

Photovoltaik



Abbildung 1: Photovoltaikanlage

Autor: Stefanie Mayer, Florian Lesch

Zusammenfassung

Seit 1970 hat sich der weltweite Energiebedarf beinahe verdreifacht. Die Gründe hierfür sind einerseits die schnell wachsende Weltbevölkerung in den letzten 40 Jahren und andererseits der steigende Lebensstandard in den Industrie- und Schwellenländern. ^(1,2)

Um den weltweiten Energiebedarf auch in Zukunft decken zu können, muss der Großteil der Energiegewinnung auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Hier gibt es mittlerweile schon viele verschiedene Methoden zur Gewinnung von regenerativer Energie. Die Photovoltaik ist hierbei bisher als einzige in der Lage, Sonnenlicht auf „direkten Weg in elektrische Energie umzuwandeln ohne dass aufwendige Zwischenprozesse oder verschleißanfällige mechanische Konverter notwendig sind.“ ⁽³⁾

Beim Auftreffen von Licht auf die Solarzelle der Photovoltaik kann also direkt Energie in Form von Strom gewonnen werden. Wie genau dieser physikalische Prozess stattfindet, welche Einflussfaktoren zu betrachten sind und wie der Energiegewinnungsprozess optimiert werden kann, soll in diesem Modul den SchülerInnen nähergebracht werden.

¹ Mertens 2020.

² Holler und Gaukel 2019.

³ Mertens 2020.

Inhalt

Photovoltaik

1. Physik der Photovoltaik

- 1.1 Halbleiterphysik
- 1.2 Photovoltaische Effekt

2. Aufbau und Wirkungsweise eines Photovoltaikmoduls

3. Wirkungsgrad, Einflussfaktoren und Optimierung

- 3.1 Wirkungsgrad einer Solarzelle
- 3.2 Systemwirkungsgrad einer Photovoltaikanlage
- 3.3 Weitere Einflussfaktoren & Optimierung

4. Zukunft der Photovoltaik

5. Literaturverzeichnis

Aktivitäten

Aktivität 1 - Untersuchung der Einstrahlungsleistung bei variierenden Einstrahlwinkel

Aktivität 2 – Bestimmung des Optimalen Betriebspunktes

Aktivität 3 – Bestimmung des maximalen Wirkungsgrads des PV-Moduls

Aktivität 4 – Untersuchung des Einflusses von Verschattung auf die Leistung

1. Physik der Photovoltaik

1.1 Halbleiterphysik

Um zu verstehen, wie Energie aus dem Sonnenlicht gewonnen wird, müssen wir uns mit der Physik der Photovoltaik beschäftigen.

Eine Photovoltaikanlage besteht aus Solarmodulen, die wiederum aus einzelnen parallelgeschalteten Solarzellen besteht. Diese Solarzellen sind daher die Grundbausteine der Photovoltaikanlage. ⁽⁴⁾ Für den genauen Energiegewinnungsprozess müssen wir die Grundlagen der Festkörperphysik betrachten.

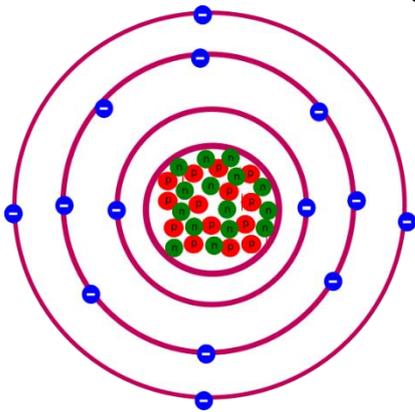


Abbildung 2: Siliziumatom

Typischerweise besteht eine Solarzelle aus dem Halbleiterelement Silizium. Nach dem Bohrschen Atommodell wissen wir, dass der Siliziumkern aus 14 Protonen und 14 Neutronen besteht, während die 14 Elektronen auf bestimmten diskreten Schalen in der Atomhülle, um den Atomkern kreisen. Hierbei gilt die Regel, dass die Schalen von Innen nach Außen besetzt werden, wodurch im Fall von Silizium die erste und zweite Schale voll besetzt sind, während die dritte Schale nur 4 statt 8 Elektronen aufweisen kann. Diese 4 Elektronen auf der äußersten Schale nennt man Valenzelektronen. ⁽⁵⁾

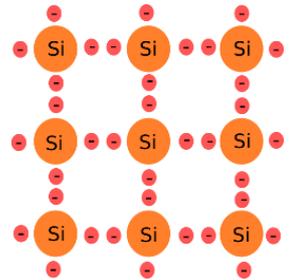


Abbildung 3: Siliziumkristall

Durch die kovalente Bindung kann das Siliziumatom die äußerste Schale mit Elektronen auffüllen und somit Edelgaskonfiguration erreichen. Hierbei gehen die Valenzelektronen eine feste Bindung mit benachbarten Atomen ein, wodurch ein regelmäßiges, symmetrisches Gitter entsteht. Eine derartige Struktur nennen wir Kristall. ⁽⁶⁾

Wenn wir nun genau ein Siliziumatom aus der Gitterstruktur betrachten, hat jedes Elektron sein eigens definiertes, diskretes Energieniveau. Durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung können einzelne Elektronen angeregt werden und so auf ein höheres, nicht voll besetztes Energieniveau angehoben werden. Demgegenüber kann das Elektron zurück in seinen Grundzustand versetzt werden, durch Emission von elektromagnetischer Strahlung. ⁽⁷⁾

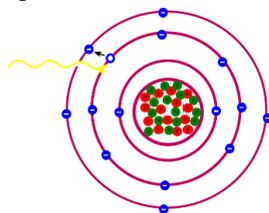


Abbildung 5: Absorption von Licht

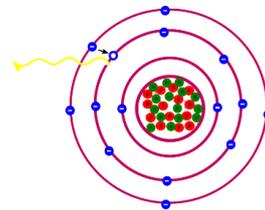


Abbildung 4: Emission von Licht

⁴ Mertens 2020.

⁵ Stroppe et al. 1994.

⁶ Demtröder 2016.

⁷ Stroppe et al. 1994.

In welcher Weise verändern sich nun aber die Energieniveaus, wenn nicht mehr nur ein Atom betrachtet wird, sondern unendlich viele Siliziumatome in unserer Gitterstruktur. Hier kommt es zur wechselseitigen Kopplung der Atome untereinander. Das heißt die einzelnen Energieniveaus der Atome verbinden sich zu Energiebändern. Die Energiebänder geben an, genauso wie zuvor die einzelnen diskreten Energieniveaus eines Atoms, welche Energiezustände für die Elektronen im Gitter erlaubt sind. Das Valenzband, das das höchste von Elektronen am höchsten besetzte Energieband des Siliziumkristalls ist, wird von den Valenzelektronen besetzt. Das Leitungsband ist das erste nicht besetzte Energieband. Zwischen Valenzband und Leitungsband existiert eine verbotene Zone, die Bandlücke, die ein Valenzelektron zunächst überwinden muss, um in das Leitungsband zu gelangen. Der Vorgang entspricht dem Anheben eines Elektrons auf eine höhere Schale im einfachen Atommodell. ⁽⁸⁾

Das heißt es muss Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung zugeführt werden, sodass ein Valenzelektron die Bandlücke überwinden kann und zu einem Leitungselektron wird. Wenn das der Fall ist, entsteht im Valenzband durch das Herauslösen eines Elektrons ein Loch. Ein Elektronen-Loch-Paar wird generiert. Der umgekehrte Vorgang entspricht der Rekombination eines Leitungselektrons, das zurück in das Valenzband fällt und sich dort mit einem Loch verbindet. ⁽⁹⁾

