

UNIVERSITÄT REGENSBURG

F-PRAKTIKUM

# Brennstoffzelle



Korbinian Baumgartner und Jonas Schambeck

25. Juni 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Vorbereitung</b>	<b>4</b>
2.1	Optische Grundlagen . . . . .	4
2.2	Halbleiter . . . . .	5
2.3	Brennstoffzelle . . . . .	8
2.4	Solarzelle . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>13</b>
3.1	Solarzelle . . . . .	13
3.2	Elektrolyseur . . . . .	16
3.3	Brennstoffzelle . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Fazit</b>	<b>22</b>

# 1 Einleitung

Mit immer größer werdender Kritik an fossilen Brennstoffen in Motorbetriebenen Fahrzeugen und Flugzeugen wird die Suche nach einem passenden Ersatz immer bedeutender. Nachdem sich nun auch das Elektroauto aufgrund seines  $CO_2$  Abdrucks große Kritik einholte, ist eine Andere Technologie notwendig. Eine Technologie, die Effizient, umweltschonend und in großen Massen herstellbar ist. Über eine mögliche Alternative soll nun hier berichtet werden, die Brennstoff- und Solarzelle. Ottomotoren haben einen geringen Wirkungsgrad und nutzen den endlichen fossilen Brennstoff Erdöl. Rund 15 % der Erde bestehen aus Wasserstoff, der sich zu seiner elementaren Form auch leicht herstellen lässt. Die Brennstoffzelle scheint also als die optimale Wahl zu sein. Das größte bisherige Problem ist, dass erst Wasserstoff durch Strom hergestellt werden muss, dann kann er nur gefährlich (da Hoch explosiv) gelagert und später nur unter einem weiteren Verlust zu Strom rücktransformiert werden. Für den Ottomotor ist dies wesentlich billiger, da man lediglich Erdöl abbauen und zu Benzin/Disel umwandeln muss. Eine der größten Herausforderungen momentan ist also, die Effizienz der Brennstoffzelle und die Lagerung des Wasserstoffs so weit zu optimieren, dass die Zelle ein würdiger Ersatz zum Ottomotor oder dem Elektroauto werden kann. Die Brennstoffzelle ist umweltfreundlich, in großen Massen zu vermarkten, kommt jedoch auf wesentlich zu hohe Kosten. Zur Optimierung muss nun also Forschung betrieben werden.

Eine andere Möglichkeit, jedoch nicht genügend mobil für Fahrzeuge, stellt die Solarzelle da. Hier ist Verschleiß und Nutzen noch sehr teuer im Vergleich zu Atom- und Kohlekraftwerken. Die Solarzellen im handelsüblichen Vertrieb besitzen noch einen Wirkungsgrad von unter 20%. Dies ist deutlich zu wenig, wenn man überlegt, dass im Labor schon Wirkungsgrade von knapp 50% üblich sind. Nach Zwischenfällen wie Fukushima oder Tschernobyl und dem Problem der Endlagerung, wäre es durchaus sinnvoll, in Nachhaltigkeit zu investieren, anstatt in Schadensbegrenzung. Diese Zwischenfälle haben der Atomkraft schon mehrere Billionen Euro Schaden zugeschrieben. Forschung für kostengünstige und effiziente Solarzellen wäre also eine sehr gute Option. Als zukünftige Generation liegt es nun an uns, sich mit diesem Thema einhergehend zu Beschäftigen um Lösungen für die Zukunft zu finden.

Hierzu Befassen wir uns im Kommenden mit diesen Beiden Zellen und gehen auf die Wirkungsprinzipien ein. Nachhaltige Energiequellen sind notwendig für das Bestehen unserer Fortschrittlichen Gesellschaft. Hier noch ein Zitat zur Anregung, wie weit die Wirtschaft schön wäre.

”Der hundertprozentige Umstieg auf erneuerbare Energien ist nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch geboten.”

Franz Alt in Sonnige Aussichten, 2008

## 2 Vorbereitung

### 2.1 Optische Grundlagen

#### Schwarzer Strahler

Ein schwarzer Strahler ist ein idealisierter Körper, der sämtliche einfallende Strahlung absorbiert. Die aufgenommene Energie wird in Form der temperaturabhängigen Schwarzkörperstrahlung wieder ausgesandt. Die Energiedichte wird durch das Plank'sche Strahlungsgesetz beschrieben:

$$u(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T}) - 1}$$

u: Energiedichte

$\lambda$ : Wellenlänge der abgestrahlten EM-Welle

T: Temperatur des schwarzen Strahlers

Dies ergibt ein kontinuierliches Strahlungsspektrum, dessen Intensitätsmaximum bei steigender Temperatur bei schrumpfenden Wellenlängen zu finden ist. Ein Beispiel für näherungsweise schwarze Körper sind Glühlampen. Abbildung 2.1 zeigt das Spektrum dreier schwarzer Strahler mit sinkenden Temperaturen. Die Lage des Intensitätsmaximums liegt im infraroten Wellenlängenbereich, weshalb Glühlampen ein "warmes" Licht abstrahlen.

#### Wien'sches Verschiebungsgesetz

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschreibt die Lage des Intensitätsmaximum im Strahlungsspektrum des Strahlers. Aus der Extremwertbetrachtung des Plank'schen Strahlungsgesetzes folgt, mit einigen Näherungen, das Wien'sche Verschiebungsgesetz. Somit stellt es eine Näherung des Strahlungsgesetzes dar.

$$\lambda_{\max} = \frac{2897.8 \mu\text{m K}}{T}$$

Für die drei Glühlampen in Abbildung 2.1 lassen sich aus diesem Gesetz folgende Maxima errechnen:

$$\lambda_{\max}(T = 3000 \text{ K}) \approx 966 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\max}(T = 2500 \text{ K}) \approx 1160 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\max}(T = 2000 \text{ K}) \approx 1450 \text{ nm}$$

Aus dem Plot lassen sich annähernd diese Werte ablesen.

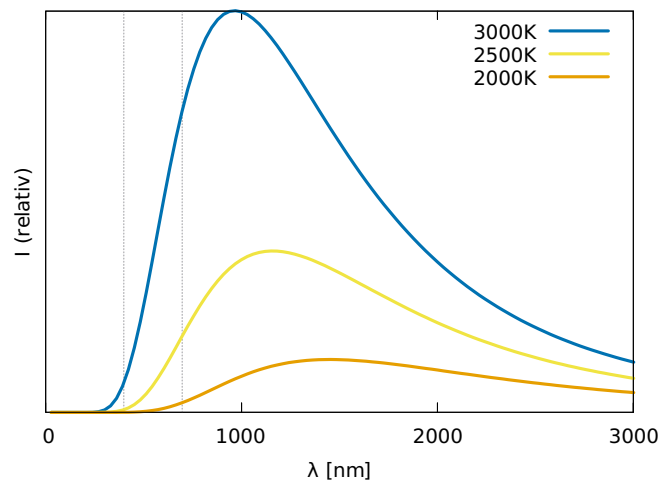


Abbildung 2.1: Spektrum schwarzer Strahler mit verschiedenen Temperaturen; sichtbarer Wellenlängenbereich markiert

## 2.2 Halbleiter

### p-n Übergang

**Dotierung:** Dotierung ist das gezielte Einbringen von Störstellen bei der Züchtung des Halbleiterkristalls. Besondere technische Relevanz besitzen Störstellen mit einem Bindungselektron mehr oder weniger als das zu ersetzende Wirtsgitteratom. In der Praxis sind Dotierungskonzentrationen von etwa  $10^{14}$  bis  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , je nach Substanz, üblich.

