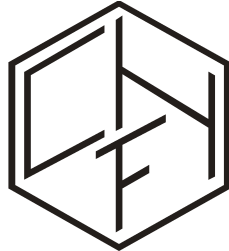


Institut Dr. Flad



Projektarbeit

Solarzellen nach Pflanzenart

Patricia Bartz

und

Benedetto Vassallo

- Lehrgang 62 -

Betreuung: Annegret Pfeiffer

Schuljahr 2012/13

Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort.....	3
2 Danksagungen.....	3
3 Zusammenfassung.....	3
4 Summary.....	4
5 Geschichte der Grätzelzelle.....	4
6 Lebenslauf Prof. Dr. Grätzel.....	5
7 Einleitung.....	5
8 Physikalische Grundlagen.....	6
8.1 Photoelektrischer Effekt.....	8
8.2 Der p-n-Übergang.....	8
8.3 Anwendung des p-n-Übergangs.....	11
9 Aufbau und Funktion der Grätzel-Solarzelle.....	12
10 Aufbau der Siliziumzelle.....	13
10.1 Vergleich der Siliziumzelle mit der Grätzelzelle.....	15
11 Photosynthese allgemein.....	16
11.1 Reaktionszentren der Pflanze.....	16
11.2 Photoinduzierte Elektronenübertragung.....	17
11.3 Unerwünschte Nebenreaktionen.....	17
11.4 Vergleich der Grätzelzelle mit der Photosynthese.....	18
12 Vorbereitung der experimentellen Messungen.....	19
12.1 Material und Gerätschaften zur Ermittlung der Messreihen.....	19
13. Experimenteller Aufbau der Grätzelzellen.....	20
13.1 Messreihen.....	24
13.2 Ergebnisdiskussion.....	26
13.3 Fazit.....	26
Literaturverzeichnis.....	27
Anlagen.....	28

1. Vorwort

Diese Projektarbeit wurde während unserer Ausbildung am Institut Dr. Flad in Stuttgart verfasst.

Es konnten einige Messreihen durchgeführt und zum Vergleich gestellt werden. Die Durchführung und Messergebnisse finden Sie im entsprechenden Kapitel.

Die eingefügten Bilder und Graphiken in dieser Dokumentation sind selbstständig erstellt worden, es sei denn, sie wurden mit entsprechender Quelle gekennzeichnet.

2. Danksagungen

Hiermit möchten wir allen Personen danken, die an diesem Projekt mitgewirkt und uns unterstützt haben, allen voran Herrn Wolfgang Flad, welcher uns Ausbildung und Projektarbeit ermöglichte.

Unser besonderer Dank gilt Frau Annegret Pfeiffer, die uns immer mit gutem Rat zur Seite stand und uns verständnisvoll betreut hat.

Desweiteren bedanken wir uns bei allen Mitarbeitern des Instituts Dr. Flad für die Bereitstellung der Geräte und des Labors für den praktischen Teil der Projektarbeit und die Aufsicht an diversen Samstagen.

3. Zusammenfassung

Mit diesem Aufsatz widmeten wir uns der Elektrizitätsgewinnung aus der Solarenergie, welches nach wie vor ein Thema von höchster Aktualität und Relevanz ist.

Im theoretischen Teil beschäftigten wir uns sowohl mit der Silizium-Solarzelle als auch mit der Grätzel-Solarzelle. In Hinblick auf Letztere widmeten wir uns der biologischen Photosynthese, welche die Inspiration und Motivation Professor Grätzels bei der Konstruktion war.

Der praktische Teil beschäftigt sich mit dem Bau von Grätzelzellen und dem Vergleich diverser Fruchtsäfte in Hinblick auf die Leistung.

Das Ziel der praktischen Arbeit war ein Workshop zum Bau einer Grätzel-Solarzelle für Mittel- und Oberstufenschüler.

Insgesamt hoffen wir mit dieser Arbeit das Interesse an erneuerbaren Energien und der Nutzung von Solarenergie zu wecken und darüber hinaus das Verständnis dafür übermitteln zu können.

4. Summary

With this essay we devoted ourselves to the generation of electricity out of solar-energy, which is a topic of highest actuality and relevance.

The subjects of our theoretical work were the silicium- and Grätzel-solar-cells. In view of the Grätzel-solar-cell we had to deal with the biological photosynthesis, which was the inspiration and motivation of Professor Grätzel while constructing his cell.

In our practical work we dealt with the construction of Grätzel-solar-cells and the comparison of different fruit juices in view of their performance.

Our target was to create a workshop for the construction of Grätzel-solar-cells for teenagers.

All in all we hope to draw interest in renewable energies and the usage of solar-energy to pass understanding for this topic.

5. Geschichte der Grätzelzelle

Prof. Dr. Michael Grätzels Forschungsgebiet in den frühen 1980er Jahren an der Eidgenössischen

Technischen Hochschule in Lausanne, Schweiz, war eine neuartige Solarzelle welche auf Farbstoffbasis arbeiten und eine von der Natur inspirierte Alternative zur Siliziumzelle darstellen sollte.

Sein Vorbild war die natürliche Photosynthese bei der das Chlorophyll unter Sonneneinstrahlung Elektronen freisetzt, welche durch chemische Reaktion chemische Energie in Form von Glucose darstellen.

Da die freigesetzten Elektronen das Herzstück der Zellen sind ist das Ganze ein bionisches Verfahren.

1988 wurde der erste Prototyp getestet und die erste Zelle 1991 fertiggestellt. Patentiert wurde die Zelle 1992.

Der Wirkungsgrad beträgt nur ca. 11% (Siliziumzelle 25%), allerdings ist die Grätzelzelle nur halb so teuer wie eine Siliziumzelle und kann bei schlechten Lichtverhältnissen effizienter arbeiten.

6. Lebenslauf Prof. Dr. Grätzel^[4]:

11.05.44	in Dorfchemnitz (Sachsen) geboren
1968	Diplomchemiker (FU Berlin)
1971	Promotion PhD in Physikalischer Chemie, TU Berlin
1969 –1972	Wissenschaftlicher Assistent, Hahn-Meitner-Institut Berlin
1972 - 1974	Post Doctoral Fellow, Univ. Notre Dame, Indiana, USA
1974 - 1976	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Hahn-Meitner-Institut Berlin
1975 – 1976	Dozent, Photochemie und Physikalische Chemie, FU Berlin
1977 - 1981	Außerordentlicher Professor für Physikalische Chemie, EPF Lausanne
1981 - heute	Professor, Direktor des Labors für Photonik und Grenzflächen, EPF Lausanne

7. Einleitung

In der heutigen Zeit, wo man sicher weiß, dass die Quellen der fossilen Brennstoffe irgendwann versiegt sein werden, ist die Energiegewinnung aus Sonnenlicht ein wichtiges Thema geworden und gewinnt zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der immer größer werdenden Knappheit ist mit großer Sicherheit eine ständige Preiszunahme bezüglich der Rohstoffe zu erwarten. Mit der stetig wachsenden Bevölkerungsrate steigt auch der Energiebedarf. Aber nicht nur deshalb beschäftigt man sich heutzutage vermehrt mit alternativen Wegen zur Energiegewinnung. Durch die Verbrennung der fossilen Brennstoffe wird auch das Klima immens beeinflusst, sehr zum Nachteil unserer Umwelt.

