

F A C H A R B E I T

aus dem Fach

P H Y S I K

Thema: Optimierung einer Photovoltaikzelle

Verfasserin: Katharina Pfeffer

Kursleiter: StR Christian Wagner

Abgabetermin:

Bewertung:

Facharbeit: Punkte

Mündliche Prüfung: Punkte

Gesamtleistung: Punkte
(einfache Wertung)

.....
(Unterschrift des Kursleiters)

Inhaltsverzeichnis:

1 Einführung.....	3
2 Optimierung einer Photovoltaikzelle.....	3
2.1 Allgemeines zu einer PV- Zelle.....	3
2.1.1 Historische Entwicklung.....	3
2.1.2 Funktionsweise einer PV- Zelle.....	4
2.2 Einflussfaktoren auf die Leistung einer Solarzelle.....	8
2.2.1 Standort.....	8
2.2.1.1 Geographische Lage.....	8
2.2.1.2 Neigungswinkel.....	9
2.2.2 Wetterbedingungen.....	10
2.3 Optimierungsversuche.....	12
2.3.1 Allgemeiner Versuchsaufbau.....	12
2.3.2 Folie gegen Verschmutzung.....	14
2.3.2.1 Aufbau.....	15
2.3.2.2 Ergebnisse.....	15
2.3.2.3 Erklärung.....	16
2.3.3 Abkühlung der Zellenoberfläche durch Besprenkelung mit Wasser.....	16
2.3.3.1 Aufbau.....	16
2.3.3.2 Ergebnisse.....	18
2.3.3.3 Erklärung.....	21
2.3.3.3.1 Versuchsergebnisse.....	21
2.3.3.3.2 Versuch zur Veranschaulichung des Prisma- Effekts des Wassers.....	21
2.3.4 Abkühlung der Zellenoberfläche mit Hilfe eines Kühlkreislaufes hinter der Zelle.....	22
2.3.4.1 Aufbau.....	22
2.3.4.2 Ergebnisse.....	25
2.3.4.3 Erklärung.....	26
2.3.5 Abkühlung durch Wasserkreislauf rund um die Zelle.....	27
2.3.5.1 Aufbau.....	27
2.3.5.2 Ergebnisse.....	27
2.3.5.3 Erklärung.....	29
2.4 Gegenüberstellung.....	30
2.5 Effizienz.....	31
2.6 Ökologische und ökonomische Aspekte.....	37
2.6.1 Ökologie.....	37
2.6.2 Ökonomie.....	38
3 Ausblicke.....	40
4 Abbildungsverzeichnis.....	42
5 Literatur- und Quellenverzeichnis.....	44

1 Einführung

In der heutigen Zeit erleben die erneuerbaren Energien einen immensen Aufschwung. Schon im Jahre 2008 haben sie nach Angaben des Bundesumweltamtes schätzungsweise 14,8% des gesamten Bruttostrombedarfs gedeckt. Zu diesen Energien gehört auch die Photovoltaiktechnik. Auf vielen Dächern sind nun große Solaranlagen zu sehen. Dabei wird diese Technik auch immer häufiger in der Presse und einigen Fachzeitschriften diskutiert. Schon bald nach der großflächigen Einführung der Technik sind auch einige Nachteile deutlich geworden, sodass zum Beispiel der Ertrag einer Anlage bei zu hohen Außentemperaturen sinkt. Dieser Aspekt hat mich insofern zu dieser Facharbeit inspiriert, da dieser Effekt auch anhand der Anlage auf dem Hof meiner Familie ersichtlich ist.

2 Optimierung einer Photovoltaikzelle

2.1 Allgemeines zu einer PV- Zelle

2.1.1 Historische Entwicklung

Die grundlegende Technik der Photovoltaik (griechisch: photo = Licht, Volt = Einheit der Spannung) ist im Jahre 1839 von Alexandre Edmond Becquerel (1820- 1891) entdeckt worden [3]. Dabei hat er zwei Platinplatten, die mit einem empfindlichen Galvanometer miteinander verbunden waren, in einen flüssigen Elektrolyten getaucht. Diese Vorrichtung ist mit einem Topf zu vergleichen, der durch eine dünne Membran, die zwar Flüssigkeiten durchlässt, das Licht aber aussperrt, in zwei Hälften geteilt wird. Becquerel hat dabei auch den Deckel geteilt, sodass nach Belieben die eine oder andere Topfhälfte geöffnet werden konnte. Hat er also eine der Deckelhälften geöffnet, so ist unter der Einwirkung des Lichts gegenüber dem dunkel gebliebenen Topfteil ein Potentialunterschied entstanden, der mit Hilfe des Galvanometers gemessen werden konnte. Diese Erkenntnis hat Becquerel am 30. Juli 1839 im wöchentlichen Protokoll der Akademie der Wissenschaften in Paris veröffentlicht. Obwohl Becquerel hiermit den lichtelektrischen Effekt entdeckt hat, nutzt man in der heutigen Photovoltaiktechnik nicht die Einwirkung des Lichts auf Elektroden in chemischen Lösungen, sondern den Potentialunterschied, der entsteht, wenn Lichtquanten auf die unterschiedlich dotierten Teile eines Halbleiters auftreffen. Da Becquerel zu dieser Zeit die technischen Mittel und die Theorie gefehlt haben, ist es ihm nicht möglich gewesen an diesem Effekt weiter zu forschen. Erst knapp vierzig Jahre später gelingt es den Physikern Adams und Day die Beobachtungen von Becquerel an einem Selenkristall nachzuweisen.

Die hohen Kosten und der geringe Wirkungsgrad von nur wenig mehr als 1% [3] haben aber weitere Anwendungen dieser Entdeckung verhindert. Im Jahre 1905 hat Albert Einstein seine Lichtquantenhypothese formuliert, die dann die theoretische Erklärung für den lichtelektrischen Effekt geliefert und für die er auch im Jahr 1921 den Nobelpreis für Physik erhalten hat. In den folgenden Jahren gerät diese Technik wieder ein wenig in Vergessenheit. Später im Jahr 1949 haben die Physiker Shockley, Bardeen und Brattain den Transistoreffekt entdeckt, in dessen Zusammenhang auch die Klärung der Physik des positiv (p)- negativ (n)- Übergangs gelungen ist [4], der eine maßgebliche Rolle bei den Solarzellen einnimmt. 1954 ist in den USA von Chapin, Fuller und Pearson die erste Siliziumzelle mit einem Wirkungsgrad von 6% entwickelt worden. Durch die steigende Nachfrage seitens der Raumfahrt sind die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten stark angetrieben worden, sodass eine Industriefertigung in bescheidenem Maße möglich war. Den Durchbruch der Solarzellen für die terrestrische Anwendung hat die Ölkrise in den Jahren 1973/74 gebracht, da alle Industriestaaten nach Alternativen zu dem plötzlich sehr teuren Öl suchten [3]. Seither versucht man die Kosten zu reduzieren und den Wirkungsgrad zu erhöhen.

2.1.2 Funktionsweise einer PV-Zelle

An der Entwicklung der Photovoltaiktechnik sind nicht nur einige wenige Physiker beteiligt gewesen, sondern viele unabhängige, daher gibt es auch viele verschiedene Arten von PV-Zellen. Die größten Unterschiede findet man in der Verwendung des Halbleiters, aus der auch verschiedene Dotierungen folgen. Des Weiteren gibt es auch Unterschiede in der Verarbeitung der Bauelemente, wie die Texturierung der Solarzellenvorderseite (siehe Abb. 1).

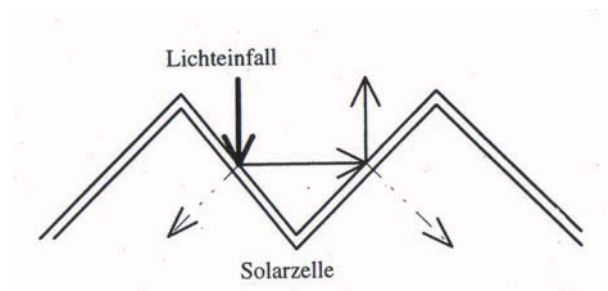


Abb. 1: Schema der Texturierung einer Solarzelle

Zum grundsätzlichen Verständnis folgt die Erläuterung der Funktionsweise einer klassischen Silizium- Solarzelle.

Die photoaktive Schicht einer solchen Zelle ist eine 200- 450 μm dicke Siliziumschicht [3]. Bei Silizium handelt es sich um einen Halbleiter, zu dessen Eigenschaften es gehört, dass die Leitfähigkeit durch Energiezufuhr – bei Solarzellen Licht – erhöht wird.

Ein Siliziumatom besitzt in der Außenschale vier Elektronen, sodass in einem stabilen Kristallgitter ein jedes von vier Nachbaratomen umgeben ist. Der Zusammenhalt der Siliziumatome kommt dadurch zustande, dass ein jedes Außenelektron mit dem des Nachbarn eine Elektronenpaarbindung bildet (siehe Abb. 2). Dieser feste und stabile Zustand wäre nicht leitend und gilt aber nur für tiefe Temperaturen.

Bei etwas höheren Temperaturen, auch schon bei Zimmertemperatur, werden einige dieser Bindungen aufgelöst und dabei Elektronen frei. Dies bedingt eine geringe Leitfähigkeit des Materials. Bei Anlegen einer Spannung würde aber nur ein geringer Strom fließen. Daher wird das Material an der der Sonne zugewandten Seite mit Phosphor dotiert [3]. Das bedeutet, dass in der oberen Schicht gezielt einige Siliziumatome durch Phosphoratome ersetzt werden. Da Phosphor in der Außenschale fünf Elektronen besitzt und mit den benachbarten Siliziumatomen nun Elektronenpaare bildet, bleibt jeweils ein frei bewegliches Elektron übrig (siehe Abb. 3).

Diese Schicht ist also durch einen Elektronenüberschuss negativ geladen, man bezeichnet dies auch als n- dotiert. Dieser Vorgang wird an der Unterseite mit dem Material Bor wiederholt. Hier besteht der Unterschied aber darin, dass Bor nur drei Außenelektronen besitzt. Wenn das Bor also Elektronenpaare mit den Siliziumatomen bildet, gibt es jeweils eine Fehlstelle (siehe Abb. 4). Diese Fehlstellen werden auch als Löcher bezeichnet.

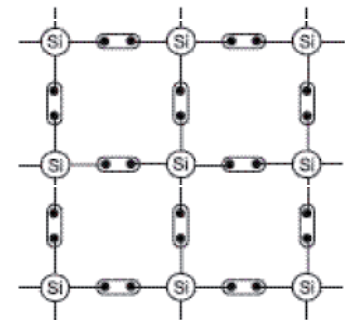


Abb. 2: Silizium-Kristallgitter

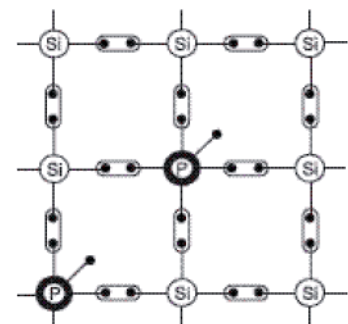


Abb. 3: Silizium-Kristallgitter mit Phosphor dotiert

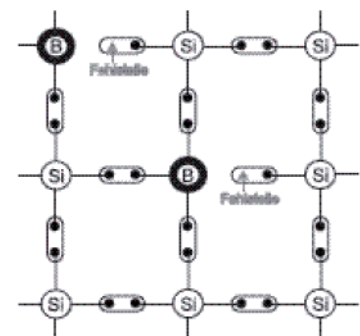


Abb. 4: Silizium-Kristallgitter mit Bor dotiert

Hierbei kann es geschehen, dass benachbarte Elektronen sich aus den Paarbindungen lösen und in diese Löcher springen. Da sich dieser Vorgang mehrmals wiederholen kann, spricht man hier von der Beweglichkeit der Löcher, auf der die Leitfähigkeit der Siliziumschicht beruht. Im Gegensatz zur oberen Schicht handelt es sich hier um einen Elektronenmangel, daher wird diese auch wegen ihrer positiven Aufladung p- dotiert genannt. Jede dieser Schichten ist für sich genommen aber gut leitfähig und elektrisch neutral. Unmittelbar nach diesem Dotierungsvorgang streben die Ladungen an der Berührungsstelle der Schichten nach einem Ladungsausgleich, sodass sich eine Grenzfläche bildet, an der die freien Elektronen in die Löcher diffundieren. Diese Grenzfläche wird auch als pn- Übergang bezeichnet. Um diesen pn- Übergang herum bildet sich die Raumladungszone, an der die Elektronen und Löcher zwar ebenfalls nach Ladungsausgleich streben, aber diesen Zustand wegen der Grenzfläche nicht erreichen können. Aus der n- dotierten Schicht wandern nun dorthin Elektronen und aus der p- dotierten Schicht Löcher in die Grenzschicht ab. Somit entsteht im n- Gebiet ein Elektronenmangel und im p- Gebiet ein Elektronenüberschuss [6]. Die beiden Schichten sind also in der Umgebung der Grenzfläche, der Raumladungszone, elektrisch geladen. Die n- dotierte Schicht positiv und die p- dotierte negativ. Dieses Gebiet ist mit den Platten eines geladenen Plattenkondensators zu vergleichen, in dem ein gewisses elektrisches Feld herrscht. Nach außen hin aber bleibt das gesamte Material elektrisch neutral.

Wenn nun dieser photoaktiven Schicht Energie in Form von Licht zugeführt wird, kommt es zu einem lichtelektrischen Effekt. Dabei muss man zwischen dem inneren und äußeren unterscheiden, wobei jedoch der äußere für die Funktion der Photovoltaikanlage ohne Bedeutung ist.

Die der Sonne zugewandte n- dotierte Schicht ist im Vergleich zur p- dotierten sehr dünn, damit die Lichtstrahlen mit genügend Energie auf den pn- Übergang vordringen können. Durch die Photonen werden ständig Elektronen aus den Paarbindungen der Siliziumatome herausgelöst. Hier prallen pro Sekunde und bei vollem Sonnenschein 250 Billionen Photonen auf einen Quadratzentimeter [7].

Dabei werden die Elektronen durch die hohe Energiezufuhr der Photonen aus dem Valenzband der Atome über den Bandabstand in das Leitungsband energetisch angehoben (siehe Abb. 5).

Folglich entstehen stets freie Elektronen und Löcher. Da in der Raumladungszone ein elektrisches Feld herrscht, werden sogleich die Elektronen in die p- dotierte Schicht und die Löcher in die n- dotierte transportiert. Dabei lädt sich das n-dotierte Gebiet wieder negativ und das p-dotierte positiv auf. Diese damit entstehende Spannung entspricht genau dem Potentialunterschied, der zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband herrscht.

Schließt man nun den Stromkreis mit Hilfe eines außen angeschlossenen Leiters kommt es hiermit zu einem Ladungsausgleich. Solange also eine Energiezufuhr durch Licht gewährleistet ist, kann elektrischer Gleichstrom fließen (siehe Abb. 6).

