

Versuche zu regenerativen Energien: Solarzelle – Elektrolyseur – Brennstoffzelle

Heino Hildebrandt, Lars Hoegen, Arne Winterboer

07. Januar 2005

1 Einleitung

Angesichts des Treibhauseffekts, der durch Verbrennung fossiler Brennstoffe verstärkt wird, sind die Anwendungsgebiete regenerativer Energien ein gesellschaftlich wichtiges Thema. Eine besondere Schwierigkeit liegt dabei in der Zwischenspeicherung der mit Hilfe von Wind, Wasser oder Sonne gewonnenen elektrischen Energie.

In der gegenwärtigen Diskussion um diese Problematik zeichnet sich ab, dass zwei Möglichkeiten der Energiespeicherung technisch gut realisierbar und kosteneffizient sind. Auf der einen Seite steht die Speicherung elektrischer Energie in Pumpspeicherwerken; sie sind in der Lage, große Energiemengen bei hohem Wirkungsgrad zwischenzuspeichern und eine Versorgung im großtechnischen Maßstab zu gewährleisten. Nachteilig sind hingegen die Transportverluste zu den exponierten Standorten. Pumpspeicherwerke befinden sich zumeist in gebirgigen Regionen, in denen eine effiziente Stromerzeugung z.B. durch Windkraft nicht möglich ist.

Ein zweite Möglichkeit der Pufferspeicherung elektrischer Energie bietet die Kombination der elektrolytischen Wasserspaltung mit einer Verstromung in einer Brennstoffzelle. Das Puffermedium Wasserstoff ist gut speicherfähig und kann über geeignete Transportnetze verteilt werden, so dass der Erzeugerort vom Verbraucherort getrennt werden kann. Zudem kann man kleine Systeme konstruieren, die kosteneffizient arbeiten, so dass eine dezentrale Erzeugung von Wasserstoff möglich ist. Der gegenwärtige Stand der Forschung zeigt zudem an, dass mit Hilfe moderner Werkstoffe bei den Elektrolyseuren und bei den Brennstoffzellen sehr hohe Wirkungsgrade erzielt werden können.

In diesem Versuch werden wir mit einem Demonstrationsaufbau einer Anlage zur Erzeugung von Wasserstoff mit Hilfe von Solarstrom und der Verstromung in einer Brennstoffzelle arbeiten. Dieser Aufbau ist so oder in ähnlicher Weise in vielen Schulen vorhanden und wird im Rahmen der Unterrichtseinheiten zu regenerativen Energien verwendet.

2 Theorie

Das von uns eingesetzte Experimentiermodul **hydro-Genius®** der Firma **Heliocentrics** aus Berlin besteht aus vier Teilmodulen: als Erzeuger ein Modul mit zwei mal drei in Reihe geschalteten Solarzellen, einem Elektrolyseur, einer Brennstoffzelle und einem Motor mit Propeller, der als Verbraucher dient. Der Aufbau ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Die einzelnen Komponenten sind *nicht* fest miteinander verdrahtet. Sie müssen vielmehr mit Hilfe von Laborkabeln miteinander verbunden werden, so dass sie auch einzeln betrieben und untersucht werden können.

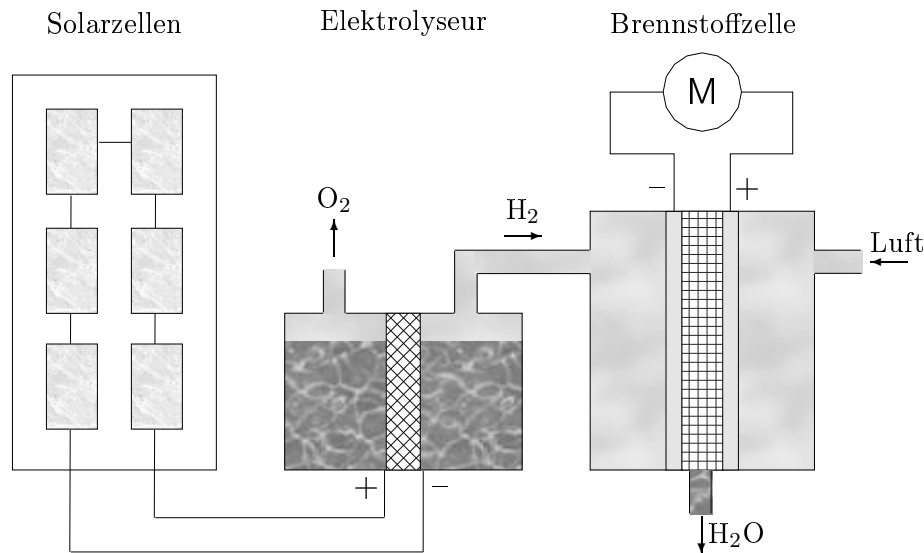


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Experimentiermodells

2.1 Solarzellen

Zur Erzeugung elektrischer Energie dient ein Solarmodul, auf dem zwei mal jeweils drei monokristalline Silizium-Solarzellen in Reihe geschaltet sind. Die Zellen sind auf einem Plexiglasträger montiert, der in einer Halterung um eine Achse drehbar gelagert ist. Auf dem Träger befinden sich Anschlussbuchsen, an denen der von den Solarzellen erzeugte Strom abgegriffen werden kann.

Eine Solarzelle besteht aus zwei dünnen, übereinander liegenden dotierten Siliziumschichten und bildet eine Halbleiterdiode. Die der Lichteinstrahlung zugewandte, sehr dünne Seite ist dabei mit Phosphor dotiert, so dass sie infolge der Fünfwertigkeit der Fremdatome n-leitend wird. Die abgewandte, dicke Seite besteht aus Bor-dotiertem Silizium, so dass sie wegen der Dreiwertigkeit der Fremdatome p-leitend wird.

Die Wirkungsweise ist am besten mit dem Lochprinzip erklärbar. Durch die p-Dotierung entsteht im Siliziumgitter ein „Loch“, in dem ein Elektron quasi fehlt. Diese Loch wird mit einer positiven Ladung assoziiert. Nun kann dieses Loch durch ein Elektron benachbarter Atome besetzt werden, bei denen dann aber wiederum ein Loch entsteht. Dieses „Wandern“ der Löcher kann als Leitung positiver Ladungsträger interpretiert werden.

Durch die n-Dotierung entsteht ein Überschuss an Elektronen, die sich frei durch das Kristallgitter bewegen können. Die Leitung erfolgt also über negative Ladungsträger.

