

Westsächsische Hochschule Zwickau

University of Applied Sciences

HOCHSCHULE FÜR MOBILITÄT | UNIVERSITY FOR MOBILITY

Bachelorarbeit

Konzeption eines Versuchsstandes zur Charakterisierung der elektrischen Kenngrößen von Solarmodulen

Ausgegeben von der Fakultät Physikalische Technik/Informatik
der Westsächsischen Hochschule Zwickau
am 24.07.2023

Eingereicht am 18.09.2023

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Bachelor of Engineering (FH)

vorgelegt von: **Mai, David** geb. am: 23.12.2000

Studiengang Umwelttechnik und regenerative Energien

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Philipp Kitschke

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Mirko Bodach

Autorenreferat

Um Photovoltaik-Module auf ihre Leistungsfähigkeit zu testen und diese weiterzuentwickeln, ist es notwendig ihre elektrischen Kenngrößen replizierbar testen zu können.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, zu diesem Zweck einen Versuchstand zu errichten und ein Programm zu schreiben, welches das automatische Abfahren einer Strom-Spannungskennlinie ermöglicht.

Dazu wurden verschiedene Strahlungsquellen mit je spezifischen Eigenschaften verwendet. Bei den Strahlungsquellen handelte es sich um LED-, Halogen- sowie Xenon-Strahler. Mit diesen wurden beispielsweise bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken Kennlinien aufgenommen, welche es zu vergleichen galt. Außerdem wurden die manuelle und die automatisierte Aufnahme der Kennlinie verglichen.

Die Kennlinien zeigen, dass Xenonstrahler am besten für die Messung elektrischer Kenngrößen von Photovoltaik-Modulen geeignet sind. Nicht nur ist das Spektrum des Strahlers am ähnlichsten dem des AM1,5-Spektrums, sondern dieser hat dazu am wenigsten Wärmeeinfluss auf das zu messende Modul. Zudem ist die automatisierte Aufnahme der Kennlinie wesentlich schneller als die manuelle.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich die elektrischen Kenngrößen der Photovoltaik-Module künftig qualitativ hochwertiger und schneller testen.

Abstract

To test the performance of photovoltaic modules and to develop them further, it is necessary to be able to test their electrical characteristics in a replicable way.

The present thesis aims to set up an experimental design for this purpose and to write a workflow which enables the automatic tracing of a current-voltage characteristic curve.

For this purpose, different emission sources were used, each with specific characteristics. The emission sources were LED, halogen and xenon emitters. With these, for example, characteristic curves were recorded at different irradiance levels and compared to each other. In addition, the manual and automated recording of the characteristic curve was evaluated.

The characteristic curves show that xenon emitters are best suited for measuring electrical parameters of photovoltaic modules. The spectrum of the emitter is most similar to the AM1.5 spectrum, and it also has the least thermal effect on the module being measured. In addition, the automated recording of the characteristic curve is much faster than the manual one.

With this knowledge gained, the electrical parameters of photovoltaic modules can be tested more quickly and to a higher quality in future.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Wissenschaftliche Grundlagen.....	2
2.1	Wirkprinzip einer Photovoltaik-Zelle.....	2
2.1.1	Aufbau.....	2
2.1.2	Funktion.....	4
2.2	Direkte und indirekte Halbleiter.....	5
2.3	Zelltypen.....	7
2.3.1	Monokristalline Zellen.....	8
2.3.2	Polykristalline Zellen.....	9
2.3.3	Amorphe Zellen.....	10
2.4	Verschaltung.....	11
2.4.1	Parallelschaltung von Zellen.....	12
2.4.2	Reihenschaltung von Zellen.....	13
2.4.3	Fazit.....	13
2.5	Maximaler Wirkungsgrad, Verlustmechanismen und Potentiale.....	14
2.5.1	Der maximale Wirkungsgrad.....	15
2.5.2	Verlustmechanismen.....	16
2.5.3	Ausblick.....	18
2.6	Spektren der genutzten Strahlungsquellen.....	19
2.6.1	Sonne.....	19
2.6.2	Light Emitting Diode (LED).....	20
2.6.3	Halogen-Strahler.....	20
2.6.4	Xenon-Strahler.....	21
2.6.5	Fazit.....	21
2.7	Strom-Spannungs-Kennlinie.....	23
2.7.1	Standard-Testbedingungen.....	25
2.7.2	Einfluss der Bestrahlungsstärke.....	26
2.7.3	Einfluss der Temperatur.....	27
2.8	Wie wird aktuell geflasht.....	28
3	Experimenteller Teil.....	29
3.1	Zielstellung.....	29
3.2	Material.....	29
3.3	Versuchsaufbau.....	31
3.4	Kennlinienaufnahme.....	32
3.4.1	Variante 1.....	33
3.4.2	Variante 2.....	33