Dabei ist die Höhe des Stromflusses direkt proportional zur Intensität des Lichtes. Je mehr Sonnenschein in Form von Photonen auf die Zelle prallt, desto mehr Strom kann fließen, da mehr Elektronen ausgelöst werden.

Dafür sind an der Unterseite der PV- Zelle eine Metallschicht und an der Oberseite ein Metallband mit vielen Kontaktfingern angebracht, die als Pluspol an der Unterseite und als Minuspol an der Oberseite fungieren.

An der Unterseite wird eine ganze Metallschicht montiert, damit diese der Solarzelle auch die nötige mechanische Stabilität verleiht. Im Gegensatz dazu kann oben nur ein dünnes Metallband angebracht werden, damit so viel Licht wie möglich an den pn- Übergang vordringen kann [3] (siehe Abb. 7).

Die typische blaue Farbe, oft auch dunkelblau oder schwarz, erhält die Solarzelle durch die Antireflexionsschicht. Diese dient zum einen dem Schutz und zum anderen der Vermeidung allzu großer Reflexion der Sonnenstrahlen.

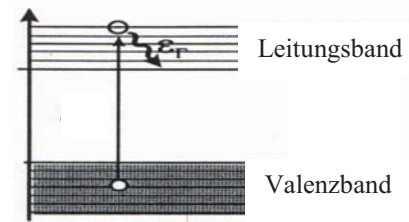


Abb. 5: Anregung eines Elektrons vom Valenzband ins Leitungsband durch Absorption der Energie eines Photons

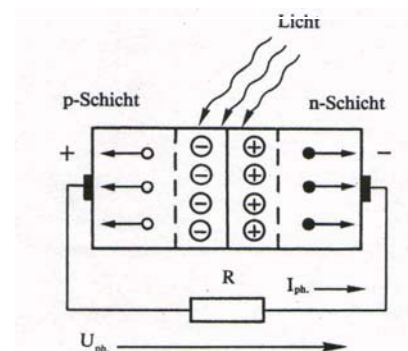


Abb. 6: Schema des Photostromflusses bei Lichteinwirkung am pn- Übergang

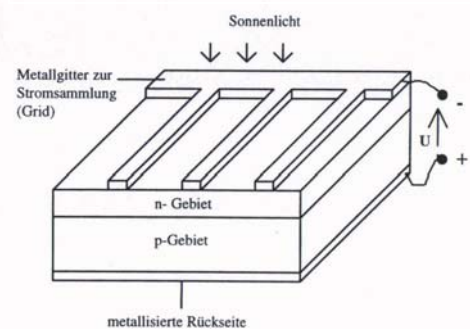


Abb. 7: Schematischer Querschnitt einer Solarzelle

2.2 Einflussfaktoren auf die Leistung einer Solarzelle

Die HS- PXL 200 Zelle, welche mit meiner Versuchszelle - ein Handmuster, zu welchem kein Datenblatt vorliegt - zu vergleichen ist, hat einen Wirkungsgrad von $\eta=13,65\%$ [10]. Dies gibt aber nur grobe Auskunft über die letztendliche Leistung der Zelle vor Ort, denn diese ist stark abhängig von bestimmten Faktoren.

2.2.1 Standort

2.2.1.1 Geographische Lage

Wichtig zu berücksichtigen für die Leistung der Zelle ist die geographische Lage. Wenn man in diesem Abschnitt nur Deutschland betrachtet, so gibt es auch hier erhebliche Unterschiede bezüglich der Strahlung über das Jahr verteilt. Dies ist aber nicht nur durch die Längen- und Breitengrade bedingt, es sind auch große Unterschiede zwischen verschiedenen Jahren zu erkennen. Als Beispiel dafür sollen die Jahressummen der Globalstrahlung der vergangenen drei Jahre dienen.

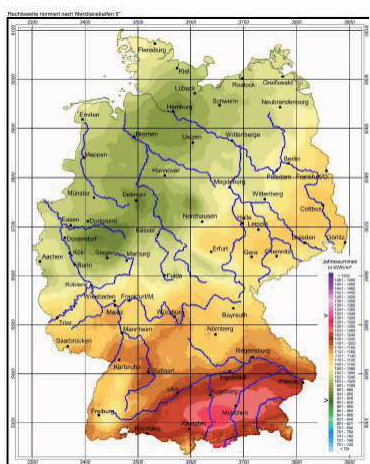


Abb. 8: Globalstrahlung in der BRD im Jahr 2007

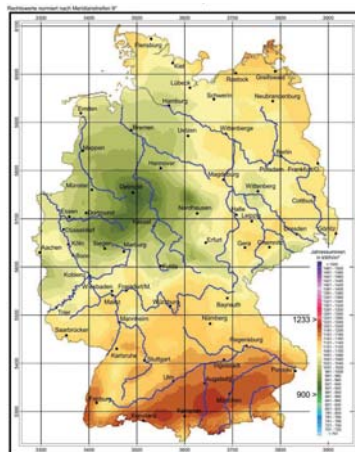


Abb. 9: Globalstrahlung in der BRD im Jahr 2008

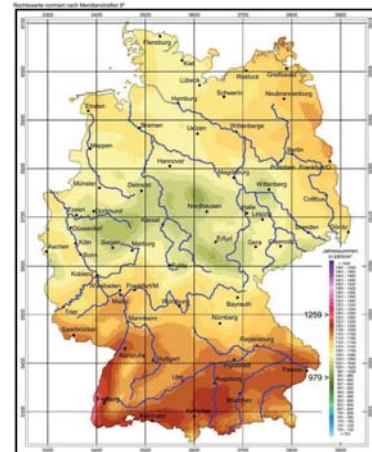


Abb. 10: Globalstrahlung in der BRD im Jahr 2009

Bei diesen Graphiken sind die Mittelwerte in einem Abstand von einem Kilometer von der Erdoberfläche berechnet worden.

Man kann also erkennen, dass es einige Orte in Deutschland gibt, wie im Raum von Süddeutschland, die eine hohe Strahlungssumme aufweisen. Im Gegensatz dazu gibt es in Norddeutschland eine geringere Globalstrahlung. Diese Globalstrahlung setzt sich aus der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Strahlung, die aus der Reflexstrahlung und der

Himmelsstrahlung besteht, zusammen. Die Photovoltaikzelle kann sowohl die direkte als auch die diffuse Strahlung zur Stromgewinnung verwenden, wobei die direkte Sonneneinstrahlung den größten Einfluss auf die Leistung der Zelle hat. Theoretisch wäre der Ort mit der höchsten Jahressumme der beste für den Standort eine PV- Anlage, doch obwohl ein erhöhtes Strahlungsmittel nicht unerheblich für mehr Leistung ist, ist dies auch noch von anderen Faktoren abhängig, auf die später noch eingegangen wird. Dieses Bild ändert sich von Jahr zu Jahr, wodurch sich auch der Ertrag einer Anlage ändern kann. Doch auch der Einfluss auf diese Berechnungen durch die Lage bezüglich der Längen- und Breitengrade ist von großer Wichtigkeit. So ist es verständlich, dass aufgrund der Erdkrümmung im Norden geringere Jahressummen als im Süden zu erreichen sind.

Wenn man nun die Lage von Viechtach auf dieser Karte betrachtet, sieht man, dass Viechtach aufgrund der Globalstrahlung mit einer Jahressumme von 1160- 1200 kWh/m² keine schlechten Voraussetzungen besitzt.

2.2.1.2 Neigungswinkel

Die Leistungsfähigkeit einer Solarzelle ist nicht nur von der Globalstrahlung, sondern auch vom Neigungswinkel der Zelle abhängig. Da sich der Stand der Sonne stündlich wie monatlich verändert, wäre es die beste Einrichtung, die Solarzellen auf beweglichem Untergrund zu montieren und diesen dem Stand der Sonne anzupassen. Doch da dies bei gewöhnlichen PV- Anlagen auf den Dächern nicht möglich ist, erweist sich über das ganze Jahr betrachtet ein Neigungswinkel von etwa 30° [3] als der günstigste.

Durch die Neigung der Erdachse um 23,5° und die elliptische Bahn um die Sonne ergeben sich für diese Betrachtungen vier maßgebliche

Daten im Jahr, die auf den Neigungswinkel Einfluss ausüben (siehe Abb. 11). Zum einen der 21. Juni, an dem die Sonne im Süden Deutschlands, bei 48° nördlicher Breite, in einem Winkel von 65,5° einfällt. Dabei ist zu beachten, dass die Solarzellen die Sonnenenergie am besten nutzen können, wenn sie zusammen mit den Sonnenstrahlen einen rechten Winkel bilden. Demzufolge

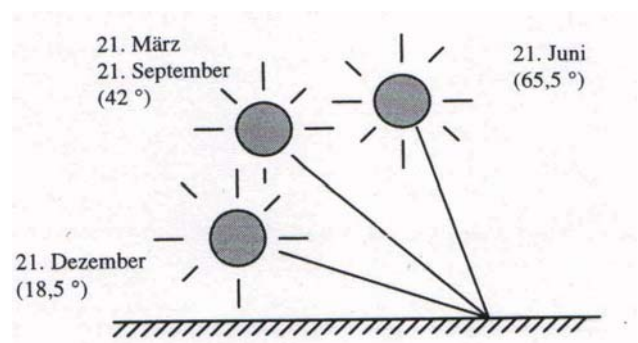


Abb. 11: Schematische Darstellung der Mittagssonnenhöhen an verschiedenen Daten im Jahr

muss bei einem Einfallswinkel von $65,5^\circ$ die Solarzelle einen Neigungswinkel von $24,5^\circ$ einschließen. Dieses Ergebnis lässt sich über die Winkelsumme im Dreieck ermitteln. Das nächste wichtige Datum ist der 21. März, an dem die Sonne genau wie am 21. September in einem Winkel von 42° einfällt. Hier wäre ein Neigungswinkel von 48° ideal. Ein letztes wichtiges Datum ist der 21. Dezember, an dem die Sonne einen Einstrahlwinkel von $18,5^\circ$ besitzt. Dabei wäre ein Neigungswinkel von $71,5^\circ$ optimal. Ebenso wichtig zu beachten ist, dass aufgrund der Erdkrümmung im Norden die Solarzellen etwas steiler und im Süden etwas flacher angebracht werden müssen. Auch in dem Versuch zur Optimierung der Heckert- Zelle wird eine Dachfläche im Kleinen simuliert, daher erwies sich der Neigungswinkel von 30° als bester, da mit diesem über das ganze Jahr gesehen der meiste Ertrag erzielt wird. Zwar verliert die Solarzelle bei $\pm 20^\circ$ Steigung nur circa 5% ihrer Leistung, sollten die Anfangsbedingungen jedoch optimal sein.

2.2.2 Wetterbedingungen

Eine Solarzelle liefert nicht bei jedem Wetter gleich viel Leistung. So gibt es auch erhebliche Unterschiede zwischen den Jahreszeiten. Dennoch existieren auch hier Idealbedingungen für den Betrieb einer PV- Zelle.

Optimale Bedingungen

Im Gegensatz zum Winter liefert die Solarzelle im Sommer viel mehr an Leistung. Im Winter ist dazu meist durch die Dachneigung der Einfallswinkel der Sonne zu gering und auch der längere Weg der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre wirkt sich negativ auf die Leistung aus. Jedoch steigert die kalte Außentemperatur das Ergebnis der Tagesernte wiederum. Auf diesen Aspekt des Einflusses der Oberflächentemperatur wird später noch genauer anhand meiner eigenen Testergebnisse eingegangen.

Doch nicht nur die Außentemperatur und damit die Oberflächentemperatur spielen eine wichtige Rolle. Das Wetter an sich ist der ausschlaggebende Punkt. Optimal für den Betrieb einer Solarzelle ist voller Sonnenschein. Da die Zelle zwar diffuse Strahlung genauso gut wie direkte Sonneneinstrahlung umwandeln kann, ist ein sonniger Tag ohne Bewölkung dennoch am besten. In unseren Breiten beträgt der Anteil der diffusen Strahlung, die ungerichtet auf die Zelle fällt, je nach Jahreszeit zwischen 20- 80% [3]. Daher ist ein Sonnentag ideal, denn die diffuse Strahlung bleibt weiterhin erhalten, die direkte Strahlung steigert aber durch die optimale Ausrichtung der Zelle den Wirkungsgrad erheblich.

Temperatur als leistungshemmender Faktor

Wenn nun in unserer Breitenlage zu heiße Außentemperaturen von ca. 30-35°C herrschen, heizt sich die Oberfläche der Solarzelle auf ca. 40-70°C [2] auf. Doch auch schon bei etwas höheren Temperaturen ab ungefähr 25°C kann sich die Solarzelle auf mehr als 30°C erwärmen. Aufgrund dieser erhöhten Temperatur steigert sich die Bewegung der Elektronen im Halbleitermaterial. Dabei verringert sich der Bandabstand, der bereits in der Funktionsweise beschrieben wurde, zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband. Dieser Abstand entspricht der Spannung U , die die Solarzelle erreichen kann [9]. Der Stromfluss I allerdings bleibt unabhängig von der Temperatur immer konstant, da der Stromfluss die Anzahl der durch die Photonen herausgelösten Elektronen beschreibt. Somit bestimmt bei hoher Temperatur und gleichen Wetterbedingungen die Spannung U nach der Formel für die elektrische Leistung $P = U \cdot I$ [1] die Leistung einer Solarzelle. Wenn sich aber bei zunehmender Temperatur der Bandabstand verringert, so wird auch die Spannung U kleiner, da die Elektronen beim Auslösen aus dem Halbleitermaterial weniger Energie brauchen, um in das höher gelegene Leitungsband zu gelangen. Daher nimmt die Leistung einer Solarzelle mit sinkender Spannung ab.

2.3 Optimierungsversuche

2.3.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Die Firma PLANASolar hat zur Durchführung dieser Facharbeit eine Solarzelle bereitgestellt, die ich unter Mithilfe meines Bruders bei Tätigkeiten wie Schweißen in den Versuch eingebaut habe. Der gesamte Aufbau mit allen Versuchseinheiten befindet sich kompakt auf einer Sperrholzplatte, welchen die Abbildungen 12, 13 und 14 zeigen.



Abb. 12: Versuchsaufbau



Abb. 13: Nahaufnahme der Solarzelle



Abb. 14: Nahaufnahme der Solarzelle der Pumpe

Das Gestell, auf dem die Zelle montiert ist, besteht aus Alteisen, das ansonsten keinem Zweck mehr dient. Dieses Alteisen wird zu einer Halterung für die Solarzelle zusammen geschweißt. Dabei ist in den Berechnungen berücksichtigt worden, dass der Neigungswinkel der Zelle zur Horizontalen 30° beträgt.