In der Grenzschicht zwischen p- und n-dotiertem Silizium, dem sog. p-n-Übergang, besetzen freie Elektronen aus dem n-dotierten Teil die Löcher im p-dotierten Teil. Diese lassen im n-dotierten Teil einen Atomrumpf zurück, dort bildet sich eine positive Ladung. Die Elektronen sorgen im p-dotierten Teil für einen Überschuss an negativer Ladung. In der Grenzschicht bildet sich demnach ein elektrisches Feld aus.

Trifft nun Licht auf die Solarzelle, so geben die Photonen ihre Energie an die Elektronen der Atome in der Grenzschicht ab und lösen diese von den Atomkernen. Es entsteht ein Elektronen-Loch-Paar. Durch das elektrische Feld in der Grenzschicht werden die Elektronen in den n-dotierten Teil gezogen, während die Löcher in den p-dotierten Teil wandern. Diese

Ladungstrennung erzeugt ein elektrisches Potential zwischen n- und p-dotierter Schicht. Beim Kurzschluss der Schichten über einen äußeren Leiter fließt ein Strom.

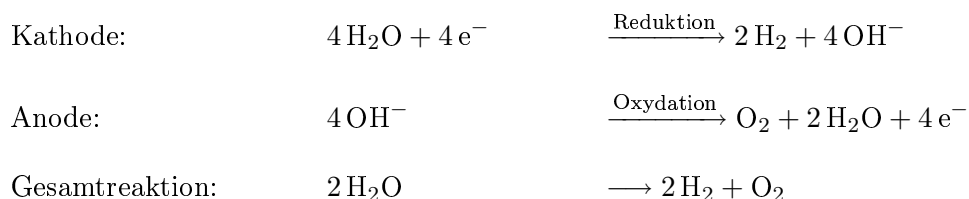
Um den Wirkungsgrad der Solarzellen zu erhöhen, sind diese meist noch mit einer Anti-Reflexionsschicht bedampft, so dass Verluste infolge von Totalreflexion verringert werden. Zum Abgreifen der Spannung ist die p-dotierte Schicht auf eine Metallplatte aufgebracht. Auf den n-dotierten Schicht sind dünne Metallfäden aufgeklebt.

Neben der Verwendung von Silizium erforscht man die Herstellung von anderen Halbleitermaterialien, die höhere Wirkungsgrade aufweisen, dafür aber komplizierter in der Herstellung und teurer in den Rohstoffen sind. Der Wirkungsgrad von guten, monokristallinen Silizium-Solarzellen liegt gegenwärtig bei etwa 19 %.

2.2 Elektrolyseur

Zur elektrolytischen Spaltung von Wasser kommt in diesem Modell ein alkalischer Elektrolyseur zum Einsatz, der ein Nachbau eines großtechnischen Gerätes im Forschungszentrum Jülich ist. Als Elektrolyt dient eine 25%ige Kalilauge. Anode und Kathode sind als Nickelgitter ausgeführt, da dieses sehr beständig gegen alkalische Korrosion ist. Die Halbzellen zur Wasserstoff- und Sauerstoffgenese sind durch ein Nickeloxid-Keramik-Diaphragma getrennt, das OH^- -Ionen leitet.

An der Kathode findet eine Reduktion von Wasser zu Wasserstoff und Hydroxid-Ionen statt. Die Hydroxid-Ionen wandern durch das Diaphragma zur Anode und werden dort zu Sauerstoff und Wasser oxidiert. Insgesamt laufen folgende Reaktionen ab:



Die für die Reaktion aufzubringende Energie stammt aus der an den Elektrolyseur angelegten Spannung. Diese muss infolge der thermodynamischen Vorgänge mindestens 1,23 V betragen.

Diese alkalische Membranelektrolyse ist sehr weit entwickelt und ermöglicht einen sehr hohen Wirkungsgrad bei gut kontrollierbaren Rahmenbedingungen. Dies ist auch der Grund, warum diese Methode beim Experimentiermodell verwendet wird.

Der Elektrolyseur ist aus einem transparenten Kunststoff gefertigt, so dass man die Entstehung der Gase an den netzartigen Elektroden gut beobachten kann. Zum Nachweis der Gasmenge, zur Reinigung der Gase und zur Abschottung der Atomsphäre im Elektrolyseur von der Aussenluft fließen die Gase über zwei Waschflaschen ab. Der Wasserstoff verbleibt in einem geschlossenen Leitungssystem, der Sauerstoff wird an die Luft abgegeben.

2.2.1 Andere Verfahren

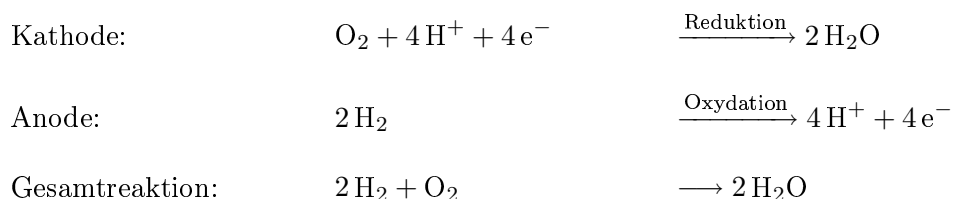
Die Trennung von Wasser kann in einem einfachen Elektrolyseur erfolgen, in dem die Hydroxidionen in Wasser gelöst sind. Dazu muss lediglich eine Anode und eine Kathode in ein wassergefülltes Behältnis eintauchen und für eine geeignete Abfuhr der Gase sorgen. Diese Methode birgt aber Risiken, da Wasserstoff und Sauerstoff im Wasser gelöst werden und somit ein Knallgas entsteht.

Großtechnisch verwendete Elektrolyseure trennen daher die Anode und die Kathode gasdicht voneinander. Die Trennmembranen, die dabei zum Einsatz kommen, leiten dabei nur die Hydroxidionen. Neben der oben beschriebenen alkalischen gibt es auch noch die saure Membranelektrolyse, bei der Wasserstoffionen in einer sauren Lösung entstehen und über eine protonenleitende Membran transportiert werden. Diese Methode ist aber nicht sehr weit entwickelt worden.

Experimentell erforscht wird gegenwärtig noch ein Hochtemperaturverfahren, bei dem die Elektrolyse in überhitztem Wasserdampf abläuft. Diese Methode verspricht einen sehr geringen Stromverbrauch bei hoher Leistung, ist aber technisch schwierig zu realisieren.