Betrachten wir einmal die Quellen der globalen Energiegewinnung im Jahre 2007:

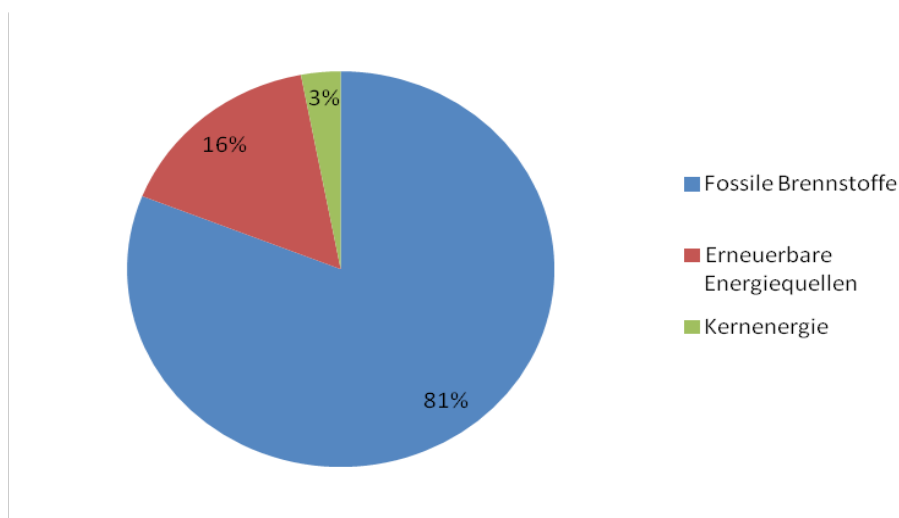


Abb.1: Ressourcen zur globalen Energieversorgung

Das Diagramm zeigt die prozentuale Nutzung der hier genannten Energiequellen für die globale Energieversorgung. Dabei ist zu erkennen, dass die meiste Energie aus fossilen

Brennstoffen gewonnen wird. Die erneuerbaren Energiequellen tragen mehr als die fünffache Menge zur Energieversorgung bei als die Kernkraftwerke. Der Oberbegriff „Erneuerbare Energiequellen“ beinhaltet unter anderem die Energiegewinnung aus Solarkraft, Wasserkraft, Windkraft sowie Biomasse wie zum Beispiel Mais.

Hier Verhältnis der Energiequellen für die deutschlandweite Energiegewinnung im Jahre 2009:

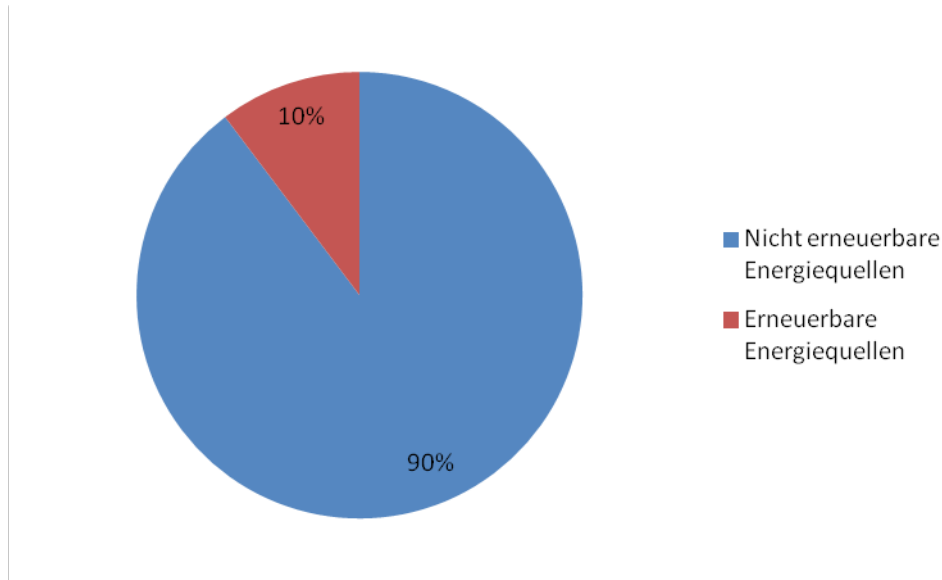


Abb. 2: Ressourcennutzung zur deutschlandweiten Energieversorgung

In Deutschland werden, im Vergleich zum globalen Anteil, die erneuerbaren Energiequellen noch weniger in Anspruch genommen, sie werden sogar am wenigsten frequentiert. Hauptsächlich werden Mineralöle und Erdgas für die Energiegewinnung genutzt.

Dabei ist das Prinzip der Energiegewinnung aus Solarkraft ebenso unkompliziert wie profitabel, mit dem zusätzlichen Nebeneffekt, die Umwelt zu schonen. Ein höherer Nutzungsanteil an erneuerbaren Energiequellen sollte deshalb auf jeden Fall als Ziel gesetzt werden.

Es gibt verschiedene Medien, mit deren Hilfe Solarenergie gewonnen werden kann. Die bekannteste ist die Solarzelle auf Siliziumbasis. Eine Neuheit dagegen ist die Grätzel-Zelle, die nach ihrem Erfinder benannt ist. Im weiteren Verlauf der Dokumentation gehen wir auf Aufbau, Funktionsweise und Wirkungsgrad der beiden genannten Solarzellen ein, setzen diese in Vergleich und erläutern im Anschluss unsere praktischen Erfahrungen bezüglich dem Bau und den durchgeführten Messreihen mit mehreren Grätzel-Zellen.

8. Physikalische Grundlagen

Der Mensch kann nur einen bestimmten, sehr kleinen, Bereich im Spektrum der Solarstrahlung wahrnehmen. Dieser liegt im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780nm.

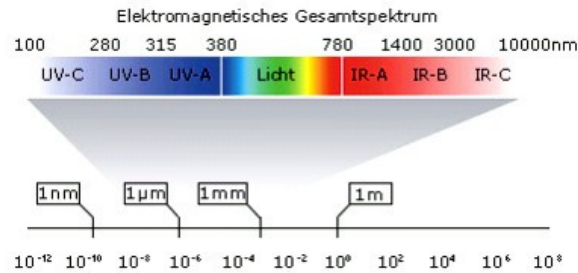


Abb. 3: Gesamtspektrum elektromagnetischer Strahlung^[11]

Elektromagnetische Wellen definieren sich über folgende Parameter:

- Ausbreitungsgeschwindigkeit c in $\frac{m}{s}$
- Wellenlänge λ in $[m]$
- Frequenz ν in $\frac{1}{s}$

Aus den einzelnen Parametern ergibt sich folgende grundlegende Formel:

$$c = \nu * \lambda$$

In einem Spektrum ist die elektromagnetische Strahlung bezüglich deren Wellenlängen sortiert. Bei UV-Strahlung, wie sie von der Sonne bekannt ist, ist ein solches Spektrum eher ungeeignet um die Strahlung zu beschreiben. Hierbei betrachtet man die Eigenschaften einzelner Teilchen, Photonen genannt, um einen Überblick zu bekommen. Dafür wird jedem einzelnen Photon eine Energie zugeordnet bei einer bestimmten Frequenz.

Dabei sind folgende Parameter von Bedeutung:

- Energie E
- Proportionalitätskonstante $h = 6,6260755 * 10^{-35}$ [Js]
- Frequenz ν = bekannt

Aus den einzelnen Parametern ergibt sich folgende Formel:

$$E = h * \nu$$

Die Proportionalitätskonstante h ist auch bekannt als Plank'sches Wirkungsquantum. Sie wurde im Jahre 1900 von Max Plank eingeführt, als dieser Versuche zum Strahlungsverhalten schwarzer Körper durchführte. Er setzte dabei voraus, dass eine Strahlung bei einer gleichbleibenden und bekannten Frequenz nur in einer bestimmten Menge an Energie absorbiert werden kann.

8.1 Photoelektrische Effekte

Die Reaktionsprozesse zur Energiegewinnung mit Hilfe von Solarzellen bezeichnet man als photoelektrischer Effekt. Man unterscheidet zwischen den folgenden Arten:

- Äußerer Effekt
- Innerer Effekt
- Photovoltaischer Effekt

Alle Arten dieser Effekte haben gemeinsam, dass ein Photon Energie an ein Elektron überträgt. Beim äußeren Effekt muss für die Energieübertragung vom Photon auf das Elektron eine Mindestmenge an Energie zuvor aufgebracht werden. Die Elektronen, die bei der Energieübertragung in den angeregten Zustand übergehen, verlassen das Trägermaterial mit kinetischer Energie. Dadurch wird Ladungstrennung verursacht, welche von der Frequenz bzw. Wellenlänge abhängig ist. Beim inneren Effekt befinden sich die Elektronen in einem Festkörper, der nur wenig leitet. Die Photonen verursachen, dass die Elektronen auf ein energetisch höheres Niveau gelangen, sodass der Festkörper besser leitet. Der photovoltaische Effekt basiert auf dem inneren Effekt, aber zusätzlich wird ein p-n-Übergang angelegt, an welchem die Ladungstrennung stattfindet. Bei der Ladungstrennung entsteht ein elektrisches Spannungsgefälle, welches für die Umwandlung der Strahlen in elektrische Energie dient. Der photovoltaische Effekt dient als Basis für Solarzellen.