Um Rost zu verhindern sind sämtliche Eisenteile mit einem Zinkspray besprüht worden. Dieser Vorgang ist auch in der Abb. 15 zu erkennen.

Die Zelle liegt auf zwei Holzklötzen auf, die auf einer dünnen Sperrholzplatte montiert sind. Diese wiederum ist auf der vorher beschriebenen Halterung befestigt worden (siehe Abb. 16). Der Abstand zwischen der Sperrholzplatte und der Zelle soll den Abstand einer gewöhnlichen Solaranlage und dem Dach simulieren. Dies ist in Abb. 17 ersichtlich. In dem oberen Holzklötz sind zwei Schrauben zur Befestigung der Solarzelle zu drei Viertel eingedreht. Die Zelle kann somit durch ihren Rahmen an diesen eingehängt werden, hält fest und nimmt keinen Schaden.



Abb. 15: Einsprühen des Gestells mit Zinkspray



Abb. 16: Aufliegefläche für die Solarzelle



Abb. 17: Zwischenraum von Solarzelle und Aufliegefläche

Die mechanischen Einrichtungen sind nun komplett, doch fehlen noch Anschlüsse zur Messung der Spannung U und des Stromflusses I , um aus diesem Produkt die Leistung P zu berechnen. Die Solarzelle besitzt bereits im Originalzustand zwei Kabel, an die man einen Energieumwandler anschließen kann (siehe Abb. 18).

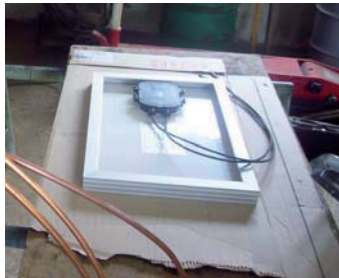


Abb. 18: Kabelausgänge der Zelle



Abb. 19: Glühbirne mit Fassung



Abb. 20: Krokodilklemme

Als Energieumwandler dient in allen Versuchen eine 2,4 Watt- Glühbirne, die mit 6 Volt betrieben wird, welche auf Abb. 19 zu erkennen ist. Durch diese Glühbirne wird allerdings auch am Ende der Versuche die Leistung minimiert, da sie selbst nur eine Leistung von 2,4 Watt besitzt. Dadurch kann weniger Strom fließen und die Leistung am Ende der Versuche ist weniger als unter Standardtestbedingungen. Dies begründet sich darin, dass keine Glühbirne mit einer Leistung von 10 Watt oder mehr erhältlich ist, die nur mit einer Spannung von 4- 6 Volt funktioniert.

Die Fassung der Glühbirne ist an das erste Kabel angeschlossen, welcher eine Krokodilklemme wie in Abb. 20 am Ende folgt. Am zweiten Kabel ist eine weitere Krokodilklemme montiert. Da die Kabel der Solarzelle nicht gesondert gekennzeichnet sind und deren Polung in diesem geschlossenen Stromkreis nicht weiter von Bedeutung ist, kann darüber auch keine weitere Aussage getroffen werden.

Die Krokodilklemmen erfüllen den Zweck die Messungen erheblich zu erleichtern, da sie leicht zu handhaben sind und sicher halten. Um die Spannung U zu ermitteln, steckt man die Krokodilklemmen zusammen, sodass der gesamte Versuch einen geschlossenen Stromkreislauf ergibt. Danach hält man die Kontakte eines Multimeters (siehe Abb. 21) zum einen an die Fassung der Glühbirne und zum anderen an die Verbindung der beiden Klemmen, damit über den Widerstand der Glühbirne die Spannung U gemessen werden kann. Dieser Vorgang ist auch in Abb. 22 zu sehen.

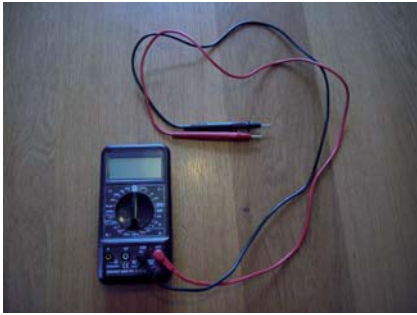


Abb. 21: Multimeter



Abb. 22: Vorgang der Spannungsmessung



Abb. 23: Vorgang der Stromflussmessung

Hier muss nur noch beachtet werden, dass der Multimeter die richtige Einstellung hat, da mit diesem verschiedene Größen gemessen werden können.

Zur Ermittlung der Leistung P muss auch der Stromfluss I gemessen werden. Dafür trennt man die Krokodilklemmen und in jede dieser Klemmen spannt man nun einen Kontakt des Multimeters ein, sodass das Messgerät in Reihe mit dem Stromkreis geschaltet ist (siehe Abb. 23). Auch hier muss die richtige Einstellung des Multimeters beachtet werden.

Die exakte Ermittlung der Oberflächentemperatur erfolgt über einen Temperaturfühler mit Laserpointer und digitaler Anzeige (siehe Abb. 24/25). Bei dieser Messung muss darauf geachtet werden, dass die Temperatur jedes Mal aus demselben Abstand ermittelt wird, damit keine verfälschten Ergebnisse erzielt werden. Dafür ist jedes Mal ein Abstand von 40 Zentimetern gewählt worden.



Abb. 24: Temperaturfühler seitlich



Abb. 25: Temperaturfühler frontal

2.3.2 Folie gegen Verschmutzung

Viele Solaranlagen, die verbaut werden, befinden sich auf Stalldächern oder Kamine sind in der Nähe der Zellen. Da auch auf den Stalldächern Luftschächte zur Kühlung integriert sind, wie in Abb. 26, tritt durch diese oder die Kamine viel Schmutz aus.

Ebenso können Exkreme von vorbei fliegenden Vögeln oder



Abb. 26: Luftschächte eines Stalles

Laub von umliegenden Bäumen zu Verschmutzungen auf der Anlage führen. Ziel dieses Versuches ist es mit Hilfe einer Folie, die auf die Zelle gelegt wird, den Schmutz abzuhalten. Dabei kann die Folie zum Beispiel halbjährlich erneuert werden.

2.3.2.1 Aufbau

Die Solarzelle auf der vorher beschriebenen Halterung wird nun mit einer haushaltsüblichen Frischhaltefolie überzogen. Dies ist in den Abbildungen 27 und 28 zu sehen.



Abb. 27: Folie beim Aufziehen auf die Solarzelle



Abb. 28: Folie auf der Solarzelle

2.3.2.2 Ergebnisse

Die Messungen fanden am 11.09.2010 statt. Dabei herrscht ein sonniges und leicht bewölktes Wetter (siehe Abb. 29) bei einer Außentemperatur von 19,5°C (siehe Abb. 30). Der Stromfluss I hat vor dem Versuch einen Wert von $I = 0,30$



Abb. 29: Wetterbedingungen



Abb. 30: Außentemperatur

A (siehe Abb. 31), welcher auch während diesem Test und allen weiteren Versuchen, sei es vor oder nach der Kühlung, identisch bleibt. Als nun Hausstaub, der in etwa die Verschmutzung der Zelle nach einem halben Jahr simulieren soll (siehe Abb. 33), auf die Zelle aufgetragen worden ist, beläuft sich die Spannung auf $U = 3,35$ V, wie in Abb. 32. Dies hat nach der Formel für die Leistung $P = U \cdot I$ eine Ausgangsleistung von $P = 1,005$ W zur Folge.



Abb. 31: Stromfluss I



Abb. 32: Spannung U vor dem Versuch



Abb. 33: Verschmutzung der Folie

Nach Abziehen der Folie steigt die Spannung auf den Wert von $U=3,39\text{ V}$ (siehe Abb. 34), was eine höhere Leistung von $P=1,017\text{ W}$ verursacht.

Das Auftragen einer neuen Folie, die den Schmutz für das nächste halbe Jahr abhalten soll, beeinträchtigte die Spannung nicht und es bleibt bei der Höchstleistung von $P=1,017\text{ W}$.



Abb. 34: Spannung U nach dem Versuch

2.3.2.3 Erklärung

Wenn nun so viel Staub oder Schmutz auf einer Solarzelle liegt, so führt dies zu dem Effekt, dass weniger Sonnenstrahlen die Grenzschicht, den pn- Übergang, erreichen. Dadurch können weniger Elektronen aus dem Halbleitermaterial ausgelöst werden. Somit kann in der p-dotierten und in der n-dotierten Schicht nur ein elektrisches Feld mit geringerer Spannung aufgebaut werden und dadurch wird die Leistung der Solaranlage gemindert.

2.3.3 Abkühlung der Zellenoberfläche durch Besprenkelung mit Wasser

Falls zu heißes Wetter herrscht, kommt es zu dem Effekt, dass die Spannung einer Zelle und somit die Leistung abnimmt. Ziel der folgenden Versuchsanordnung ist es die Zelle durch Besprenkelung abzukühlen, damit die Spannung zu erhöhen und letztendlich die Leistung zu steigern.

2.3.3.1 Aufbau

Um nun diesen Versuch mit der Besprenkelung durchführen zu können sind noch zwei maßgebliche Teile an der bereits beschriebenen Halterung zu montieren. Zum einen wird eine Schiene am oberen Ende der Zelle, aus der das Wasser nach unten laufen kann, angebracht und zum anderen eine Auffangschale, damit kein Wasser verschüttet und damit verschwendet wird. Die Schiene besteht aus einem Kupferrohr mit einem Durchmesser von fünf Millimeter (Abb. 35). Darin sind in einem Abstand von drei Zentimeter kleine Löcher gebohrt worden, sodass das Wasser austreten kann. Um die Schiene zu befestigen, ist am oberen Holzklötz an jeder Seite



Abb. 35: Schiene zur Oberflächenkühlung

jeweils ein dünnes Metallplättchen, das schon vorher kleine Löcher hatte und ansonsten keinen Verwendungszweck mehr fand, angebracht worden. Diese Halterung ist in Abb. 36 zu sehen.

Damit nun das Wasser auch aufgefangen werden kann, wird am unteren Holzklötz die Hälfte eines ausgedienten Kuchenblechs angebracht. Dies ist in Abb. 37 ersichtlich.

Dieses wird auch um Rost zu verhindern mit Zinkspray eingesprüht. Doch da diese Auffangschale ohne Ablauf nicht die ganze Wassermasse fassen könnte, wird im rechten Eck ein Loch gebohrt, durch das ein dünner Plastikschauch passt. Damit auch kein Wasser auslaufen kann, ist der Plastikschauch mit Dichtmasse fixiert (siehe Abb. 38).

Sodass nun das Wasser laufen kann, muss noch eine Pumpe angeschlossen werden. Dafür findet in dieser Versuchsanordnung eine Solarpumpe aus Abb. 39 Platz, die sich mit dem Strom, den sie benötigt, selbst versorgt. Somit wird der Solarzelle keine Energie entzogen und das Ergebnis der Tests wird nicht verfälscht. Ebenso ist es umweltschonender auch diesen Strom regenerativ zu gewinnen. Die Pumpe wird auf einen Plastikwasserbehälter montiert, da sie aus zwei Teilen besteht, zum einen die Solarzelle, welche die Lichtenergie in elektrische Energie umwandelt, und zum anderen aus der eigentlichen Pumpe. Diese beiden Bestandteile funktionieren aber nicht getrennt voneinander, da sie durch ein Kabel miteinander verbunden sind. Um auch für die kleine Solarzelle den besten Wirkungsgrad zu erzielen, ist sie auf dem Plastikbehälter, wie es aus Abb. 40 ersichtlich ist, ebenfalls in einem 30°- Winkel ausgerichtet worden. Außerdem steht sie in einer Linie mit der Solarzelle,



Abb. 36: Metallplättchen als Halterung der Schiene



Abb. 37: Kuchenblech als Auffangschale



Abb. 38: Wasserabfluss mit Dichtmasse fixiert



Abb. 39: Solarzelle der Wasserpumpe auf dem Wasserbehälter

sodass sie auch dieselbe Ausrichtung nach Süden hat. Um die kleine Solarzelle zu befestigen, ist eine der gleichen Metallplatten, die auch die Wasserschiene halten (siehe Abb. 41), am Plastikbehälter festgeschraubt worden, an der sie dann eingehakt werden kann. Aufgrund des Verbindungskabels zwischen der Zelle und der Pumpe ist unmittelbar neben der Halterung ein Loch eingebohrt, welches in Abb. 42 zu erkennen ist. Im Deckel des Plastikbehälters befinden sich noch drei weitere Löcher.

Eines wiederum ist unmittelbar neben dem Loch für das Verbindungskabel, durch das ein Plastikschlauch mit einem Durchmesser von fünf Millimeter passt, in den die Pumpe das Wasser befördert.



Abb. 40: Montage der Pumpensolarzelle



Abb. 41: Metallhalterung der Pumpensolarzelle



Abb. 42: Loch für das Verbindungskabel im Behälterdeckel

Dieser Schlauch ist direkt mit der Wasserschiene am oberen Ende der Zelle verbunden. Ein weiteres Loch dient dazu, das Wasser durch den gleichen Plastikschlauch aus dem Rücklauf des Kuchenbleches wieder im Behälter aufzufangen. Das dritte Loch besitzt für diesen Versuchsaufbau noch keine Funktion und wird später erläutert.

2.3.3.2 Ergebnisse

Die Messungen wurden am 21.08.2010 durchgeführt. Dabei herrscht sonniges und unbewölktes Wetter (Abb. 43) bei einer Außentemperatur von 27,5°C (Abb. 44). Die Oberflächentemperatur der Solarzelle beträgt nach einiger Zeit in der Sonne 41,0°C (Abb. 45).

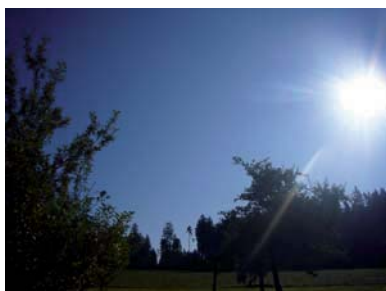


Abb. 43: Wetterbedingungen



Abb. 44: Außentemperatur



Abb. 45: Oberflächentemperatur der Solarzelle

Die Spannung U vor der Kühlung beträgt 3,30 V (siehe Abb. 46). Der Stromfluss I hat vor dem Versuch wiederum einen Wert von $I=0,30$ A. Zu sehen ist dies in Abb. 47.

Damit ergibt sich eine Anfangsleistung von $P=0,99$ W. Damit nun der Versuch durchgeführt werden kann, wird Regenwasser aus einem Brunnen geholt. Doch da sich dieses Wasser in der Sonne und durch den Versuch viel zu schnell aufheizen würde, empfiehlt es sich den Wasserbehälter in das Erdreich einzugraben. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich der Behälter auch in einer Tiefe von mindestens einem Meter befindet, denn die obere Erdschicht heizt sich wie der Sand am Strand je nach Jahreszeit auf. Um eben diesen Effekt zu verhindern, sollte man den Behälter genügend tief eingraben, um das ganze Jahr hindurch eine einigermaßen konstante kühle Temperatur zu erhalten. Da dies aber bei diesem Versuch nicht möglich ist aufgrund der kleinen Ausmaße und des Verbindungskabels zwischen der Solarzelle und der Pumpe, werden tiefgefrorene Kühlkompressen wie in Abb. 48 in den Wasserbehälter gegeben. Dabei wird die Wassertemperatur auf konstant auf $14,8^{\circ}\text{C}$ (siehe Abb. 49) gehalten.