2.3 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle kehrt das Prinzip des Elektrolyseurs um. An der Anode wird das zugeführte Wasserstoffgas unter Elektronenabgabe oxidiert. Die dabei entstehenden Wasserstoffionen werden in einem Elektrolyten gelöst und durch das zwischen Anode und Kathode anliegende elektrische Feld zur Kathode transportiert. Dort werden sie zusammen mit Sauerstoff (in der Regel aus der Umgebungsluft) zu Wasser reduziert:



Die dabei freiwerdende Energie erzeugt ein elektrisches Potential zwischen Anode und Kathode. Aus thermodynamischen Überlegungen folgt, dass die dadurch erzeugte Spannung 1,23 V beträgt.

Bei der hier verwendeten Brennstoffzelle kommt eine protonenleitende Membran zum Einsatz, die aus einem Fluor-Polymer besteht. Auf beide Seiten einer solchen Membran wurden die Kathode bzw. die Anode heiß verpresst, so dass ein direkter Materialkontakt entstand. Zur Förderung der Redox-Reaktion wurden die Elektroden vor diesem Verpressen zusätzlich mit einem Platinkatalysator beschichtet. Die Membran trennt Wasserstoff und Sauerstoff voneinander, so dass es zu keiner Knallgasbildung kommen kann. Die Reaktion läuft bei niedrigen Temperaturen ab.

Die im Experimentiermodell verbaute Zelle ist ebenfalls aus transparentem Kunststoff konstruiert, auch wenn die Reaktion im Inneren nicht sehr spektakulär ist. Die Kathodenseite ist mit Bohrungen zur Luftzu- und Wasserabfuhr versehen.

2.3.1 Andere Verfahren

Es gibt verschiedene Bauarten von Brennstoffzellen, die sich im Wesentlichen nur in dem verwendeten Elektrolyten unterscheiden. Die ersten drei Verfahren laufen bei niedrigen Temperaturen unter 100° C ab, die anderen Verfahren erfordern höhere Temperaturen.

- Die einfachste Bauart ist eine Brennstoffzelle, bei der Kalilauge als Elektrolyt verwendet wird. Sie haben einen hohen Wirkungsgrad und sind preiswert, erfordern dafür aber den Betrieb mit hoch reinem Wasserstoff, da Verunreinigungen z.B. durch CO₂ den Elektrolyten chemisch verändern.

- Die protonenleitende Membrantechnik ist oben beschrieben.
- Eine Abwandlung der protonenleitenden Membrantechnik, bei der statt Wasserstoff das wesentlich einfacher handhabbare Methanol zugeführt wird. An der Membran kommt es zu einer katalytischen Reformierung des Methanols, bei der Wasserstoff und Kohlendioxid entstehen.
- Sehr weit entwickelt und verbreitet ist Phosphorsäure als Elektrolyt. Auch hier wird Wasserstoff zugeführt. Der Elektrolyt ist tolerant gegenüber Verunreinigungen, erfordert wegen der höheren Temperaturen aber einen größeren Regelaufwand.
- Mit sehr hohen Betriebstemperaturen eignen sich Alkalikarbonatschmelzen oder keramische Werkstoffe als Elektrolyten. Als Versorgung können beliebige Gase dienen, in denen Wasserstoff chemisch gebunden ist. Die erforderlichen Temperaturen senken allerdings den Wirkungsgrad, daher eignen sich solche Brennstoffzellen eher dort, wo Prozesswärme genutzt werden kann.

2.4 Verbraucher

Zur Verdeutlichung der Stromerzeugung an der Brennstoffzelle dient im Experimentiermodell ein Gleichstrommotor, auf dessen Welle ein kleiner Propeller aufgesteckt ist.

3 Versuche

3.1 Versuche mit dem Solarmodul

3.1.1 Erfassung der Dunkelkennlinie

Unser erster Versuch galt der Ermittlung der Dunkelkennlinie des Solarmoduls. Dazu schalteten wir die sechs Zellen in Reihe und bedeckten sie mit schwarzem Fotokarton. An die Anschlussklemmen des Moduls schlossen wir eine regelbare Spannungsquelle an und maßen bei verschiedenen Spannungen an den durch die Solarzellen fließenden Strom. Die anliegenden Spannungen wurden mit Hilfe eines Spannungsmessgeräts ermittelt. Die Schaltung ist in Abbildung 2 skizziert.

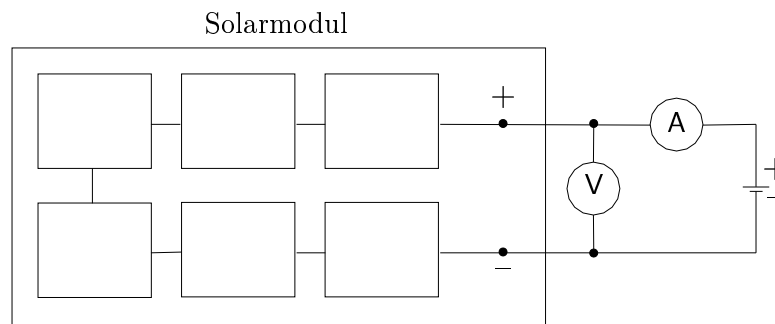


Abbildung 2: Schaltbild zur Ermittlung der Dunkelkennlinie

Die bei der Messung gewonnenen Daten sind in Tabelle 1¹ erfasst und in Abbildung 3 als I/U-Diagramm dargestellt.

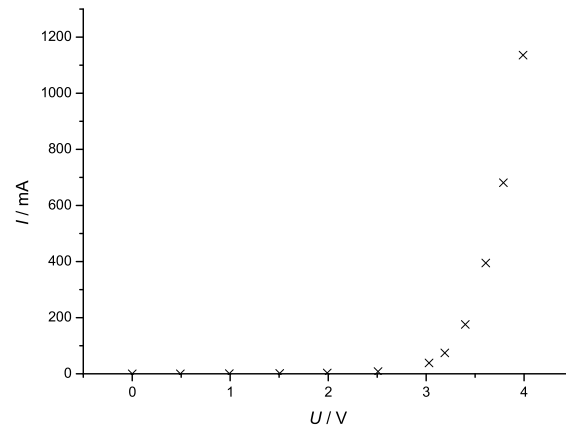


Abbildung 3: Diagramm der Dunkelkennlinie

Man erkennt, dass der Strom erst im Bereich einer Spannung größer etwa 3 V nennenswert ansteigt. Die Dunkelkennlinie ähnelt der Kennlinie einer Halbleiterdiode. Dies ist auch erklärbar, denn eine Solarzelle ist eine lichtempfindliche Halbleiterdiode.