8.2 Der p-n-Übergang

Der p-n-Übergang wird definiert als Materialübergang zwischen Halbleiterkristallen mit unterschiedlicher Dotierung^[1]. Der Übergang der Dotierung beschreibt deren Wechsel von negativ (n) zu positiv (p) oder vice versa. Ein Bauelement welches diesen Vorgang nutzt wird als Halbleiterdiode bezeichnet.

Einen p-n-Übergang zeichnet die Ausbildung zweier Raumladungen aus, welche durch die Potentialdifferenzen der Donator- und Akzeptoratomene und dem sich ausbildenden entgegengesetzten elektrischen Feldes zwischen den Raumladungen zustande kommen.

Dotierte Halbleiter sind prinzipiell ungeladen, auch wenn sie unterschiedlich dotiert sind. Jedoch hat dies ein Konzentrationsgefälle der beweglichen Ladungsträger zur Folge.

Aufgrund der Konzentrationsdiffusion werden nun die Majoritätsladungsträger^[2] in das Halbleitermaterial gezogen in dem ihre Konzentration geringer ist.

Dies hat zur Folge, dass die Elektronen des n-Kristalls zum p-Kristall streben und Defektelektronen^[3] zurücklassen. Es bildet sich ein elektrisches Feld. Dieses elektrische Feld wird auch Diffusionsspannung oder Potentialdifferenz genannt. Die durch das elektrische Feld erzeugte Driftbewegung arbeitet entgegen der Diffusion und resultiert in einem Gleichgewicht aus Diffusion und elektrischer Feldkraft.

Aufgrund der Rekombination^[4] der geladenen Teilchen bildet sich eine Raumladungszone oder auch Sperrschicht^[5] aus.

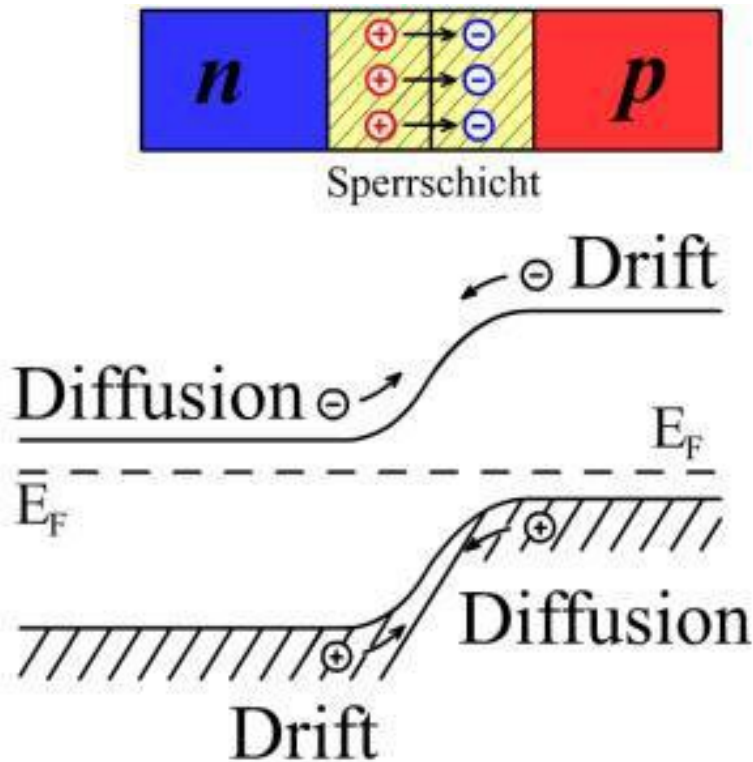


Abb. 4: Darstellung der Raumladungszone resultierend aus Drift und Diffusion^[5]

1. Dotierung: Einbringen von Fremdatomen in eine Halbleiterschicht.
2. Majoritätsladungsträger: Ladungsträgerart, welche häufiger vorkommt. Defektelektronen bei p-Dotierung und Elektronen bei n-Dotierung. Das Gegenstück wird als Minoritätsladungsträger bezeichnet.
3. Defektelektron: Elektronenloch durch Abwesenheit eines Valenzelektrons.
4. Reaktion eines positiven mit einem negativen Ladungsträger zu einem neutralen Teilchen.
5. Raumladungszone: In der Halbleitertechnik der Bereich, in dem sich Ladungsüberschuss und Ladungsmangel gegenüberstehen und ein nach außen hin neutrales Gebiet erzeugen.

Die Größe der Raumladungszone ist beeinflussbar durch die Höhe der Dotierung, die Symmetrie durch die Dotierungsdichte. So ergibt eine gleichmäßige Dotierungsdichte eine symmetrische Raumladungszone, eine ungleichmäßige Dotierungsdichte jedoch eine Verzerrung hin zum weniger stark dotierten Bereich.

Im Bändermodell ist eine Angleichung der Fermi-Niveaus^[6] der beiden Kristalle resultierend aus der Diffusion entstanden und eine Krümmung der Energiebänder^[7] (Valenzband^[8] und Leitungsband^[9]) im p-n-Übergangsbereich zu beobachten. Die Krümmung erklärt sich dadurch, dass das Fermi-Niveau konstant sein muss.

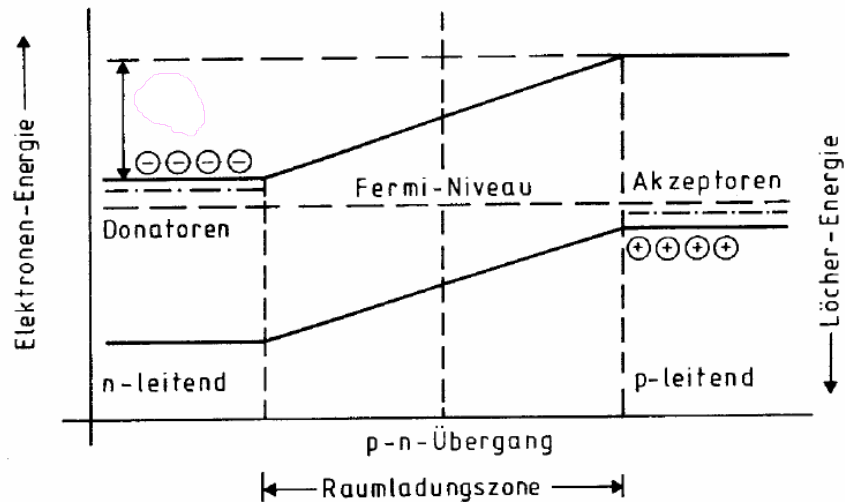


Abb. 5: Krümmung der Energiebänder am p-n-Übergang^[7].

Die zu Beginn neutralen Kristalle erfahren aufgrund der festen Ladungen eine Raumladung, die den n-Kristall zum positiven Pol und den p-Kristall zum negativen Pol machen.

Daraus folgt die von Dotierung und Material abhängige Diffusionsspannung.

Die Krümmung der Energiebänder stellt für die Ladungsträger einen Potentialwall dar, den sie überwinden müssen. Hierzu ist zusätzliche Energie nötig.

-
6. Fermi-Niveau: Höchste Energie eines Teilchens innerhalb eines Systems im Grundzustand.
 7. Energiebänder: Beschreibung von Energiezuständen in einem Kristall.
 8. Valenzband: Das höchste besetzte Energieband am Nullpunkt (0 K), Sitz der Valenzelektronen.
 9. Leitungsband: Liegt bei 0 K noch über dem Valenzband. Bei Halbleitern und Isolatoren sind die Bänder getrennt und somit unbesetzt. Bei Leitern durch Überlagerung besetzt. Auf dem Leitungsband befindliche Elektronen nehmen Feldenergie auf und können sich somit bewegen, das Material leitet.