Ebenso wichtig ist die Tatsache, dass Regenwasser verwendet wird. Dies hat hauptsächlich drei Gründe. Zum einen ist es umweltschonender, da kein Trinkwasser zur Kühlung verschwendet wird. Zum anderen ist es kostengünstiger, da dieses Wasser nicht bezahlt werden muss und noch dazu jedem zur Verfügung steht. Der wichtigste Grund aber ist, dass dieses Wasser keinerlei Kalk mehr enthält, da es durch den Wasserkreislauf der Erde ein natürlich destilliertes Wasser ist. Der Kalk könnte sich auf der Solarzelle absetzen und durch diese Kalkablagerung würde die Leistung verringert werden, denn die Sonne kann nicht mehr ungehindert auf das Halbleitermaterial auftreffen.



Abb. 46: Spannung U vor dem Versuch

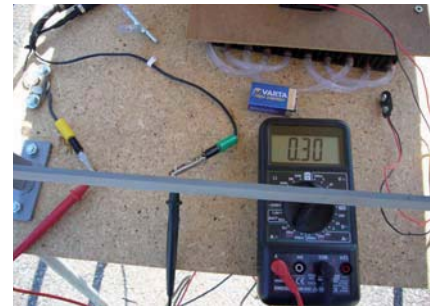


Abb. 47: Stromfluss I



Abb. 48: Zugabe von Kühlkompressen



Abb. 49: Wassertemperatur

Nachdem nun die Pumpe eingeschaltet worden ist, fließt das Wasser über die Solarzelle, was in den Abbildungen 50 und 51 zu sehen ist, und die Spannung ändert sich innerhalb

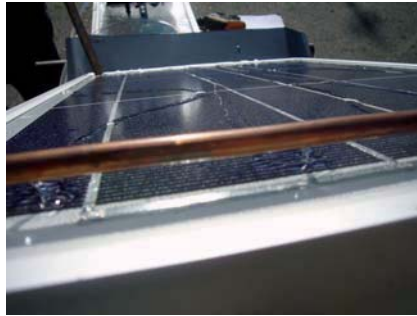


Abb. 50: fließendes Wasser während des Versuches



Abb. 51: mit Wasser gefüllte Auffangschale

von Sekunden. Nach circa zwei Sekunden befindet sich die Spannung U bei 3,35 V (Abb. 52), nach circa 20 Sekunden erreicht die Spannung U einen Wert von 3,41 V (Abb. 53) und nach circa einer Minute ist der Höchstwert von 3,47 V erreicht, welcher der Abbildung 54 zu entnehmen ist. Der Stromfluss I bleibt während der gesamten Versuchsdurchführung, wie bereits in 2.3.2.2 erwähnt, stetig konstant bei $I=0,30$ A. Diese Werte ergeben nach der Formel für die Leistung $P=U \cdot I$ folgende Werte. Für eine Spannung $U=3,35$ V liefert die Solarzelle eine Leistung von $P=1,005$ W, für eine Spannung $U=3,41$ V eine Leistung von $P=1,023$ W und für den Höchstwert der Spannung $U=3,47$ V eine Höchstleistung von $P=1,041$ W.



Abb. 52: Spannung U nach zwei Sekunden



Abb. 53: Spannung U nach 20 Sekunden

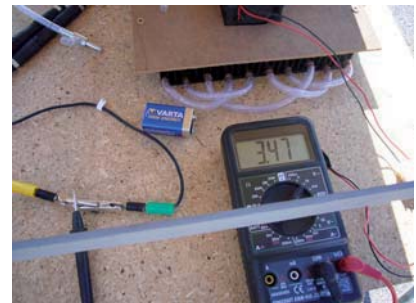


Abb. 54: Spannung U nach einer Minute

Nach ungefähr drei Minuten beträgt die Oberflächentemperatur der Solarzelle 23,9°C (siehe Abb. 55).



Abb. 55: Oberflächentemperatur nach dem Versuch

2.3.3.3 Erklärung

2.3.3.3.1 Versuchsergebnisse

Obwohl diese Werte nicht sonderlich groß sind und keine allzu große Änderung erkennen lassen, sieht man aber deutlich den Effekt, der bereits oben beschrieben worden ist. Wenn zu heiße Außentemperaturen herrschen, verringert sich die Spannung durch den kleineren Bandabstand im Silizium und dies verringert die Leistung. Die rasche Veränderung der Spannungswerte tritt dadurch auf, dass das Wasser die Solarzelle direkt kühlt. Durch die kühle Temperatur von 14,8°C wird die Platte sehr schnell abgekühlt. Dabei vermindert sich die Bewegung der Elektronen im Siliziumhalbleitermaterial fast schlagartig und die Spannung U steigt innerhalb von nur wenigen Sekunden. Dazu kommt auch noch der Prisma- Effekt des Wassers. Dadurch, dass nun konstant ein dünner Film Wasser auf der Solarzelle liegt, wird das Licht beim Eintritt in das Medium Wasser durch den Brechungsindex $n = 1,33$ [1] gebrochen, doch auch beim Austritt aus dem Wasser und gleichzeitig mit dem Eintritt in das Medium Glas tritt eine erneute Brechung des Lichts mit dem Brechungsindex von $n = 1,52$ [2] auf. Dies allein würde noch zu keiner großen Veränderung der Leistung führen. Denn obwohl auf den Solarzellen eine Antireflexionsschicht angebracht ist, kann diese eine Reflexion eines kleinen Teils des Lichtes nicht verhindern. Doch das Licht, das an der Solarzelle reflektiert wird, wird nun am Wasser wieder reflektiert und damit wiederum zur Solarzelle zurückgeschickt. Somit wird ein Lichtstrahl mehrfach genutzt und dies erhöht die Leistung der Solarzelle zusätzlich.

2.3.3.3.2 Versuch zur Veranschaulichung des Prisma- Effekts des Wassers

Da die Solarzelle bei diesem Versuch beständig mit Wasser bedeckt ist, stellt sich die Frage, welche Auswirkungen allein der Prisma- Effekt zur Leistungssteigerung beiträgt. Dazu wird ein zusätzlicher Versuch durchgeführt. Damit die alleinige Auswirkung des Brechungseffekts untersucht werden kann, haben die Solarzellenoberfläche und das Kühlwasser dieselbe Temperatur von 17,6°C, welche der Abbildung 56 zu entnehmen ist, da sich der Versuchsaufbau in einem kühleren Raum befunden hat, sodass es zu keiner Beeinflussung kommen kann.

Die Messungen fanden am 11.09.2010 statt und dabei herrscht sonniges und leicht bewölktetes Wetter (siehe Abb. 57) bei einer Außentemperatur von 19,5°C (siehe Abb. 58).



Abb. 56: Oberflächentemperatur
vor dem Versuch



Abb. 57: Wetterbedingungen



Abb. 58: Außentemperatur

Die Auswahl dieses Tages ist ebenso wichtig, da es vollen Sonnenscheins bei kühler Außentemperatur bedarf. Dadurch sind die Außenbedingungen wie bei dem Ausgangsversuch der Besprenkelung gleich, bis auf die Tatsache, dass die Zellenoberfläche nicht zusätzlich durch die Außentemperatur aufgeheizt wird.

Vor der Besprenkelung mit Wasser beträgt die Spannung $U=3,50$ V, was auf dem Display des Multimeters in Abb. 59 abzulesen ist. Nachdem nun die Besprenkelung etwa zwei Minuten gelaufen ist, beträgt die Spannung schon $U=3,54$ V. Diesen Wert kann man der Abb. 60 entnehmen.



Abb. 59: Spannung U vor dem
Versuch



Abb. 60: Spannung U nach dem
Versuch

Allein dieser Prisma- Effekt des Wassers bewirkt also eine Leistungssteigerung von 1,14%.

2.3.4 Abkühlung der Zellenoberfläche mit Hilfe eines Kühlkreislaufes hinter der Zelle

2.3.4.1 Aufbau

Der Versuchsaufbau hierbei ist dem vorherigen sehr ähnlich. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Wasser nicht oben über die Solarzelle läuft, sondern hinter der Zelle durch einen Kühlkreislauf vorbeigeleitet wird.

Dieselben Einrichtungen, die für diesen Versuch von Bedeutung sind, sind demzufolge noch die Halterung mit dem optimalen Neigungswinkel, die Solarzelle, der Wasserbehälter und die Pumpe.

Die maßgebliche Veränderung hierzu ist der Kreislauf auf der Hinterseite der Solarzelle, der in der Abbildung 61 zu sehen ist. Dafür wird ein Kupferrohr mit dem Durchmesser von fünf Millimeter so gebogen, dass es hinter der Zelle mehrere Male das Wasser vorbeileitet.

Damit das Kupferrohr besser hinter der Zelle fixiert wird und gleichzeitig mehr Wärme leiten kann, wird es mit zwei Metallschienen eingespannt, welche in Abbildung 62 zu erkennen sind. Für diesen Versuch ist ein Kupferrohr gewählt worden, da dieses Material eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt.



Abb. 61: Kühlkreislauf hinter der Zelle



Abb. 62: Kühlkreislauf hinter der Zelle mit Metallschienen fixiert

Thermische Eigenschaften einiger Materialien

	α [10^{-6} 1/K]	c_p [J/g.K]	λ [W/m.K]
reine Metalle			
Aluminium	23.1	0.897	237
Blei	28.9	0.129	35.3
Eisen	11.8	0.449	80.2
Gold	14.2	0.129	317
Kupfer	16.5	0.385	401
Magnesium	24.8	1.023	156
Nickel	13.4	0.444	0.907
Quecksilber		0.140	8.34
Platin	8.8	0.133	71.6
Silber	18.9	0.235	429
Zink	30.2	0.388	116
Zinn	22.0	0.228	0.666

Abb. 63: Tabelle mit den thermischen Eigenschaften einiger Materialien

Dieser Tabelle (Abb. 63) kann man entnehmen, dass Kupfer nach Silber die höchste Wärmeleitfähigkeit besitzt. Das bedeutet, dass dieses Material die Temperatur sehr schnell aufnimmt und sie genau so schnell wieder abgibt. Gemessen werden diese Daten in Watt pro Kelvin mal Meter ($\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$). Doch da Silber zu teuer für so einen Einsatz wäre, ist stattdessen Kupfer gewählt worden.

Das Kupferrohr hat am unteren Ende der Solarzelle zwei Enden. Das rechte Ende ist direkt durch einen Plastikschlauch mit einem Durchmesser von fünf Millimeter mit dem Wasserbehälter

verbunden und in dieses Ende strömt das kalte Wasser. An das linke Ende ist der gleiche Plastikschlauch angeschlossen, welcher zuletzt in den Wasserbehälter zurückführt, für den das Loch im Behälter von Bedeutung ist, das bei dem ersten Versuch noch nicht beschrieben worden ist. Doch dazwischen wird noch ein Wärmetauscher geschaltet, welcher in Abbildung 64 zu sehen ist. Dabei läuft das Wasser wiederum durch die Kupferrohre, die mit Plastikschläuchen verbunden sind (siehe Abb. 65). Dieser Wärmetauscher kühlt das aufgeheizte Wasser, das aus dem Kühlkreislauf hinter der Zelle kommt, ab. Dies funktioniert dadurch, dass der Wärmetauscher durch seine Lamellen eine große Oberfläche besitzt. Durch diese Oberflächenvergrößerung und der Tatsache, dass er aus wärmeleitfähigem schwarz eloxiertem Aluminium besteht, kann er das Wasser, während es vorbeiläuft, abkühlen. Er kann auch bei größeren Anlagen durch diverse andere Einrichtungen ersetzt werden oder die Leitungen können an einem Pool vorbeigeführt werden, sodass dieser geheizt wird, um diese Restwärme zu nutzen. Eine andere Anwendungsmöglichkeit wäre mit Hilfe dieses warmen Wassers die Luft in der Umgebung aufzuheizen und mit dieser warmen Luft und mit Hilfe eines Ventilators Hackschnitzel für eine Heizung zu trocknen.

Außerdem ist auf dem Wärmetauscher eine Sperrholzplatte mit einem kleinen Loch, in das ein kleiner Ventilator eingelassen ist, montiert. Diese Vorrichtung ist in Abbildung 66 zu sehen. Als einziger negativer Aspekt in diesen ansonsten umweltschonenden Gedankengängen ist hier zu nennen, dass der Ventilator mit Hilfe einer 9V- Batterie betrieben wird, da man ihn an keine Solarzelle anschließen kann.

Diese Vorrichtung soll dazu beitragen, dass der Wärmetauscher und die Leitungen zusätzlich durch das Ansaugen der Luft gekühlt werden.

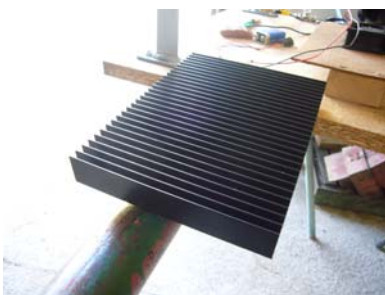


Abb. 64: Wärmetauscher

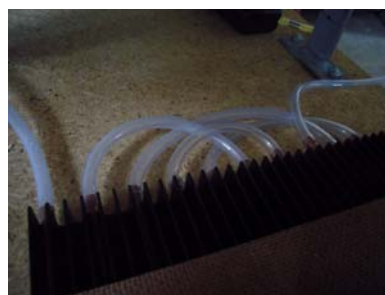


Abb. 65: Kühlleitungen durch den
Wärmetauscher



Abb. 66: Wärmetauscher mit Kühl-
leitungen und Ventilator

2.3.4.1 Ergebnisse

Diese Messungen sind am 22. 08. 2010 durchgeführt worden. Dabei herrscht sonnig heiteres Wetter (Abb. 67) bei einer Außentemperatur von 29°C (Abb. 68).



Abb. 67: Wetterbedingungen



Abb. 68: Außentemperatur

Die Solarzellenoberflächentemperatur beträgt $51,3^{\circ}\text{C}$. Dieser Wert ist dem Display des Temperaturfühlers in Abbildung 69 zu entnehmen.

Die Spannung U beträgt vor dem Versuch $3,25\text{ V}$ (siehe Abb. 70), der Stromfluss I hat wiederum den konstanten Wert von $0,30\text{ A}$, welches eine Ausgangsleistung von $P=0,975\text{ W}$ beschreibt.