Bei geringen Spannungen wirkt die Grenzschicht zwischen p- und n-dotierter Schicht wegen der fehlenden freien Ladungsträger als Sperrschicht. Durch Anlegen einer äußeren Spannung werden nun Ladungsträger in diese Grenzschicht getrieben und die Sperrschicht wird dünner. Ab einer gewissen Spannung, der sog. Schleusenspannung, bricht die Sperrschicht dann ganz zusammen und die Diode schaltet durch. Bei den hier verwendeten Solarzellen liegt die Schleusenspannung bei etwa 3 V.

3.1.2 Erfassung der Hellkennlinie

Wir beleuchteten das Solarmodul mit Hilfe einer in etwa 20 cm Abstand platzierten Reflektorlampe (Anschlussleistung $P_L = 120 \text{ W}$). Das Modul wurde dabei senkrecht bestrahlt. Mit einem Spannungsmessgerät maßen wir die an den Anschlußklemmen des Moduls abfallende Spannung. An den Ausgang des Moduls schlossen wir einen veränderbaren Widerstand (Widerstandsdekade) an und bestimmten die hierdurch fließenden Strom. Abbildung 4 zeigt ein Schaltbild.

Die gemessenen Werte für Widerstand, Strom, Spannung und Leistung ($P = U \cdot I$) sind in Tabelle 2 erfasst und in Abbildung 5 als I/U-Diagramm aufgetragen. Abbildung 6 zeigt ein P/U-Diagramm.

Die Hellkennlinie im I/U-Diagramm entspricht in ihrem Verlauf dem für eine Solarzelle zu erwartenden, was in Folge der Reihenschaltung der sechs Solarzellen auch plausibel ist. Die Leerlaufspannung des Moduls ohne angeschlossenen Verbraucher ($R \rightarrow \infty$) beträgt etwa 3 V, d.h. jede einzelne Solarzelle hat eine Leerlaufspannung von etwa 0,6 V.

¹Der besseren Übersichtlichkeit halber sind die Tabellen im Anhang ab Seite 15 aufgeführt.

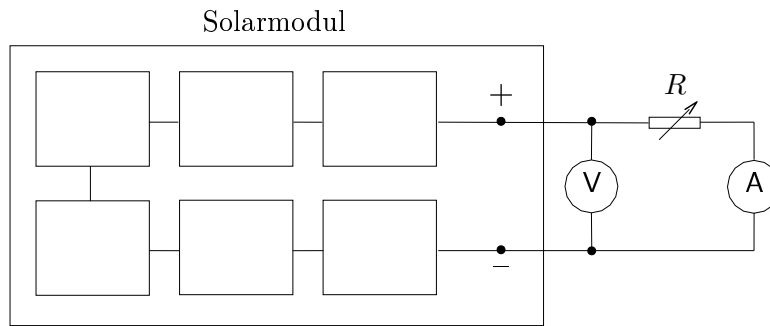


Abbildung 4: Schaltbild zur Ermittlung der Hellkennlinie

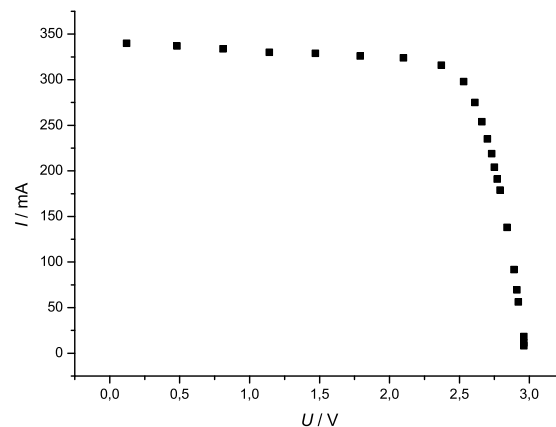


Abbildung 5: I/U-Diagramm der Hellkennlinie

Der Kurzschlussstrom ($R \rightarrow 0 \Omega$) beträgt etwa 300 mA, d.h. jede Zelle liefert maximal diesen Strom. Dieser ist über weite Widerstandsbereiche nahezu konstant.

Bei Solarzellen sollte die entnommene Leistung bei festgelegter Bestrahlungsintensität maximal sein. Das P/U-Diagramm zeigt, dass die maximal mögliche Leistungsentnahme aus dem Solarmodul bei etwa 775 mW liegt. Nimmt man für die Lampe auch nur einen Wirkungsgrad von 10 % an, so zeigt sich der sehr geringe Wirkungsgrad der Solarzellen.

3.1.3 Abhängigkeit der erzeugten Leistung von der Lichtintensität

Mit Hilfe des in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Verfahrens wird in diesem Versuch die Abhängigkeit der von den Solarzellen erzeugten Leistung von der eingestrahlteten Lichtintensität untersucht. Dazu entfernten wir die Lampe in 10 cm-Schritten vom Solarmodul (Abstand d) und bestimmten die am Modul anliegende Spannung und den erzeugten Kurzschlussstrom.

Für die Spannung U , die Stromstärke I und die Leistung $P = U \cdot I$ ergaben sich die in Tabelle 3 eingetragenen Werte. Abbildung 7 zeigt ein Diagramm der Messwerte.

Man erkennt einen exponentiellen Abfall der Leistung mit zunehmenden Abstand. Da die Lichtintensität näherungsweise quadratisch mit dem Abstand abnimmt, ist ein solcher Verlauf zu erwarten. Die nahezu konstante Spannung des Moduls erklärt sich quantenmechanisch, da