**Donatoren:** Donatoren besitzen ein Bindungselektron *mehr* als das Wirtsgitteratom. Ein Beispiel für das beliebte Silizium ist Phosphor. Silizium besitzt 4 Valenzelektronen, während Phosphor als Teil der 5. Hauptgruppe 5 hat. Dieses fünfte Elektron wird zur chemischen Bindung im Kristallgitter nicht benötigt und kann sich so durch den Halbleiter bewegen. Es unterliegt allerdings trotzdem noch der Coulomb-Anziehung durch die nicht abgesättigte Ladung des Atomkerns.

**Akzeptoren:** Akzeptoren besitzen ein Bindungselektron *weniger* als das zu ersetzende Wirtsgitteratom. Das fehlende Valenzelektron, das zur Bindung aber nötig ist, wird durch ein Loch ausgeglichen. Somit ist weiterhin Neutralität gewährleistet. Das Loch bewegt sich - wie das Elektron beim Donator - im Coulomb-Feld der gegenüber dem Wirtsgitteratom negativen Kernladung. Ein Beispiel eines Akzeptoren für Silizium ist das 3 wertige Bor.

**Isoelektronische Störstellen:** In einigen wenigen Fällen sind auch Störstellen durch gleichwertige Fremdatome von Bedeutung. Dies nennt man *isoelektronische Störstellen*. So werden zwar keine zusätzlichen Ladungsträger eingebracht, doch die optischen Eigenschaften können von Interesse sein. Ein Beispiel ist das Stickstoff in GaP-Lumineszenzdioden, die das intensive grüne Leuchten verantworten.

**pn-Übergang:** Bringt man p- und n-dotierte Halbleiter nun in Kontakt, so entsteht an der Kontaktstelle des dotierten Materials der *pn-Übergang*. Im akzeptordotierten Bereich sind die beweglichen Ladungsträger Löcher (p-Leitung), im donatordotierten Elektronen (n-Leitung). An der Übergangsstelle können beide Sorten rekombinieren, sodass dieses Gebiet keine beweglichen Ladungsträger mehr aufweist. Dieses Gebiet, in welchem nur noch die Raumladung der Störstellenrümpfe vorhanden ist, wird Raumladungszone genannt. Die Änderung der Elektronen- bzw. Löcherkonzentration in dieser Zone führt zu einem Diffusionsstrom in diese Gebiete hinein. Dieser wird durch einen gleich großen, entgegengesetzt gerichteten Feldstrom kompensiert, sodass insgesamt ein Gleichgewicht herrscht. (siehe Skizze 2.2 auf Seite 6)

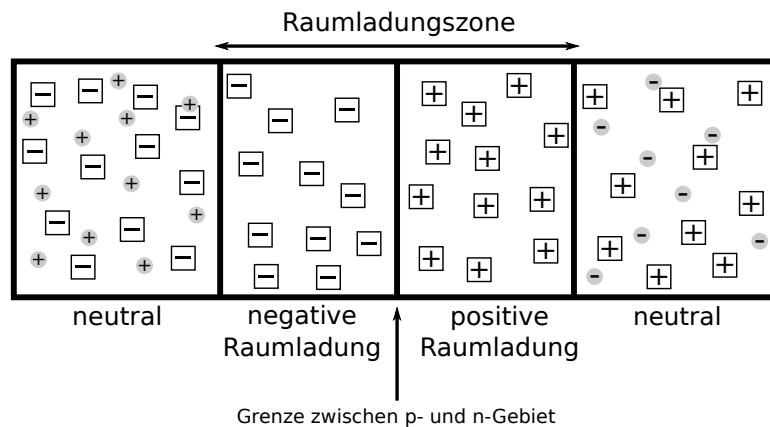


Abbildung 2.2: **pn-Übergang:** *Quadrate:* unbewegliche Rümpfe der Donatoren/Akzeptoren. *Kreise:* bewegliche Ladungsträger (Elektronen und Löcher)

## Halbleitermaterialien

Die Bandbreite technisch genutzter Halbleitermaterialien ist groß. Je nach Verwendungszweck und Budget kommen viele verschiedene Kristalle zum Einsatz.

*Silizium* ist der bekannteste Halbleiter. Die größten Vorteile sind die niedrigen Kosten und die hohe Verfügbarkeit. Für Mikroprozessoren wird Silizium mit Bor (III) und Arsen (V) dotiert. Auch für Solarzellen wird einerseits das kristalline Silizium gerne eingesetzt, andererseits allerdings auch amorphes Silizium (a-Si). Hier bildet sich kein Kristallgitter aus, sondern eine glasartige Struktur. So bleiben manche Si-Bindungen frei und Wasserstoffatome können sich festsetzen. So gibt es auch innerhalb des Gaps noch erlaubte Zustände und es bilden sich keine scharfen Bandkanten aus.

## Bestimmung der Gap-Energie

Die Gap-Energie kann gemessen werden, indem man den Widerstand eines hochreinen Halbleiters misst, während man diesen mit Photonen unterschiedlicher Wellenlänge

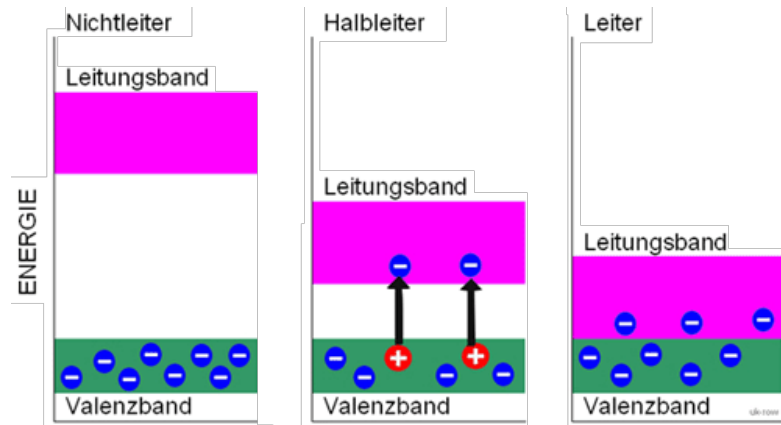


Abbildung 2.3: Bänder der verschiedenen Materialklassen

bestrahlt. Ab einer bestimmten materialabhängigen Wellenlänge sinkt der Widerstand sprunghaft. Photonen dieser Wellenlänge haben mindestens die Gap-Energie.

### Diffusionslänge

Die Diffusionslänge gibt die durchschnittliche Strecke an, die ein Elektron-Loch-Paar zurücklegt, bevor es rekombiniert.

### Gleichrichter

Wird die Diode in Durchlassrichtung gepolt, baut sich die Verarmungszone ab, bis die Diode ab einer kleinen materialabhängigen Grenzspannung sehr gut leitend wird. Siehe hierzu die Kennlinie einer Diode, Abb. 2.4.