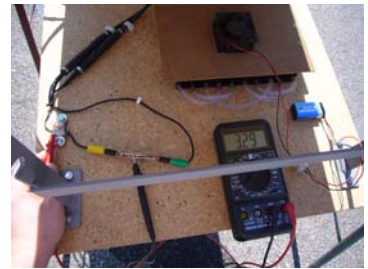
Abb. 69: Oberflächentemperatur vor dem Versuch

Abb. 70: Spannung U vor dem Versuch

Nachdem nun die Pumpe eingeschaltet und der Versuch damit gestartet worden ist, ergeben sich folgende Ergebnisse. Nach zwei Minuten beträgt die Oberflächentemperatur nur noch $40,7^{\circ}\text{C}$ (Abb. 71), die Spannung U liegt bei $3,29\text{ V}$, was in Abb. 72 zu erkennen ist. Daraus folgt eine Leistung von $P=0,987\text{ W}$.



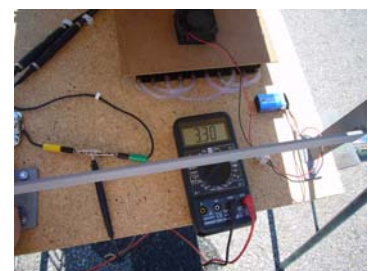
Abb. 71: Oberflächentemperatur nach ca. zwei Minuten

Abb. 72: Spannung U nach ca. zwei Minuten

Nach circa fünf Minuten des Versuchsverlaufes liegt die Oberflächentemperatur bei $38,6^{\circ}\text{C}$ (Abb. 73), die Spannung U bei $3,30\text{ V}$ (siehe Abb. 74), welche eine Leistung von $P=0,99\text{ W}$ zur Folge hat.



Abb. 73: Oberflächentemperatur nach ca. fünf Minuten

Abb. 74: Spannung U nach ca. fünf Minuten

Nach zehn Minuten wird dann der Endstand von einer Oberflächentemperatur von $29,8^{\circ}\text{C}$, welche aus Abb. 75 zu entnehmen ist, einer Spannung U von $3,33\text{ V}$, die aus Abb. 76 abzulesen ist und der Höchstleistung von $P=0,999\text{ W}$ erreicht.



Abb. 75: Oberflächentemperatur nach ca. zehn Minuten

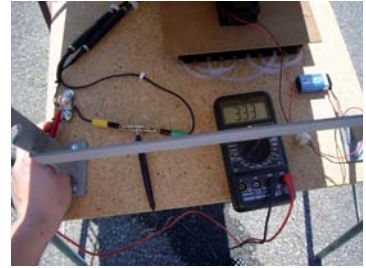


Abb. 76: Spannung U nach ca. zehn Minuten

Selbst nach einer Stunde in diesem Versuchsdurchgang ändert sich keiner dieser Werte mehr, da die Sonne ohne Hindernis auf die Zelle gelangen kann. Als der Himmel kurz bedeckt ist, kühlt sich die Platte sehr rasch auf $25,5^{\circ}\text{C}$ ab (siehe Abb. 77) und erreicht dabei



Abb. 77: Oberflächentemperatur bei Bewölkung



Abb. 78: Spannung U bei Bewölkung

eine Spannung U von $3,39\text{ V}$, die in der Abbildung 78 zu sehen ist, was eine Spitzenleistung von $P=1,017\text{ W}$ zur Folge hat.

Diese Werte sind allerdings nur von kurzer Dauer, denn sobald die Wolken wieder vor der Sonne verschwinden, klettert die Oberflächentemperatur wieder auf $29,8^{\circ}\text{C}$ und die Spannung U fällt wiederum auf $3,33\text{ V}$.

2.3.4.3 Erklärung

An diesen geringeren Werten im Gegensatz zum ersten Versuch kann man schon erkennen, dass der Kühlkreislauf hinter der Zelle nicht so schnell und effizient wirkt wie das Besprenkeln mit Wasser. Das liegt daran, dass die Kühlung indirekt erfolgt und somit erst alle Bestandteile zwischen dem Kreislauf und der Zellenoberfläche abgekühlt werden müssen, bevor sich die Leistung verbessern kann. Außerdem heizt sich das Wasser auch schon hinter der Platte ein wenig auf, sodass sich im Kreislauf hinter der Zelle schon angewärmtes Wasser befindet, welches die Verbesserung der Leistung um einiges verringert. Ein weiterer negativer Einflussfaktor ist dabei der Raum zwischen dem Dach, welches bei meinem Versuch die Sperrholzplatte simuliert, und der Zelle an sich. Auch dieser Zwischenraum speichert enorm viel Wärme und muss erst abgekühlt werden, bevor die Oberfläche gänzlich gekühlt wird.

Die Spannung U vor der Kühlung beträgt 3,30 V (siehe Abb. 46). Der Stromfluss I hat vor dem Versuch wiederum einen Wert von $I=0,30$ A. Zu sehen ist dies in Abb. 47.

Damit ergibt sich eine Anfangsleistung von $P=0,99$ W. Damit nun der Versuch durchgeführt werden kann, wird Regenwasser aus einem Brunnen geholt. Doch da sich dieses Wasser in der Sonne und durch den Versuch viel zu schnell aufheizen würde, empfiehlt es sich den Wasserbehälter in das Erdreich einzugraben. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich der Behälter auch in einer Tiefe von mindestens einem Meter befindet, denn die obere Erdschicht heizt sich wie der Sand am Strand je nach Jahreszeit auf. Um eben diesen Effekt zu verhindern, sollte man den Behälter genügend tief eingraben, um das ganze Jahr hindurch eine einigermaßen konstante kühle Temperatur zu erhalten. Da dies aber bei diesem Versuch nicht möglich ist aufgrund der kleinen Ausmaße und des Verbindungskabels zwischen der Solarzelle und der Pumpe, werden tiefgefrorene Kühlkompressen wie in Abb. 48 in den Wasserbehälter gegeben. Dabei wird die Wassertemperatur auf konstant auf $14,8^{\circ}\text{C}$ (siehe Abb. 49) gehalten.

Ebenso wichtig ist die Tatsache, dass Regenwasser verwendet wird. Dies hat hauptsächlich drei Gründe. Zum einen ist es umweltschonender, da kein Trinkwasser zur Kühlung verschwendet wird. Zum anderen ist es kostengünstiger, da dieses Wasser nicht bezahlt werden muss und noch dazu jedem zur Verfügung steht. Der wichtigste Grund aber ist, dass dieses Wasser keinerlei Kalk mehr enthält, da es durch den Wasserkreislauf der Erde ein natürlich destilliertes Wasser ist. Der Kalk könnte sich auf der Solarzelle absetzen und durch diese Kalkablagerung würde die Leistung verringert werden, denn die Sonne kann nicht mehr ungehindert auf das Halbleitermaterial auftreffen.



Abb. 46: Spannung U vor dem Versuch

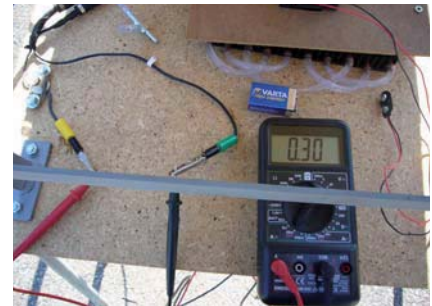


Abb. 47: Stromfluss I



Abb. 48: Zugabe von Kühlkompressen



Abb. 49: Wassertemperatur

Bei diesem Versuch könnten noch bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn zwischen den Kühlleitungen und der Solarzellenunterseite Wärmeleitpaste angebracht werden würde. Da die Wärmeleitpaste, die auf Silikon basiert, welches nicht elektrisch leitend ist, wahrscheinlich nicht ohne Rückstände zu entfernen wäre, kann der Versuch damit nicht durchgeführt werden.

2.3.4 Abkühlung durch Wasserkreislauf rund um die Zelle

2.3.4.1 Aufbau

Bei diesem Versuchsaufbau werden nun die beiden ersten Versuche miteinander kombiniert. Es erfolgt also eine Kühlung der Solarzelle an der Oberfläche durch Besprenkelung mit Wasser und gleichzeitig durch den



Abb. 79: T- Stück

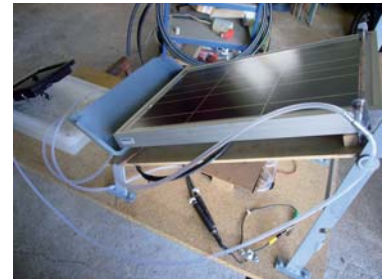


Abb. 80: Verbindungsschläuche

Kühlkreislauf an der Hinterseite der Zelle. Dies kann dadurch erreicht werden, indem die Plastikschläuche, die zuerst die beiden einzelnen Versuche an die Pumpe angeschlossen haben, durch ein T- Stück (siehe Abb. 79) miteinander verbunden werden, sodass beide gleichzeitig angeschlossen sind. Das System der Verbindungsschläuche ist in der Abbildung 80 zu sehen. Ansonsten gibt es keine weiteren Bauteile, die zu den bereits beschriebenen hinzugefügt werden.

2.3.4.2 Ergebnisse

Die Messungen haben ebenfalls am 21. 08. 2010 stattgefunden. Dabei herrscht wie beim ersten Versuch sonniges und unbewölktes Wetter (Abb. 81) bei einer Außentemperatur von 27,5°C (Abb. 82).



Abb. 81: Wetterbedingungen



Abb. 82: Außentemperatur

Die Oberflächentemperatur vor dem Versuch beträgt diesmal $44,6^{\circ}\text{C}$, welche dem Display des Temperaturfühlers in Abbildung 83 zu entnehmen ist. Die Spannung U beläuft sich auf $3,30\text{ V}$ (siehe Abb. 84) und der Stromfluss I liegt konstant bei $0,30\text{ A}$ (siehe Abb. 85), was somit eine Ausgangsleistung von $P=0,99\text{ W}$ erzielt.



Abb. 83: Oberflächentemperatur vor dem Versuch



Abb. 84: Spannung U vor dem Versuch



Abb. 85: Stromfluss I

Zum Start des Versuchs steckt man alle Schläuche zusammen, schaltet die Pumpe ein und schließt den Ventilator auf dem Wärmetauscher an die Batterie an. Schon nach wenigen Sekunden zeigt sich eine Spannung von $3,42\text{ V}$, die aus Abbildung 86 abzulesen ist, was eine Leistung von $P=1,029\text{ W}$ zur Folge hat.



Abb. 86: Spannung U nach wenigen Sekunden

Nach circa zwei Minuten wird erneut die Spannung gemessen und dabei zeigt sich eine Spannung von $3,48\text{ V}$ (siehe Abb. 87) und somit eine Leistung von $P=1,044\text{ W}$. Nach insgesamt 4 Minuten nach Starten des Versuchs folgt die nächste Messung, welche einen Spannungswert von $3,52\text{ V}$ (siehe Abb. 88) und damit eine Leistung von $P=1,056\text{ W}$ ergibt. Die



Abb. 87: Spannung U nach ca. zwei Minuten

Oberflächentemperatur nach vier Minuten beträgt $23,3^{\circ}\text{C}$. Diese ist der Abbildung 89 zu entnehmen. Dieselben Werte liefert auch die nächste Messung zehn Minuten nach Starten des



Abb. 88: Spannung U nach vier Minuten



Abb. 89: Oberflächentemperatur nach vier Minuten

Versuchs, welche ab dann konstant bleiben.

Der Versuch erreicht also nach circa vier Minuten seine Höchstleistung von $P=1,056\text{ W}$, welche zugleich auch die Spitzenleistung aller Versuche darstellt. Nur die Oberflächentemperatur fällt bei dieser Messung noch auf $20,5^\circ\text{C}$, die in Abbildung 90 ersichtlich ist. Ansonsten gibt es keinerlei Veränderungen.



Abb. 90: Oberflächentemperatur
nach zehn Minuten

2.3.4.3 Erklärung

Dieser Versuch zeigt die deutlichste Veränderung der Leistung nach der Kühlung. Obwohl die Werte nur sehr gering sind, muss man dabei aber auch berücksichtigen, dass die Zelle sehr klein ist und ein größerer Stromfluss I wegen der niedrigen Leistung der Glühbirne nicht möglich ist. Die logische Folgerung ist aber, dass dieser Versuch am meisten Auswirkungen haben muss, da die Zelle hierbei direkt und indirekt gekühlt wird. Dazu kommt noch der Brechungs- Effekt des Wassers.

Ebenso interessant ist es anzumerken, dass die Zelle ab einer gewissen Oberflächentemperatur, der Idealtemperatur, die Leistung nicht mehr erhöhen kann. Gerade beim letzten Versuch fällt auf, dass die Zelle auch nach zehn Minuten der Kühlung die Leistung nicht mehr steigert. Allgemein formuliert gilt, dass 25°C [5] die Idealoberflächentemperatur für eine Solarzelle darstellt. Um dieser Aussage auf den Grund zu gehen, wird versucht durch eigene Tests diese Tatsache zu bestärken. Dabei stellt sich allerdings heraus, dass bereits ab einer Oberflächentemperatur von unter 30°C keine Leistungssteigerung mehr zu erwarten ist. Man kann dies an den drei bereits beschriebenen Versuchen zeigen. Bei dem ersten Versuch durch die Besprenkelung mit Wasser an der Oberseite der Zelle stellt sich nach circa einer Minute der Höchstwert von $3,47\text{ V}$ ein. Bedingt durch das kühle Wasser ergibt dies eine Oberflächentemperatur von $23,9^\circ\text{C}$. Doch auch nach längerem Durchführen des Tests ergeben sich keine anderen Werte. Bei dem zweiten Versuch durch die indirekte Kühlung tritt deutlich auf, dass nur eine Temperatur von unter 30°C benötigt wird, denn nach zehn Minuten des Tests ist eine Oberflächentemperatur von $29,8^\circ\text{C}$ und die höchste Spannung U von $3,33\text{ V}$ erreicht. Auch nach einer Stunde ändert sich, wie bereits beschrieben, weder die Temperatur noch die Spannung. Beim dritten Versuch fällt ebenfalls auf, dass die Spannung U im Zeitraum zwischen der Messung nach vier Minuten und der Messung nach zehn Minuten nicht mehr ansteigt und konstant bei dem Höchstwert von $3,52\text{ V}$ bleibt, wobei aber die Temperatur von $23,3^\circ\text{C}$ auf

20,5°C fällt. Es bleibt also zu sagen, dass die Idealoberflächentemperatur einer Solarzelle unter 30°C bleiben muss.

2.4 Gegenüberstellung

Die Folie gegen die Verschmutzung zeigt deutliche Ergebnisse. Nach etwa einem halben Jahr ist eine Solarzelle stark verunreinigt und dies mindert die Leistung um einiges. Wenn also eine Folie angebracht wird, um dies zu verhindern, so lässt sich der Ertrag auf längeren Zeitraum hin betrachtet steigern. Da dieser Versuch aber nichts zur Kühlung der Zelle beiträgt, lässt er sich nicht mit den anderen Versuchen vergleichen.