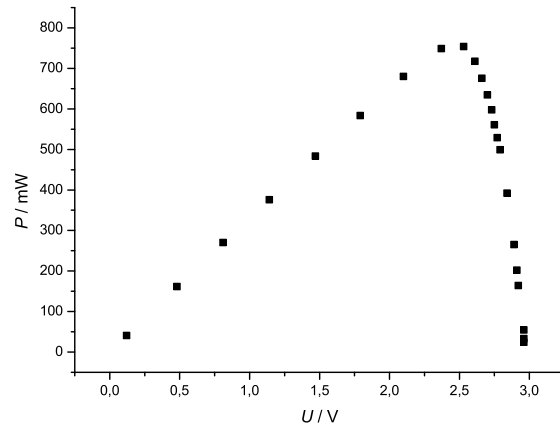


Abbildung 6: P/U-Diagramm der Hellkennlinie

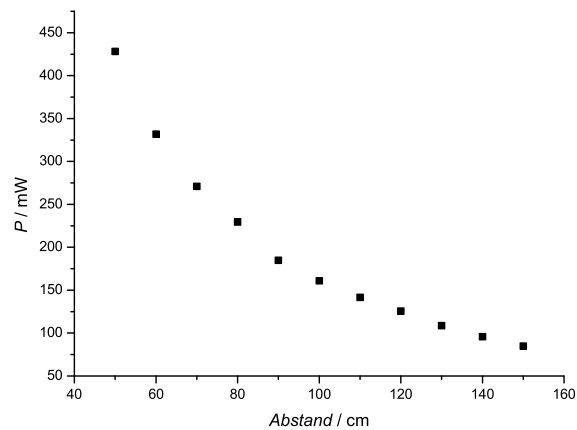


Abbildung 7: Diagramm der dem Solarmodul entnommenen Leistung P in Abhängigkeit vom Abstand Lampe–Solarmodul

die aufzubringende Arbeit zum Ablösen eines Elektrons aus der Atomhülle konstant ist.

Leider war es uns mangels geeignetem Photometer nicht möglich, die eingestrahlte Lichtintensität quantitativ zu bestimmen, um so vielleicht einen Vergleich zu den in Deutschland typischen Tageslichtintensitäten zu ziehen.

3.1.4 Abhängigkeit der Leistung vom Einfallswinkel

Nach der Untersuchung der Abhängigkeit vom Abstand interessierte uns auch die Abhängigkeit vom Einfallswinkel. In allen bisherigen Versuchen wurde das Solarmodul senkrecht von der Lampe bestrahlt. Wir bestimmten mit dem gleichen Versuchsaufbau wie in 3.1.3 die anliegende Spannung und die Stromstärke bei verschiedenen Einfallswinkeln. Der Abstand der Lampe von der Drehachse des Solarmoduls betrug dabei 50 cm. α bezeichnet den Winkel zwi-

schen der Verbindungslinie Lampenmittelpunkt–Drehachse des Solarmoduls und dessen Lot auf der Drehachse.

In Tabelle 4 sind die Messwerte für die Spannung U , Stromstärke I und die Leistung $P = U \cdot I$ verzeichnet. Abbildung 8 zeigt ein Diagramm der Messwerte, die Abszisse zeigt den $\cos(\alpha)$ im Bogenmaß.

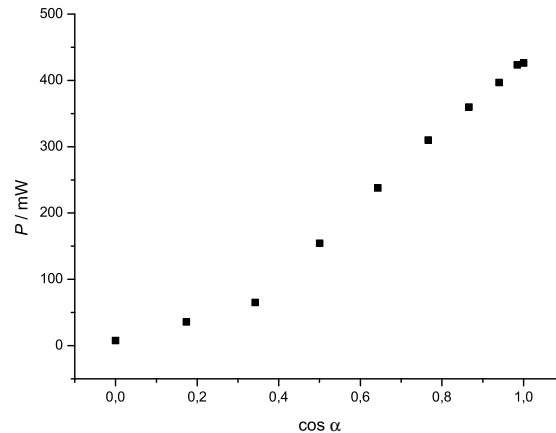


Abbildung 8: Diagramm der dem Solarmodul entnommenen Leistung P in Abhängigkeit vom Winkel Lampe–Solarmodul

Im Bereich kleiner Winkel ist ein nahezu linearer Verlauf erkennbar. Dieser kann erklärt werden, wenn man annimmt, dass das Solarmodul eine wirksame Fläche hat, die senkrecht zur Einstrahlrichtung steht. Wenn l die Länge und b die Breite der Solarzellen auf dem Modul bezüglich der Achsenrichtung bezeichnet, so gilt für diese scheinbare Fläche $A = a \cdot b \cdot \cos(\alpha)$. Im Bereich kleiner Winkel ist die wirksame Fläche nahezu gleich der Fläche bei senkrechter Bestrahlung bzw. maximaler Leistung.

Die Messkurve kann als Beleg dazu herangezogen werden, dass für eine möglichst große Effizienz von Solarmodulen eine Nachführung unabdingbar ist, bei der die Oberflächen der Solarmodule immer senkrecht zur zeitlich veränderlichen Einstrahlrichtung der Sonne geführt werden. Diese Nachführung kann selbst regelnd realisiert werden, indem man die Regeltechnik anhand der maximalen Leistung ausrichtet.

3.2 Versuch mit dem Elektrolyseur

3.2.1 Erfassung der Kennlinie

Mit einer Schaltung gemäß Abbildung 2 – anstelle des Solarmoduls war nun der Elektrolyseur angeklemt – untersuchten wir nun die Stromstärken, die bei verschiedenen Spannungen durch den Elektrolyseur flossen. Der dabei entstehenden Wasserstoff wurde der Brennstoffzelle zugeführt, da austretenden Wasserstoffgas leicht entzündlich ist. An die Brennstoffzelle war der Propeller als Verbraucher angeschlossen.

Da der Elektrolyseur eine augenschädigende Kalilauge enthielt, trugen wir während der gesamten Durchführung Schutzbrillen. Um den Elektrolyseur nicht zu beschädigen, wurde die angelegte Spannung unter 2,5 V gehalten.

Die für Stromstärke und Spannung ermittelten Werte sind in Tabelle 5 aufgeführt, Abbildung 9 zeigt ein I/U-Diagramm.

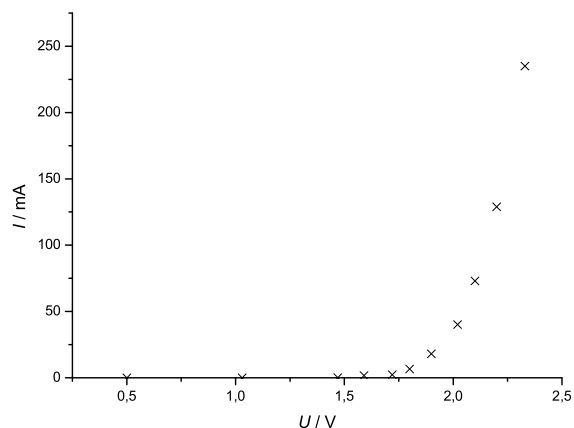


Abbildung 9: I/U-Diagramm der Kennlinie des Elektrolyseurs

Man erkennt, dass bei geringen Spannungen noch kein Strom durch den Elektrolyseur fließt. Dies ist auch zu erwarten, denn die thermodynamisch für die Reaktion notwendige Spannung von 1,23 V muss erst überschritten werden. Durch Widerstandsverluste und chemische Prozesse in der Kalilauge liegt dieser Punkt bei dem von uns verwendeten Elektrolyseur allerdings höher, bei etwa 1,75 V. Ab diesem Punkt wäre eine steile Steigung der Kennlinie zu erwarten. Man versucht, diese Differenz durch geeignete Wahl der Materialien zu minimieren, da eine höhere Spannung auch mehr elektrische Energie verbraucht.