3.4.3	Fazit	34
3.5	Berechnungen für die Messungen	34
3.5.1	Abstände für eine Bestrahlungsstärke von 1.000 W/m^2	35
3.5.2	Variation der Bestrahlungsstärken	35
3.6	Temperatureinfluss	36
3.6.1	Temperaturentwicklung der Photovoltaik-Zellen.....	36
3.6.2	Einfluss der Temperatur auf die Kennlinie	40
3.7	Kennlinien der Strahler	44
3.8	Einfluss der Bestrahlungsstärken.....	46
3.8.1	Monokristallines Photovoltaik-Modul.....	46
3.8.2	Polykristallines Photovoltaik-Modul.....	48
4	Zusammenfassung und Ausblick	50
5	Quellenverzeichnis	52
6	Anhang	1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Photovoltaik-Zelle	3
Abbildung 2: Weg der Elektronen in der Photovoltaik-Zelle	4
Abbildung 3: indirekter Halbleiter (links) und direkter Halbleiter (rechts) im Vergleich	6
Abbildung 4: indirekter Halbleiter (links) und direkter Halbleiter (rechts) im Vergleich	7
Abbildung 5: Zelle (links) und Modul (rechts) auf Basis von monokristallinem Silizium.....	9
Abbildung 6: Zelle (links) und Modul (rechts) auf Basis von polykristallinem Silizium	10
Abbildung 7: Dünnschichtmodul.....	11
Abbildung 8: Parallelschaltung von Photovoltaik-Zellen	12
Abbildung 9: Reihenschaltung von Photovoltaik-Zellen.....	13
Abbildung 10: Spektrale Verluste einer kristallinen siliziumbasierten Photovoltaik-Zelle.....	16
Abbildung 11: Sonnenspektrum	20
Abbildung 12: Vergleich der Spektren	22
Abbildung 13: Kennlinie einer Photovoltaik-Zelle	23
Abbildung 14: Kennlinie einer Photovoltaik-Zelle im ersten Quadranten	24
Abbildung 15: Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Kennlinie	26
Abbildung 16: Einfluss der Temperatur auf die Kennlinie	27
Abbildung 17: Modulflasher.....	28
Abbildung 18: Versuchsaufbau 1 schematisch (a) und real (b).....	31
Abbildung 19: Versuchsaufbau 2 schematisch (a) und real (b).....	32
Abbildung 20: Temperaturverlauf der unterschiedlichen Strahler bei 1.000 Wm^2 (60 s).....	37
Abbildung 21: Temperaturverlauf der unterschiedlichen Strahler bei 1.000 Wm^2 (10 s).....	38
Abbildung 22: Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken (60 s)	39
Abbildung 23: Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken (10 s)	40
Abbildung 24: Strom-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen.....	41
Abbildung 25: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen.....	42
Abbildung 26: Strom-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen.....	43
Abbildung 27: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen.....	44
Abbildung 28: Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Strahlungsquellen.....	45
Abbildung 29: Leistung-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Strahlungsquellen	45
Abbildung 30: Strom-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken	47
Abbildung 31: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken	48
Abbildung 32: Strom-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken	49
Abbildung 33: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken	49
Abbildung 34: Vergleich automatisch und manuell aufgenommener Kennlinien	50
Abbildung 35: Best Research-Cell Efficiency Chart des National Renewable Energy Laboratory (NREL)	1
Abbildung 36: AM1,5-Spektrum	2
Abbildung 37: LED-Strahler-Spektrum	2
Abbildung 38: Halogen-Strahler-Spektrum.....	3
Abbildung 39: Xenon-Strahler-Spektrum.....	3
Abbildung 40: verwendeter LED-Strahler	4

Abbildung 41: verwendeter Halogen-Strahler.....	4
Abbildung 43: Blockdiagramm des Programms zur Erfassung der Kennlinien	5
Abbildung 42: verwendeter Xenon-Strahler.....	5

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Absorptionseigenschaften verschiedener direkter und indirekter Halbleiter	7
Tabelle 2: Verwendete Strahlungsquellen	29
Tabelle 3: Verwendete Module	30

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Symbole	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m ²
c	Lichtgeschwindigkeit	299.792.458 $\frac{m}{s}$
d	Abstand	m
E	Energie	J
f	Frequenz	Hz
h	Planksches Wirkungsquantum	6,626·10 ⁻³⁴ J·s
I	Strom	A
n	Brechungsindex	(einheitslos)
P	Leistung	W
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
U	Spannung	V
x _E	Eindringtiefe	m
α	Absorptionskoeffizient	m ⁻¹
ΔW _G	Bandlücke	eV (1ev=1,602·10 ⁻¹⁹ J)
η	Wirkungsgrad	%
η _i	Eigenleitungsichte	m ⁻³

ϑ	Temperatur	°C
λ	Wellenlänge	m

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AM	Air mass; Luftmasse
a-Si	amorphes Silizium
C	Kohlenstoff
CO	Kohlenstoffmonoxid
c-Si	kristallines Silizium
FF	Füllfaktor
H ₂	Wasserstoff (molekular)
HCl	Chlorwasserstoff
ISFH	Institut für Solarenergieforschung in Hameln
KOH	Kaliumhydroxid
LED	Light Emitting Diode; lichtemittierende Diode
MPP	Maximum-Power-Point; Punkt Maximaler Leistung
NREL	National Renewable Energy Laboratory

ppm	parts per million; $1\text{ppm}=1\cdot 10^{-6}$
SCPI	Standard Command for Programmable Instruments; Standardbefehle für programmierbare Instrumente
Si	Silizium
Si ₃ N ₄	Siliziumnitrid
SiHCl ₃	Trichlorsilan
SiO ₂	Siliziumoxid
STC	Standard Test Conditions, Standard-Testbedingungen
TCO	Transparent Conducting Oxide; transpatente, elektrisch leitfähige Oxide
VBA	Visual Basic for Applications

Formelverzeichnis

Formel 2.1	S. 8
Formel 2.2	S. 8
Formel 2.3	S. 12
Formel 2.4	S. 12
Formel 2.5	S. 12
Formel 2.6	S. 12
Formel 2.7	S. 13
Formel 2.8	S. 13
Formel 2.9	S. 13
Formel 2.10	S. 13
Formel 2.11	S. 14
Formel 2.12	S. 15
Formel 2.13	S. 15
Formel 2.14	S. 15
Formel 2.15	S. 15
Formel 2.16	S. 22
Formel 2.17	S. 22
Formel 2.18	S. 22
Formel 2.19	S. 22
Formel 2.20	S. 22
Formel 2.21	S. 23
Formel 2.22	S. 24
Formel 2.23	S. 26
Formel 2.24	S. 26
Formel 2.25	S. 27
Formel 2.26	S. 34
Formel 2.27	S. 34
Formel 2.28	S. 35

1 Einleitung

Im Zeitalter des zunehmenden Bedarfs an sauberer und nachhaltiger Energiegewinnung hat die Forschung und Entwicklung von Photovoltaik-Technologien erheblich an Bedeutung gewonnen. Dabei spielen Solarmodule, als zentrale Komponenten von Photovoltaik-Anlagen, eine herausragende Rolle. Diese Module ermöglichen die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie und tragen somit maßgeblich zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen bei. Um jedoch die Effizienz und Leistungsfähigkeit von Solarmodulen umfassend zu verstehen und zu optimieren, bedarf es einer genauen Charakterisierung ihrer elektrischen Kenngrößen.