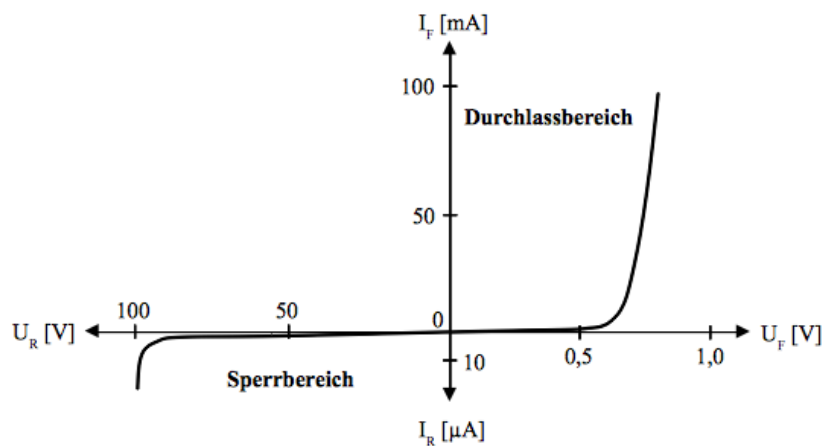


Abbildung 2.4: I/U-Kennlinie einer Diode

## Temperaturabhängigkeit der I/U-Kennlinie

Abb. 2.5 zeigt die Temperaturabhängigkeit der I/U-Kennlinie.

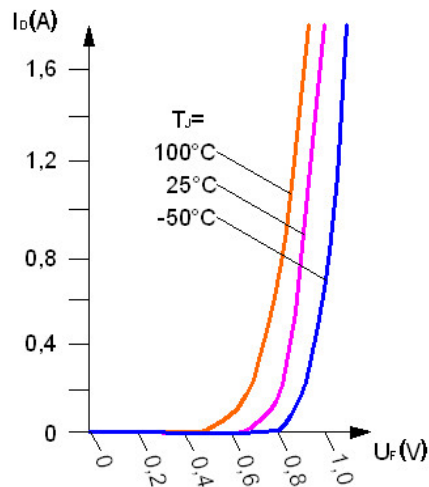


Abbildung 2.5: Kennlinie bei verschiedenen Temperaturen

## 2.3 Brennstoffzelle

### Gefahren beim Umgang mit Sauerstoff und Wasserstoff

Bevor nun auf die Funktionsweise eingegangen werden kann, muss erwähnt werden, wie gefährlich ein falscher Umgang mit Elementarem Sauerstoff und Wasserstoff sein kann. Da elementarer Sauerstoff in unserer Atmosphäre vorkommt ist das freisetzen von  $H_2$  an der Luft ausreichend um das gefährliche und hochexplosive Knallgas zu entwickeln. Ein bloßer Funke oder Reibung reicht nun aus um dieses Gas explosionsartig verbrennen zu lassen. Hierbei entstehen Temperaturen bis zu  $2000^\circ\text{C}$ . Dies bedeutet auch, dass die Aufbewahrung kostspielig sein kann. Aufgrund des sehr hohen Elektronegativitätenunterschiedes zwischen den beiden Elementen, sind sie im elementaren Zustand sehr reaktionsfreudig. Diese Potenzialdifferenz bestimmt auch die maximal mögliche Spannung von ca. 1.3 V. Praktische gemessene Werte befinden sich jedoch aufgrund Verluste im Aufbau, bei einem maximalen Wirkungsgrad von 60%, unter einem Volt. Verluste können vom Brennstoff, von der Qualität der Zelle und von der Temperatur abhängen. Zur erhöhung der gewonnen Spannung lassen sich mehrere Brennstoffzellen aneinander ketten. Aufgrund der Tatsache, dass Wasserstoff leicht herzustellen ist, ist die Brennstoffzelle dennoch ein wichtiges Forschungsgebiet. Sie kann helfen, den Bedarf von tragbaren Energiequellen zu stillen, zudem sie ohne Risiken für Umwelt funktioniert.



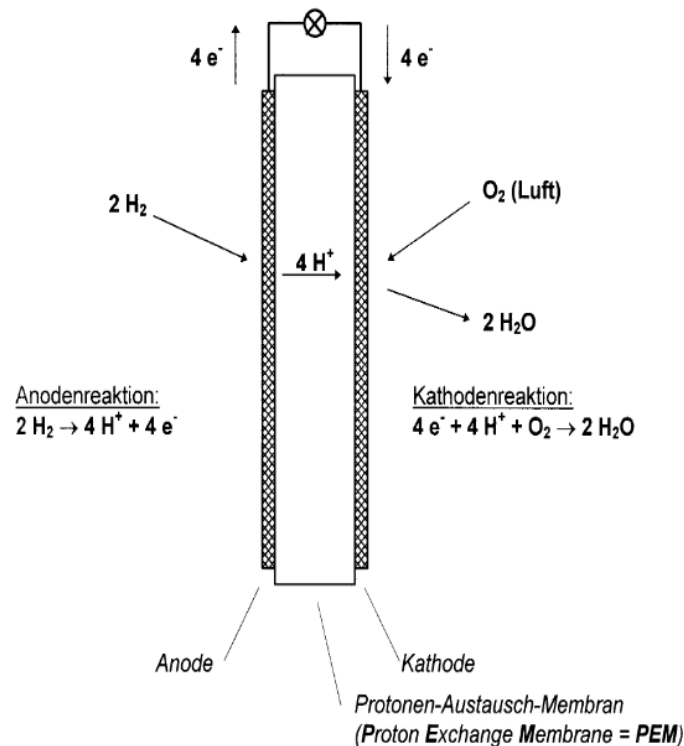


Abbildung 2.6: Funktionsweise der Brennstoffzelle

## Maximalspannung einer Solar-/Brennstoffzelle

Die maximale Spannung einer Solarzelle ist vorrangig durch das Halbleitermaterial begrenzt. Bei der Brennstoffzelle gibt das chemische Potential zwischen Wasserstoff und Sauerstoff die Spannung vor.

## Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle

Im Folgenden soll auf die Funktionsweise der Brennstoffzelle eingegangen werden. Entgegen der Elektrolyse von Wasser sollen nun die Elementaren Moleküle,  $\text{H}_2$  und  $\text{O}_2$ , zu elektrischer Energie zurückreagieren. Stark vereinfacht lässt sich die Brennstoffzelle als Galvanisches Element darstellen, also, Anode und Kathode getrennt von einer semipermeablen Membran. Die trennende Membranschicht benötigt also die Eigenschaft  $\text{H}^+$  Ionen passieren lassen zu können. Durch das Ionomer, ein protonendurchlässiges Polymer, können nur Protonen, nicht jedoch Stoffe wie Sauerstoff oder Wasserstoff, passieren. Hierzu verwendet man zum Beispiel, ähnlich zu den klassischen Galvanischen Zellen, Laugen oder Säuren als flüssige Membran und Keramiken als Feste Membranschichten. Durch ihre Eigenschaft hat sie auch den Namen PEM-Membran ("Proton Exchange Membrane") bekommen. Abbildung 2.6 verdeutlicht Aufbau und Funktionsweise.

Entscheidend ist die Reaktionsgleichung, sie sorgt für frei Elektronen, die nun für

den elektrischen Strom genutzt werden können. Anode:  $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$  Kathode:  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$  Gesamtgleichung:  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

An der Anode docken  $H_2$  Moleküle an, geben ihr Elektron an einen Leiter ab und wandern als Protonen durch die Membran zum Sauerstoff. An der Kathode Reagieren dann  $2H_2$  und  $O_2$  zu  $2H_2O$ .