Generieren eines Elektronen-Loch- Paares

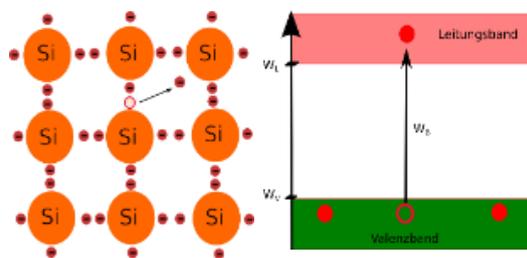


Abbildung 6: Generierung eines E-L-Paares

Rekombinieren eines Elektronen-Loch- Paares

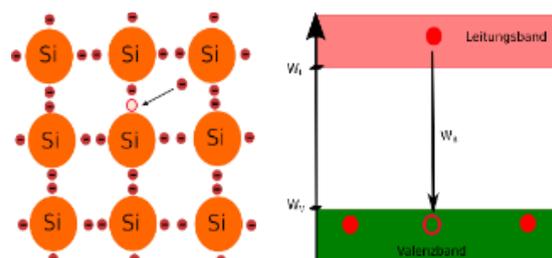


Abbildung 7: Rekombinieren eines E-L-Paares

Silizium ist ein Halbleiter. Bei einer Temperatur um den absoluten Nullpunkt fungiert der Halbleiter als Isolator. Das heißt kein Valenzelektron kann die Bandlücke überwinden und in das Leitungsband gelangen. Wird die Temperatur erhöht, können Elektronen durch die zugeführte Wärmeenergie leichter aus dem Valenzband herausgelöst werden, die Bandlücke überwinden und als Leitungselektron die Leitfähigkeit des Siliziumkristalls steigern. In der Solarzelle muss also ein Lichtstrahl auf den Halbleiter treffen, dessen Photonen genau die Energie mit sich bringen, um die verbotene Zone zwischen Valenzband und Leitungsband zu überwinden. ^(10,11)

Da der Halbleiter erst bei hohen Temperaturen (ca.200°C) zu einem gute Leiter wird, und damit die Photonenenergie unglaublich groß sein müsste, damit aus der Solarzelle Energie gewonnen werden kann, muss die elektrische Leitfähigkeit von Silizium verbessert werden. Dies kann durch das Einarbeiten von Fremdatomen in das

⁸ Stroppe et al. 1994.

⁹ U. Wulf 2021.

¹⁰ Mertens 2020.

¹¹ U. Wulf 2021.

Siliziumgitter gewährleistet werden. Diesen Vorgang nennt man Dotierung. „Durch Dotierung der Solarzelle kann die Leitfähigkeit von Silizium um den Faktor 10^6 gesteigert werden“⁽¹²⁾ Hierbei unterscheidet man:

p-Dotierung: Originalatom wird durch ein Atom der dritten Hauptgruppe des Periodensystems ersetzt (z.B. Bor). Bor hat ein Valenzelektron weniger als Silizium, wodurch ein Loch entsteht, das sich frei durch den Kristall verschieben kann (Löcherleitung). Diese Kombination wird auch Akzeptor genannt.⁽¹³⁾

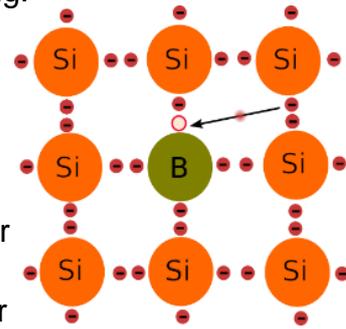


Abbildung 8: p-Dotierung

n-Dotierung: Originalatom wird durch ein Atom der fünften Hauptgruppe des Periodensystems ersetzt (z.B. Phosphor). Phosphor hat ein Valenzelektron mehr als Silizium, wodurch ein freies Elektron entsteht, das sich in Form von Elektronengas frei im Kristall bewegen kann. Diese Kombination wird auch Donator genannt.⁽¹⁴⁾

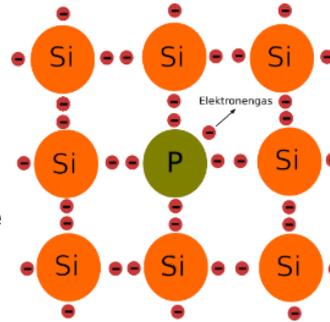


Abbildung 9: n-Dotierung

1.2 Photovoltaischer Effekt

Wird ein Akzeptor und ein Donator zusammengefügt, möchte das p-dotierte Silizium-Borgitter (Akzeptor) sowie das n-dotierte Silizium-Phosphorgitter (Donator) Edelgaskonfiguration erreichen, indem die freien Elektronen des Donators nach rechts zum Akzeptor diffundieren um mit dessen freien Löchern rekombinieren, während die positiven Löcher des Akzeptors sich in Richtung des Donators verschieben. Die Wanderung der Elektronen und Löcher nennt man Diffusionsstrom. Der Diffusionsstrom begünstigt die Rekombination vor allem am Übergang zwischen Donator und Akzeptor.⁽¹⁵⁾

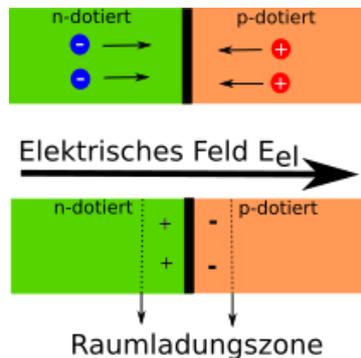


Abbildung 10: Bildung der Raumladungszone

Zeichenerklärung:

- Freies Elektron
- Freies Loch
- ortsfeste, negative Ladung
- + ortsfeste, positive Ladung

Da das dotierte Silizium vor der Diffusion und Rekombination elektrisch neutral war, führt jede Rekombination im n-Gebiet zu einer zunehmend positiven Ladung und im p-Gebiet zu einer zunehmend negativen Ladung dieses Bereichs. Die Folge ist, dass am Übergang sich eine Raumladungszone mit einem positiven Pol im n-dotierten Halbleiter und einem negativen Pol im p-dotierten Halbleiter und somit ein elektrisches Feld

¹² Photovoltaik Solarstrom.

¹³ Kuchling 1994.

¹⁴ Kuchling 1994.

¹⁵ Patrik Schnabel.

aufbaut, welches dem Diffusionsstrom mit einer gewissen Diffusionsspannung entgegenwirkt. Die Wanderung der freien Ladungen wird gestoppt. ⁽¹⁶⁾

Trifft nun Licht, bestehend aus Photonen einer bestimmten Wellenlänge, auf den Halbleiter können die Photonen die Elektronen-Loch-Paare anregen, wodurch die Rekombination gelöst wird und wieder ein freies Elektron und ein freies Loch entsteht. Diese werden entsprechend ihrer Ladung von den positiven bzw. negativen Pol des elektrischen Feldes der Raumladungszone angezogen. Deswegen wandert das freigewordene Loch in den p-dotierten und das freigewordene Elektron in den n-dotierten Halbleiter. Sie kehren beide in ihre Heimat zurück.

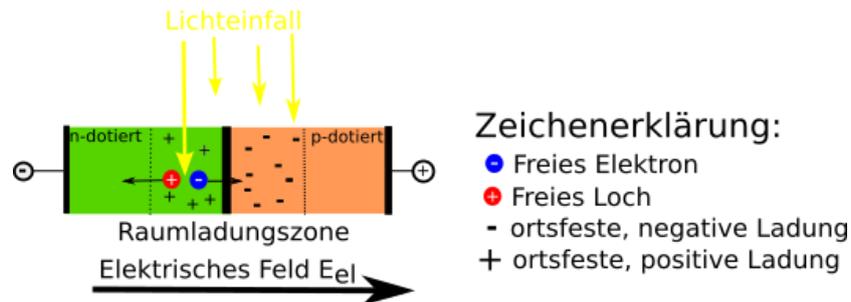


Abbildung 11: Lichteinfall auf Raumladungszone

Dadurch entsteht im n-Gebiet ein Elektronenüberschuss und im p-Gebiet ein Elektronenmangel. Dieses starke Ungleichgewicht nennt man „elektrisches Potential“ oder auch elektrische Spannung und damit sind wir am Ziel. Die elektrische Spannung kann zwischen den beiden Kontakten gemessen, der erzeugte Gleichstrom kann an den Kontakten abgegriffen und an das System weitergeleitet werden und somit kann die gewonnene Energie genutzt werden. ⁽¹⁷⁾ Was genau beim Auftreffen von Licht in der Solarzelle geschieht, wie der Solarstrom erzeugt wird und welchen Weg der Strom bis zu einem Verbraucher zurücklegt, wird im nächsten Kapitel genauer betrachtet.