Die vorliegende Bachelorarbeit widmet sich der Aufgabe, einen Versuchsstand zu konzipieren, der die präzise Charakterisierung dieser elektrischen Kenngrößen von Solarmodulen ermöglicht. Dies umfasst die Aufnahme und Erstellung einer Strom-Spannungs-Kennlinie unter möglichst kurzer Beleuchtungsdauer des Moduls. Die exakte Erfassung und Analyse dieser Kenngrößen ist von entscheidender Bedeutung für die Weiterentwicklung der Photovoltaik-Technologie und trägt dazu bei, die Leistungsfähigkeit von Solarmodulen in realen Einsatzszenarien zu optimieren. Um dies Studierenden in Rahmen eines Praktikums näher zu bringen, wurde im Verlauf dieser Arbeit ein Versuchsstand mit einem entsprechenden Programm konzipiert.

Die Gliederung der Arbeit ist dabei so gestaltet, dass sie von den grundlegenden wissenschaftlichen Konzepten der Photovoltaik bis hin zur praktischen Umsetzung des Versuchsstandes reicht. Kapitel 2 führt in die Wirkprinzipien von Photovoltaik-Zellen ein und beleuchtet verschiedene Zelltypen sowie ihre Verschaltungen. Es werden auch der maximale Wirkungsgrad, Verlustmechanismen und Potentiale der Solarmodule analysiert, um ein tiefes Verständnis für deren Funktionsweise zu schaffen.

Der experimentelle Teil, dargestellt in Kapitel 3, befasst sich mit der praktischen Umsetzung des Versuchsstandes. Die Zielstellung der Arbeit wird definiert, der Versuchsaufbau beschrieben und die Auswahl des benötigten Materials erörtert. Zudem werden Methoden zur Aufnahme von Kennlinien untersucht und verschiedene Varianten der Messungen betrachtet.

Diese Bachelorarbeit soll dazu beitragen, ein tieferes Verständnis der elektrischen Eigenschaften von Solarmodulen zu entwickeln und eine Grundlage für zukünftige Forschungen und Entwicklungen auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien schaffen.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

2.1 Wirkprinzip einer Photovoltaik-Zelle

Der innere photoelektrische Effekt, auch als Photoeffekt bekannt, bildet die Grundlage für die Funktionsweise einer Photovoltaik-Zelle. Dieser Effekt wurde 1873 von Willoughby Smith und Joseph May entdeckt. Er besagt, dass Elektronen in Halbleitern durch Licht aus ihren Bindungen gelöst werden und somit als freie Ladungsträger im Festkörper vorliegen.

Dass in Festkörpern Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt werden kann, wiesen 1876 William Adams und Richard Day erstmals nach, indem sie zeigten, dass ein beleuchteter, mit Platinelektroden versehener Selenstab elektrische Energie produziert. [1, S. 32]

2.1.1 Aufbau

Eine Solarzelle besteht aus halbleitenden Materialien. Diese haben eine Bandlücke ΔW_G , die unter 3 eV liegt. Im Halbleiter wird Licht mit einer Frequenz $f > \Delta W_G/h$ absorbiert, wodurch Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband übergehen. Silizium ist ein häufig verwendeter Halbleiter mit einer Bandlücke von $\Delta W_G = 1,12$ eV. [1, S. 64]

Um die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern zu erhöhen, werden Fremdatome durch Diffusion eingebracht, was man als Dotierung bezeichnet. Die Dotierdichten sind in der Praxis sehr gering und dennoch sehr effektiv. So reichen 100 ppm an Dotierdichte für eine Erhöhung der Leitfähigkeit im Vergleich zu reinem Silizium um den Faktor 10^6 . [1, S. 69]

Man unterscheidet grundlegend zwischen n- und p-Dotierung.

Bei der n-Dotierung von Silizium werden Donatoratome wie Phosphor eingebaut. Diese Atome, die sich in der fünften Hauptgruppe befinden, bilden mit den umliegenden Siliziumatomen Bindungen, wobei vier der fünf Valenzelektronen des Donatoratoms an den Bindungen beteiligt sind. Das fünfte Valenzelektron des Donatoratoms befindet sich in einem energetischen Zustand, der leicht über dem Niveau des Leitungsbandes liegt. Dieser Zustand ist bereits bei Raumtemperatur besetzt und trägt zur erhöhten Leitfähigkeit des dotierten Siliziums bei. Zusätzlich erzeugt das Dotieratom ein zusätzliches Energieniveau unterhalb des Leitungsbandes. Die Energie, die erforderlich ist, um ein Elektron von diesem Zustand in das Leitungsband anzuheben, ist niedrig (0,02 eV). Durch die n-Dotierung erhöht sich die Anzahl von Elektronen

in diesem energetischen Zustand signifikant, was zu einer erheblichen Steigerung der Leitfähigkeit des gesamten Kristalls führt. [1, S. 68]

Als Gegensatz zu der n-Dotierung steht p-Dotierung. Hierbei werden Akzeptoren, Atome der dritten Hauptgruppe, eingebaut, beispielsweise Bor. Da diese Elemente nur drei Valenzelektronen besitzen bleibt die Bindung zu den umliegenden Siliziumatomen unvollständig. Diese offene Bindung kann von benachbarten Elektronen genutzt werden, in sie in diese wechseln, was man als Löcherleitung bezeichnet. [1, S. 69]

Kristalle mit n-Dotierung bezeichnet man auch als Emitter, p-dotierte Kristalle als Basis. Führt man nun beide zusammen entsteht durch das Konzentrationsgefälle an Elektronen ein Diffusionsstrom. Die freien Elektronen des Emitters strömen in die Basis und besetzt die Elektronenfehlstellen. Die Donatoren und Akzeptoren bleiben fest im Kristallgitter. In der Folge ist der Emitter positiv und die Basis negativ geladen. Da nun viele ortsfeste Ladungen im Übergangsbereich vorliegen entsteht ein elektrisches Feld, wodurch ein Teil der Elektronen von der Basis in den Emitter zurückfließt. Es entsteht ein Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldstrom am Übergang. Es hat sich eine Raumladungszone gebildet. Ihre Verteilung ist von der Dotierdichte der Donatoren und Akzeptoren abhängig. Ist die Donatordichte um den Faktor x größer als die Akzeptordichte, so erstreckt sich die Raumladungszone um denselben Faktor x mehr in den p-dotierten Bereich. [1, S. 70]