Die maximale Spannung einer Solarzelle ist vorrangig durch das Halbleitermaterial begrenzt. Bei der Brennstoffzelle gibt das chemische Potential zwischen Wasserstoff und Sauerstoff die Spannung vor.

## 2.4 Solarzelle

### Funktionsprinzip einer Solarzelle

Durch Einstrahlung von Photonen werden freie Ladungsträger in der Zelle erzeugt. Der p-n-Übergang erzeugt ein inneres elektrisches Feld. Das herausgelöste Elektron und das entstandene Loch werden dadurch in unterschiedliche Richtungen transportiert. Hieraus entsteht ein Strom.

Das Herauslösen eines Elektrons ist nur möglich, wenn die Energie  $E = h\nu$  größer der Gap-Energie des Halbleitermaterials ist.

### Füllfaktor

Das Verhältnis zwischen theoretisch erzielbarer Leistung und der am Maximum Power Point (MPP) erzielten Leistung, wird Füllfaktor genannt. Abb. 2.7 zeigt den Füllfaktor grafisch.

### Wärmeeinwirkung auf Solarzelle

Die Anzahl der freien Ladungsträger nimmt im Halbleiter mit der Temperatur zu. Diese Ladungsträger bewirken in der Sperrschicht der Solarzelle einen Diffusionsstrom, der die Leistung der Solarzelle reduziert.

### Effizienz der Solarzelle

Die Effizienz hängt neben den offensichtlichen Faktoren, wie Wellenlänge/Spektrum des eingestrahlten Lichts, und der oben genannten Wärmeabhängigkeit, noch von Bauart bedingten Einschränkungen ab. Hier seien die Dicke der Schichten der Photozelle und dem Material genannt. Von den in ?? genannten Materialien, weist zum Beispiel kristallines Silizium eine höhere Effizienz auf, als amorphes. Weiter werden in Raumfahrtanwendungen sehr teure Materialien wie GaAs, oder GaAlAs und GaInAsP, verwendet, die Effizienzen bis 40% erreichen.

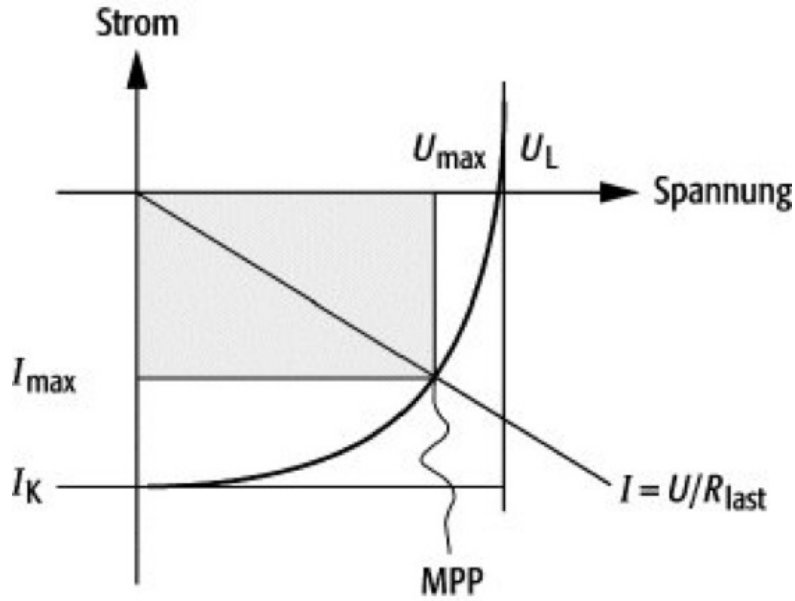


Abbildung 2.7: Der Füllfaktor grafisch

### Spektrum des schwarzen Strahlers

Abb. 2.8 zeigt die Strahlung eines schwarzen Strahlers bei 2500K in Abhängigkeit der Energie der emittierten Photonen, sowie die Gapenergie verschiedener Halbleiter. Der Anteil der Strahlung rechts von den Strichen trägt zur Leistung der Solarzelle bei.

### Abhängigkeit des Fotostroms von der Temperatur des schwarzen Strahlers

Die Anzahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare ist proportional zur Anzahl der Photonen, die eine Energie größer der Gap-Energie besitzen. Der Anteil dieser Photonen lässt sich mit dem Wien'schen Verschiebungsgesetz bestimmen.

$$M(\lambda) = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T}\right)}$$

mit  $\lambda = c/v$  und  $E_{Gap} = hv$  folgt:

$$M(v) = \frac{2\pi v^5}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{E_{Gap}}{k_B T}\right)}$$

Für die Intensität gilt

$$I \propto \frac{2\pi v^5}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{E_{Gap}}{k_B T}\right)} \propto \exp\left(-\frac{E_{Gap}}{k_B T}\right)$$

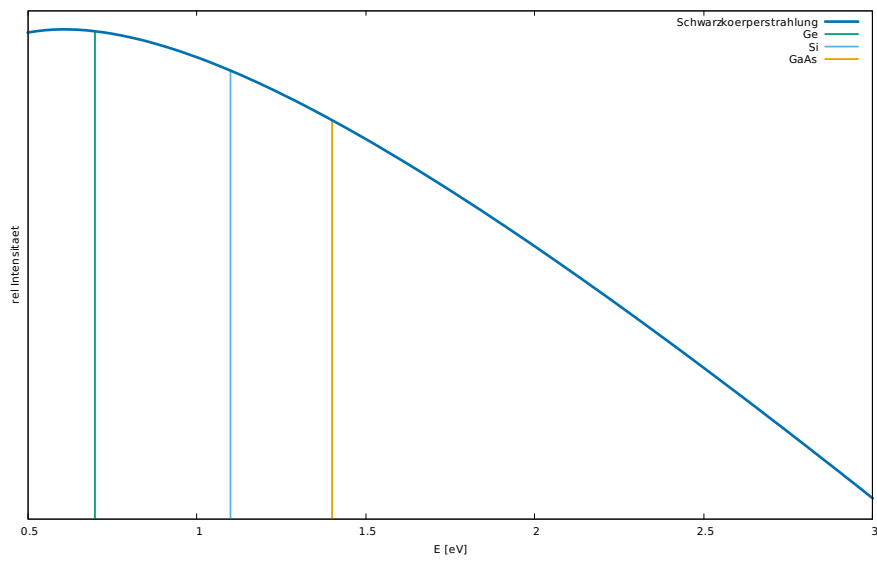


Abbildung 2.8: Intensität eines schwarzen Strahlers mit 2500K, Gapenergien einiger typischer Halbleiterverbindungen

## 3 Durchführung

### 3.1 Solarzelle

Als Solarzelle kommt eine Anordnung von 6 Einzelzellen zum Einsatz. Zuerst messen wir die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom der Anlage bei verschiedenen Beleuchtungsstärken.

	Tisch	Fenster	unter Tisch
Leerlaufspannung	0.665 V	1.979 V	0.173 V
Kurzschlussstrom	0.95 mA	9.89 mA	0.18 mA

Wir messen nun die I/U-Kennlinie der Zellen im Dunklen (siehe Abb. 3.1). Aus dieser Kennlinie erzeugen wir die P/I-Kennlinie. Im Dunklen ist die Leistung hier positiv, die Zellen wirken also als Verbraucher (siehe Abb. 3.2).