8.3 Anwendung des p-n-Übergangs

1.) Polung in Sperrrichtung:

Bei dieser Art der Polung wird der Minuspol an der p-Schicht angebracht und der Pluspol an der n-Schicht. Die Folge ist eine Verstärkung der Diffusion und damit eine größere Sperrschicht. Lediglich kleinste Ströme können durch eine derart ausgeprägte Sperrschicht fließen.

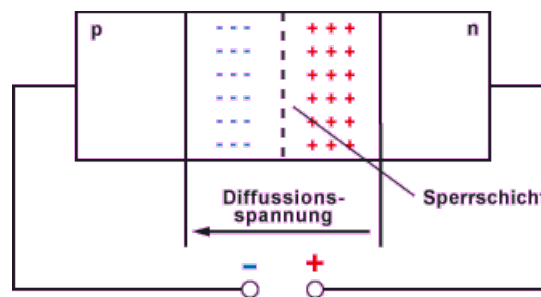


Abb. 5: Polung in Sperrrichtung^[6]

2.) Polung in Durchlassrichtung:

Hier wird der Pluspol an der p-Schicht und der Minuspol an der n-Schicht angelegt. An der Sperrschicht entsteht ein starker Überschuss freier Ladungsträger und es kann über den p-n-Übergang hinweg ein elektrischer Strom fließen. Da die Rekombination der freien Ladungsträger so gut wie unterbunden ist, wird auch die Diffusionsspannung gesenkt. Somit wird der von der Diffusionsspannung erzeugte Drift welcher entgegen der Diffusion arbeitet erniedrigt.

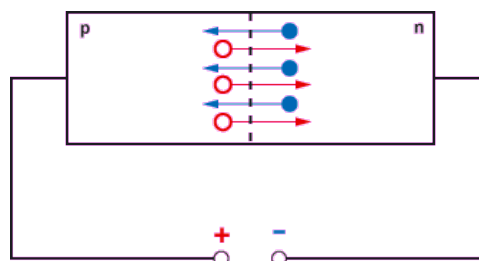


Abb. 6: Polung in Durchlassrichtung^[6]

9. Aufbau und Funktionsweise der Grätzel-Solarzelle

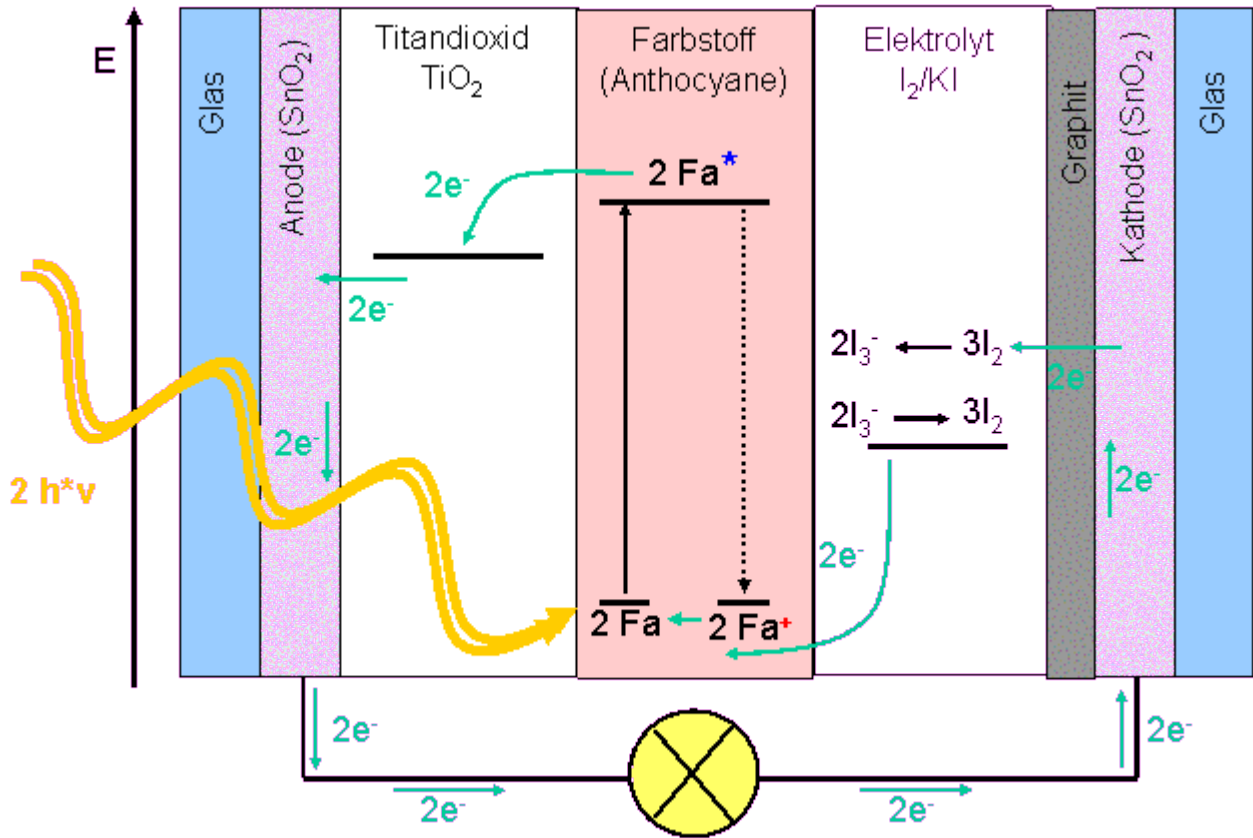


Abb. 7: Schematischer Aufbau der Grätzel-Solarzelle^[8]

Das eintreffende Sonnenlicht regt ein Elektron des Anthocyan-Farbstoffes an, welches auf ein höheres Energieniveau angehoben wird und in das nur geringfügig niedrigere Leitungsband des Titandioxids übergeht. Der Farbstoff verbleibt mit einem Elektron weniger und bildet somit ein Elektronenloch. Hiermit ist die Ladung getrennt und ein p-n-Übergang aus der Siliziumsolarzelle wird simuliert.

Der Anthocyan-Farbstoff ist der Elektronen-Donator und das Titandioxid der Elektronen-Akzeptor.

Das Titandioxid leitet sein überschüssiges Elektron über das Zinnoxid der Anode weiter an einen Verbraucher. Hier kann elektrischer Strom abgegriffen werden.

Unverbrauchte Elektronen werden über die ebenfalls mit Zinnoxid beschichtete Kathode und Graphit als Katalysator an das Iod/Kaliumiodid Elektrolyten-Redoxsystem weitergegeben.

Das entstehende Triiodid ist negativ geladen und gibt sein überschüssiges Elektron an das Farbstoffmolekül mit Elektronenloch weiter. Somit wird das Triiodid wieder zum Iod oxidiert und das Farbstoffmolekül ist erneut ungeladen. Damit wird der Kreislauf abgeschlossen.

