstrahlers (Planck'sches Strahlungsgesetz) korrekt wiedergibt, stellt das klassische Rayleigh-Jeans-Gesetz den Verlauf bei niedrigen Frequenzen korrekt dar. [9]	5
5	In diesem Diagramm erkennt man, dass mit steigender Temperatur die Wellenlänge der maximalen Energiedichte kleiner wird, was genau das Wien'sche Verschiebungsgesetz aussagt [9]	5
6	Skizze zur Gleichrichterwirkung [6]	7
7	Diagramm der Diode [7]	7
8	Temperaturabhängigkeit der Kennlinien [4]	8
9	Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom bei verschiedener Beleuchtung	10
10	I/U-Kennlinie der abgedunkelten Photodiode	10
11	P/I-Kennlinie der unbeleuchteten Photodiode	11
12	I/U-Kennlinie der vollständig beleuchteten Photodiode	11
13	P/I-Kennlinie der vollständig beleuchteten Photodiode	12
14	Leistung der Photodiode in Abhängigkeit von der bestrahlten Fläche	12
15	Berechnung des Parallel- und Reihenwiderstands aus der I/U-Kennlinie der Diode	13
16	I/U-Kennlinie des Elektrolyseurs	14
17	Produzierte Wasserstoffmenge bei unterschiedlicher Leistung pro Zeit	14
18	Wirkungsgrad des Elektrolyseurs	15
19	Faraday'scher Wirkungsgrad des Elektrolyseurs	15
20	I/U-Kennlinie der Brennstoffzelle	16
21	P/I-Kennlinie der Brennstoffzelle	16
22	Gasverbrauch der Brennstoffzelle	17

## Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/fuellfaktor-einer-solarzelle/5392>.
- [2] [https://de.wikipedia.org/wiki/Protonen\\_Austausch-Membran](https://de.wikipedia.org/wiki/Protonen_Austausch-Membran).
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Raumladungszone>.
- [4] [https://de.wikipedia.org/wiki/Shockley\\_Gleichung](https://de.wikipedia.org/wiki/Shockley_Gleichung).
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoff>.
- [6] <https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode>.
- [7] <https://www.ulfkonrad.de/physik>.
- [8] Mosca Tipler. *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. Auflage. Springer Spektrum, 2015.
- [9] Zinth. *Optik, Lichtstrahlen-Wellen-Photonen*. 4. Auflage. Oldenbourg Verlag München, 2013.