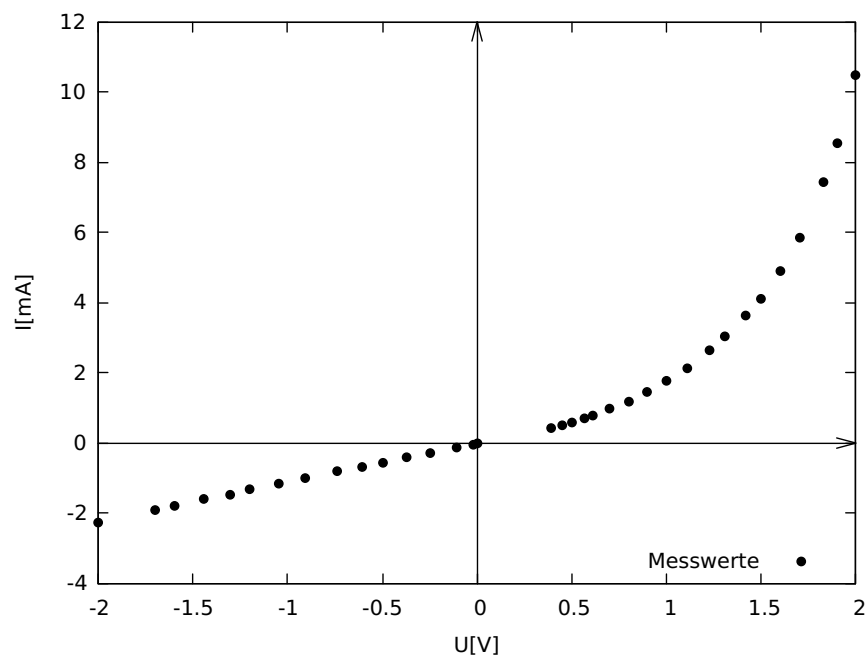


Abbildung 3.1: Dunkel I/U-Kennlinie der Solarzellen

Nun messen wir die I/U-Kennlinie bei beleuchteter Zelle. Dazu schalten wir verschiedene Lastwiderstände vor (siehe Abb. 3.3). Aus dieser erzeugen wir wiederum die P/I-

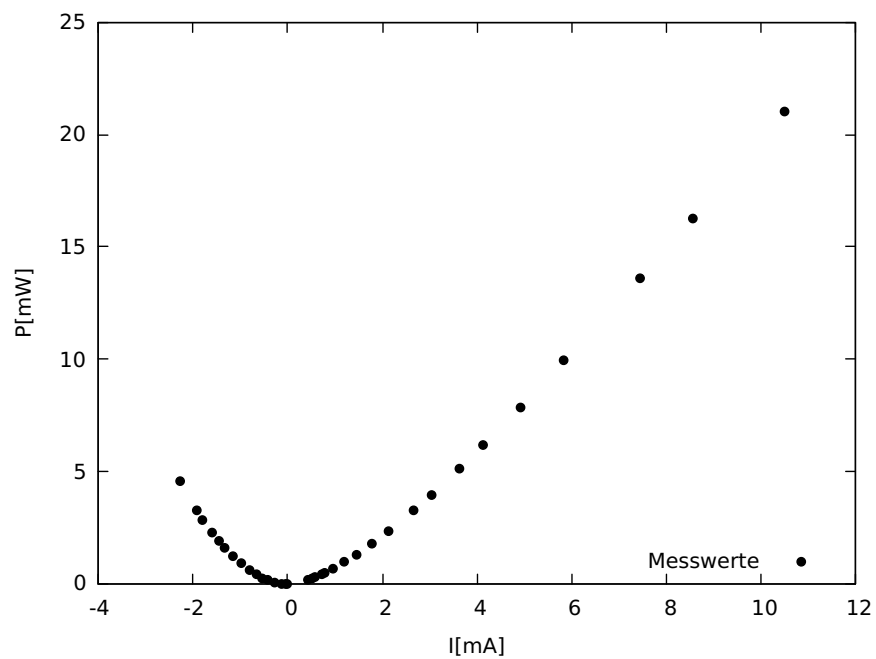


Abbildung 3.2: Dunkel P/I-Kennlinie der Solarzellen: Zellen wirken als Verbraucher

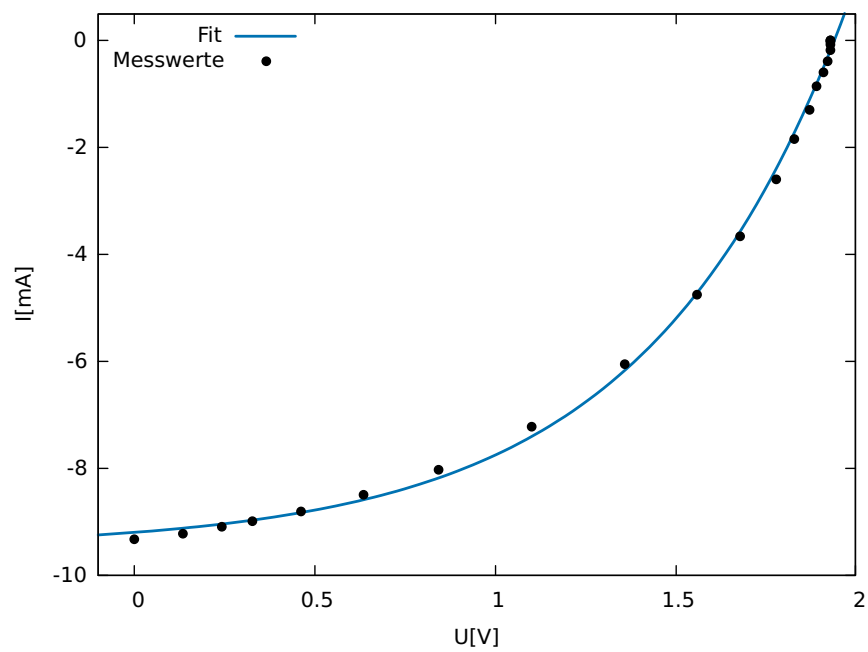


Abbildung 3.3: I/U-Kennlinie der Solarzellen

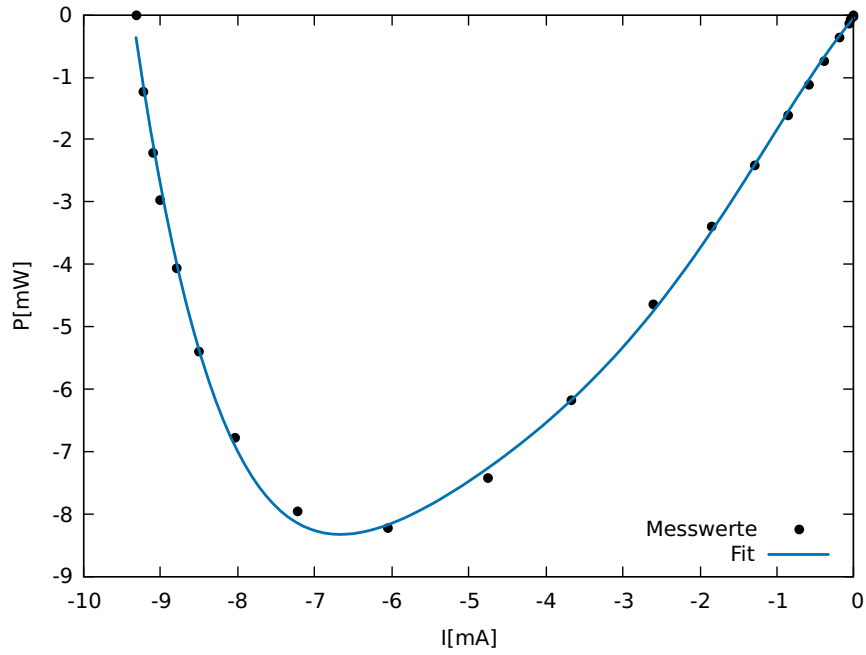


Abbildung 3.4: P/I-Kennlinie der Solarzellen

Kennlinie (siehe Abb. 3.4) Gefittet wurde die I/U-Kennlinie mit dem Zusammenhang:

$$I(U) = y_0 + I_0 e^{\frac{U}{U_0}}$$

Aus dem Fit ergeben sich die Werte:

$$y_0 = -9.48 \text{ mA}$$

$$I_0 = 0.28 \text{ mA}$$

$$U_0 = 0.55 \text{ V}$$

Für  $U = 0$  ergibt sich der Kurzschlussstrom  $I_K$  und für  $I = 0$  die Leerlaufspannung  $U_L$ .

$$I_K = I(0) = y_0 + I_0 = -9.2 \text{ mA}$$

$$U_L = U(0)$$

$$\Rightarrow U(I) = U_0 \ln \left( \frac{I - y_0}{I_0} \right)$$

$$U_L = U_0 \ln \left( -\frac{y_0}{I_0} \right) = 1.9 \text{ V}$$

Verunreinigungen und Kristallfehler an der Grenzfläche der p-n leitenden Schicht verursachen Widerstände die sich im realen nicht auf 0 (Reihe) und unendlich (Parallel) setzen lassen. Dabei wäre der Füllfaktor bei 1 und der MPP folglich am besten. Um diese Widerstände zu bestimmen nutzt man die Kennlinie des Bauteils. Diese Widerstände

entsprechen den Steigungen der Kennlinie nahe den Achsen, also der Steigung des Graphen bei Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom. Wir erhalten daraus die Werte:

$$R_s = R(0) = -\frac{U_0}{y_0} = 58 \Omega, \quad R_p = R(I_K) = \frac{U_0}{I_0} = 2.0 \text{ k}\Omega$$

Diese Werte sind in etwa realistisch für unsere Bedingungen. Die Tendenz, dass der Parallelwiderstand hoch ist und der Reihenwiderstand gering ist, ist gegeben. Die Werte wurden am Fenster aufgenommen.

Mit  $P = UI$  stellen wir nun die Fit-Funktion für das P/I-Diagramm auf, um den Maximum Power Point zu bestimmen.

$$P(I) = U(I) \cdot I = U_0 \cdot \ln\left(\frac{I - y_0}{I_0}\right) \cdot I$$

Aus dem Graphen erhalten wir  $P_{MPP} = -8.5 \text{ mW}$  und  $I_{MPP} = -6.5 \text{ mA}$ . Daraus ergibt sich für Spannung und Widerstand

$$U_{MPP} = U(I_{MPP}) = 1.3 \text{ V}$$

$$R_{MPP} = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}} = 0.2 \text{ k}\Omega$$

Hieraus lässt sich auch der Füllfaktor bestimmen.

$$f = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_L \cdot I_L} = 0.49$$

Der Literaturwert für amorphe Solarzellen liegt bei 0.5-0.7. Durch das Durchführen des Versuches ohne direkte Sonneneinstrahlung geht der errechnete Wert in Ordnung.

Zuletzt untersuchen wir den Zusammenhang zwischen Leistung und beleuchteter Fläche. Hierzu bedecken wir schrittweise ein halbes Solarpanel pro Messung. Aus dem Plot (siehe Abb. 3.5) ist der quadratische Zusammenhang zu erkennen. Dies ist das Resultat der Mischung aus Reihen- und Parallelschaltungen der einzelnen Solarmodule. Zunächst gilt es wiederum die I/U-Kennlinie aufzuzeichnen. Hierfür variieren wir die Elektrolyseurspannung und messen den zugehörigen Strom.

## 3.2 Elektrolyseur

Als Nächstes soll mit einem Elektrolyseur Wasserstoff und Sauerstoff hergestellt werden. Uns interessiert zunächst der elektrische Wirkungsgrad. Hierfür benötigen wir den Brennwert für Wasserstoff  $W_H = 11.7 \text{ MJ m}^{-3}$ . Die geleistete Arbeit des Elektrolyseurs ist proportional zum erzeugten Gasvolumen  $V$ . Mit der Formel  $W_{el} = UI t$  kann man nun die theoretisch mögliche Spannung berechnen und damit den elektrischen Wirkungsgrad bestimmen.

$$n = \frac{W_{HV}}{W_{el}}$$



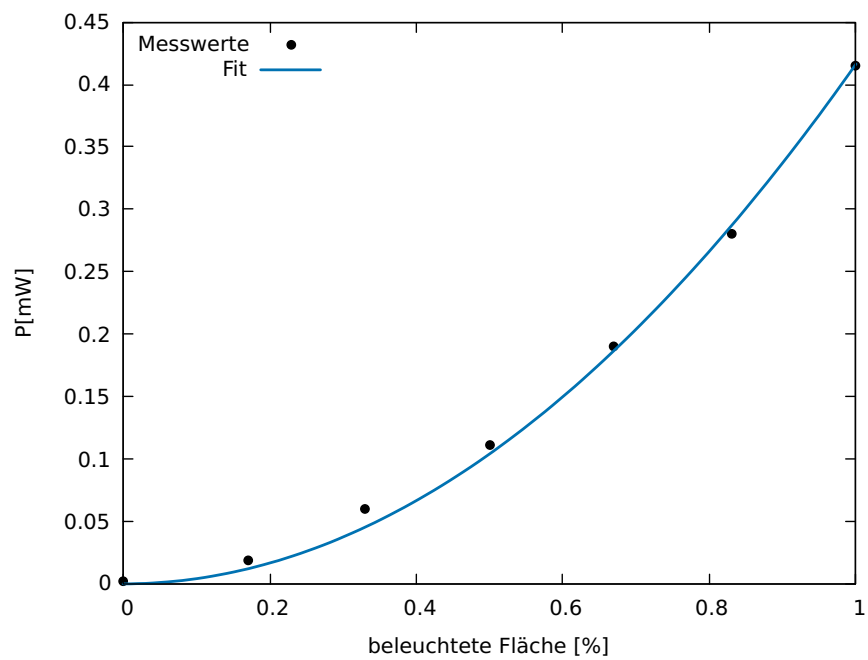


Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen Leistung und beleuchteter Fläche