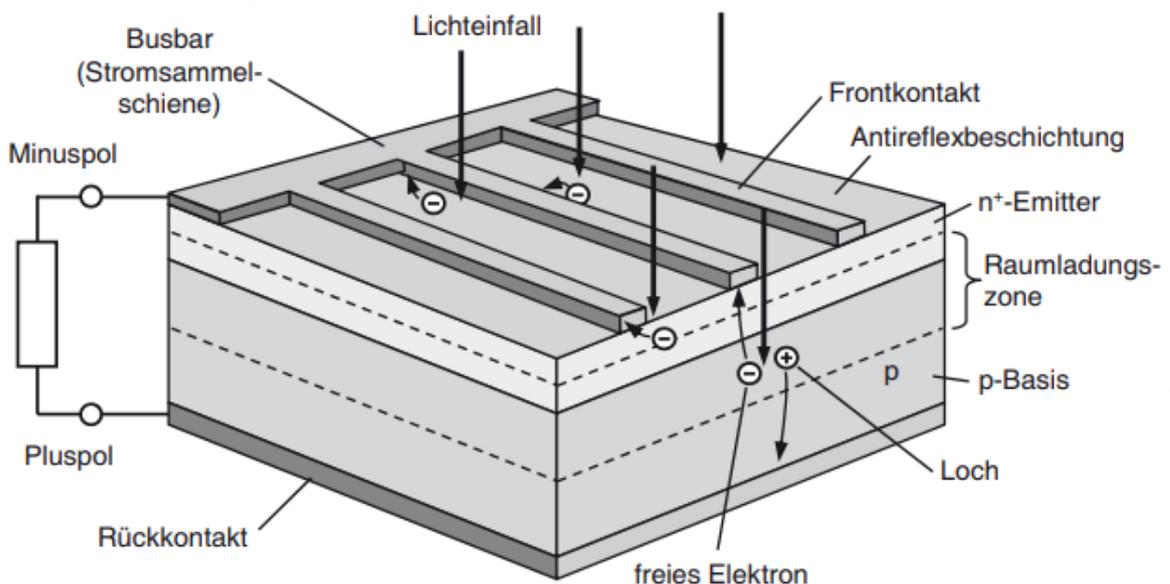


Abbildung 1: Aufbau einer Photovoltaik-Zelle [1, S. 85]

Abbildung 1 zeigt, dass eine Photovoltaikzelle hauptsächlich aus dem besprochenen dotierten Halbleiter besteht. Zusätzlich ist eine Stromsammelschiene notwendig, um Elektronen von der

Zelle abzutransportieren, sowie ein Rückkontakt, um diese wieder zu der Zelle zurückzuführen.

2.1.2 Funktion

Wenn Licht in die Zelle eindringt, entsteht durch jedes absorbierte Photon ein Elektron-Loch-Paar. Diese werden durch das Feld der Raumladungszone getrennt und zu den Kontakten transportiert: Die Löcher gelangen über die Basis zum darunter liegenden Rückkontakt, während die freien Elektronen über den Emitter zu den Frontkontakten gelangen. Die Frontkontakte sind schmale Metallstreifen, die die erzeugten Elektronen zur Stromsammelschiene (Busbar) führen, um den erzeugten Strom zu sammeln. Wenn man einen Verbraucher an die beiden Pole der Solarzelle anschließt, kann dieser die erzeugte elektrische Energie nutzen. [1, S. 84]

Die Tiefe, in der ein Photon in einer Photovoltaikzelle absorbiert wird, wird durch seine Wellenlänge bestimmt. Die Eindringtiefe gibt dabei an, wie tief in das Material das Licht eindringen kann, bevor seine Intensität auf 36 % des ursprünglichen Wertes abnimmt, wobei die Eindringtiefe von der Wellenlänge abhängig ist. Mit steigender Wellenlänge nimmt die Eindringtiefe zu. So hat blaues Licht eine Eindringtiefe von weniger als 1 μm , während infrarotes Licht eine Eindringtiefe von mehr als 100 μm aufweist. [1, S. 86]

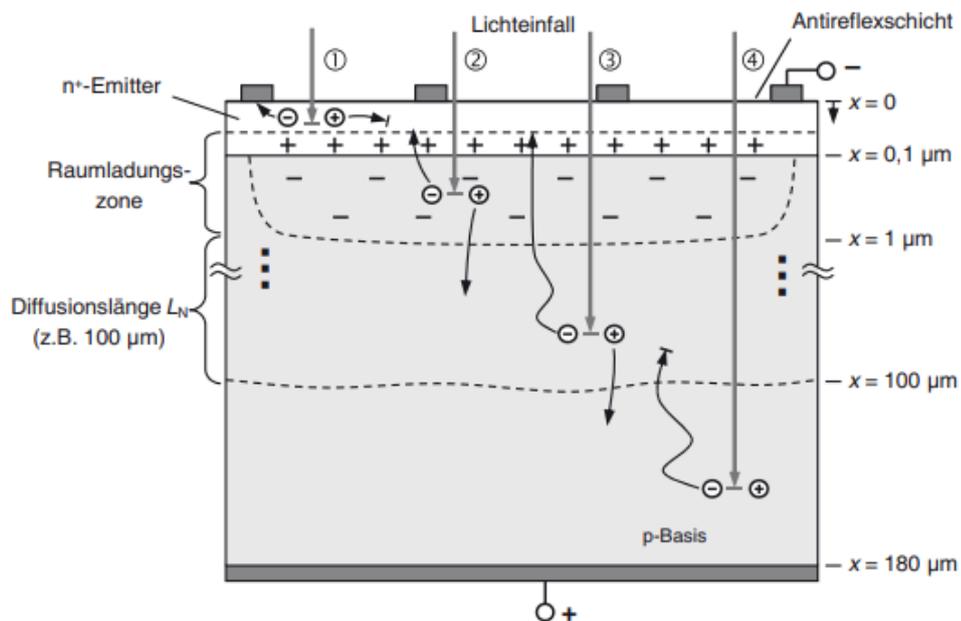


Abbildung 2: Weg der Elektronen in der Photovoltaik-Zelle [1, S. 86]

Abbildung 2 zeigt, was mit den entstehenden Elektronen geschieht, abhängig davon, in welcher Lage sie erzeugt werden. Die vier möglichen Fälle sind in der Abbildung nummerisch gekennzeichnet und werden im restlichen Abschnitt entsprechend beschrieben.