Im Bereich kleiner Spannungen unterhalb von etwa 2 V verläuft die Kennlinie entgegen den Erwartungen sehr flach. Dies hängt mit elektrochemischen Vorgängen an der Elektroden zusammen. Dort bilden sich zunächst nur kleine Gasmengen, die von den Elektroden adsorbiert werden. Es bildet sich eine galvanische Zelle, deren Spannung einen Strom bewirkt, der dem von außen angelegten Strom entgegen gerichtet ist.

Bei Erhöhung der Spannung am Elektrolyseur werden die abgeschiedenen Gasmengen größer, damit steigt auch der Gasdruck. Wenn dieser den Atmosphärendruck überschreitet, kommt es zur Entstehung von Gasblasen. Erhöht man die Spannung weiter, zeigt die Kennlinie den theoretisch zu erwartenden nahezu linearen Verlauf.

3.3 Versuch mit der Brennstoffzelle

3.4 Ermittlung der Kennlinie

Mit einem Aufbau gemäß Abbildung 10 ermittelten wir die Kennlinie der Brennstoffzelle. Der Elektrolyseur wird mittels einer Spannungsquelle ($U = 2,3 \text{ V}$, $I = 330 \text{ mA}$) betrieben. Der erzeugte Wasserstoff wird der Brennstoffzelle zugeleitet, der Sauerstoff an die Luft abgegeben.

Die Brennstoffzelle erhält den Sauerstoff für die Redox-Reaktion aus der Luft. An ihren Anschlussbuchsen wird die Spannung U gemessen, die bei Einschalten verschiedener Widerstände R (Widerstandsdekade) in den Stromkreis anliegen. Der Strom I der durch den Widerstand fließt, wird ebenfalls bestimmt. Die zugehörigen Messwerte sind in Tabelle 6 eingetragen. Ein

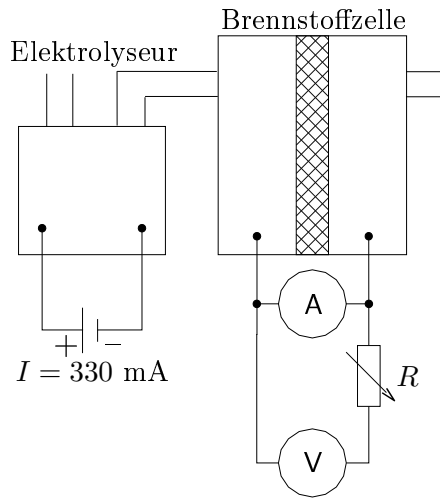


Abbildung 10: Schaltbild zur Ermittlung der Kennlinie der Brennstoffzelle

I/U-Diagramm der Messwerte ist in Abbildung 11 dargestellt; Abbildung 12 zeigt ein P/I-Diagramm.

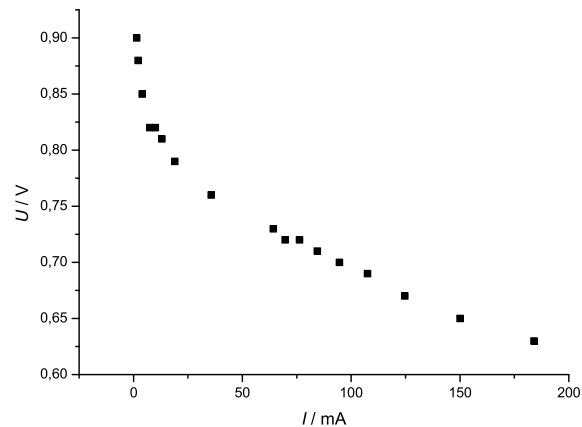


Abbildung 11: I/U-Diagramm der Kennlinie der Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist die funktionale Umkehrung des Elektrolyseurs, daher sind die beobachteten Messkurven ähnlich und auf die gleichen Phänomene zurückzuführen. Die galvanischen Prozesse, die dort für eine höhere Spannung als 1,23 V zum Beginn der Elektrolyse verantwortlich waren, sind hier die Ursache für die geringere maximale Spannung von etwa 0,9 V. Man bezeichnet diese Spannung als *Ruhe­spannung*. Bei steigender Stromentnahme sinkt die Spannung exponentiell; dieser Verlauf entspricht qualitativ dem reziproken Verlauf der Kennlinie des Elektrolyseurs.

Das I/P-Diagramm zeigt einen leicht gekrümmten Verlauf der Leistung mit steigender Stromentnahme. Man versucht, die Brennstoffzelle an einem optimalen Arbeitspunkt zu betreiben, um möglichst große Ströme zu erzeugen. Im P/I-Diagramm wäre dies der Punkt, an

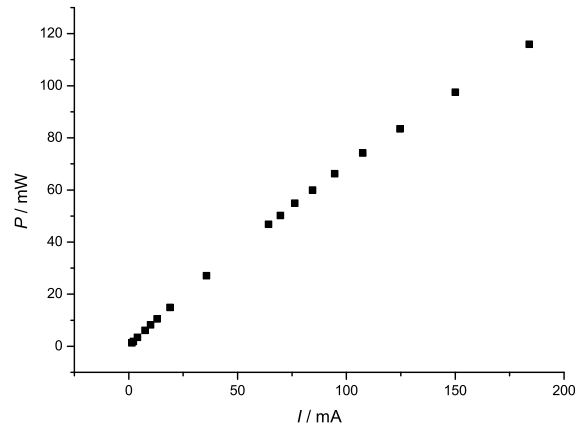


Abbildung 12: P/I-Diagramm der Kennlinie des Brennstoffzelle

dem die Tangente an die Messkurve die geringste Steigung hat.