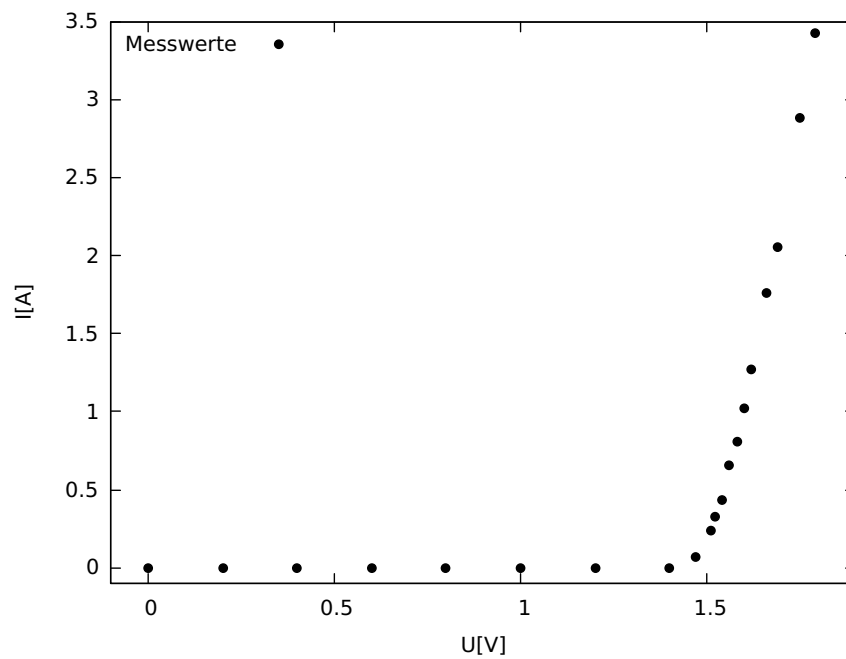


Abbildung 3.6: I/U-Kennlinie des Elektrolyseurs: Nach dem Erreichen der Zersetzungsspannung von ca. 1,5 Volt, nimmt der Strom linear zu

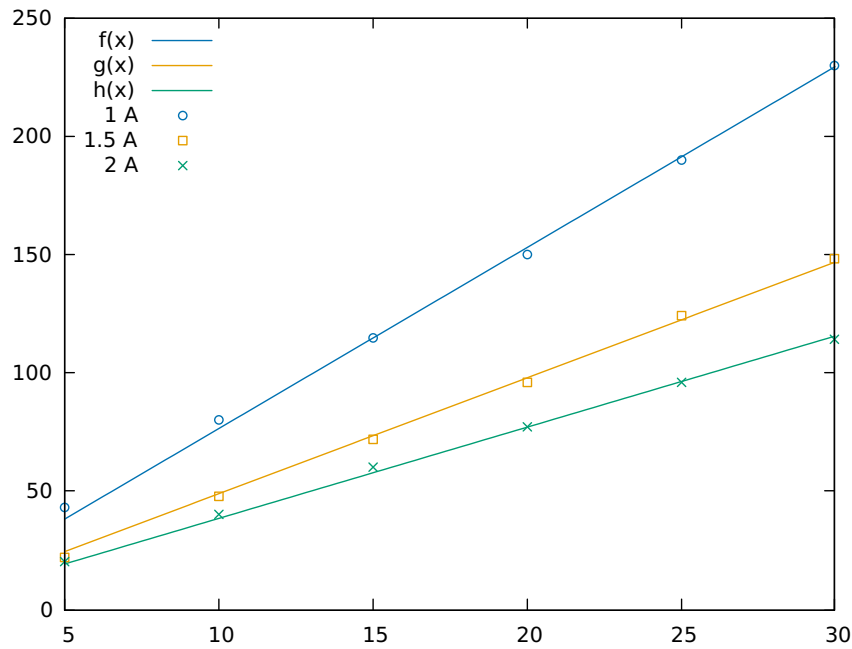


Abbildung 3.7: Gasproduktion pro Zeit bei konstanter Last

$$n(1 \text{ A}) = 0.95 \quad n(2 \text{ A}) = 0.96 \quad n(2.5 \text{ A}) = 0.92$$

Diese Werte sind sehr gut. Eine gute Ausbeute bei der Aufspaltung von  $H_2O$  ist wünschenswert. Die Herstellung von Wasserstoff ist also sehr effizient. Das Gas nutzt man später für die Brennstoffzelle.

Im Graphen 3.7 zu sehen ist, wie viel Gas bei einer konstanten Stromlast hergestellt wird. Mit den theoretisch berechneten Werten der Gasentwicklung nach dem Faraday'schen Gesetz, ermittelt man den Faradayschen Wirkungsgrad und überprüft damit das Gesetz. Man erhält das Verhältnis von theoretisch errechneter zu tatsächlich erzeugter Gasmenge. Hierzu nutzt man die Formeln:  $Q = nzF$  mit dem molaren Volumen  $V_m = V_n = 24.465 \text{ l}$ ,  $z$  ist 2, denn es werden beide H-Atome des  $H_2O$  reduziert.  $I = \frac{V_z F}{V_{nt}}$   $\frac{dV}{dt} = I \cdot 0.127 \text{ cm}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}$  Berechnen sich unsere Faraday'schen Wirkungsgrade auf:

$$nF(1 \text{ A}) = 1.02 \quad nF(2 \text{ A}) = 1.05 \quad nF(2.5 \text{ A}) = 1.04$$

Die Werte sind größer als eins, was auf manche Fehlerquellen verweisen muss. Da dieses Gesetz die chemischen Vorgänge beschreibt, sollte die Werte nahe der eins, aber keines Falls größer der eins, liegen. Probleme stellten beispielsweise das Ablesen der Gasmenge dar. Die angebrachte Skala war recht unhandlich und grob abzulesen.

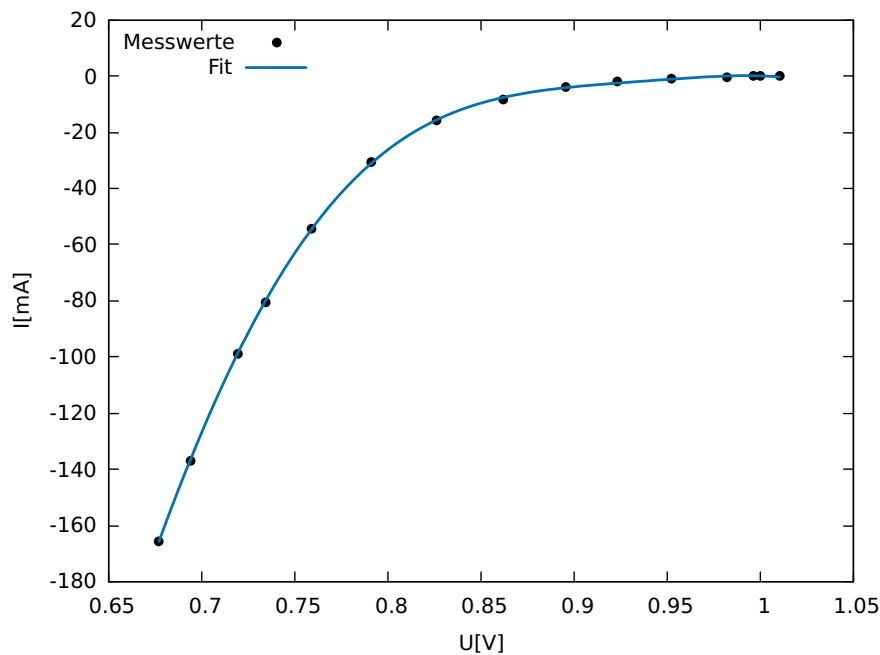


Abbildung 3.8: I/U-Kennlinie der Brennstoffzelle: durch den, auch ohne zusätzlich vorgeschaltetes Bauteil, hohen Widerstand des Aufbaus, ist die Kennlinie linear

### 3.3 Brennstoffzelle

Für die Brennstoffzelle soll nun die I/U-Kennlinie aufgenommen werden, hieraus lassen sich viele nützliche Daten, wie z.B. Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom und Leistung, errechnen. Dazu wird der zwischengeschaltete Widerstand, von 0,5 Ohm bis mehrere hundert Kilo-Ohm, variiert. Verwendet wird hier das vorher hergestellte Wasserstoffgas.