(1) Licht, das innerhalb des Emitters absorbiert wird, erzeugt Elektronen-Loch-Paare, bei denen das Loch mit hoher Wahrscheinlichkeit durch das Vorliegen zahlreicher freier Elektronen vor dem Erreichen der Raumladungszone rekombiniert. Es ist somit kein Beitrag zur Stromerzeugung von niedrigwelligen Licht vorhanden.

(2) Ist die Wellenlänge hingegen so groß, dass das Photon erst in der Raumladungszone absorbiert und ein Elektronen-Loch-Paar bildet, so trägt es vollständig zur Stromerzeugung bei. Durch das vorherrschende Feld werden Elektronen in den Emitter und die Löcher in die Basis gezogen, sodass die Wahrscheinlichkeit für eine Rekombination gering ist.

(3) Die von Photonen, die aufgrund ihrer Wellenlänge erst in der Basis absorbiert werden, erzeugten Elektronen haben zwei Möglichkeiten. Da kein elektrisches Feld vorliegt, diffundieren diese ziellos umher. So können sie zum einen in die Raumladungszone gelangen und daraufhin an den Emitter gezogen werden, oder sie rekombinieren mit einem der Löcher in der Basis. Nur die Elektronen, die den Emitter erreichen, haben einen Beitrag zur Stromerzeugung.

(4) Wenn ein Photon außerhalb der Diffusionslänge der Elektronen absorbiert wird, bewegt sich das Elektron zwar durch die Basis, aber es reagiert mit einem Loch, bevor es die Raumladungszone erreicht. Dieser Prozess führt lediglich zur Erwärmung des Kristalls und beeinflusst nicht den Photostrom. [1, S. 87]

2.2 Direkte und indirekte Halbleiter

Um die stark variierenden Absorptionskoeffizienten verschiedener Materialien zu erklären, wird nun die Interaktion zwischen Licht und dem Halbleiterkristall genauer betrachtet.

Ein Halbleiterkristall besteht aus gekoppelten schwingungsfähigen Gitterteilchen, die in ihren Energiezuständen begrenzt sind. Diese Gitterschwingungen können ähnlich wie Photonen als Teilchen, genannt Phononen, betrachtet werden. Unter Verwendung dieses Modells lässt sich die optische Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares als Stoßprozess beschreiben, bei dem sowohl der Energie- als auch der Impulserhaltungssatz gelten. Ein einfallendes Photon besitzt

eine hohe Energie, aber nur einen geringen Impuls. Im Gegensatz dazu weist ein Phonon eine niedrige Energie und gleichzeitig einen hohen Impuls auf.

In der Halbleiterphysik lassen sich Materialien in zwei Kategorien einteilen: direkte und indirekte Halbleiter.

Ein indirekter Halbleiter, wie kristallines Silizium (c-Si), besitzt ein Leitungsbandminimum und ein Valenzbandmaximum an unterschiedlichen Impulsorten im Kristallgitter. Das bedeutet, dass die Bildung eines Elektron-Loch-Paars nur durch die Wechselwirkung mit einem Phonon möglich ist. Im Gegensatz dazu benötigt ein direkter Halbleiter, wie amorphes Silizium (a-Si), keine Phononen, da sein Leitungsbandminimum und Valenzbandmaximum am gleichen Punkt im Impulsraum liegen. Diesen Unterschied veranschaulicht Abbildung 3.

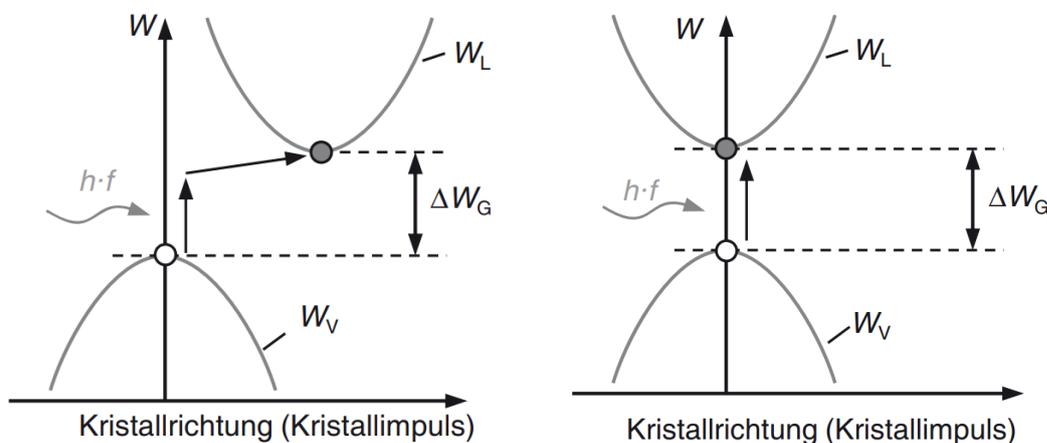


Abbildung 3: indirekter Halbleiter (links) und direkter Halbleiter (rechts) im Vergleich [1, S. 77-78]

Ein Photon kann ein Elektron in einem indirekten Halbleiter nur dann anregen, wenn es nicht nur Energie überträgt, sondern auch die Schwingungsrichtung des Elektrons ändert.

Im Kristallmodell (siehe Abbildung 4) werden Löcher als schlitzförmig dargestellt und freie Elektronen werden als schwingende Kugeln betrachtet, die eine bestimmte diagonale Schwingungsrichtung erreichen müssen, um zu existieren. Dies kann geschehen, wenn das Elektron mit einem Atom im Kristallgitter kollidiert und einen zusätzlichen Impuls erhält. Da solche Kollisionen selten sind, dringt Licht in einem indirekten Halbleiter weit ein, bevor es absorbiert wird. Daher haben indirekte Halbleiter wie Silizium oder Germanium einen niedrigen Absorptionskoeffizienten.