Der Wirkungsgrad beträgt ca. 10%^[1]

10 Aufbau der Siliziumsolarzelle

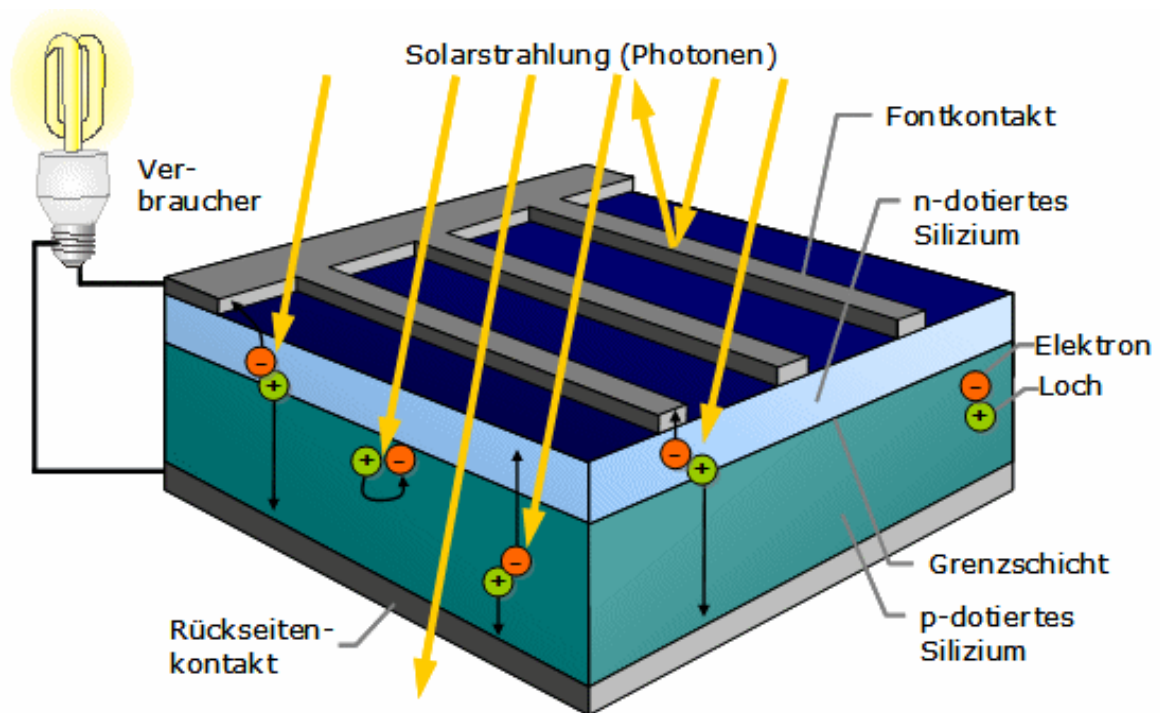


Abb. 8: Aufbau der Siliziumzelle^[3]

Die Photonen des Sonnenlichts treffen auf ein Elektron und geben ihre Energie ab. Somit wird das Elektron energetisch auf ein höheres Niveau gebracht und kann die Bandlücke^[3] somit überwinden.

Aufgrund dessen, dass der n-dotierte Bereich eine positive Raumladung aufweist wird das Elektron zum n-Bereich^[1] und somit zum Frontkontakt streben.

In gleicher Weise wird das Elektronenloch zum p-dotierten^[2] Bereich mit der negativen Raumladung und somit zum Rückseitenkontakt streben wo es mit ankommenden, freien

Elektronen rekombinieren kann welche durch eine Verbindung von Frontkontakt und Rückseitenkontakt dorthin gelangen.

Auf diese Weise entsteht ein gleichmäßiger Fluss der am Verbraucher, welcher zwischen den beiden Kontakten anliegt, eine Spannung anlegt. An dieser Stelle kann Leistung abgegriffen werden.

Da nicht alle Photonen ein Elektron anregen und der beschriebene Effekt mit der Rekombination der Ladungen konkurriert wird ein Wirkungsgrad von maximal 20% bei kommerziellen, monokristallinen Solarzellen erreicht. Der Wirkungsgrad variiert je nach Bauart der Solarzelle.

-
- 1 n-Dotierung: Bewusste Einbringung von Phosphor (5. Hauptgruppe) im Siliziumgitter (4. Hauptgruppe) um einen Elektronenüberschuss zu erzielen.
 - 2 P-Dotierung: Bewusste Einbringung von Bor (3. Hauptgruppe) im Siliziumgitter um einen Elektronenmangel (Elektronenlöcher) zu erzielen.
 - 3 Bandlücke: Differenz der Energieniveaus zwischen Valenzband und Leitungsband

10.1 Vergleich der Siliziumzelle mit der Grätzelzelle

Die konventionelle Siliziumsolarzelle wie auch die Grätzelzelle generieren elektrischen Strom aus Solarenergie. Somit wird dieselbe Aufgabe lediglich auf zwei verschiedene Arten bewältigt.

Während das Funktionsprinzip der Siliziumzelle sich auf rein physikalisch-chemische Prozesse stützt, wurde die Grätzelzelle von der natürlichen Photosynthese inspiriert und ist somit aufgrund der Nachahmung eines natürlichen Mechanismus ein Produkt der Bionik.

Die Ladungstrennung, das Herzstück bei der Gewinnung von Solarstrom, erfolgt bei herkömmlichen Siliziumzellen über den sogenannten p-n-Übergang, welcher über unterschiedliche Dotierungen der verwendeten Kristalle zustande kommt.

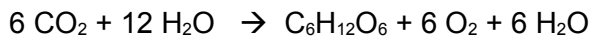
Die Grätzelzelle hingegen arbeitet mit einem Elektronenaustausch zwischen angeregten Farbstoffmolekülen und dem Titandioxid, dieser Austausch führt ebenfalls zur Ladungstrennung und simuliert somit einen p-n-Übergang.

Die nächsten Kapitel widmen sich der Erklärung und dem Vergleich der unterschiedlichen Funktionsweisen beider Solarzellen.

11 Photosynthese allgemein

Die Photosynthese ist ein Prozess, bei dem Pflanzen aus Wasser und Kohlendioxid unter Lichteinstrahlung Energie gewinnen.

Die bekannteste Reaktionsgleichung in Bezug auf die Photosynthese lautet:



Diese Formel dient jedoch nur zum einfachen Verständnis. In Wirklichkeit ist der Energiegewinnungsprozess viel komplexer und dabei spielen nicht nur chemische, sondern auch biologische und physikalische Reaktionen eine große Rolle. Sowohl Moleküle als auch Bestandteile der Pflanze und deren Organellen sind beteiligt an der Photosynthese.

11.1 Reaktionszentren der Pflanze

Die Reaktionszentren der Pflanze bestehen aus Pigmenten und Proteinen, die komplexartig miteinander verknüpft sind. Ebenfalls sind in den Zentren einzelne Cofaktoren vorhanden, die eine lichtabsorbierende Wirkung aufweisen. Die Reaktionszentren sind der Ort, an dem die Ladungstrennung stattfindet. Pro Lichtquant wird ein Elektron gleichzeitig mit einem Proton über die Membran transportiert. Dadurch entsteht innerhalb der Membran ein elektrochemisches Potential, welches in chemische Energie umgewandelt wird. Diese Energie äußert sich in Form des Stoffes ATP (Adenosintriphosphat), welcher auch im menschlichen Stoffwechselsystem eine wichtige Rolle bei der Energieproduktion spielt.