Um den Maximum Power Point zu bestimmen nutzen wir die P/I Kennlinie. Unsere P/I Kurve bis zum Ende hin steigt, da kein geringerer Widerstand als  $0.8\ \Omega$  in den Stromkreis geschlossen werden konnte und der Kurzschlussstrom die Brennstoffzelle zerstören kann. Wir benennen also unseren MPP an der Stelle von 0.8 Ohm und bekommen folgenden Wert:  $P_{MPP} = 95\text{ mW}$  Dieser Wert ist akzeptabel, aber nicht das Optimum der Brennstoffzelle.

Nun soll bei konstanter Last die verbrauchte Gasmenge bestimmt werden: Wir bestimmen nun analog zum Elektrolyseur den elektrischen und Faraday'schen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Bei 0.13 V und  $-128\text{ mA}$  hat die Zelle am meisten Gas verbraucht

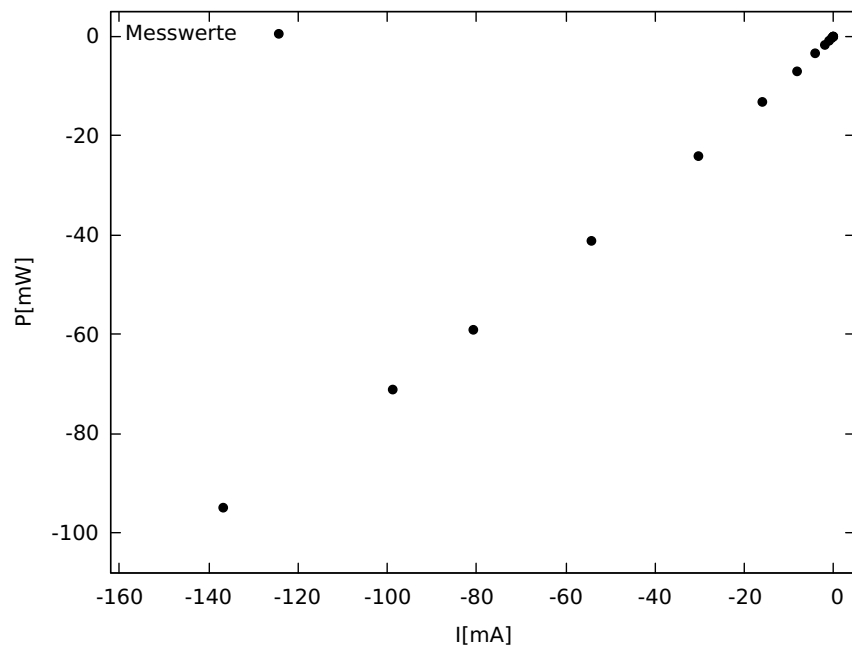


Abbildung 3.9: P/I-Kennlinie der Brennstoffzelle: linearer Anstieg

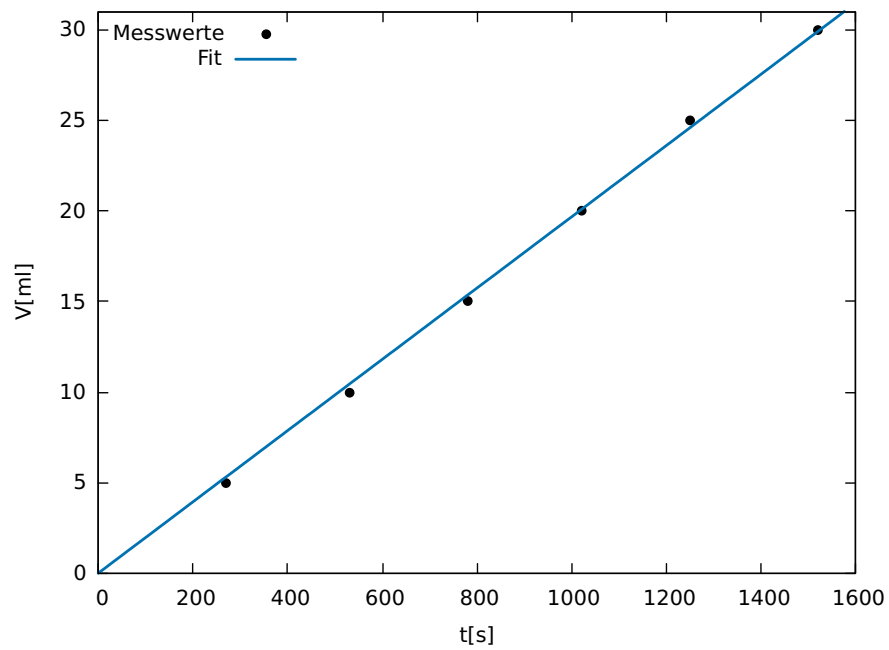


Abbildung 3.10: Gasdurchsatz der Brennstoffzelle bei konstanter Leistung

uns somit am meisten Leistung gebracht. Es ergeben sich folgende Werte:

$$n_{el} = \frac{W_{el}}{HHH2V} = 0.39$$
$$n_F = \frac{V_{theo}}{V} = 0.83$$

Klar war für uns: Die Erzeugung von Strom durch den Verbrauch von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser kann nicht perfekt Funktionieren. Dennoch ist sie mit ca. 40% keine schlechte Alternative zum Ottomotor. Theoretisch sind wohl noch bessere Werte möglich, mit geringerem Widerstand und einer moderneren Vorrichtung.

## 4 Fazit

Wie die Auswertung des Versuchs zeigt, ist die Solar- und Brennstoffzelle eine sehr zukunftsorientierte Technologie. Ebenso ist sie im großtechnischen Maßstab einsetzbar. Die Wirkungsgrade, die wir im Versuch zur Solarzelle und zum Elektrolyseur erreicht haben, waren sehr gut, auch im Vergleich zu aktuell vermarkteten Technologien. Interessant ist vor allem, dass konstanter Gleichstrom, wie es die Herstellung von Wasserstoff benötigt, mit der Solarzelle erzeugt werden kann, so dass ein 100% Umweltfreundlicher Kraftstoff gebildet werden kann. Lediglich die Herstellung der Zellen weisen einen geringen CO<sub>2</sub> Abdruck auf. Brennstoffzellen erreichen hohe Wirkungsgrade, Rekorde liegen sogar bei über 60 und erzeugen dabei direkt elektrische Energie, die im Elektromotor bei fast keinem Verlust für Fortbewegung genutzt werden kann. Das Hauptproblem der Wasserstofftechnologie ist derzeit also die fehlende Infrastruktur zur Speicherung und Transport von Wasserstoff. Ein flächendeckendes Angebot an sicherem Wasserstoff müsste gewährleistet sein, damit diese Technologie den Markt übernimmt. Es wäre jedoch an der Zeit ein Zeichen für die Umwelt zu setzen und ebendiese Fortbewegung zu fördern.