4 Didaktische Anmerkungen

Die Rahmenrichtlinien für den Physikunterricht an niedersächsischen Gymnasien von 1994 sehen für den Themenbereich „Energie und Umwelt“ 15 Unterrichtsstunden in der 10. Klasse vor, wobei hierunter aber auch die experimentelle Erarbeitung des Begriffs der Bewegungsenergie gefasst ist und als weitere Themen erst die unter diesem Titel zunächst vermuteten Bereiche Energieumsatz, Probleme infolge der Energienutzung (und hier dann auch der Unterbereich Verfügbarkeit regenerativer Energien) und Energieeinsparung. Erst im Wahlpflichtbereich erscheint dann die Solarzelle (physikalische Grundlagen der Photovoltaik, Kennlinien, spektrale Empfindlichkeit, Anwendungen und Entwicklungstendenzen). Angesichts der immer größer werdenden gesellschaftlichen Relevanz des Themas Regenerative Energien sollte dieses auch in der Schule angesprochen werden, um die Schülerinnen und Schüler zu einem kritischen Umgang anzuleiten. Das hier zum Einsatz kommende Experimentiermodell lässt sich dabei in zwei Themenblöcke unterteilen: Der Erzeugung elektrischer Energie und der Zwischenspeicherung der gewonnenen Energie.

4.1 Erzeugung elektrischer Energie

Im Experimentiermodell wird die Erzeugung der elektrischen Energie mittels Solarzellen untersucht. Im Unterricht der Klasse 10 kann dies der Einstieg in zwei Teilbereiche des Themas sein, die sich gegenseitig aber nicht ausschließen.

Zum Einen kann die Funktionsweise einer Solarzelle untersucht werden. Bei der Erklärung der Frage, warum diese eigentlich eine elektrische Spannung erzeugt, wenn Licht einfällt, kann man die in der Theorie dieses Protokolls beschriebene Löcherleitung heranziehen und den Schülerinnen und Schülern damit ein sehr einfaches und tragfähiges Halbleitermodell vermitteln. Dieses findet sich in den meisten Schulbüchern; das Begleitmaterial des Herstellers des Experimentiermodells ist diesbezüglich eine ebenso gute Quelle wie die meisten Standardwerke der Physik. Hier bietet sich also reichlich Grundlage für mögliche Arbeit in Referaten

bzw. Facharbeiten oder Kleingruppen. In jedem Fall sollte vor der Einführung der Löcherleitung aber die Berücksichtigung des Vorwissens stehen. Das Halbleitermodell vermittelt eine Vorstellung von Atomen als „Kugeln“ mit besonderen Eigenschaften. Im Hinblick auf das später eingeführte quantenmechanische Atommodell ist dies aber irreführend. In der Didaktik vom Physik und Chemie wird in den letzten Jahren daher über andere Atommodelle für die Sekundarstufe I nachgedacht, die z.T. auch schon erprobt werden.²

Auf der anderen Seite steht die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Solarzellen. Dazu können Versuche herangezogen werden, wie wir sie hier durchgeführt haben. Die Anleitungen des Herstellers sind sehr gut formuliert, so dass diese Untersuchungen sowohl im Schüler- wie auch im Demonstrationsexperiment durchgeführt werden können. Interessant sind hierbei die Versuche zur Ermittlung der maximalen Leistung und die zur Abhängigkeit vom Abstand Lampe–Solarmodul und vom Einfallswinkel. Bei den Versuchen zeigt der sehr geringe Wirkungsgrad der Solarzelle. Mit der Lampe steht eine kontinuierliche Lichtquelle zur Verfügung, die mit der tatsächlichen mittleren Sonneneinstrahlung in Deutschland wenig gemein hat; die Intensität der Sonneneinstrahlung erreicht höchstens an sehr guten Sommertagen die Werte der Lampe, zudem strahlt die Lampe senkrecht auf das Solarmodul, was großtechnisch eben nur durch eine Nachführung realisierbar ist.

Am Ende der Versuche sind solche Betrachtungen sicherlich sinnvoll, denn sie vermitteln nicht nur Ansätze zur Kritik an regenerativen Energien, sondern schulen auch das Hinterfragen von dem Modellcharakter einiger Experimente. Vielleicht kann man auch noch auf die Energiebilanz einer Solarzelle eingehen: Erzeugt eine Solarzelle während ihrer Lebensdauer tatsächlich nennenswert mehr Energie, als bei ihrer Herstellung verbraucht wurde? Hierbei kann den Schülern auch vermittelt werden, dass nicht allein das Funktionsprinzip sondern wesentlich die Frage der Herstellungsverfahren, des Wartungsaufwands, der Lebensdauer, etc. Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und energetische Sinnhaftigkeit bestimmter Technologien haben.

Als Alternative zur Erzeugung elektrischer Energie können dann noch andere Verfahren wie Wind- und Wasserkraft oder geothermische Energie herangezogen und mit den gleichen Fragestellungen untersucht werden. Somit würde ein breiter Zugang zum Thema gewährleistet sein.

4.2 Zwischenspeicherung der gewonnenen Energie

Das Experimentiermodell zeigt als Möglichkeit zur Zwischenspeicherung die Kombination von Elektrolyseur und Brennstoffzelle auf. In der Chemie der Klasse 9 ist die Behandlung von Redox-Reaktionen vorgesehen, so dass zu erwarten ist, dass die Schülerinnen und Schüler die chemischen Prozesse in den Bauelementen verstehen. Meist kennen sie einen einfachen Elektrolyseur auch schon aus dem Chemieunterricht und sind in der Lage, die dort ablaufenden Prozesse auch rudimentär elektrochemisch zu erklären. Da die Brennstoffzelle das Prinzip eigentlich nur umkehrt, sind beide Bauteile für die Schülerinnen und Schüler funktional konsistent erklärbar.

Sicherlich ist es notwendig, auf die Frage einzugehen, warum man bei der Brennstoffzelle eine Membran einsetzt und keine Knallgasreaktion ablaufen lässt. Dies kann als Einstieg für die im Begleitmaterial und anderen Büchern geschilderten Hintergrundinformationen zu verschiedenen Methoden dienen. Die Wasserstofftechnologie ist ein sehr aktuelles Forschungsgebiet,

²Ein Vorschlag findet sich z.B. bei LICHTENBERG [1] und FISCHLER [2].

daher sind Bezüge zu aktuellen Ergebnissen sicherlich leicht herzustellen.