2. Aufbau und Wirkungsweise eines Photovoltaikmoduls

Eine Photovoltaikanlage besteht aus mehreren Komponenten. Die wichtigste Komponente ist die bereits angesprochene Solarzelle. Da jedoch eine einzelne Solarzelle nur wenig Strom erzeugt, werden mehrere zu einem Solarmodul zusammengeschaltet. Dabei werden zunächst einige Solarzellen in Reihe geschaltet und danach parallel. Werden mehrere Solarmodule auf einem Dach oder Ähnlichem installiert, werden sie ebenfalls in Reihe geschaltet, um Leistungsverluste zu vermeiden. Man spricht bei dem Zusammenschluss mehrere Module von einem Solargenerator. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen „werden die Solarmodule in eine Kunststoffschicht eingebettet und oben mit einem lichtdurchlässigen Spezialglas abgedeckt.“ ⁽¹⁸⁾ Das

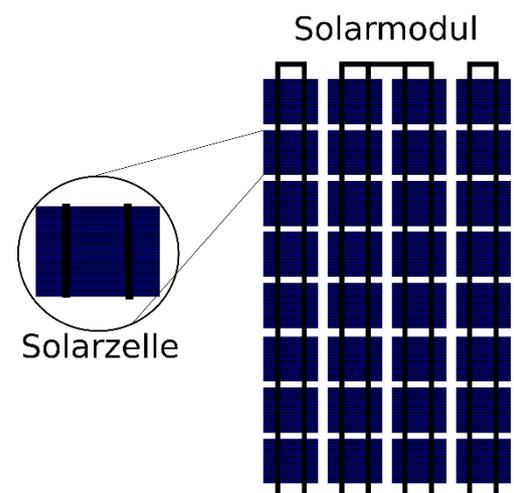


Abbildung 12: Solarmodul

¹⁶ Patrik Schnabel.

¹⁷ U. Wulf 2021.

¹⁸ Photovoltaik.org.

Solarmodul wird dann mit dem Wechselrichter verkabelt, um den erzeugten Gleichstrom der Photovoltaikanlage nutzen zu können. Der Wechselrichter wandelt Gleichstrom in Wechselstrom um. Um den Wechselstrom im öffentlichen Netz oder für den Eigenverbrauch nutzen zu können, wird ein Einspeisezähler bzw. Eigenverbrauchs-zähler benötigt, der an den Wechselrichter durch weitere Kabel angeschlossen wird. Nachdem der Gleichstrom die Umwandlung und den beschriebenen Weg zurückgelegt hat, kann er im eigenen Haushalt oder im öffentlichen Netzwerk verwendet werden.

Doch was passiert nun in der Solarzelle, wenn Licht darauf trifft. Photonen in Form von Licht mit unterschiedlicher Wellenlänge treffen auf ein Modul der Photovoltaikanlage. Dabei müssen die einzelnen Photonen zunächst eine Antireflexbeschichtung durchdringen. Ohne diese Beschichtung würde senkrecht auftreffendes Licht zu 35% reflektiert werden, da das Licht auf Medien mit unterschiedlichen Brechungsindex n trifft und somit ein Drittel des Lichtes ungenutzt von der Solarzelle zurückgeworfen wird. ⁽¹⁹⁾ Für nicht senkrecht einfallendes Licht ist der Faktor der Reflexion sogar noch höher. Berechnet wird der Reflexionsfaktor über die Fresnelformel:

$$R = \frac{n_s^2 - n_1 \cdot n_2}{n_s^2 + n_1 \cdot n_2} \quad (1) \quad (20)$$

Um den Reflexionsfaktor zu senken und die Solarzelle somit effizienter zu gestalten wird die Antireflexionsschicht aufgetragen. Heutzutage besteht die Beschichtung bei Solarzellen aus Siliziumnitrid (Si_3N_4), wodurch der Reflexionsfaktor bei senkrecht einfallendem Licht auf unter 10% gesenkt wird. ⁽²¹⁾

Im idealen Fall durchdringt das Photon die Antireflexionsbeschichtung und den Halbleiter bis es die Raumladungszone erreicht. Um dies zu vereinfachen, wird der Siliziumhalbleiter unsymmetrisch dotiert, wodurch sich die Raumladungszone vergrößert. In der Zone wird das Photon absorbiert und generiert ein Elektronen-Loch-Paar. Durch das elektrische Feld der Raumladungszone wird das Paar getrennt. Das Elektron wird zum n-Gebiet geleitet und dort weiter zum Frontkontakt. Dieser befördert die Elektronen zur Stromsammelschiene (Busbar) und dem Minuspol. Die Löcher wiederum müssen einen weiteren Weg durch die Basis zurücklegen, um zum Rückkontakt der Solarzelle zu gelangen. Da dieser Weg durch die p-dotierte Basis verläuft und hier keine freien Elektronen vorhanden sind, ist eine unerwünschte Rekombination unwahrscheinlich. ⁽²²⁾

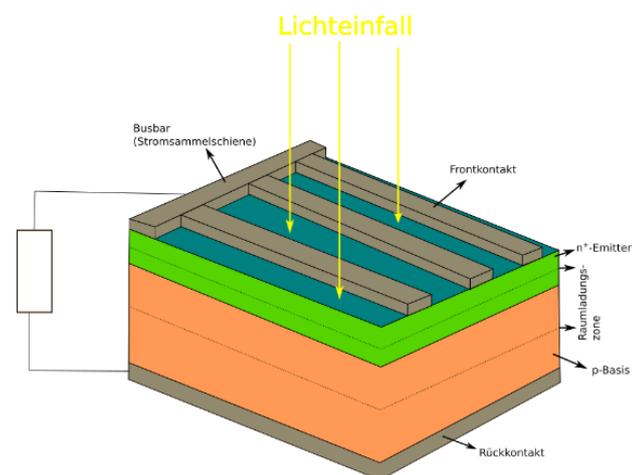


Abbildung 13: Aufbau einer Solarzelle

Doch was ist, wenn das Photon über oder unterhalb der Raumladungszone absorbiert, daher die Eindringtiefe und somit die Wellenlänge des Photons variiert wird? Können

¹⁹ Mertens 2020.

²⁰ Mende und Simon 2016.

²¹ Mertens 2020.

²² Photovoltaik Solarstrom.

die Elektronen dann noch den entsprechenden Weg zum Minuspol zurücklegen? Das hängt von der Diffusionslänge der Elektronen bzw. der Löcher ab. Die Diffusionslänge L_N beschreibt, welche Strecke das erzeugte Elektron im Halbleiter zurücklegen kann, bevor es mit einem freien Loch rekombiniert. ⁽²³⁾ Sie lässt sich aus der Trägerlebensdauer τ_N und der Diffusionskonstante D_N berechnen:

$$L_N = \sqrt{D_N \times \tau_N} \quad (2) \quad (24)$$

Nun werden Photonen mit einer geringen Wellenlänge, wie zum Beispiel bei blauem Licht sehr gut vom Halbleiter absorbiert. Deswegen ist die Eindringtiefe des blauen Lichtes in den Halbleiter unter einem μm . Das heißt, das Photon kann entweder wie gewünscht in der Raumladungszone absorbiert werden, doch wahrscheinlicher ist es, dass es bereits im hochdotierten Emitter absorbiert wird. Durch die hohe Dotierung ist die Diffusionslänge der Elektronen und der Löcher extrem klein. Das Elektron würde den Frontkontakt zwar erreichen, aber durch die geringe Diffusionslänge wird das Loch, vor dem Erreichen der Raumladungszone, mit einem freien Elektron aus dem Emitter rekombinieren. Deswegen wird der besonders hochdotierte Rand des Emitters häufig auch Dead Layer bezeichnet, da hier die größte Rekombinationswahrscheinlichkeit vorliegt. Somit trägt ein Photon, das in dieser Zone ein Elektronen-Loch-Paar generiert nicht zum Solarstrom bei. ⁽²⁵⁾

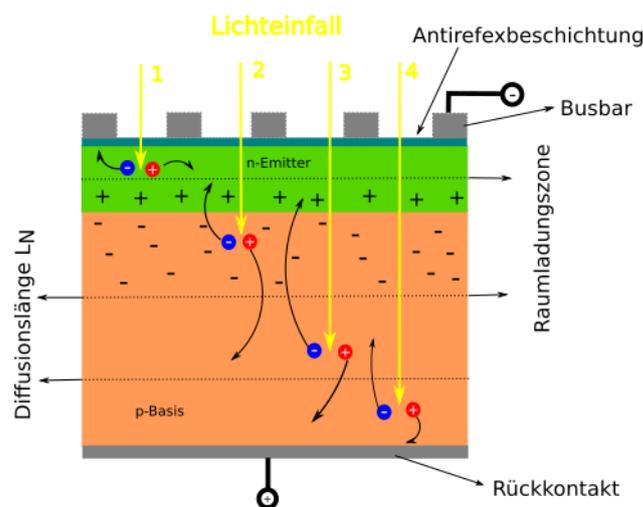


Abbildung 14: Weg des Photons in der Solarzelle

Bei Photonen mit höherer Wellenlänge, wie zum Beispiel Photonen aus dem Bereich der Infrarotstrahlung, ist eine Absorption unterhalb der Raumladungszone möglich. Hier muss man unterscheiden, ob die Absorption innerhalb der Diffusionslänge des Elektrons ist oder nicht. Ist dies der Fall kann das tief in der Basis erzeugte Elektron auf Umwegen zur Raumladungszone diffundieren und wird bei Eintritt in die Zone auf direkten Weg zum Minuspol beschleunigt. Das Loch kann ohne Probleme den kurzen Weg zum Pluspol zurücklegen Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Elektron in die Raumladungszone retten kann, ist hier noch relativ groß und somit trägt das Photon

²³ Mertens 2020.