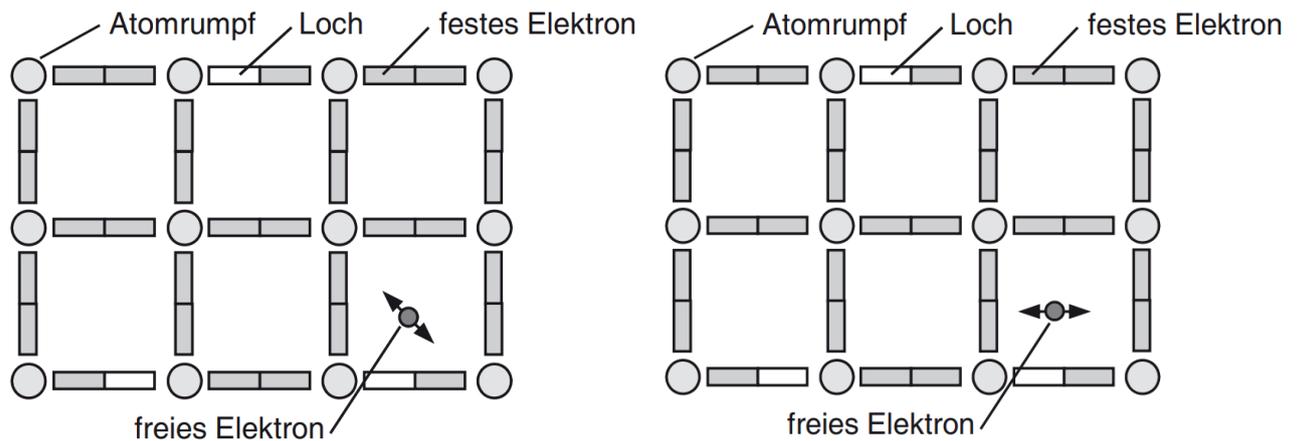


Abbildung 4: indirekter Halbleiter (links) und direkter Halbleiter (rechts) im Vergleich [1, S. 77-78]

Im Gegensatz dazu kann in einem direkten Halbleiter ein Photon ein Elektron aus der Bindung lösen, ohne seine Schwingungsrichtung zu ändern. Dies führt zu einer höheren Wahrscheinlichkeit der Absorption und somit zu einem höheren Absorptionskoeffizienten. Tabelle 1 zeigt die Absorptionseigenschaften verschiedener direkter und indirekter Halbleiter. Bei direkten Halbleitern steigt der Absorptionskoeffizient stark oberhalb der Bandlückenenergie an, während er bei kristallinem Silizium moderater ansteigt, was zu einem insgesamt niedrigeren Absorptionskoeffizienten führt. [1, S. 76-78]

Tabelle 1: Absorptionseigenschaften verschiedener direkter und indirekter Halbleiter [1, S. 78]

Material	Art	Bandlücke ΔW_G	Absorptionskoeffizient α	Eindringtiefe x_E
Kristallines Silizium	Indirekter Halbleiter	1,12 eV	4.000 cm^{-1}	2,5 μm
Amorphes Silizium	Direkter Halbleiter	1,7 eV	40.000 cm^{-1}	0,3 μm
Galliumarsenid	Direkter Halbleiter	1,42 eV	47.000 cm^{-1}	0,2 μm

2.3 Zelltypen

Für alle betrachteten Zelltypen ist hochreines Silizium notwendig. Silizium ist nach Sauerstoff das in der Natur am häufigsten vorkommende Element der Erdkruste. Jedoch liegt es in Form

von Quarzmineralien, dem Siliziumoxid, vor. Zunächst wird aus diesem metallurgisches Silizium (MG-Si) mit einer Reinheit von 98 % hergestellt. Dazu wird das natürlich vorkommende Siliziumoxid mit Kohle in einem Lichtbogenofen bei 1800°C reduziert.



Da für Solarzellen ein noch höherer Reinheitsgrad benötigt wird, muss das vorliegende MG-Si gereinigt werden, was aufwendig über den Silan-Prozess geschieht. Dabei wird gemahltes Silizium mit Chlorwasserstoff in einem Wirbelschichtreaktor vermischt, was exotherm zu Trichlorsilan und Wasserstoff reagiert.



Durch wiederholte Destillation wird das Trichlorsilan weiter gereinigt. Der Siedepunkt der Flüssigkeit liegt bei 31,8°C. Die Rückgewinnung des Siliziums geschieht in einem Siemens-Reaktor. In dem Reaktor wird das gasförmige Trichlorsilan zusammen mit Wasserstoff an einem 1350°C heißen Siliziumstab vorbeigeführt, an dem sich das Polysilizium abscheidet. Das Silizium hat eine Reinheit von 99,999% und liegt in der Regel als zwei Meter langer Stab mit 30 cm Durchmesser vor. [1, S. 113-115]

2.3.1 Monokristalline Zellen

Bei der Herstellung von monokristallinem Silizium wird in der Regel das Czochralski-Verfahren genutzt. Hierbei werden Brocken des Polysiliziums in einem Tiegel aus Quarzglas bei 1450°C geschmolzen. Anschließend wird ein Impfkristall, welcher an einem Metallstab angebracht ist, in die Schmelze getaucht und unter leichter Drehung nach oben gezogen. Das flüssige Silizium lagert sich dabei an diesem Kristall an und kristallisiert. So bildet sich der notwendige Einkristall. Die für Solarzellen gängigen Durchmesser des entstehenden Ingots liegen bei ungefähr 15 cm. Dies lässt sich über eine entsprechende Ziehgeschwindigkeit erreichen.