Leider endet die elektrochemische Betrachtung der Elektrolyse im Chemieunterricht der Sekundarstufe I bei der Betrachtung der Elektronentransfers, so dass es schwierig sein dürfte, auf die im Begleitmaterial genannten notwendigen Spannungen einzugehen. Die dazu nötige Thermodynamik sowie weitere elektrochemische Grundlagen sind Stoff der Sekundarstufe II. Vielleicht kann man hier einen Rückbezug setzen und die Wasserstofftechnologie erneut aufgreifen.

Im Experimentiermodell ist die Zwischenspeicherung des Wasserstoffs in Form einer Tanktrappe angedeutet. Hier bietet sich ein Vergleich dieser Technologie zu anderen Zwischenspeicherkonzepten, z.B. den Pumpspeicherwerken, an. Der Vergleich kann an der Erstellung der Energieflussdiagramme vorgenommen werden. Diese sollten möglichst nah an der Realität formuliert werden und plausible Werte für die Energieverluste zur Speicherung und zum Transport enthalten. Ein Vergleich der entsprechenden angenommenen Zahlenwerte von Gegnern und Befürwortern der Anwendung der Technologie (was sind also die realistischen Werte?), die sich durch Internetrecherche o.ä. ermitteln ließen, oder allgemein das Auffinden verschiedener angenommener Werte in der Recherche, würde den Schülern noch einmal verdeutlichen wie abhängig der Ausgang der öffentlichen Diskussion von diesen Parametern ist, bzw. werden kann.³ Wenn man dazu noch die verschiedenen Methoden zur Gewinnung regenerativer Energien vorschaltet, haben die Schülerinnen und Schüler ein Instrument, mit dem sie die verschiedenen Technologien physikalisch fundiert bewerten können. Spannend wäre zum Abschluss des Themenblocks eine Diskussionseinheit, bei der die Schülerinnen und Schüler Stellung zu regenerativen und konventionellen Methoden nehmen können.

4.3 Resümee

Das Experimentiermodell bietet reichlich Ansätze für die Verwendung im Themenblock Regenerative Energien. Die einzelnen Versuche sind weitgehend voneinander unabhängig und können als Modul verwendet werden. Das gute Begleitmaterial, das die wesentlichen Aspekte zum Verständnis von Solarzelle, Elektrolyseur und Brennstoffzelle knapp aber nicht zu kurz zusammenfasst, ergänzt diese Module. Inwieweit und in welcher Zahl nun Versuche durchgeführt werden, hängt sicherlich von der zur Verfügung stehenden Zeit und vom Leistungsniveau der Klasse ab. Prinzipiell lässt sich mit diesem Material und einigen anderen Quellen zu anderen Methoden ein guter Überblick über den Themenblock vermitteln. Die geringen Kosten des Experimentiermodells oder anderer vergleichbarer Einheiten sprechen ebenfalls für sich.

Literatur

- [1] Lichtfeld, Michael. *Sprechen, Denken und Handeln von Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht*. In: Zur Didaktik der Physik und Chemie. GpPC, Kiel. 1993. Seiten 127-158.
- [2] Fischler, Helmut. *Quantenphysik in der Schule*. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel. 1992.

³als Beispiel kann hier auch die Kampagne des Spiegels gegen Windenergie im Jahr 2004 und die entsprechenden Gegenreaktionen dienen, die sich eben auf der Ebene von Annahmen verschiedener Parameter gründete

A Tabellen der Messwerte

U / V	I / mA
0	0
0,492	0,27
0,990	0,71
1,506	1,48
1,99	3,02
2,51	7,94

U / V	I / mA
3,03	38,9
3,19	74,2
3,40	176,1
3,61	395
3,79	681
3,99	1136

Tabelle 1: Tabelle der Messwerte zur Ermittlung der Dunkelkennlinie

R/Ω	U/V	I/mA	P/mW
0	0,12	340	40,80
1	0,48	337	161,76
2	0,81	334	270,54
3	1,14	330	376,20
4	1,47	329	483,63
5	1,79	326	583,54
6	2,10	324	680,40
7	2,37	316	748,92
8	2,53	298	753,94
9	2,61	275	717,75
10	2,66	254	675,64
11	2,70	235	634,50

R/Ω	U/V	I/mA	P/mW
12	2,73	219	597,87
13	2,75	204	561,00
14	2,77	191	529,07
15	2,79	179	499,41
20	2,84	138	391,92
30	2,89	91,8	265,30
40	2,91	69,5	202,24
50	2,92	56,2	164,10
150	2,96	18,38	54,41
250	2,96	11,33	33,54
350	2,96	8,21	24,31

Tabelle 2: Tabelle der Messwerte zur Ermittlung der Hellkennlinie

d / cm	U / V	I / mA	P / mW
50	3,22	133	428,26
60	3,16	105	331,80
70	3,08	88	271,04
80	3,03	75	227,25
90	3,03	61	184,83
100	2,98	54	160,92
110	2,95	48	141,60
120	2,92	43	125,56
130	2,86	38	108,68
140	2,82	34	95,88
150	2,83	30	84,90

Tabelle 3: Tabelle der Messwerte zur Abhängigkeit der Solarmodulleistung von der Lichtintensität

$\alpha / ^\circ$	U / V	I / mA	P / mW
0	3,18	134	426,12
10	3,16	134	423,44
20	3,15	126	396,90
30	3,13	115	359,95
40	3,10	100	310,00
50	3,05	78	237,90
60	2,97	52	154,44
70	2,84	23	65,32
80	2,57	14	35,98
90	2,54	3	7,62

Tabelle 4: Tabelle der Messwerte zur Abhängigkeit der Solarmodulleistung vom Einfallswinkel

U / V	I / mA	U / V	I / mA
0	0	1,8	6,68
0,5	0	1,9	18
1,03	0,04	2,02	40
1,47	0,19	2,1	73
1,59	1,65	2,2	129
1,72	2,37	2,33	235

Tabelle 5: Tabelle der Messwerte zur Ermittlung der Kennlinie des Elektrolyseurs

R / Ω	U / V	I / mA
600	0,90	1,45
400	0,88	2,11
200	0,85	4,01
100	0,82	7,45
80	0,82	10,0
60	0,81	13,0
40	0,79	18,9
20	0,76	35,7
10	0,73	64,2

R / Ω	U / V	I / mA
9	0,72	69,7
8	0,72	76,3
7	0,71	84,4
6	0,70	94,6
5	0,69	107,5
4	0,67	124,6
3	0,65	150
2	0,63	184

Tabelle 6: Tabelle der Messwerte zur Ermittlung der Kennlinie der Brennstoffzelle