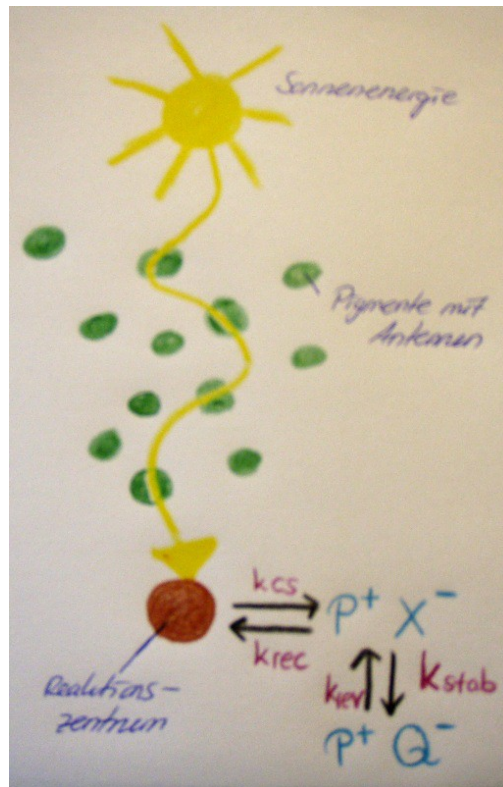


Abb. 9: Lichttransport zum Reaktionszentrum

Die Abbildung zeigt den Transportweg des einstrahlenden Lichts zum Reaktionszentrum der Pflanze. Wenn Licht von der Sonne auf eine Pflanze strahlt, wird dabei die Energie der Lichtquanten von den Pigmenten der Pflanze erfasst und absorbiert. Diese leiten die Energie der Lichtquanten über ihre Antennen weiter zu den Reaktionszentren. Da ein einzelnes Pigment eine große Entfernung zum Reaktionszentrum aufweist, muss der Energietransport in mehreren Zwischenschritten, also über mehrere Pigmente, erfolgen. Der Transport zum Reaktionszentrum muss in einem kürzeren Zeitraum erfolgen, als die Zeit, in welcher der angeregte Zustand anhält, sodass die transportierte Energie im Reaktionszentrum für die Ladungstrennung verbraucht werden kann. Im Reaktionszentrum befindet sich ein Elektronendonator. Das ankommende Licht versetzt ein Elektron des Donators vom Grundzustand in den angeregten Zustand. Der Elektronendonator liegt nun als P^+ vor. Das Elektron wird von einem primären Elektronenakzeptor aufgenommen, welcher anschließend als X^- vorliegt. Die Geschwindigkeitskonstante k_{cs} beschreibt die Ladungstrennung und Entstehung des primären Radikalpaares. Die Geschwindigkeitskonstante k_{rec} beschreibt den umgekehrten Prozess also die Rekombination der Ladung. Desweiteren findet ein weiterer Elektronentransfer statt, bei dem das primäre Radikalpaar zum sekundären Radikalpaar energetisch stabilisiert wird. Dabei wird ein sekundärer Elektronenakzeptor benötigt, der anschließend als Q^- vorliegt. Die Geschwindigkeitskonstante k_{stab} beschreibt den Vorgang der Stabilisierung und die Geschwindigkeitskonstante k_{rev} den umgekehrten Vorgang.

Allerdings würde das Potential zur Lichtgewinnung der Reaktionszentren nicht ausreichend genutzt, wenn die ohnehin wenig vorhandenen Cofaktoren alleine für die Energielieferung zuständig wären. Dies hätte nämlich zur Folge, dass die Pflanze nicht ausreichend mit Licht versorgt werden könnte. Daher haben alle pflanzlichen Organismen,

die in der Lage sind Photosynthese zu betreiben, sogenannte Antennen entwickelt, die die absorbierte Energiemenge auf schnellen Transferwegen zu den Reaktionszentren weiterleiten können. Somit wird gewährleistet, dass das Potential der Reaktionszentren ausreichend genutzt wird.

11.2 Photoinduzierte Elektronenübertragung

Ein Energietransfer findet zwischen dem Donator und dem Akzeptor statt. Dabei wird die Energie von dem bereits angeregten Donator auf den Akzeptor übertragen. Für den Transport von Energie gibt es unterschiedliche Methoden. Davon sind zwei von ganz besonderer Bedeutung für Systeme, die sich der Photosynthese bedienen, nämlich der Förster-Energietransfer und der Dexter-Energietransfer.

Der Förster-Energietransfer beruht auf den Dipol-Dipol-Wechselwirkungen zwischen dem Donator und dem Akzeptor. Dabei geht ein Elektron des Donators von dem angeregten Zustand in den Grundzustand über. Gleichzeitig wird ein Elektron des Akzeptors von dem Grundzustand in den angeregten Zustand versetzt. Bei diesem Vorgang werden keine Elektronen zwischen Donator und Akzeptor ausgetauscht. Diese Art von Energietransfer eignet sich gut für weitere Entfernungen.

Der Dexter-Energietransfer beruht auf einer direkten Interaktion zwischen Donator und Akzeptor. Während ein Elektron aus dem angeregten Zustand des Donators zum angeregten Zustand des Akzeptors übergeht, wandert ein Elektron aus dem Grundzustand des Akzeptors zum Grundzustand des Donators. Es findet also ein direkter Elektronenaustausch statt. Dies setzt jedoch voraus, dass der Abstand zwischen den beiden Partnern sehr gering ist, damit sich die Wellenfunktionen ihrer Elektronen überlappen können.

Aufgrund der hohen Entfernung zwischen Pigmenten und Reaktionszentrum, findet vermehrt die Methode nach Förster statt.

11.3 Unerwünschte Nebenreaktionen

Vom primären Radikalpaar können unerwünschte Reaktionen ausgehen, was einen Verlust der Anregungsenergie und das Absinken der photosynthetischen Effizienz zur Folge hat. Diese Nebenreaktionen sind unter anderem:

1. Rekombination des primären Radikalpaares
 - Elektron geht wieder in angeregten Zustand zurück, wäre aber nicht schlimm, weil erneut reagieren kann
 - Elektron geht in Grundzustand über
2. Spinumkehr im Radikalpaar unter Triplett-Bildung
3. Zu langsame Ladungstrennung
 - Energieverlust durch Fluoreszenz-Entwicklung aus dem Zustand P*

11.4 Vergleich der Grätzelzelle mit der biologischen Photosynthese

-

Zweifelsfrei ist die Grätzelzelle von der Photosynthese inspiriert, wie Prof. Dr. Michael Grätzel schön des Öfteren betonte.

Folgende Effekte wurden von Mutter Natur abgeschaut:

→ Das Anregen eines Farbstoffes

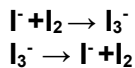
Der Farbstoff nimmt die Energie der Lichtquanten auf und ermöglicht somit einem Elektron auf ein höheres Energieniveau zu gelangen.

→ Der Transport von Ladung

Angeregte Elektronen wandern vom Donator (Farbstoff) zum Akzeptor (Titandioxid). In der Natur findet dieser Prozess zwischen zwei Chlorophyll-Molekülen statt.

→ Das Redox-System

In der Grätzelzelle fungiert die Elektrolytlösung als Redox-System.



Die Natur arbeitet mit einem Radikalsystem. Ein P680^[1] wird radikalisiert und gibt sein Elektron ab, es dient der Regeneration des Chlorophyll-Moleküls welches ein angeregtes Elektron abgespalten hatte und den Ladungstransfer ermöglichte.

Das P680⁺ Radikal wird durch einen Tyrosinrest^[2] reduziert und so der Kreislauf geschlossen.

[1] P680: Ein gepaartes Chlorophyll-a-Molekül, dient als Elektronen Donator.

[2] Tyrosinrest: Die 2-Amino-3-(4-hydroxyphenyl)-Propansäure (Tyrosin), gibt das Proton der phenolischen Hydroxy-Gruppe ab und reduziert das zuvor zum Radikal oxidierte Chlorophyll in seinen Ausgangszustand zurück.

12 Vorbereitung der experimentellen Messungen

- Stets eine Schutzbrille tragen
- Bei Augenkontakt mit den Substanzen sofort gründlich ausspülen
- Nach der Laborarbeit gründlich Hände waschen
- Achtung vor Glasbrüchigkeit einzelner Materialien

- Achtung vor Verbrennungen bei Herstellung diverser Farbstofflösungen
- Achtung vor allergischen Reaktionen mit den Farbstoff-, Elektrolyt- und sonstigen Lösungen
- Handschuhe sollten stets getragen werden
- Gefäße die Substanzen enthalten sind unmittelbar nach Gebrauch zu verschließen

12.1 Materialien und Gerätschaften zur experimentellen Ermittlung der einzelnen Messreihen

- Titandioxid-Lösung (Anatas-Modifikation)
- Glasplatten (unbeschichtet, leitfähig)
- Multimeter
- Glasspatel
- Klebeband
- Pipette
- Muffelofen
- Brenngitter
- Bleistift (Graphit-Quelle)
- Diverse Fruchtblüten und Fruchtsäfte
- Petrischale
- Büroklammern
- Elektrolyt-Lösung (KI/I₂)
- Krokodilkabel
- Taschenrechner
- Schraubendreher

13 Experimenteller Aufbau der Grätzel-Zellen

Vorbereitung:

Zunächst müssen alle Glasplatten mit Wasser gereinigt und gut getrocknet werden. Anschließend wird mit Hilfe des Multimeters die elektrisch leitfähige Seite der Glasplatten ermittelt.

Aufbau der „Min“-Elektrode:

Die Glasplatten werden jeweils an den Rändern mit Klebeband fixiert, sodass die elektrisch leitfähige Seite nach oben zeigt.