Besser, aber auch teurer als das Czochralski-Verfahren, ist das Float-Zone-Verfahren. Dabei wird der Impfkristall unten an einem senkrecht hängenden Polysiliziumstab angesetzt, über welchen anschließend mit einer Induktionsspule gefahren wird. Das Silizium schmilzt in der Folge nur in der Induktionszone und der Einkristall bildet sich von unten nach oben. [1, S. 7]

Monokristalline Zellen sind im Vergleich zu anderen Zelltypen teuer, haben dafür aber die höchsten Wirkungsgrade, da hier die Kristalle einheitlich orientiert sind und keine Korngrenzen vorliegen, was Verluste dahingehend verhindert.

Typisch für diesen Zellentyp sind die abgerundeten Ecken der Wafer. Die Module sind dunkelblau bis schwarz und wirken ausgesprochen glatt und eben (siehe Abbildung 5). [2]

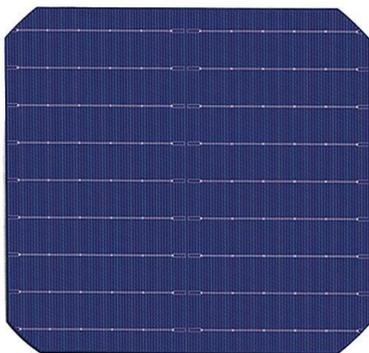


Abbildung 5: Zelle (links) [3] und Modul (rechts) auf Basis von monokristallinem Silizium

2.3.2 Polykristalline Zellen

Zur Herstellung von polykristallinem Silizium werden Siliziumbrocken in einem Graphittiegel zur Schmelze gebracht und anschließend erkaltet, beispielsweise indem beim Induktionsheizen langsam die Heizringe nach oben gezogen werden. So bilden sich am Tiegelboden verteilte Einkristalle, die bis zum Zusammenstoß mit einem anderen seitlich weiterwachsen. Das zielgerichtete Abkühlen sorgt anschließend für ein säulenartiges Wachstum. An den Korngrenzen kommt es vermehrt zu Rekombination, was den Wirkungsgrad niedrig hält. Daher sind möglichst große Einkristalle erstrebenswert. [1, S. 116]

Polykristalline Zellen sind einfacher in der Herstellung und dadurch günstiger als monokristalline Zellen, da der Prozess weniger Aufwand erfordert. Dafür haben diese aufgrund der vorhandenen Korngrenzen mehr Verluste und damit einen niedrigeren Wirkungsgrad.

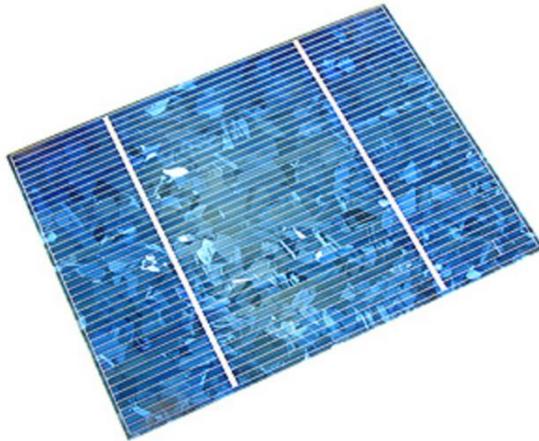


Abbildung 6: Zelle (links) [4] und Modul (rechts) auf Basis von polykristallinem Silizium

Polykristalline Zellen erkennt man an den quadratischen Wafern mit sichtbarer Inhomogenität. Außerdem sind die Module von einem wesentlich helleren blau als monokristalline Zellen (siehe Abbildung 6). [2]

2.3.3 Amorphe Zellen

Bei amorphen Siliziumzellen, einer Untergruppe der Dünnschichtzellen, liegt das Silizium im Gegensatz zu den anderen betrachteten Fällen nicht in fester Form, sondern gasförmig vor. Hierbei wird mittels der Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD), also der Plasma unterstützten Gasphasenabscheidung, eine Schicht aus amorphem Silizium gebildet. Dazu strömen Silan und Wasserstoff in eine 200°C heiße Prozesskammer, in der sie durch Stoßionisation mit beschleunigten Elektronen, welche durch ein starkes Hochfrequenzfeld erzeugt werden, in ihre Bestandteile zerlegt werden. Die nun geladenen Teilchen reagieren mit der Substratoberfläche und lagern sich dort an. Die Abscheideraten liegen typischerweise bei $0,2 \frac{nm}{s}$, was bei einer nur 0,5 μm dicken Schicht, welche für die Absorption des Sonnenlichtes ausreicht, trotzdem 40 Minuten dauert. Das ist für eine Massenproduktion nicht optimal.

Das Substrat weist nun eine unregelmäßige, also amorphe, Struktur aus Siliziumatomen auf. Dementsprechend liegen viele offene Bindungen, auch Dangling Bonds genannt, vor, welche Rekombinationszentren für Elektronen-Loch-Paare bilden, was für Solarzellen ungeeignet ist.

Durch die Zugabe des Wasserstoffes werden die Dangling Bonds, wenn auch nicht vollständig, passiviert und somit für Solarzellen nutzbar.

Dünnschichtzellen haben ihren Namen daher, dass das aufgetragene Material auf dem Substrat unter 2 μm dick ist. Als Substrat wird meist Glas mit einer Dicke von ca. 1 mm verwendet. Als nächste Schicht kommt ein leitendes Oxid, welches als transparente Elektrode fungiert. Man spricht auch von Transparent Conducting Oxide (TCO), welches 0,5 μm dick ist. Typischerweise wird dazu Indium-Zinn-Oxid oder Zinn-Oxid genutzt. Danach folgt eine 0,01 μm dicke Schicht p-dotiertes, 0,4 μm dicke Schicht undotiertes, oder auch intrinsisches, und eine 0,01 μm dicke Schicht n-dotiertes amorphes Silizium. Als Letztes kommt ein 0,7 μm dicker Rückkontakt aus Aluminium oder Silber. Da die Lichtabsorption bestenfalls in der intrinsischen Schicht der Zelle stattfinden soll, sollte die p-dotierte Zone möglichst transparent sein, was durch die Zugabe von Kohlenstoff gewährleistet wird.