²⁴ Mende und Simon 2016.

²⁵ Mertens 2020.

trotzt suboptimaler Wellenlänge zum Solarstrom bei. Findet die Absorption des Photons außerhalb der Diffusionslänge statt, ist die Rekombination von Loch und Elektron wahrscheinlicher, als dass das Elektron die Raumladungszone erreicht und somit trägt hier das Photon nicht zum Solarstrom bei. ⁽²⁶⁾

Damit hängt der Gleichstrom, der durch die Photonen erzeugt wird, natürlich einerseits davon ab, wie viele Photonen in der Solarzelle absorbiert werden als auch davon, dass die erzeugten Elektronen-Loch-Paare sicher und ohne unerwünschte Rekombinationen nach Hause gebracht werden.

3. Wirkungsgrad, Einflussfaktoren und Optimierung

Damit der Energiegewinnungsprozess der Photovoltaik möglichst effizient stattfinden kann, müssen verschiedene Faktoren beachtet werden. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

3.1 Wirkungsgrad der Solarzelle

Der Wirkungsgrad von Solarzellen ist ein entscheidender Parameter im Energiegewinnungsprozess. Da die Energiegewinnung von der Generierung der Elektronen-Loch-Paare durch Photonen abhängt, wird der Wirkungsgrad der Solarzelle hier offensichtlich beschränkt. Denn nicht jedes Photon, das auf die Solarzelle trifft, führt zum gewünschten Effekt, wie im vorherigen Kapitel bereits beschrieben. Die Grenze der Wellenlänge der Photonen kann bestimmt werden über die Bandlückenwellenlänge.

$$\lambda_G = \frac{h \times c}{\Delta W} \quad (3) \quad (27)$$

ΔW = Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband des Halbleiters

Sie gibt an wann Licht im Halbleiterelement gerade noch absorbiert werden kann. Im Fall von Silizium können nur Photonen mit der Wellenlänge von ca. 400-1150nm verwendet werden, um Solarenergie zu erzeugen. Das entspricht aber nur einen kleinen Teil der UV-Strahlung, den gesamten sichtbaren Bereich und einen kleinen Bereich der Infrarot-Strahlung des Lichtspektrums. ⁽²⁸⁾

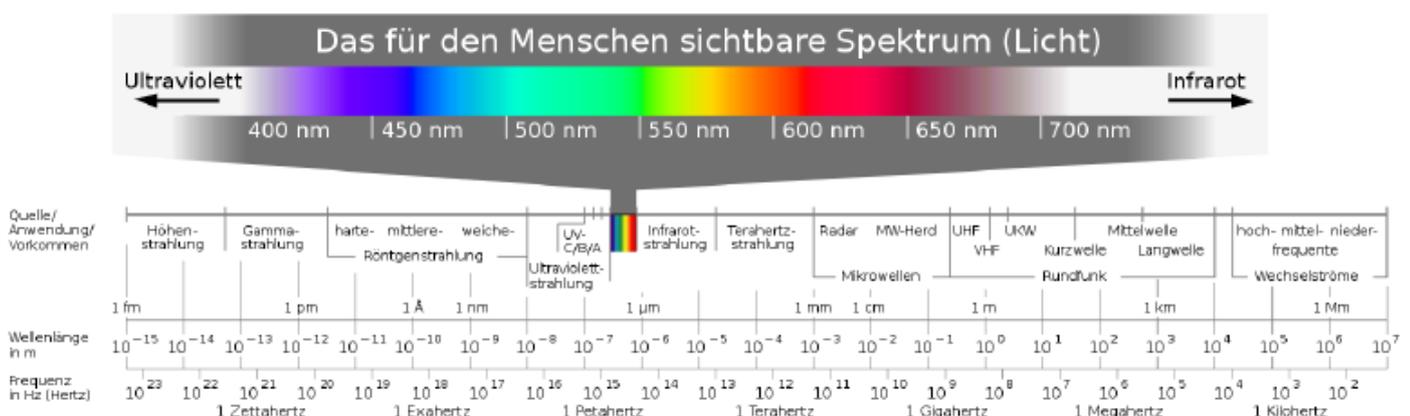


Abbildung 15: Lichtspektrum

²⁶ Mertens 2020.

²⁷ Mende und Simon 2016.

²⁸ Photovoltaik Solarstrom.

Zusammen sind das ca. 80,7% der gesamten Energie des Sonnenspektrums an der Erdoberfläche. Der restliche Teil, also 19,3% der Strahlung, dringt ungenutzt durch die Zelle. Hier ist die Wellenlänge der Photonen oberhalb der Bandlückenwellenlänge λ_0 und somit ist die Energie der Photonen zu klein, um vom Halbleiter absorbiert zu werden. Dieser ungenutzte Teil des Lichtes wird in der Photovoltaik als Durchschlags- oder Transmissionsverlust bezeichnet. Andererseits führt Strahlung, die unterhalb der Bandlückenwellenlänge liegt, ebenfalls zu Verlusten. Da hier die Energie der Photonen größer ist als verlangt, kommt es im Kristall zu Stößen, um die überschüssige Energie abzubauen, was zur Erwärmung des Halbleiters führt. Wir sprechen hier von Thermalisierungsverlusten in Höhe von 31,7%. Somit können insgesamt nur noch maximal 49% des Lichtspektrums genutzt werden, um daraus Energie zu gewinnen. ⁽²⁹⁾

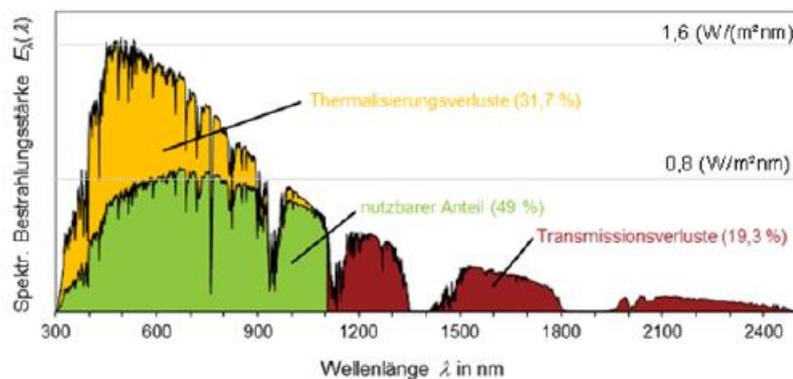


Abbildung 16: nutzbares Licht für die Photovoltaikanlage

Um diese 49% auch wirklich für den Solarstrom nutzen zu können, muss die Solarzelle optimiert werden. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln angesprochen kann es zu optischen Verlusten durch Reflexion an der Zelloberfläche kommen. Die Antireflexionsbeschichtung kann den Reflexionsfaktor auf 10% bei senkrecht einfallendem Licht senken. Eine weitere Maßnahme, um die Zelle zu optimieren ist die Texturierung der Zelloberflächen. Durch Säure wird hier die Oberfläche der Solarzellen angeraut, wodurch sich mikroskopisch kleine Pyramidenstrukturen auf der Zelloberfläche bilden. Dadurch gehen reflektierte Strahlen nicht verloren, sondern treffen ein zweites Mal auf die Zelloberfläche. So dringt in Summe mehr Licht in die Solarzelle ein, wodurch der Wirkungsgrad der Solarzelle erhöht und der Reflexionsfaktor bei senkrecht einfallendem Licht auf 3% gesenkt wird. ⁽³⁰⁾

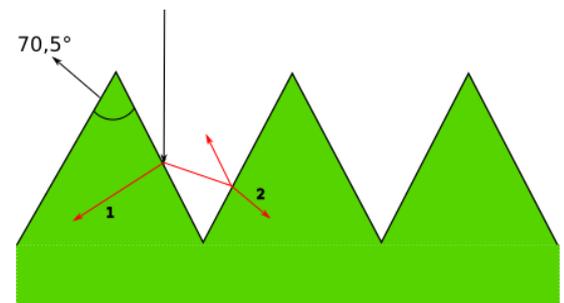


Abbildung 17: Texturierung der Zelloberfläche

Ebenso kann der Transmissionsverlust der Solarzelle durch Texturierung gesenkt werden, da so der Absorptionsfaktor für Licht mit einer Wellenlänge, die über der Bandlückenwellenlänge liegt, erhöht wird. Eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades der Solarzelle ergibt sich, wenn an der Zellunterseite ein reflektierendes Material abgebracht wird. Gut geeignet hierfür ist der Rückkontakt der Zelle aus Aluminium, der

²⁹ Photovoltaik Solarstrom.