Eine kleine Menge der zuvor geschüttelten Titandioxid-Lösung wird auf die Oberfläche der Glasplatte gegeben und mit dem Glasspatel homogen verteilt, sodass eine dünne und gleichmäßige Schicht entsteht.



Abb. 10: Titandioxidbeschichtete Glasplatte

Die Platte wird entweder an Luft oder mit einem Föhn getrocknet und anschließend sämtliche Klebestreifen entfernt.

Nun muss die aufgetragene Titandioxid-Schicht auf die Platte gebrannt werden. Dies erfolgt im Muffelofen bei einer Temperatur von 500°C . Nach etwa 20 Minuten. Dabei ist zu beachten, dass die Schicht keine Braunfärbung aufweist, da sonst nicht alle organischen Bestandteile entfernt sind. Sollte dies der Fall sein, wird die Platte noch ein paar Minuten länger im Muffelofen beheizt. Die Platten müssen nach dem Heizvorgang langsam abgekühlt werden um zu verhindern dass diese brechen.

Aufbau der „Plus“-Elektrode:

Die restlichen Glasplatten werden zunächst gründlich mit Wasser gereinigt und gut getrocknet. Die elektrisch leitfähige Oberfläche wird mit einer Graphit-Schicht mit Hilfe eines Bleistiftes überzogen. Dabei ist zu beachten, dass die Oberfläche komplett geschwärzt sein muss, die Graphitschicht sollte nicht zu dünn aufgetragen werden.



Abb. 11: Graphitbeschichtete Glasplatte

Herstellung einer Farbstofflösung am Beispiel Hibiskus-Tee:

Eine kleine Menge an Hibiskusblüten wird in einer Petrischale mit siedendem Wasser übergossen. Nach kurzer Wartezeit ist der Farbstoff extrahiert. Die Farbstofflösung kann nun zum Einfärben der Glasplatten verwendet werden.



Abb. 12: Farbstofflösung aus Hibiskusblüten

Färben der „Min“-Elektrode:

Die Glasplatten werden komplett in die Farbstofflösung getaucht. Die Titandioxidschicht weist nach oben, um Kratzer und Verletzungen an der Schicht zu vermeiden.

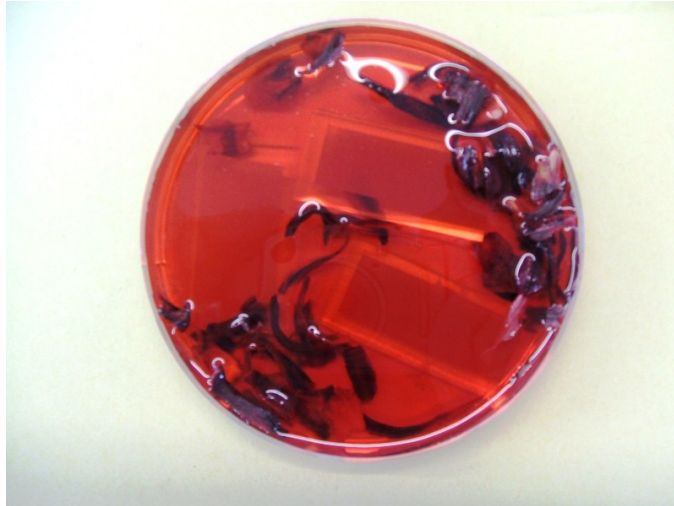


Abb. 13: Einfärben der Titandioxidschicht

Nach wenigen Minuten Wartezeit ist eine violette Färbung in der Titandioxidschicht zu erkennen. Der Farbstoff ist somit erfolgreich angebracht worden.

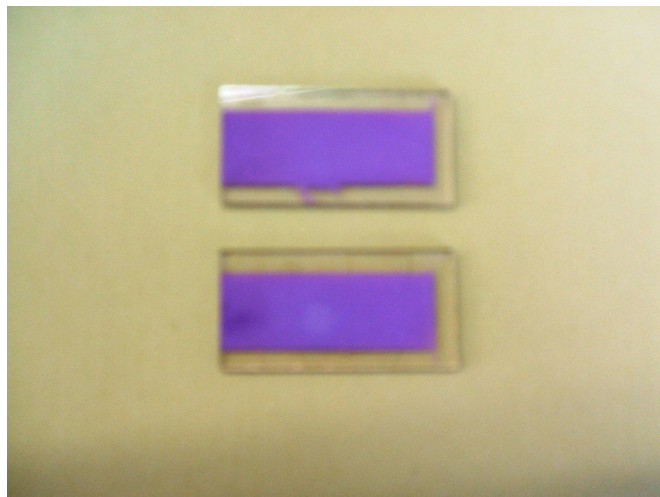


Abb. 14: Mit Farbstoff versetzte Glasplatten

Nach dem Einfärben müssen die Platten einige Minuten luftgetrocknet werden. Eine optimale Trocknung ist erreicht, wenn eine leichte Abnahme der Farbintensität auftritt.

Montage der beiden Elektroden zu einer Grätzel-Zelle:

Zunächst wird ein geeignetes Verbindungsstück angefertigt, um zu verhindern, dass die Elektroden während den anschließenden Messverfahren voneinander getrennt werden. Dafür eignen sich zum Beispiel Büroklammern.



Abb. 15: Verbindungsstück zur Befestigung der Elektroden

Die Graphitschicht der „Plus“-Elektrode wird mit einer kleinen Menge Elektrolyt-Lösung versetzt. Anschließend wird die „Min“-Elektrode auf die „Plus“-Elektrode angebracht, sodass die Titandioxidschicht ebenfalls mit Elektrolyt-Lösung benetzt wird. Hierbei ist zu beachten, dass auf beiden Seiten eine kleine Fläche frei bleibt, um anschließend die Zellen in Reihe zu schalten. Die Elektroden werden mit einer Büroklammer befestigt.

Reihenschaltung der Grätzelzellen:

An den freiliegenden Flächen der einzelnen Elektroden werden die Zellen jeweils über Krokodilkabel miteinander verbunden. Die mit Farbstoff versetzte Elektrode muss nach oben zeigen, da diese in Kontakt mit der Lichtquelle gebracht werden muss. Die Plus-Elektrode der vorigen Zelle wird mit der Min-Elektrode der nächsten Zelle verbunden, bis alle Zellen miteinander auf diese Weise verbunden sind.

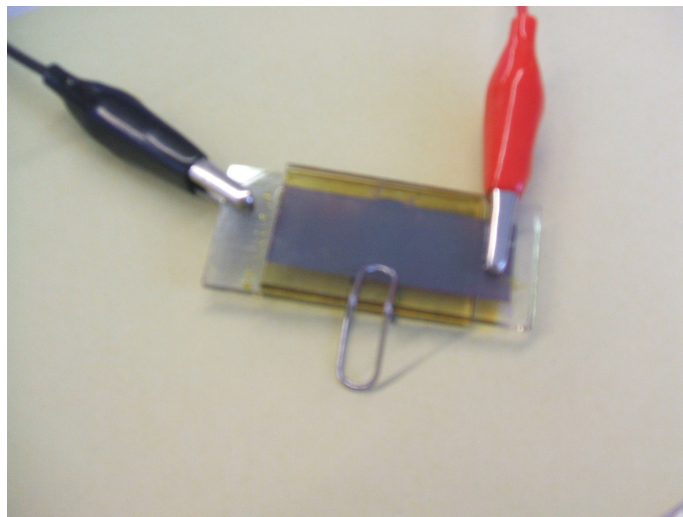


Abb. 16: Montierte Elektroden einer Grätzelzelle

Inbetriebnahme eines Taschenrechners:

Der Taschenrechner wird aufgeschraubt, sodass die Batterie freiliegt. Die Min-Elektrode der ersten Zelle aus der Reihenschaltung wird mit dem Minus-Pol der Batterie über ein Krokodilkabel verbunden. Die Plus-Elektrode der letzten Zelle aus der Reihenschaltung wird mit dem Plus-Pol der Batterie über ein Krokodilkabel verbunden. Die in Reihe geschalteten Zellen werden nun von einer konstanten Energiequelle bestrahlt. Der Taschenrechner kann nun verwendet werden.