Der erste Versuch zur Kühlung wirkt in der Anwendung sehr schnell und effektiv. Es sind äußerst schnell Ergebnisse zu erkennen und die Höchstleistung ist auch rasch erreicht.

Der zweite Versuch aber braucht im Verhältnis sehr lange, um die Zelle abzukühlen und damit die Leistung zu steigern. Ebenso erreicht dieser Versuch keine so hohen Werte wie der erste Versuch. Negativ am ersten Versuch ist dabei zu nennen, dass bei diesem über einen langen Zeitraum viel Wasser verdunstet. Dabei gibt es zwei Faktoren, die zu einer hohen Verdunstung führen können, zum einen die Zelle selbst aufgrund ihrer hohen Oberflächentemperatur und zum anderen aber auch die Sonne, die ungehindert auf das Wasser auf der Zelle scheint. Da die Kühlung nur an heißen Tagen in Gebrauch ist, und somit voller Sonnenschein das Wetter beherrscht, wird am meisten Wasser gleich zu Beginn des Versuchs verdunstet, da hier beide Faktoren aufeinander treffen. Zu verhindern ist dies nur, wenn die Kühlung früh morgens eingeschaltet wird, sodass die Zelle keine heißen Oberflächentemperaturen erreichen kann. Der Punkt, der bei diesem ersten Versuch negativ auffällt, ist bei dem zweiten positiv zu beurteilen. Denn hierbei kann durch den geschlossenen Kreislauf kein Wasser verdunsten. Allerdings fällt hier negativ auf, dass der Ventilator, der über dem Wärmetauscher montiert ist, mit einer Batterie betrieben wird. Dies ist die einzige Schwachstelle des Versuches, denn die Energie, die der Ventilator braucht, ist keine regenerative Energie. Als positiv zu bewerten wäre die Möglichkeit diesen Versuch im Winter mit warmem Wasser durchzuführen. Dabei würde die Kühlung als Heizung verwendet werden. Die Schneedecke auf der PV- Zelle würde durch das warme Wasser abgelöst und es könnte weiterhin Sonnenlicht in Strom umgewandelt werden.

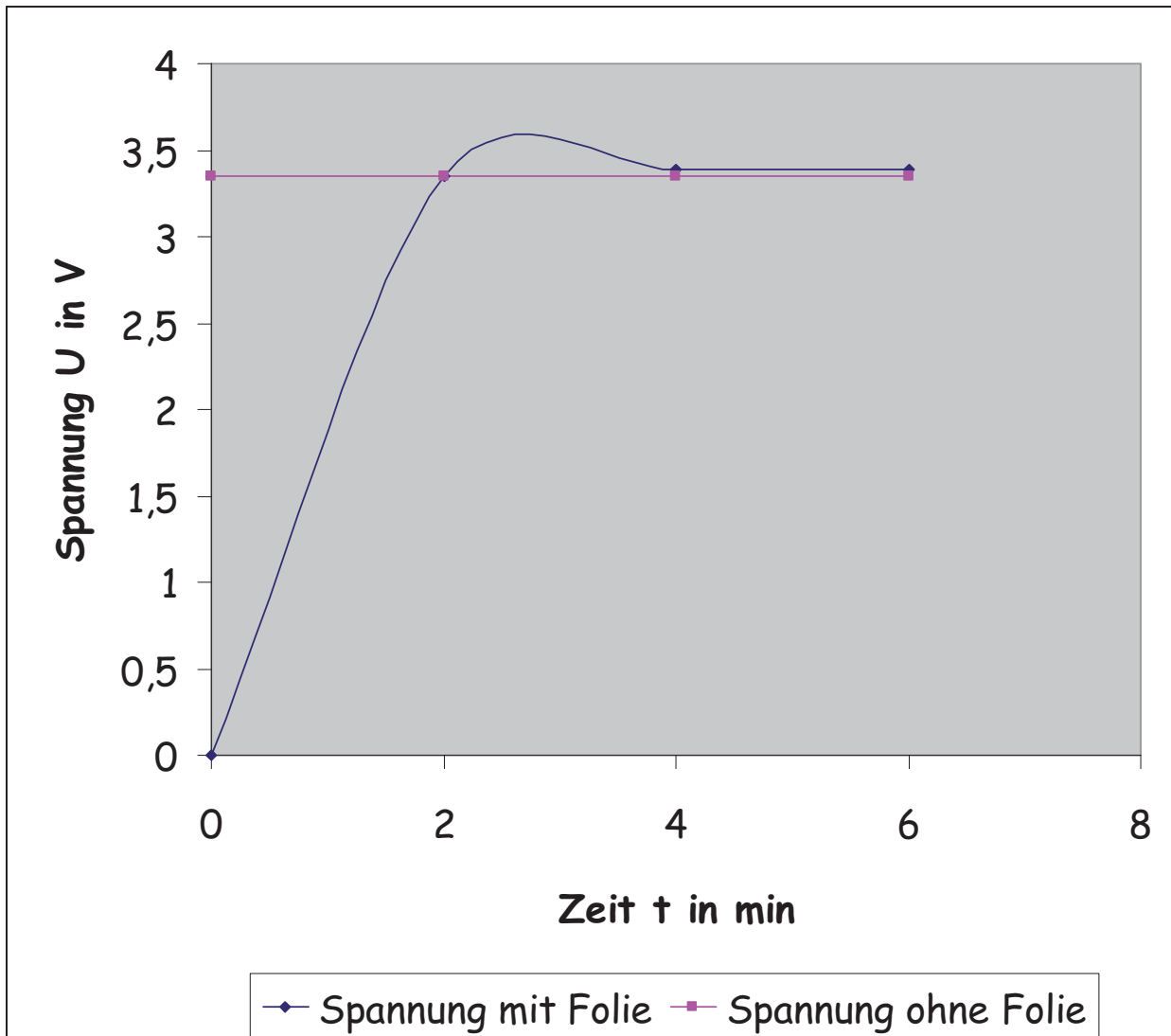
Der dritte Versuch ist dabei eine sehr gute Kombination. Dabei kann die Besprenkelung der Zellenoberfläche mit Wasser dazu benutzt werden, dass die Zelle sehr rasch und effektiv gekühlt wird. Auch wird zusätzlich durch den Brechungs- Effekt die Leistung gesteigert. Der

Kühlkreislauf hinter der Zelle ist dabei auf einen längeren Zeitraum ausgelegt nützlich, denn dieser braucht, wie bereits beschrieben, länger, um die Platte zu kühlen. Wenn also die beiden Systeme zusammen arbeiten, kühlt die Besprenkelung die Platte sehr schnell ab, der Kühlkreislauf unterstützt diese auf lange Sicht. Negativ fällt auch bei diesem Test auf, dass die Wasserverdunstung sehr hoch sein kann. Dies kann dadurch vermindert werden, dass die Besprenkelung nur noch intervallweise zugeschaltet wird oder die Wassermenge an der Zelloberfläche verringert wird.

2.5 Effizienz

Unter diesem Gliederungspunkt werden nun die Versuchsergebnisse in Diagrammen ausgewertet, um die Effizienz der einzelnen Versuche anschaulich zu vermitteln. Dabei wird nur die Spannung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, da diese nach der Formel für die Leistung $P=U \cdot I$ und den konstanten Wert des Stromflusses von $I= 0,30 \text{ A}$ bei allen Versuchsdurchführungen die letztendliche Leistung der Zelle bestimmt.

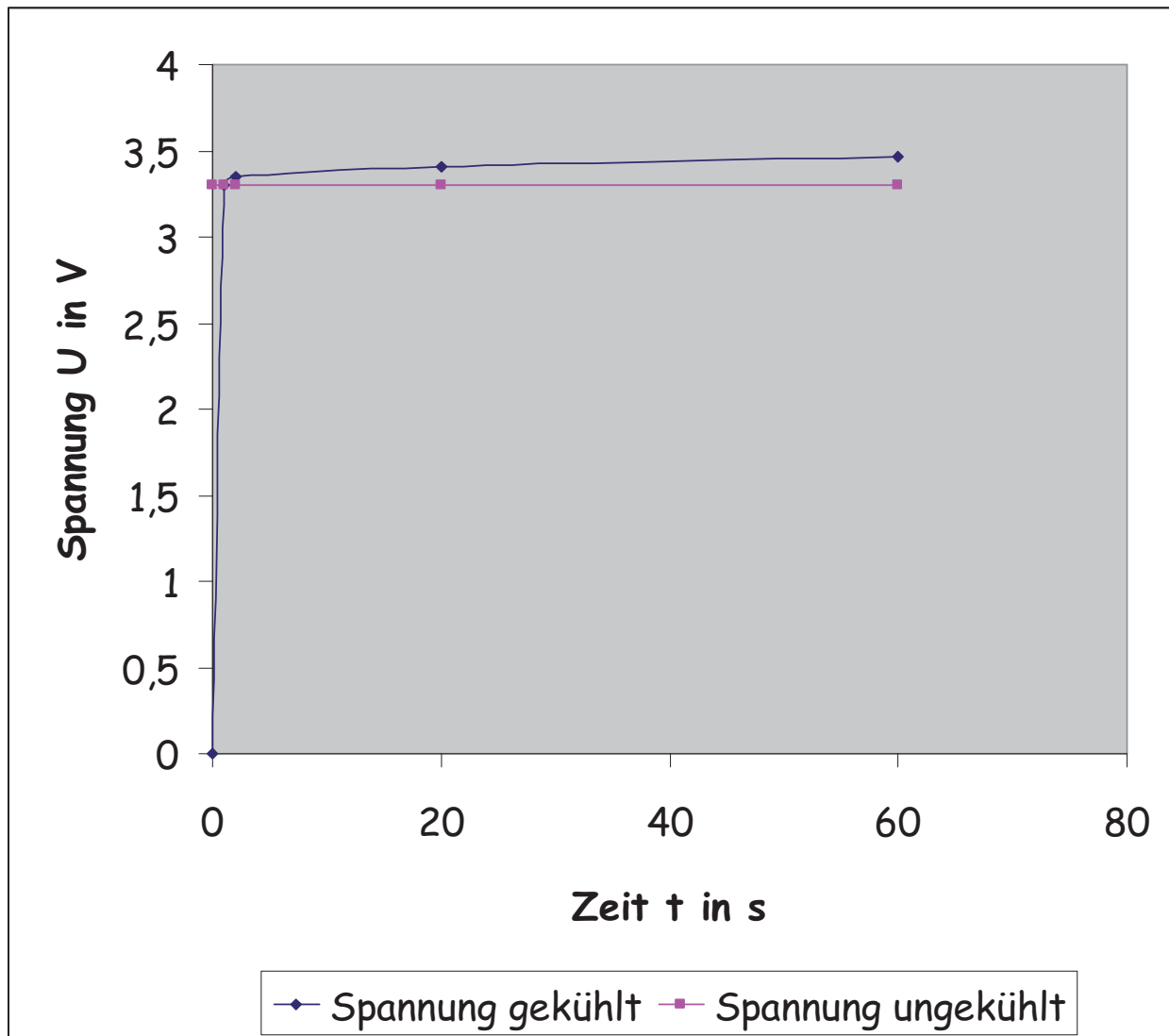
Effizienz der Folie gegen Verschmutzung



Zeit t in Minuten min	Spannung U mit Folie in V	Leistung P in W
0	3,35	1,005
2	3,35	1,005
4	3,39	1,017
6	3,39	1,017

Die Zeiten 0 Minuten und 2 Minuten sollen die Zeit und die Spannung vor dem Abziehen der Folie veranschaulichen, wohingegen die Zeiten 4 Minuten und 6 Minuten die Zeit nach dem Abziehen verdeutlichen. Denn bei diesem Versuch spielen die Zeiten keine wichtige Rolle, da der Übergang eher sprunghaft ist. Wenn nun die Spannung von $U = 3,35 \text{ V}$ vor dem Versuch die Basis und die Spannung von $U = 3,39 \text{ V}$ das Endergebnis des Versuches darstellt, so bewirkt dieser Versuch eine Leistungssteigerung von 1,19 %.

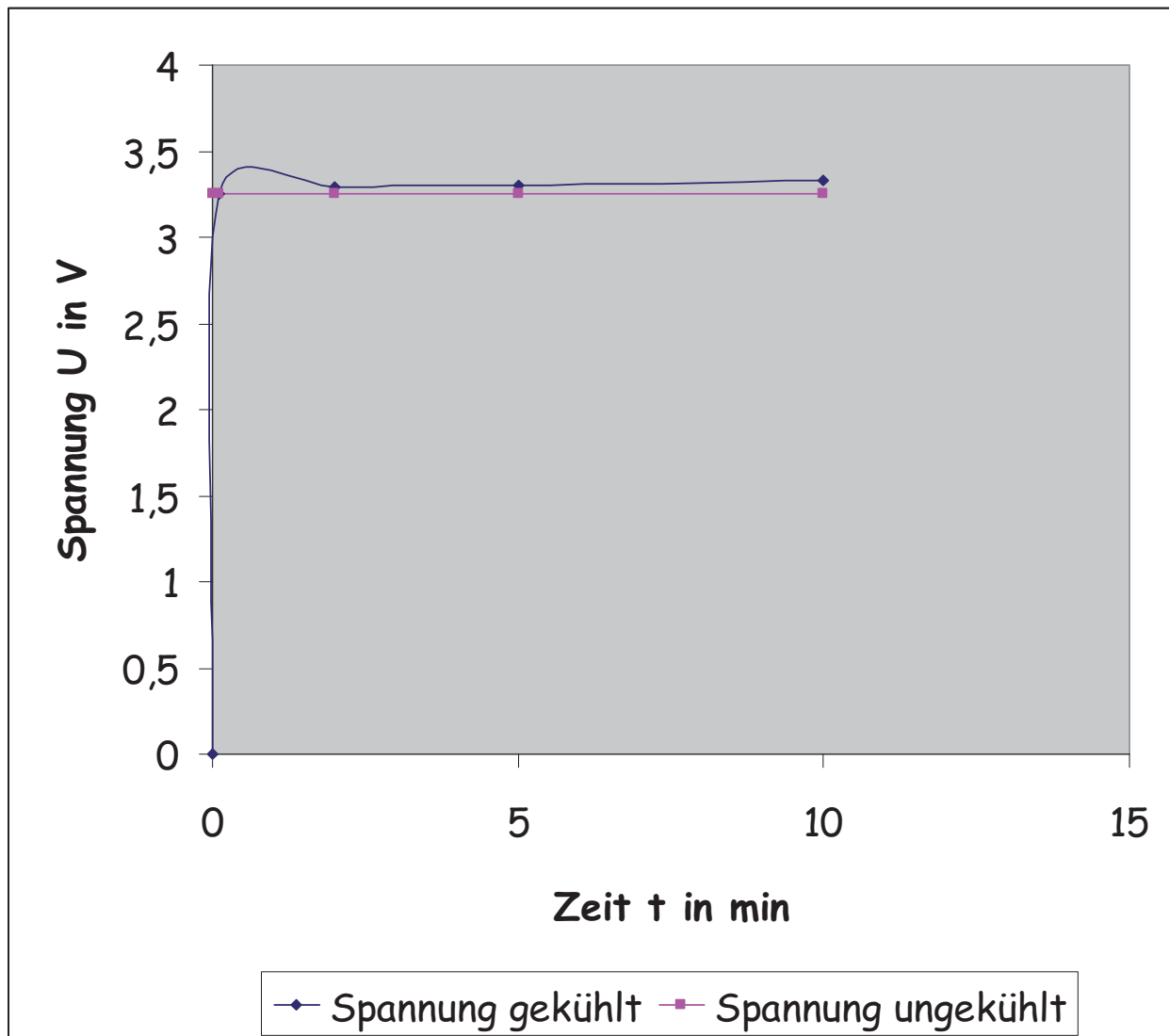
Effizienz der Abkühlung der Zellenoberfläche durch Besprenkelung mit Wasser



Zeit t in Sekunden s	Spannung U gekühlt in V	Leistung P in W
0	3,30	0,99
2	3,35	1,005
20	3,41	1,023
60	3,47	1,041

Ausgehend von einer Anfangsleistung von $P=0,99$ W und einer Höchstleistung von $P=1,041$ W hat die Steigerung einen Wert von $P=0,051$ W. Prozentual ausgedrückt ist dies eine Steigerung von 5,15%.