³⁰ Mertens 2020.

einen Reflexionsfaktor von 80% aufweist. So wird langwelliges Licht wieder zurück in den Halbleiter reflektiert und bekommt für die Absorption eine zweite Chance. ⁽³¹⁾

3.2 Systemwirkungsgrad einer Photovoltaikanlage

Auch kann es bei der Verschaltung der Solarzelle zu einem Modul beziehungsweise bei der Verkabelung der Photovoltaikanlage mit einem Verbraucher zu Verlusten kommen. Hierbei spricht man von dem Systemwirkungsgrad, also dem Wirkungsgrad der gesamten Anlage. Dieser bezieht sowohl die Verluste der einzelnen Solarmodule, als auch die Verluste des Wechselrichters, der den erzeugten Solarstrom, der in Gleichstrom vorliegt, in Wechselstrom umwandelt, mit ein.

Das heißt, um den Systemwirkungsgrad der Photovoltaikanlage zu optimieren, müssen die Leistungsverluste, die durch die Verkabelung der Anlage entstehen reduziert werden. ⁽³²⁾ Die Einflussfaktoren bei Kabelverlusten stellen einerseits die Länge und der Querschnitt des verwendeten Kabels dar. Je dünner bzw. je länger ein Kabel ist desto höher fällt der Leistungsverlust aus. Das heißt zur Optimierung müssen kurze Kabel mit großem Querschnitt verwendet werden. Natürlich ist auch das Material der Kabel zu beachten. So hat „ein Aluminiumkabel einen höheren spezifischen Widerstand als das übliche Kupferkabel.“ ⁽³³⁾

Außerdem muss der Wirkungsgrad des Wechselrichters verbessert werden, da der Wechselrichter eine zentrale Rolle für den Systemwirkungsgrad einer Photovoltaikanlage spielt. „Die Hauptaufgabe des Wechselrichters besteht darin, den von den Solarmodulen erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln. Seit einigen Jahren müssen Wechselrichter zusätzlich noch einige Steuerungsaufgaben übernehmen, um die Integration der Photovoltaik ins Stromnetz zu verbessern.“ ⁽³⁴⁾ Der Wirkungsgrad des Wechselrichters hängt immer von seiner Auslastung ab, das heißt je höher die Einstrahlung desto höher ist der Wirkungsgrad. Er setzt sich aus zwei Faktoren zusammen: Anpassungswirkungsgrad und Umwandlungswirkungsgrad. ⁽³⁵⁾ Der Umwandlungswirkungsgrad hängt davon ab „wie effektiv der Wechselrichter den angebotenen Gleichstrom in Wechselstrom wandelt. Der Wandlungsverlust und damit der Umwandlungswirkungsgrad ist nicht konstant sondern hängt hauptsächlich von der aktuellen Leistung und der Spannung des Solarmoduls ab.“ ⁽³⁶⁾ Der Anpassungswirkungsgrad wiederum beschreibt die Geschwindigkeit und Anpassungsfähigkeit des MPP-Trackings. Der MPP ist der Maximal-Power-Point eines Solarmoduls. Damit ist der höchste Punkt der Strom-Spannungskennlinie des Solarmoduls gemeint, an dem das Modul die höchste Leistung erbringt. „Der MPP-Tracker hat nun die Aufgabe, den Maximum Power Point zu ermitteln, da dieser von der Sonneneinstrahlung, der Temperatur und individuellen Moduleigenschaften abhängig ist und sich somit ständig

³¹ Mertens 2020.

³² Photovoltaik.org.

³³ Photovoltaik.org.

³⁴ Photovoltaik.org.

³⁵ Photovoltaik.org.

³⁶ Energie-Experten.org 2016.

ändert.“⁽³⁷⁾ Sind die Leistungsverluste klein und der Wirkungsgrad des Wechselrichters groß, steigt der Systemwirkungsgrad. Doch nur wenn alle Komponenten aufeinander abgestimmt werden und es zu einem optimalen Zusammenspiel von Solarmodul, Wechselrichter und Verkabelung kommt, ist ein hoher Systemwirkungsgrad garantiert.⁽³⁸⁾

3.3 Weitere Einflussfaktoren und Optimierungen

In den vorherigen Kapiteln wurde immer von senkrecht einfallenden Lichtstrahlen ausgegangen. Da Licht im Laufe eines Tages nur einmal senkrecht auf die Photovoltaikanlage treffen wird, kommt es also allein durch die Wanderung der Sonne zu weiteren Verlusten. Grundsätzlich ist dieser Verlust bei einer Montage auf einem Hausdach am geringsten, wenn das Photovoltaikmodul auf die Südseite eines Daches mit einer Neigung von 35 Grad angebracht wird. Hier kommt es zu einer 5-prozentigen Verlustrate durch die Sonnenwanderung. Wird das Modul beispielsweise auf die Westseite des gleichen Daches montiert liegt der Verlust bereits bei 20%.⁽³⁹⁾ Das heißt es ist nicht nur wichtig alle technischen Möglichkeiten auszuschöpfen, um das Photovoltaikmodul möglichst effizient zu gestalten, sondern auch bei der Wahl des Standorts muss wohl überlegt vorgegangen werden, um eine möglichst große Gewinnspanne zu gewährleisten. So können Photovoltaikanlagen in Süden von Bayern aufgrund der jährlich höheren Sonnenstunden mehr Energie erzeugen als im Norden von Bayern.



Abbildung 18: Photovoltaikanlage auf einem Dach

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Schatten. Trifft Schatten auf das Solarmodul erreichen deutlich weniger Photonen die Raumladungszone im Halbleiter und der Solarstrom sinkt rapide. Deswegen ist es wichtig vor der Montage der Module auf einem Dach, der Fassade eines Hauses oder in Photovoltaikanlagen auf dem Festland oder dem Meer zu prüfen, ob diese durch Umweltfaktoren wie Bäume oder andere Häuser verschattet werden. Dadurch wird gewährleistet das mit der Anlage die maximale Energie aus den auf die Erde auftreffenden nutzbaren Sonnenstrahlen gewonnen wird.⁽⁴⁰⁾

Natürlich gibt es noch weitere Verlustfaktoren und Aspekte, die bei einer Montage und der Inbetriebnahme einer Photovoltaikanlage beachtet werden müssen, jedoch würde dies den hier gewünschten Rahmen sprengen. Im Folgenden lernen wir nun noch die einzelnen Aspekte der Photovoltaik durch die anliegenden Schülerexperimente besser kennen. Hier gehen wir insbesondere auf die Auswirkung des Einfallwinkels der Sonnenstrahlen, der Bestimmung des optimalen Betriebspunktes eines Photovoltaikmoduls (MPP-Wert) und den Einfluss der Verschattung auf den Solarstrom ein. Des Weiteren bestimmen wir den maximalen Wirkungsgrad eines Photovoltaikmoduls.

³⁷ Photovoltaik.org.

³⁸ Photovoltaik.org.

³⁹ Mertens 2020.

⁴⁰ Mertens 2020.