Ermittlung der Leistung einer einzelnen Zelle:

Die beiden Elektroden einer Zelle werden über Krokodilkabel an ein Multimeter angeschlossen. Die energetische Leistung wird am Multimeter angezeigt.

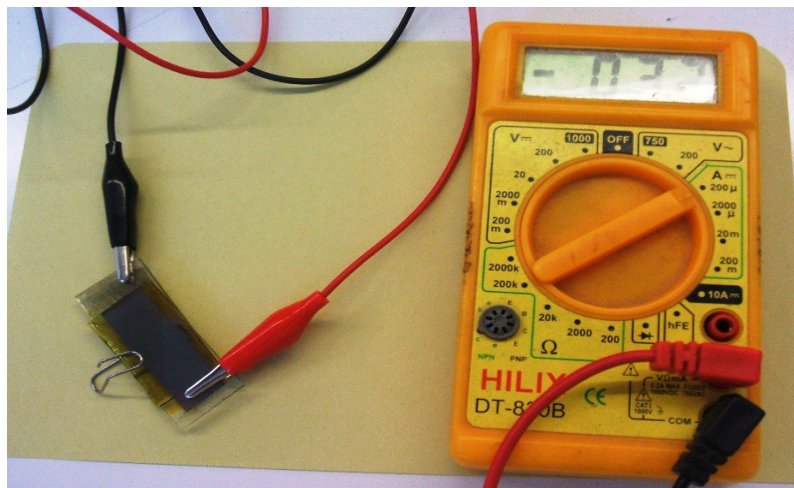


Abb. 17: Leistung einer einzelnen Zelle

13.1 Messreihen

Brombeersaft

Pflanzenfarbstoff: Anthocyane

Messergebnisse: Zelle 1-6 [mV]

305
308
307
306
309
304

Mittelwert: 307 mV

Sämtliche Zellen wurden mit einem 120 Watt Scheinwerfer ca. 1 Minute lang bestrahlt, auch in folgenden Messreihen!

Schwarzer Johannisbeersaft

Pflanzenfarbstoff: Anthocyane

Messergebnisse: Zelle 1-6 [mV]

232
225
228
220
224
229

Mittelwert: 226 mV

Hibiskusblütentee

Pflanzenfarbstoff: Anthocyane

Messwerte: Zellen 1-6 [mV]

259 260
252 270
252 255

Mittelwert: 258 mV

Himbeersaft

Pflanzenfarbstoff: Anthocyane

Messwerte: Zellen 1-6 [mV]

195 188
190 194
192 190

Mittelwert: 192 mV

Karottensaft

Pflanzenfarbstoff: Carotinoide

Messwerte: Zellen 1-6 [mV]

70 68
66 72
70 74

Mittelwert: 70 mV

13.2 Ergebnisdiskussion

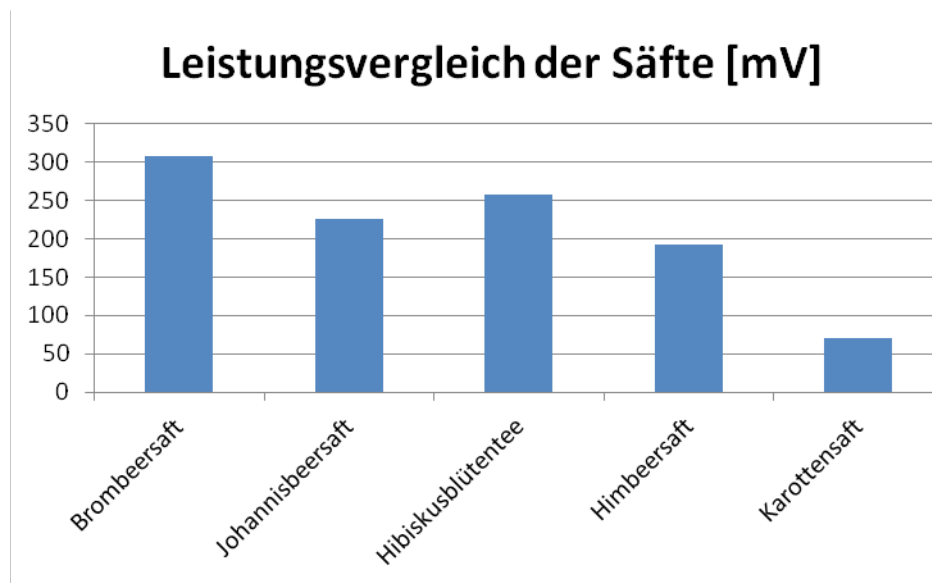


Abb. 17: Übersicht der energetischen Leistung der einzelnen Säfte

Bei der Auswertung unserer ermittelten Leistungswerte ist deutlich zu erkennen, dass mit dem Brombeersaft und dem Hibiskusblütentee die beste Leistung erzielt werden konnte. Mit der Verwendung von Karottensaft konnte im Vergleich nur eine schlechte Leistung ermittelt werden. Es wurde auch eine Messreihe mit Kaffee durchgeführt, jedoch waren die erhaltenen Messergebnisse nicht ausreichend leistungsversprechend, sodass diese von uns nicht im Verhältnis zu den anderen Produkten dargestellt wurden.

13.3 Fazit

Der Bau einer eigenen Solarzelle bzw. die Inbetriebnahme mehrerer, in Reihe geschalteter Zellen brachte und viel Freude und eine ganze Menge Erfahrungswerte. Die Messreihen wurden mit großem Interesse unsererseits durchgeführt und ausgearbeitet. Die Zusammenarbeit im Team verlief stets in gutem Maß. Durch die Projektarbeit wurde unser tägliches Verhalten bezüglich des Energieverbrauchs immens beeinflusst. In Zukunft werden wir versuchen, noch stärker diesen zu senken und bewusster mit Energie umzugehen.

Literaturverzeichnis

Bücher:

- [1] HÄDER, Donat-P. et al. (1998): Photosynthese. 1. Auflage. ISBN 3-13-115021-1. Tübingen: Thieme Verlag
- [2] MEYER, Thomas (2004): Die Grätzelzelle – Die photochemische Solarenergiewandlung im Vergleich zur Photovoltaik auf Siliziumbasis. 1. Auflage. ISBN 978-3-640-30099-0. GRIN Verlag
- [3] QUASCHNING, Volker, (2009): Erneuerbare Energien und Klimaschutz, 2. Auflage, ISBN 978-3-446-41961-2, München: Carl Hanser Verlag

Online-Quellen:

- [4] <http://www.science-blog.at/Autor/Michael+Grätzel> (05.01.13). Autor unbekannt: Michael Grätzel
- [5] http://de.wikipedia.org/wiki/P-n-%C3%9Cbergang#cite_ref-2 (02.01.13). Autor unbekannt: p-n-Übergang
- [6] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/0112072.htm> (03.01.13). SCHNABEL, Patrick: pn-Übergang (Halbleiterdiode)
- [7] <http://www.ie.rub.de/download/solarzelle.pdf> (18.01.13). WAGNER, Prof. Dr.-Ing. H.-J.: Kennlinien einer Photovoltaikzelle
- [8] http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/cnat/kunststoffe/solarzelle_e_1.htm (28.12.2013). WAGNER, Walter: Herstellen einer organischen Solarzelle
- [9] <http://www.solaronix.com/technology/dyesolarcells/#efficiency> (28.12.2013). SOLARONIX SA: Dye Solar Cells
- [10] <http://www.heise.de/tr/artikel/31-Prozent-Wirkungsgrad-sind-mit-intensiver-Forschung-drin-1027456.html> (26.01.2013). SCHWAN, Ben: 31 Prozent Wirkungsgrad sind mit intensiver Forschung drin. 23.06.2010
- [11] http://www.leyco.de/Wassertechnik_Anlagenbau/UV-Desinfektions-Anlagen.php (13.01.2013). LEYCO Wassertechnik GmbH: Ultraviolett (UV)-Strahlung