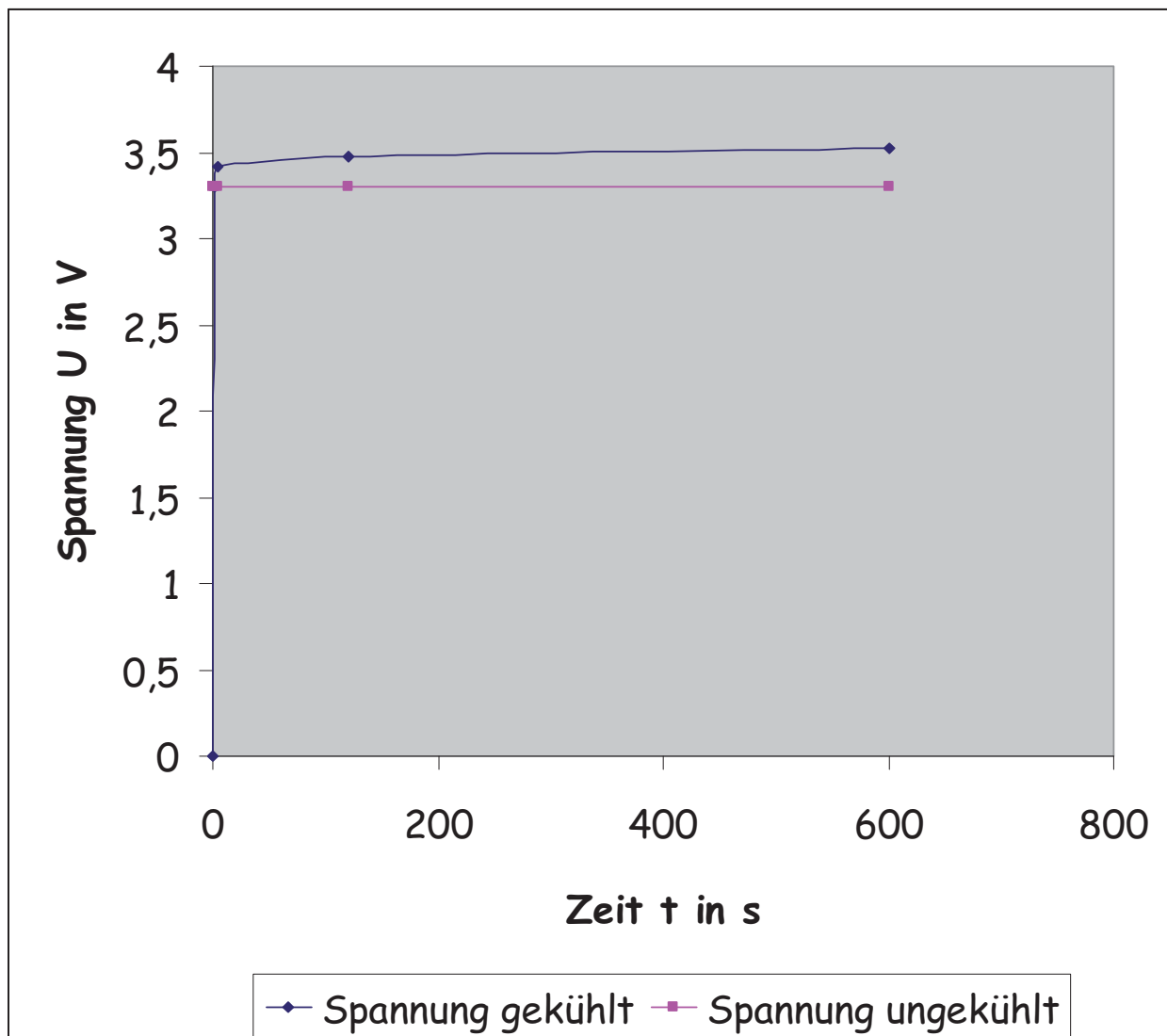
Effizienz der Abkühlung der Zellenoberfläche mit Hilfe eines Kühlkreislaufes hinter der Zelle



Zeit t in Minuten min	Spannung U gekühlt in V	Leistung P in W
0	3,25	0,975
2	3,29	0,987
5	3,30	0,99
10	3,33	0,999

Wenn man hier die Leistung von $P=0,975$ W als Basis nimmt und der Spitzenwert einer Leistung von $P=0,999$ W entspricht, so ist dies eine Leistungssteigerung von 2,46%.

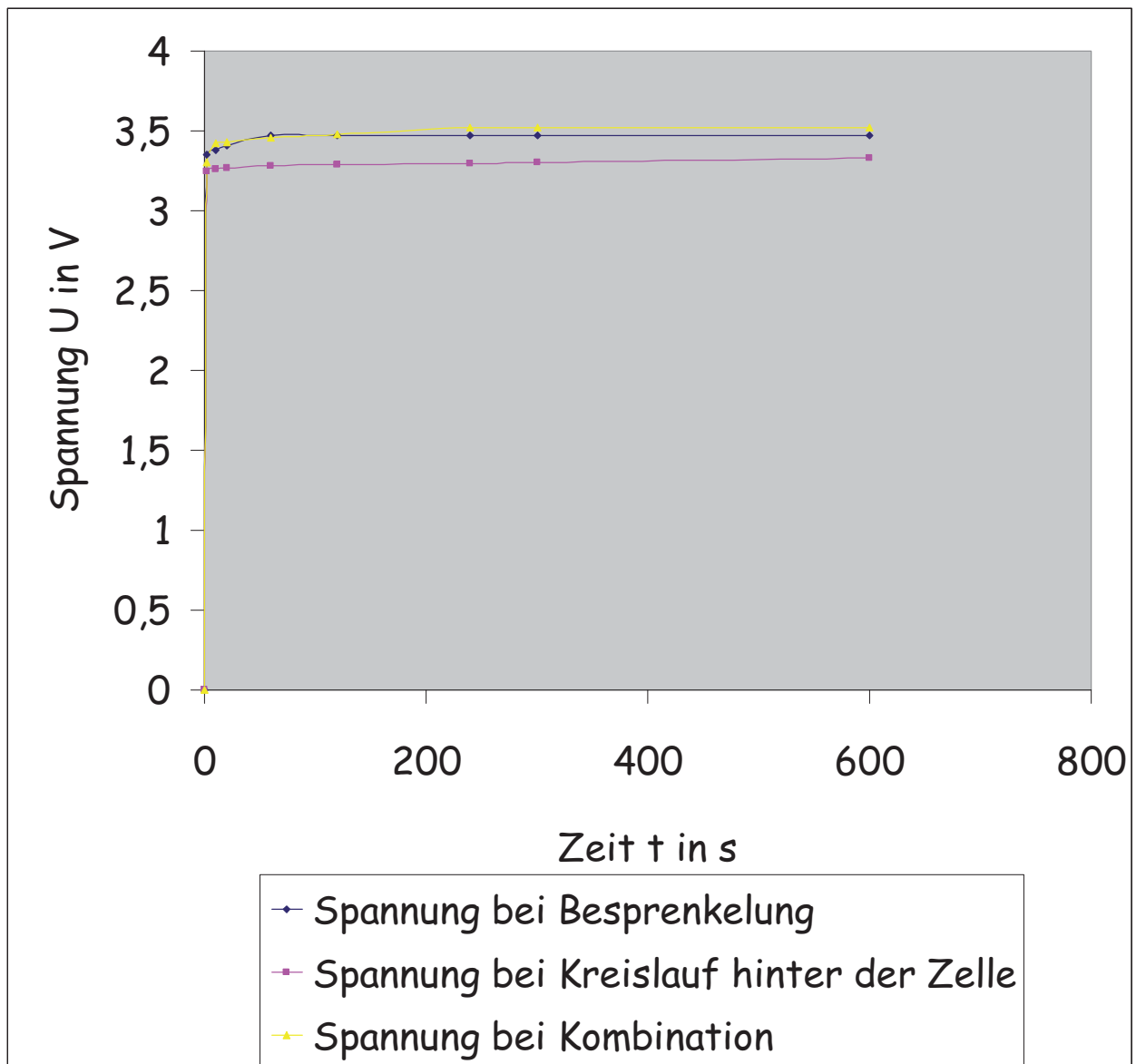
Effizienz der Abkühlung durch Wasserkreislauf rund um die Zelle



Zeit t in Sekunden s	Spannung U gekühlt in V	Leistung P in W
0	3,30	0,99
5	3,42	1,029
120	3,48	1,044
240	3,52	1,056
600	3,52	1,056

Bei dieser Kombination der Versuche dient der Wert der Leistung von $P=0,99$ W als Ausgangsleistung und der Höchstwert von $P=1,052$ W als Endwert. Somit erreicht der Versuch eine Leistungssteigerung von 6,26%.

Kombination der Spannungsentwicklung der verschiedenen Versuche



	Zeit t in Sekunden s	Spannung U gekühlt in V	Leistung P in W
Besprenkelung	0	3,30	0,99
	2	3,35	1,005
	20	3,41	1,023
	60	3,47	1,041
	600	3,47	1,041
Kreislauf hinter der Zelle	0	3,25	0,975
	120	3,29	0,987
	300	3,30	0,99
	600	3,33	0,999
Kombination aus beiden	0	3,30	0,99
	10	3,42	1,029
	120	3,48	1,044
	240	3,52	1,056
	600	3,52	1,056

In der Kombination aller drei Spannungslinien kann man erkennen, dass der dritte Versuch die größte Effektivität besitzt. An der Steigung der Graphen erkennt man das Zusammenwirken der ersten beiden Versuche im dritten besonders gut. Der erste Versuch, die Besprenkelung, zeigt in den ersten Sekunden eine sehr große Steigung und erreicht den Spitzenwert ebenfalls sehr schnell. Die indirekte Kühlung durch den Kreislauf hinter der Zelle bewirkt nur einen geringen Anstieg, doch benötigt dies auch mehr Zeit, um den Höchstwert zu erreichen. Im dritten Versuch, der Kombination aus diesen beiden Versuchen, erkennt man, dass der Anstieg auch in den ersten Sekunden sehr steil verläuft, aber im Gegensatz zur Besprenkelung steigt dieser Graph auch noch weiterhin, welches die Folge der indirekten Kühlung ist. Insgesamt erreicht auch die Kombination aus der direkten und indirekten Kühlung den höchsten Spannungswert von $U = 3,52$ V. Prozentual gesehen hat der letzte Versuch auch die höchste Leistungssteigerung von 6,26 %.

2.6 Ökologische und ökonomische Aspekte

Der Versuch durch die Folie Schmutz zu verhindern, zeigt zwar eine Leistungssteigerung, aber ökologisch und ökonomisch gesehen gilt es hier einiges anzumerken.

Ebenso die Versuchsreihe, die zur Kühlung der Solarzelle dient, ist physikalisch bestens durchzuführen und zeigt gute Ergebnisse, doch gilt es auch hier die ökologische und ökonomische Sichtweise zu betrachten.

2.6.1 Ökologie

Aus ökologischer Sichtweise ist der Versuch durch die Folie Schmutz von der Solarzelle abzuhalten eher fragwürdig. Denn für die Herstellung und Entsorgung der Folie wird mehr Energie aufgewendet als die dadurch aus dem Sonnenlicht umgewandelte. Da die Folie mindestens halbjährlich ausgetauscht werden müsste, ist eine Leistungssteigerung von 1,14 % in Relation zur Umweltbelastung verschwindend gering. Ein wichtiger Gesichtspunkt hinsichtlich der Ökologie, der die Kühlversuche betrifft, ist die Verwendung von Regenwasser zur Kühlung. Bei der kleinen Versuchsanordnung, die verwendet worden ist, ist dies kein nennenswerter negativer Aspekt, da die Menge, die dazu verwendet wird im Gegensatz zu der, die zur Kühlung einer üblichen Anlage benötigt wird, verschwindend gering ist. Bei meiner Versuchsanordnung werden nur etwa zwei Liter Wasser verbraucht, um die Leitungen zu füllen und gleichzeitig noch genügend Wasser im Behälter zu haben. Zur Veranschaulichung einer üblichen Anlage, für die eine solche Kühlung zur Leistungssteigerung in Frage kommt, soll die Anlage auf dem Hof in Poppenzell dienen, welche auch in der Abbildung 91 zu sehen ist.

Dies ist zwar eine Anlage, die in der Gegend des Bayerischen Waldes zu den größeren zählt, doch ist sie auch mit einer Leistung von 42 kWh nicht zu groß. Zur Kühlung einer solchen Anlage sind schätzungsweise 3000 Liter Wasser notwendig, um die Leitungen zu füllen, die Oberfläche mit einem dünnen Wasserfilm zu bedecken und



Abb. 91: Poppenzeller Solaranlage

dabei noch eine Reserve im Tank zu behalten und dies ist der ökologisch fragwürdige Punkt. Denn gerade im Sommer und bei heißem Wetter, wenn die Kühlung benötigt wird, ist Regenwasser ein knappes Gut. Dies sollte dann auch nicht dazu benutzt werden, um den Ertrag einer Solaranlage zu steigern, sondern sollte vielmehr dem Zweck als Trinkwasser nach der Reinigung durch die Gesteinsschichten für Mensch und Tier oder als Dünger für die Wiesen und Gärten dienen.