Erneuerbare Energie für die Schule

1. Untersuchung eines Photovoltaikmoduls

Ing. Florian Lesch

Ziel:

In diesen Versuchen soll der Wirkungsgrad und Leistungsfähigkeit eines PV-Moduls untersucht werden. Dazu können folgende Teilversuche durchgeführt werden:

- Untersuchung der Einstrahlungsleistung bei variierendem Einstrahlungswinkel
- Bestimmung des optimalen Betriebspunktes (Strom-Spannungs-Kennlinie)
- Bestimmung des maximalen Wirkungsgrads des PV-Moduls
- Untersuchung des Einflusses von Verschattung auf die Leistungsabgabe des PV-Moduls

Materialien:

- ✓ 1x Halogenstrahler 400W
- ✓ 1x Photovoltaikmodul 5W
- ✓ 2x Multimeter
- ✓ PC-Lüfter 5W
- ✓ Potentiometer 0-100Ohm
- ✓ Luxmeter

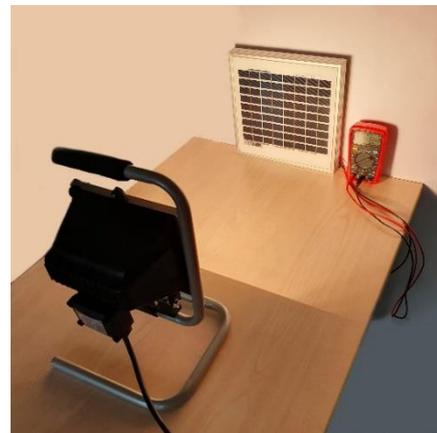


Abbildung19: Versuch 1

Durchführung „Einstrahlungswinkel“:

Eine PV-Zelle benötigt direkte Einstrahlung, um elektrische Leistung zu produzieren. Je nach Einstrahlungswinkel ändert sich die Einstrahlungsleistung auf das PV-Modul. PV-Anlagen sind üblicherweise in einer festen Position zum Beispiel auf dem Hausdach montiert. Da sich aber der Winkel der Sonne über den ganzen Tag kontinuierlich ändert, gibt es an jedem Tag nur einen Zeitpunkt, an dem die Sonne senkrecht über den PV-Modulen steht. Zusätzlich ändert sich der Winkel der Sonne auch noch über das Jahr in Form der Höhe über dem Horizont. Streng genommen gibt es nur einen Zeitpunkt im Jahr, an dem die Sonneneinstrahlung genau senkrecht auf die PV-Module treffen. Um möglichst viel elektrische Energie aus dem PV-Modul zu gewinnen ist es daher wichtig den Einfluss des Einstrahlungswinkels nachzuvollziehen.

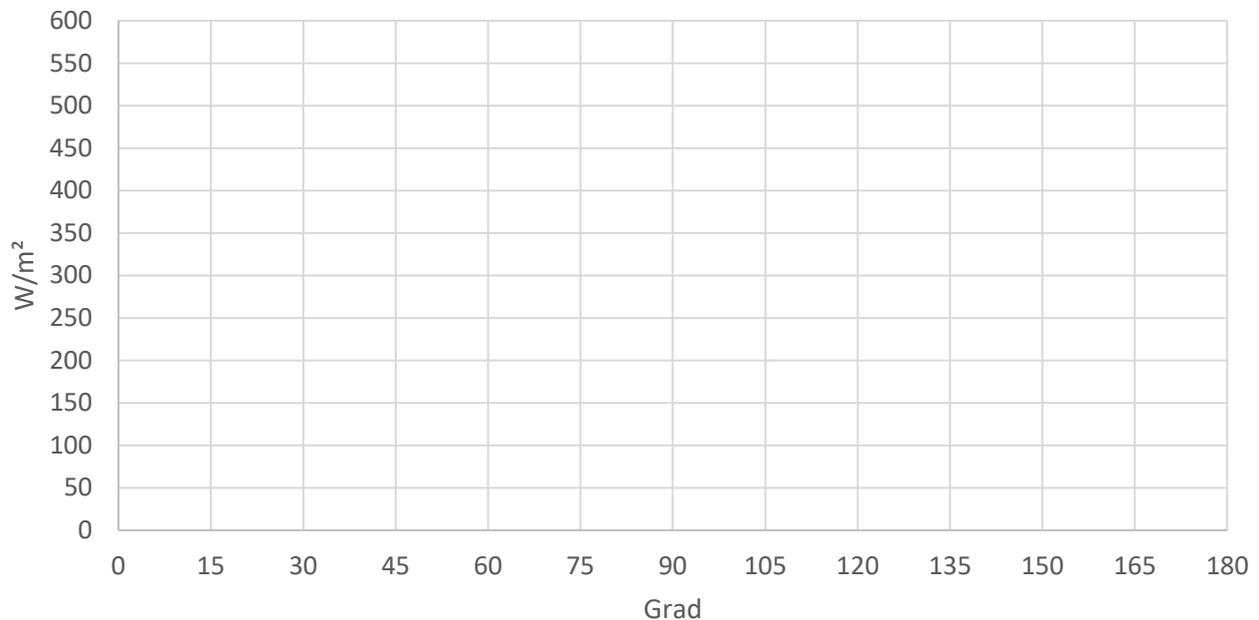
- Platziert das PV-Modul senkrecht vor einer Wand und den Strahler mit einem Abstand von ca. 50cm davor und miss die Einstrahlung in der Mitte des Moduls und teilen sie durch den Faktor $52 \ln/W$. Wie groß ist der Schatten, den das Modul an die Wand wirft?

Die Größe des Schattens ist proportional zur Einstrahlungsleistung auf das PV-Modul, da diese nicht auf die Wand treffen kann. Die Einstrahlungsleistung auf das PV-Modul ist proportional zur maximalen elektrischen Leistung, die das Modul erzeugen kann.

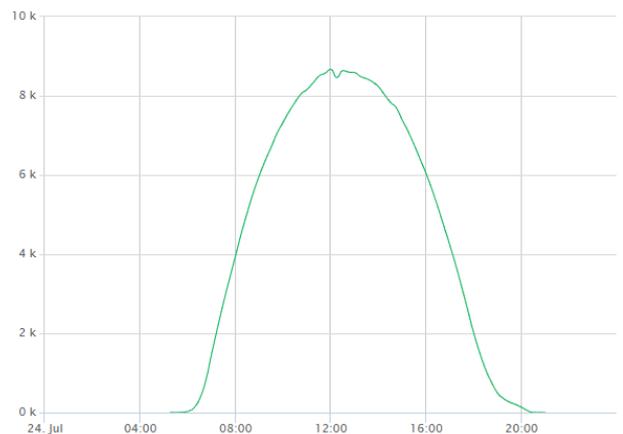
- Verändere jetzt den Neigungswinkel des PV-Moduls auf ca. 60° , 45° , 30° , 15° und 0° mit Hilfe eines Geodreiecks und miss die Einstrahlung, wie verändert sich der Schatten?

Einstrahlungswinkel	90°	60°	45°	30°	15°	0°
e [W/m ²]						

→ Trage die Werte in das Diagramm ein und spiegele sie an der 90° Achse.



Die graphische Darstellung entspricht einer Sinuskurve aufgrund geometrischer Regeln. Die Kurve einer realen Anlage ist etwas glockenförmiger, sprich an den Füßen breiter. Das liegt daran, dass der längere Weg der Strahlung durch die Atmosphäre am Vor- und Nachmittag die Einstrahlungsleistung zusätzlich schwächt (separates Thema: Air-Mass-Index).



2. Durchführung der Bestimmung der Strom-Spannungskennlinie:

Es soll nun untersucht werden, wie sich die abgegebene Leistung eines PV-Moduls verändert, wenn unterschiedliche Lasten angeschlossen werden. Der Versuchsaufbau bleibt hierfür unverändert.

Ein PV-Modul kann aufgrund des Gesetzes der Energieerhaltung nur so viel Energie abgeben, wie eingestrahlt wird. Das bedeutet, dass bei maximalem Wirkungsgrad nur die entsprechende Menge elektrischer Energie gewonnen werden kann. Wird die Leistung des angeschlossenen Verbrauchers nun erhöht, kann das PV-Modul diese Leistung nicht mehr erbringen, der Wirkungsgrad sinkt. Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, wenn sich die benötigte Leistung verringert, wird nicht die maximale elektrische

Leistung abgerufen und der Wirkungsgrad sinkt ebenfalls. Es muss also einen optimalen Betriebspunkt geben. Diesen nennt man Maximum Power Point (MPP). In diesem Versuch wird eine Kennlinie aus Strom und Spannung durch Veränderung des Widerstands des Verbrauchers gemessen. Aus ihr wird der MPP-Punkt ermittelt.

Die elektrische Leistung eines einfachen ohmschen Verbrauchers ist definiert als:

$$P = U * I$$

Der Widerstand des Verbrauchers bestimmt letztendlich wie viel Strom fließt, wenn eine bestimmte Spannung angelegt wird:

$$I = \frac{U}{R}$$

Und damit auch, wie viel elektrische Leistung der Verbraucher bei einer bestimmten Spannung umgesetzt wird:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Die Spannung einer PV-Zelle ist abhängig von der Stärke der Einstrahlung, kann aber aufgrund der festen Fläche der Zelle nicht beliebig steigen. Man kann sich die Spannung bildlich vorstellen, wie ein Druck, der auf die Elektronen wirkt. Dieser Druck sinkt, wenn die Elektronen durch einen Verbraucher fließen können; dieser Fluss entspricht dem Strom. Die Höhe dieses Drucks und die Größe des Widerstands des Verbrauchers bestimmen, wie groß der Elektronenfluss also der Strom wird.

In der Schaltung des Versuchs befinden sich zwei elektrische Verbraucher, ein konstanter (Ventilator) und ein variabler (Potentiometer). Der Lüfter wandelt elektrische Energie in Bewegung um, das Potentiometer wandelt elektrische Energie in Wärme um. Durch die Veränderung des Widerstandswertes des Potentiometers kann also der Gesamtwert des Widerstands verändert werden, der der Spannung des PV-Moduls entgegensteht.

- Positioniere den Strahler mit einem Abstand von ca. 50 cm vor dem PV-Modul
- Miss jetzt die Spannung am PV-Modul ohne Verbraucher (Leerlaufspannung)
- Stelle das Potentiometer auf den linken Anschlag und nimm das resultierende Strom- und Spannungs-Paar auf
- Senke nun die Spannung durch das Potenziometer und nimm weitere Messpunkte auf. Mehrere Punkte solltest du im Bereich 15,5-17,5 Volt nehmen



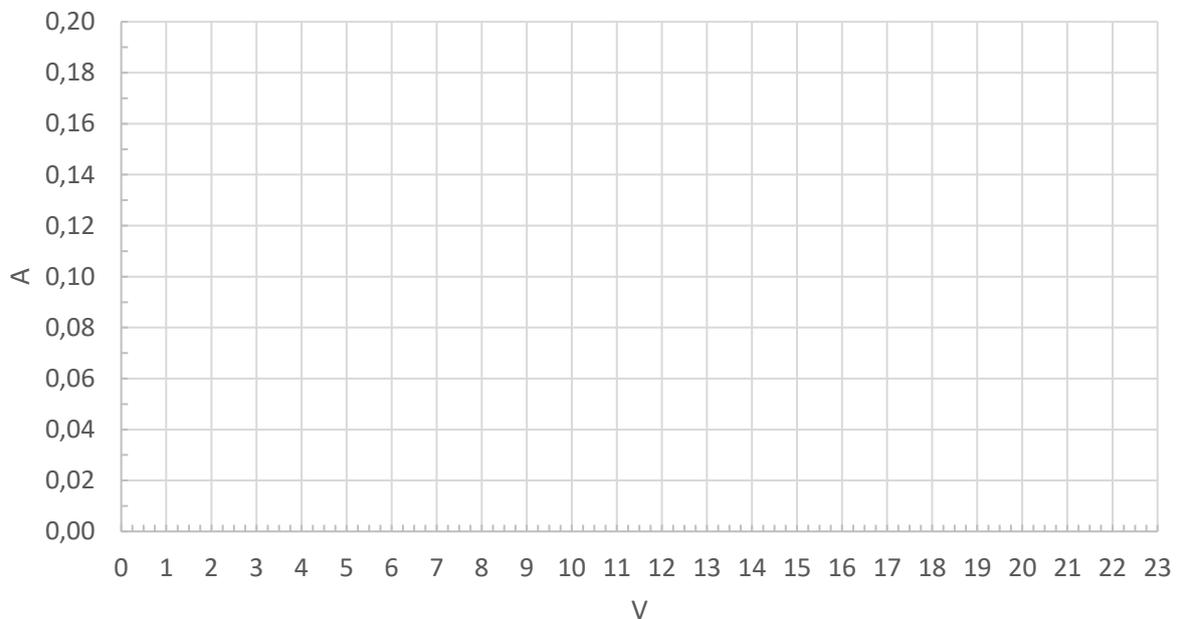
Abbildung 20: Versuch 2

Achte darauf Punkte aufzunehmen, bei denen sich der Stromwert ändert, dadurch wird die Genauigkeit der Messung erhöht und das Ergebnis hat eine höhere Aussagekraft.

- Als letzten Wert wird der Kurzschlussstrom gemessen, dafür muss das Amperemeter parallel zum Voltmeter geschaltet werden, jetzt kann man den Kurzschlussstrom ablesen
- Berechne nun für die gegebenen Strom-Spannungs-Paare die dazugehörigen Leistungswerte

Strom I [A]	0,00											
Spannung U [V]												0,00
Leistung P [W]	0,00											0,00

- Trage die Werte nun in den Graphen ein
- Wo liegt der MPP, was ist die MPP-Spannung, und die MPP-Leistung



Man kann an der Form der Leistungskurve sehen, wie wichtig es ist, den Betriebspunkt eines PV-Moduls ständig zu überwachen. Das geschieht in realen Anlagen heutzutage sogar pro Platte. Die Elektronik in Form sogenannte MPP-Tracker kontrolliert ständig, ob der MPP eingehalten wird und passt die Leistungsabgabe entsprechend an. Nur so kann der maximal mögliche Wirkungsgrad der Anlage erreicht werden.

3. Durchführung Wirkungsgradbestimmung:

Der Wirkungsgrad ist eine entscheidende Größe jeder Energiewandlungstechnik, wie auch Photovoltaik eine ist. Von Ihm hängt ab, ob sich eine Technik etablieren kann, an seiner Optimierung arbeiten die Wissenschaft und die Industrie intensiv. Es gibt viele verschiedene Wirkungsgrade für verschiedene Betrachtungen derselben technischen Anlage und ihre Namen werden oft nicht eindeutig verwendet. Ebenfalls ist das Erreichen des Wirkungsgrads nicht automatisch gegeben, es hängt von vielen Faktoren ab, die nie exakt identisch in realen Anlagen sind, wie sie es unter Laborbedingungen bei deren offizieller Messung waren. Im nachfolgenden Versuch werden mehrere Wirkungsgrade für ein und dasselbe PV-Modul ermittelt, um ein Gefühl für die Komplexität einer aussagekräftigen Wirkungsgradbestimmung zu bekommen, aber auch um Photovoltaik und sein Potenzial als Baustein zur Energiewende besser einschätzen zu können.

- Platziere den Strahler mit einem Abstand von 50cm vor dem PV-Modul und schließe die Multimeter an
- Wenn du den vorherigen Versuch „Strom-Spannungskennlinie“ gemacht hast, stelle die MPP-Spannung ein, ansonsten stelle 16,5 V mit dem Potenziometer ein.
- Miss die folgenden Werte, um den Wirkungsgrad des Moduls berechnen zu können
- Um die Einstrahlungsdichte bei künstlicher Einstrahlung korrekt zu ermitteln, sollte an 9 gleichmäßig verteilten Punkten auf dem Modul gemessen und das Ergebnis arithmetisch gemittelt werden.



Abbildung 21: Versuch 3

Spannung an der Zelle [V]	Strom [A]	Mittlere Einstrahlungsdichte [lux bzw. W/m ²]
U=	I=	e=

Bemerkung: Der Versuch kann sowohl mit Sonnenlicht als auch mit künstlichem Licht durchgeführt werden. Im Falle von künstlichem Licht kann, aufgrund des unterschiedlichen Spektrums von Sonne und Halogenstrahler die Einstrahlungsleistung nicht direkt gemessen werden. Die wird in Lux erfasst und anschließend mit dem Faktor 52 In/W in zum Sonnenlicht proportionale eingestrahle Leistung umgerechnet.

Der Wirkungsgrad des PV-Moduls entspricht folgendem Energieverhältnis:

$$\eta = \frac{\text{gewonnene elektrische Leistung}}{\text{Leistung der Einstrahlung auf das PV – Modul}}$$

Zunächst muss die Einstrahlungsdichte, welche sich auf 1m² bezieht, auf die Fläche des PV-Moduls umgerechnet werden, um die tatsächlich eingestrahlte Leistung zu bestimmen.