2.6.2 Ökonomie

Auch aus ökonomischer Sichtweise ist der Versuch durch die Folie Schmutz abzuhalten nicht rentabel. Es ist ebenso bei einigen Solaranlagenbesitzern bereits üblich die Anlage regelmäßig zu reinigen, doch der Arbeitsaufwand die Anlage zu reinigen oder die Folie anzubringen ist als gleichwertig anzusehen. Außerdem bleiben die Kosten für Reinigungsmittel oder die Folie, welche beide mindestens jedes halbe Jahr anfallen, gleich. Insgesamt betrachtet rechtfertigt eine Leistungssteigerung von 1,14 % diesen Aufwand nicht. Dazu trägt auch die Tatsache bei, dass eine höhere Leistungssteigerung nicht zu erwarten ist, da der Regen immer wieder die Anlage säubert. Dabei reinigt er sie zwar nicht vollständig, doch nach einem halben Jahr wäre die Verschmutzung auf der Anlage als stagnierend zu betrachten.

Ebenso wäre eine solche Kühlung, die in den Versuchen durchgeführt wurde, wirtschaftlich gesehen untragbar. Denn wie berechnet bringt die Kühlung bei der Kombination aus direkter und indirekter Kühlung im besten Falle eine Leistungssteigerung von 6,26%. Doch die Anschaffungskosten für eine übliche Anlage, wie zum Beispiel der in Poppenzell, würden den dadurch erzielten Gewinn um einiges übersteigen. Wenn man auch betrachtet, dass die meisten Kosten nur einmalig sind, würde sich dies niemals auszahlen. Bei dieser kleinen Versuchsanordnung waren die Ergebnisse im Gegensatz dazu schon rentabel, da nur Materialien verwendet worden sind, die in ihrem ursprünglichen Sinn keine Verwendung mehr gefunden haben und deshalb in dieser Anwendung mehr oder weniger recycelt wurden. Somit belaufen sich in der Versuchsanordnung die Anschaffungskosten, nur auf die Kühlung bezogen, auf die Plastikschräuche, das Kupferrohr, die T-Stücke und die Solarpumpe. Wenn man aber eine solche

Kühlung für eine übliche Anlage anschaffen möchte, benötigt man weitaus mehr. Wiederum soll als Beispiel die Solaranlage in Poppenzell dienen. Dabei wäre ein Erdtank in der Nähe der Halle einzugraben, der über genügend Volumen verfügt, um das Wasser zu speichern. Hier wäre ein Plastiktank zu verbauen, der in der Anschaffung billiger wäre als ein Betontank. Dieser müsste auch dem Druck standhalten können, der durch das Erdreich auf ihm lastet und zusätzlich noch das Wasser genügend kühlen. Des Weiteren würde man eine sehr große Pumpe benötigen, die ausreichenden Druck bereitstellen kann, um das Wasser auf den höchsten Punkt des Daches, auf elf Meter, zu pumpen. Außerdem ist dabei noch zu beachten, dass die Leitungen und Verbindungsstücke ebenfalls diesem Druck standhalten müssten, denn solche Teile sind in ihrer Anschaffung sehr teuer. Nicht zu vergessen ist dabei auch die Zeit, die in die Wartung investiert werden müsste. Denn es würde in dieser großen Anordnung viel zu viele störanfällige Stellen geben, die immer wieder überprüft werden müssten. Noch dazu kommen die Reparaturkosten, die nach einigen Jahren durch Verschleiß auftreten würden. Ebenso ist zu erwähnen, dass die Kühlung nicht immer zugeschaltet werden kann, um die Leistung zu steigern, sondern diese nur einen Sinn hat, wenn die Oberflächentemperatur der Solarzelle auf über 30°C steigt. Somit hat die Kühlung nur eine äußerst begrenzte Einsatzzeit. Auch in der Ökonomie tritt noch einmal der Punkt des Wasserverbrauches auf. Denn kaum jemand hat so viel Regenwasser zur Verfügung, um den Erdtank zu füllen und immer wieder nach zu füllen, wenn durch Verdunstung Wasser verloren geht. Aus diesem Grund würde wahrscheinlich Leitungswasser hinzugefügt werden. Doch dies ist Trinkwasser und gerade in Zeiten des Klimawandels stellt das ein äußerst kostbares Gut dar. Außerdem steigen die Wasserpreise in den letzten Jahren beständig.

Durchschnittliche Kosten¹ für die Trinkwasserversorgung privater Haushalte 2005 bis 2007

Bund	Kosten¹ in Euro² je Jahr bei Bezug von 80 m³		
Land	2005	2006	2007
¹ Die Kosten setzen sich zusammen aus "Verbrauchsabhängigem Entgelt" (Kubikmeterpreis) und "Haushaltsüblichem verbrauchsunabhängigem Entgelt" (Grundgebühr).			
² Nach Einwohnern gewichtet in Brutto.			
Baden- Württemberg	166,28	169,16	171,92
Bayern	129,96	132,88	135,32
Berlin	176,80	184,80	183,20
Brandenburg	220,56	222,44	223,88
Bremen	189,96	188,88	187,56
Hamburg	173,08	176,80	176,80
Hessen	181,48	182,40	183,56
Mecklenburg-Vorpommern	199,16	203,28	206,68
Niedersachsen	137,32	138,84	141,16
Nordrhein-Westfalen	227,44	229,88	232,68
Rheinland-Pfalz	177,00	179,44	183,76
Saarland	187,80	196,76	202,20
Sachsen	270,48	270,40	270,56
Sachsen-Anhalt	219,36	221,00	221,24
Schleswig-Holstein	137,04	137,96	139,64
Thüringen	264,76	275,52	275,28
Deutschland	185,24	187,92	189,56

Abb. 92: Entwicklung der Trinkwasserkosten in der BRD von 2005 bis 2007

In dieser Tabelle kann man erkennen, dass in ganz Deutschland die Wasserpreise gestiegen sind, wobei auch in einigen Bundesländern die Preise gesunken sind. Doch im internationalen Vergleich in diesen Jahren ist der Wasserpreis in Deutschland im Gegensatz zu den anderen Nationen minimal gestiegen.

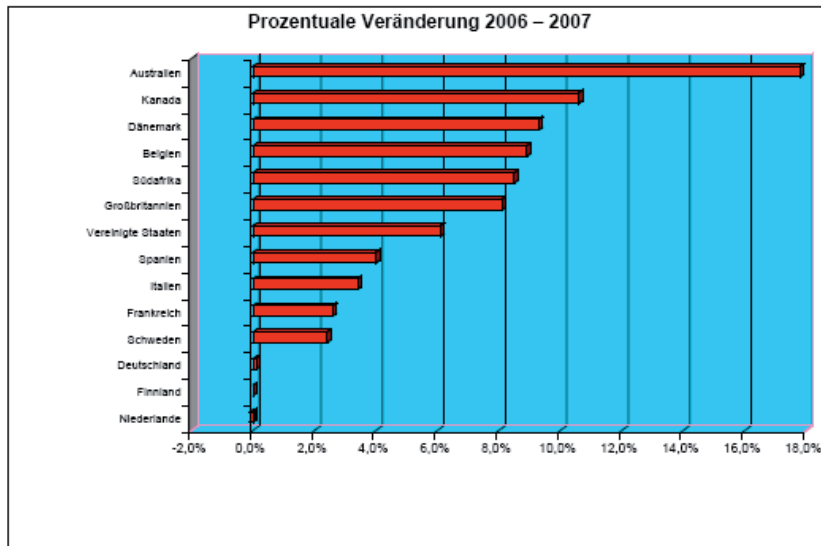


Abb. 93: Prozentuale Veränderung der Wasserpreise von 2006 bis 2007 im internationalen Vergleich

Der Trend geht also dahin, dass die Wasserpreise von Jahr zu Jahr beträchtlich steigen. Alles in allem betrachtet, wäre eine Leistungssteigerung im besten Falle von 6,26% nicht genug, um diese Anschaffungskosten zu rechtfertigen.

3 Ausblicke

„Wir müssen weg vom Öl, bevor das Öl weg ist!“. Dieser Satz stammt von Helmut Brunner, dem Bayerischen Staatsminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, auf dem 17. C.A.R.M.E.N.- Forum, des Centralen Agrar- Rohstoff- Marketing- und Entwicklungs-Netzwerks, im Straubinger Herzogschloss am 22. März 2010 unter dem Titel „Landwirtschaftliche Flächen im Umbruch“. Damit möchte er verdeutlichen, dass sich die fossilen Brennstoffe dem Ende zuneigen und Alternativen gesucht werden müssen. Dabei treten vor allem regenerative Energien in den Vordergrund. Auch Josef Gold von der GSW Gold SolarWind Management GmbH zeigt auf demselben Forum die Energieautarkie auf Basis von solarmodulbestückten Dachflächen als sinnvollen Weg auf. Der Trend der Stromgewinnung müsse zu diesen erneuerbaren Ressourcen hin gehen. Der Anfang dazu ist bereits getan, doch gibt es noch einiges an der bestehenden Technik zu verändern, um den Wirkungsgrad und die

Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Genau dem entspricht auch meine Facharbeit. Es müssen noch viele Möglichkeiten der Veränderung durchgeführt werden. Dabei kann es auch, wie bei meiner Facharbeit passieren, dass die physikalischen Verbesserungen nicht wirtschaftlich tragbar sind. Doch die Forschungsarbeiten daran dürfen nicht aufgehört werden. Sie müssen sogar, um unseren blauen Planeten vor den weit reichenden Auswirkungen der Erderwärmung zu schützen, noch intensiviert werden.

4 Abbildungsverzeichnis

- 1)Abb. 1: Schema der Texturierung einer Solarzelle, aus: Hoffmann, Volker U., Photovoltaik- Strom aus Licht, Leipzig 1996, S. 21
- 2)Abb. 2- 4: Schematische Darstellungen der Kristallgitter, aus: Hörstmann- Jungemann, Petra, Wie funktioniert eine Silizium- Solarzelle? , Informationen über den grundsätzlichen Aufbau einer Solarzelle, in:
<http://www.sfv.de/lokal/emails/phj/solarzel.htm>, Stand: 14.02.2006
Aufrufdatum: 10.08.2010
- 3)Abb. 5: Anregung eines Elektrons vom Valenzband ins Leitungsband durch Absorption der Energie eines Photons, aus: Würfel, Peter, Physik der Solarzellen, Heidelberg 1995, S. 34
- 4)Abb. 6: Schema des Photostromflusses bei Lichteinwirkung am pn- Übergang, aus: Karamanolis, Stratis, Alles über Solarzellen, Ein Handbuch für Anwender, München 1988, S. 40
- 5)Abb. 7: Schematischer Querschnitt einer Solarzelle, aus: Hoffmann, Volker U., Photovoltaik- Strom aus Licht, Leipzig 1996, S. 24
- 6)Abb. 8- 10: Globalstrahlung in der BRD von 2007 bis 2009,
aus: http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwww/Desktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T169000347481244102247200gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimagutachten%2FSolarenergie%2FDownload__node.html%3F__nnn%3Dtrue,
Stand der Karte aus dem Jahr 2007: 01.01.2008
Stand der Karte aus dem Jahr 2008: 22.10.2009
Stand der Karte aus dem Jahr 2009: 01.02.2010
Aufrufdatum: 14.08.2010
- 7)Abb. 11: Schematische Darstellung der Mittagssonnenhöhen an verschiedenen Daten im Jahr, aus: Hoffmann, Volker U., Photovoltaik- Strom aus Licht, Leipzig 1996, S. 57
- 8)Abb. 12- 62: eigene Bilder zum Versuchsaufbau, August- September 2010
- 9)Abb. 63: Tabelle mit den thermischen Eigenschaften einiger Materialien, aus: Gerstung, Olaf, Tabellen- Physik, in:
<http://ogerstung.de/tabellen/physik.html>, Stand: 17.04.2009

Aufrufdatum: 02.09.2010

- 10)Abb. 64- 91: eigene Bilder zum Versuchsaufbau, August- September 2010
- 11)Abb. 92: Entwicklung der Trinkwasserkosten in der BRD von 2005 bis 2007,
aus: Statistisches Bundesamt Deutschland- Wasserwirtschaft,
in: <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content75/KostenTrinkwasser2007,templateId=renderPrint.psml>
Stand: August 2008, Aufrufdatum: 07.09.2010
- 12)Abb. 93: Prozentuale Veränderung der Wasserpreise von 2006 bis 2007 im internationalen Vergleich, NUS consulting group, Energy Cost Management,
in: http://www.brauereijournal.de/basics/1/archiv/818/wasserpreisvergleich_2007.pdf , Stand: August 2007,
Aufrufdatum: 07.09.2010

5 Literaturverzeichnis

Bezüge aus Fachbüchern:

- 1) Dr. Hammer, Anton, Dr. Hammer, Hildegard, Dr. Hammer, Karl, Physikalische Formeln und Tabellen, München 2002
- 2) Falk, Antony, Dürschner, Christian, Remmers, Karl- Heinz, Photovoltaik für Profis, Verkauf, Planung und Montage von Solarstromanlagen, Berlin 2009, 2. Auflage
- 3) Hoffmann, Volker U., Photovoltaik- Strom aus Licht, Leipzig 1996
- 4) Wagemann, Hans- Günther, Eschrich, Heinz, Photovoltaik, Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben, Wiesbaden 2007, 1. Auflage Juni 2007
- 5) Würfel, Peter, Physik der Solarzellen, Leipzig 1995

Bezüge aus dem Internet:

- 6) Hörstmann- Jungemann, Petra, Wie funktioniert eine Silizium- Solarzelle?, Informationen über den grundsätzlichen Aufbau einer Solarzelle,
in: <http://www.sfv.de/lokal/mails/phj/solarzel.htm>, Stand: 14.02.2006
Aufrufdatum: 10.08.2010
- 7) Mennerich, Ingo, „Sonne, Energie, Klima“, Ein Themengarten im Schulbiologiezentrum Hannover,
in: <http://www.schulbiologiezentrum.info/AH%2019.55%20Garten%20Sonne%20Energie%20Klima.pdf>, Stand: Februar 2002, Aufrufdatum: 12.08.2010
- 8) Nigischer, Wolfgang, Eigenschaften des Glases, in: <http://www.fn-glas.at/Glasdaten.pdf>,
Stand: Mai 2008, Aufrufdatum: 27.08.2010
- 9) Waffenschmidt, Eberhard, Wenn es Solarzellen zu heiß wird, liefern sie weniger Energie,
in: http://www.sfv.de/lokal/mails/wvf/wenn_es_.htm, Stand: 28.09.2006,
Aufrufdatum: 23.08.2010

10) Heckert Solar AG, Datenblatt des HS- PXL 200 Moduls, in:

http://www.heckertsolar.com/fileadmin/Redakteure/allgemein/downloads/international/HS_PXL_195-205_d-e-f_101007.pdf, Stand: 10. 2010, Aufrufdatum: 16.12.2010

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den
Ort Datum

.....
Unterschrift des Schülers