→ Miss die Flächen folgender Bereiche:

Fläche des ganzen Moduls [m ²]	Fläche des Zellenfeldes [m ²]	Fläche des Zellenfeldes ohne die weißen Zwischenräume [m ²]
$F_1 =$	$F_2 =$	$F_3 =$

→ Berechne nun die 3 verschiedenen Einstrahlungsleistungen E wie folgt:

$$\text{Leistung der Einstrahlung } E = \text{Einstrahlungsdichte } e * \text{Fläche } F$$

Einstrahlung PV-Modul [W]	Einstrahlung Zellenfeld brutto [W]	Einstrahlung Zellenfeld netto [W]
$E_1 =$	$E_2 =$	$E_3 =$

→ Berechne nun die elektrische Leistung

$$P_{el} = \text{Spannung} * \text{Strom}$$

→ Berechne die 3 Wirkungsgrade der Zelle

$$\eta_1 = \frac{P}{E_1}, \eta_2 = \frac{P}{E_2}, \eta_3 = \frac{P}{E_3}$$

Wirkungsgrad η_1	Wirkungsgrad η_2	Wirkungsgrad η_3
%	%	%

Warum drei unterschiedliche Wirkungsgrade?

Ein PV-Modul kann nicht nur aus PV-Zellen bestehen. Es muss einen Rahmen haben, um es montieren zu können und um stabil vor Wind und Wetter geschützt zu sein. Die Abstände zwischen den einzelnen Zellen können ebenfalls keinen Strom erzeugen. Der Wirkungsgrad berücksichtigt hier also auch die maximale Leistung bezogen auf die benötigte Fläche zum Beispiel eines Dachs. Große moderne PV-Module, die auf unseren Hausdächern verwendet werden, können den größten Teil der benötigten Fläche bereits durch PV-Zellen ausnutzen. Damit erreichen Sie einen Wirkungsgrad, der annähernd dem maximalen Wirkungsgrad jeder einzelnen Zelle entspricht.

! Was hältst du vom maximalen Wirkungsgrad? Findest du ihn hoch oder niedrig?

! Was könnte man mit der gemessenen elektrischen Leistung betreiben?

- ! Wie viele PV-Module dieses Typs bräuchte man, um bei der gegebenen Einstrahlung einen Fön mit 1000W zu betreiben und welche Fläche würden diese Module einnehmen?

4. Durchführung Verschattung:

PV-Anlagen sind ganzjährig Umwelteinflüssen wie Schnee und Schmutz ausgesetzt. Diese verhindern, ebenso wie der Schatten von Bauwerken und Bäumen, dass direkte Sonneneinstrahlung auf die PV-Module trifft. Wie wichtig es ist, Verschattung bei der Auslegung von PV-Anlagen genau zu beachten, wird in dem folgenden Versuch gezeigt.

- Platziere den Strahler mit einem Abstand von 50cm vor dem PV-Modul und schließe die Multimeter an
- Stelle ca. 16,5 V ein
- Verschatte einen kleinen Bereich (z.B.: 2x2cm) mit einem Blatt Papier und beobachte Strom und Spannung
- Welchen Effekt kannst du feststellen?

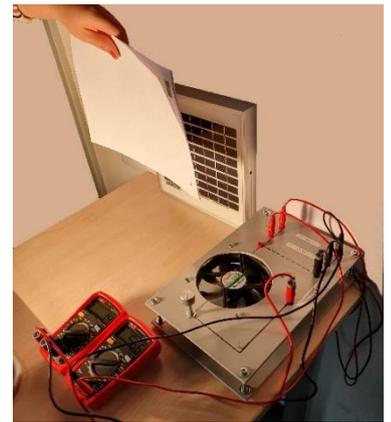


Abbildung 22: Versuch 4

Silizium ist ein Halbleiter, trifft keine Einstrahlung auf einen Zellenbereich, fallen die angeregten Elektronen im Leiterband zurück in das Valenzband, der Widerstand des Siliziums steigt. Da alle Zellen auf diesem Modul in Reihe geschaltet sind, fällt an diesem Widerstand sehr viel Spannung ab und die Leistung bricht komplett ein. Die Zelle erhitzt sich, was bei größeren Modulen zum Defekt und sogar zum Brand führen kann. Bei realen Anlagen werden die Module mit sogenannten Bypass-Dioden parallelgeschaltet. Steigt der Spannungsabfall am PV-Modul aufgrund von Verschattung an, fließt der Strom über die Diode und verhindert den Energieverlust in der Zelle.

5. Literaturverzeichnis

Demtröder, Wolfgang (2016): Atome, Moleküle und Festkörper. 5., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch, / Wolfgang Demtröder ; 3).

Energie-Experten.org (2016): Berechnung und Vergleich der Wirkungsgrade von PV-Wechselrichtern. Welche Faktoren beeinflussen den Wirkungsgrad? Wie misst man den Wirkungsgrad und was sagt dies über die Qualität des Wechselrichters und der PV-Anlage aus? Hg. v. Energie-Experten.org, zuletzt aktualisiert am 14.03.2016.

Holler, Christian; Gaukel, Joachim (2019): Erneuerbare Energien. Ohne heiße Luft. Cambridge, München: UIT; oekom verlag.

Kuchling, Horst (1994): Taschenbuch der Physik. 14., neubearb. Aufl. Leipzig: Fachbuchverl.

Mende, Dietmar; Simon, Günter (2016): Physik. Gleichungen und Tabellen. 17., aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Mertens, Konrad (2020): Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser.

Patrik Schnabel: pn-Übergang (Halbleiterdiode). Hg. v. Elektronik Kompendium. Online verfügbar unter <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0112072.htm>.

Photovoltaik Solarstrom: Das Spektrum der Solarstrahlung. So faszinierend nutzt die Photovoltaik das Spektrum des Lichts. Online verfügbar unter <https://photovoltaiksolarstrom.com/physik/spektrum-solareinstrahlung/>.

Photovoltaik Solarstrom: Solarzelle auf Speed. Online verfügbar unter <https://photovoltaiksolarstrom.com/technik/photovoltaik-herstellung/dotierung/#:~:text=Die%20Dotierung%20bezeichnet%20das%20Anreichern,wie%20z.B.%20Aluminium%20oder%20Phosphor.&text=Ziel%20der%20Dotierung%20von%20Solarzellen,Leitf%C3%A4higkeit%20des%20Ausgangsmaterials%20zu%20beeinflussen.>

Photovoltaik.org: Kabelverluste. Online verfügbar unter <https://www.photovoltaik.org/wissen/kabelverluste>.

Photovoltaik.org: MPP-Tracking. Online verfügbar unter <https://www.photovoltaik.org/photovoltaikanlagen/wechselrichter/mpp-tracking>.

Photovoltaik.org: Photovoltaikanlage. Online verfügbar unter <https://www.photovoltaik.org/photovoltaikanlagen>.

Photovoltaik.org: Systemwirkungsgrad. Online verfügbar unter <https://www.photovoltaik.org/wissen/systemwirkungsgrad>.

Photovoltaik.org: Wechselrichter. Online verfügbar unter <https://www.photovoltaik.org/photovoltaikanlagen/wechselrichter>.

Stroppe, Heribert; Langer, Heinz; Streitenberger, Peter (1994): Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften. Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen ; mit 20 Tabellen, 211 durchgerechneten Beispielen und 133 Aufgaben mit Lösungen. 10., verb. Aufl. Leipzig: Fachbuchverl.

U. Wulf (2021): Skript zur Vorlesung Halbleiterphysik mit Bauelementanwendungen Modul 13439. Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Brandenburg. Online verfügbar unter <https://www.physik.tu-cottbus.de/users/wulf/Vorlesungen/9Halbleiter/Skript.pdf>.

Bilderverzeichnis

Abbildung 1: Photovoltaikanlage: [Photovoltaik Solaranlage Energie - Kostenloses Foto auf Pixabay](#)

Abbildung 2: Siliziumatom: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 3: Siliziumkristall: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 4: Emission von Licht: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 5: Absorption von Licht: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 6: Generieren eines E-L-Paars: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 7: Rekombinieren eines E-L-Paars: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 8: p-Dotierung: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 9: n-Dotierung: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 10: Bildung der Raumladungszone: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 11: Lichteinfall auf Raumladungszone: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 12: Solarmodul: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 13: Aufbau einer Solarzelle: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 14: Weg des Photons in einer Solarzelle: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 15: Lichtspektrum: Autor: Horst Frank ; [File:Electromagnetic spectrum -de.svg - Wikimedia Commons](#)

Abbildung 16: nutzbares Licht für die Photovoltaikanlage (Florian Lesch Dokument)

Abbildung 17: Texturierung der Zelloberfläche: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 18: Photovoltaikanlage auf einem Dach: [Solar Dach Sonnenenergie - Kostenloses Foto auf Pixabay](#)

Abbildung 19: Versuch 1: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 20: Versuch 2: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 21: Versuch 3: Eigene Aufnahme/Konstruktion

Abbildung 22: Versuch 4: Eigene Aufnahme/Konstruktion