Dünnschichtzellen sind aufgrund des geringen Materialverbrauchs günstig, haben aber einen wesentlich geringeren Wirkungsgrad als die kristallinen Zellen. Dieser liegt bei gerade einmal 5-7 %. Dafür sind sie für Verschattung weniger anfällig und funktionieren auch bei diffuser Strahlung besser. Daher wird nur etwa die doppelte Fläche benötigt, um die gleiche Leistung wie kristalline Zellen zu erreichen. [1, S. 122-123]

Ein handelsübliches Dünnschichtmodul ist in Abbildung 7 zu sehen.



Abbildung 7: Dünnschichtmodul [5]

2.4 Verschaltung

Um klarzustellen, warum es notwendig ist die Zellen vor dem Gebrauch zu charakterisieren, ist es wichtig zu wissen, welche Verschaltung welche Auswirkung auf die produzierte Leistung

hat. Außerdem lassen sich so Verschattungsverluste erklären und Lösungen dafür finden. Dazu wird der Fall von jeweils drei miteinander verschalteten Zellen betrachtet. Es wird angenommen das jede Zelle dieselben Strom- und Spannungswerte erreichen kann.

2.4.1 Parallelschaltung von Zellen

Bei der Parallelschaltung liegt an allen Zellen die gleiche Spannung an, während sich die Einzelströme addieren (siehe Abbildung 8).

$$U_{\text{ges}} = U_1 = U_2 = U_3 \quad (2.3)$$

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2.4)$$

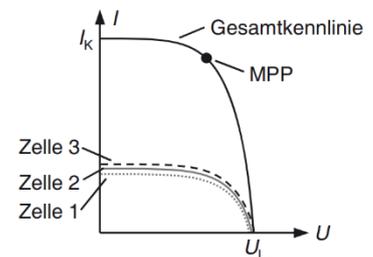
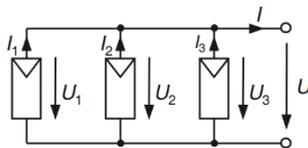


Abbildung 8: Parallelschaltung von Photovoltaik-Zellen [1, S. 148-149]

Wird eine der Zellen nun vollkommen verschattet, beispielsweise Zelle 3, ergeben sich folgende Spannungen und Ströme:

$$U_{\text{verschattet}} = U_1 = U_2 = U_{\text{ges}} \quad (2.5)$$

$$I_{\text{verschattet}} = I_1 + I_2 = I_{\text{ges}} - I_3 \quad (2.6)$$

In einer Parallelschaltung wird der Gesamtstrom durch die Summe der Ströme der einzelnen Zellen bestimmt. Wenn eine Zelle verschattet wird, liefert sie keinen Strom, was den Gesamtstrom verringert, aber die anderen Zellen können immer noch Strom liefern. Die Spannung bleibt in einer Parallelschaltung für alle Zellen gleich. Die Leistung des gesamten Moduls wird durch die Summe der Leistungen der einzelnen Zellen bestimmt.

Im Vergleich zum unverschatteten Fall ist der Kurzschlussstrom um den Faktor 1/3 niedriger, während die Leerlaufspannung unverändert ist. Für das Modul bedeutet das einen Leistungsverlust von 1/3, was dem Anteil der Fläche am verschatteten Modul entspricht. [1, S. 148-149]

2.4.2 Reihenschaltung von Zellen

In einer Reihenschaltung werden die Solarzellen hintereinandergeschaltet, sodass der Strom durch jede Zelle gleich ist, während die Spannungen addiert werden. (siehe Abbildung 9).

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2.7)$$

$$I_{\text{ges}} = I_1 = I_2 = I_3 \quad (2.8)$$

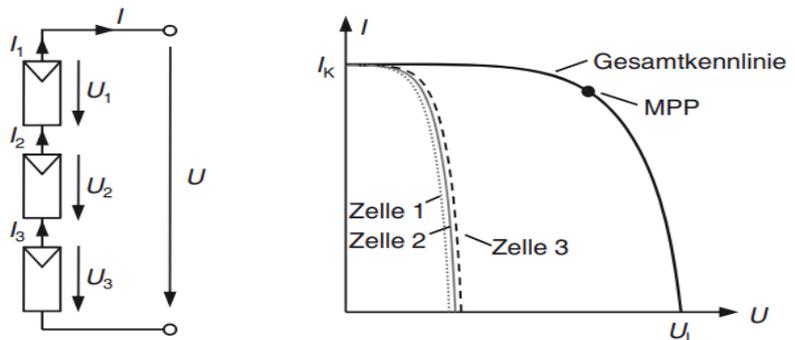


Abbildung 9: Reihenschaltung von Photovoltaik-Zellen [1, S. 149-150]

Wird wiederum eine der Zellen komplett verschattet, beispielsweise Zelle 3, ergeben sich folgende Spannungen und Ströme:

$$U_{\text{verschattet}} = U_1 + U_2 = U_{\text{ges}} - U_3 \quad (2.9)$$

$$I_{\text{verschattet}} = I_3 = 0 \text{ A} \quad (2.10)$$

Der Strom in einer Reihenschaltung wird durch die schwächste Zelle begrenzt. Wenn eine Zelle verschattet wird, liefert sie gar keinen Strom, was dazu führt, dass der gesamte Strom im Schaltkreis abnimmt. Die Spannung wird geringer, bleibt aber über den Schaltkreis bestehen. Die Leistung wird ebenfalls von dem schwächsten Modul bestimmt, da diese das Produkt aus Strom und Spannung ist. [1, S. 149-150]

2.4.3 Fazit

Die Parallelschaltung ist wesentlich weniger anfällig für Verschattung als die Reihenschaltung. Dennoch müssen Zellen in Reihe geschaltet werden, um eine hohe Spannung für den Transport der Ströme vorzugeben. In modernen Modulen werden demnach alle Zellen in Reihe geschaltet, was bei der Verschattung von nur einer Zelle zu einer starken Leistungsreduktion führen würde.

Um dies zu verhindern, werden Bypassdioden eingesetzt. Diese Dioden sind antiparallel geschaltet, das bedeutet, solange keine Verschattung auftritt, sind die Dioden inaktiv und beeinträchtigen den Stromfluss nicht. Wenn jedoch eine Zelle verschattet wird, leitet die Bypassdiode den vollen Strom, was jedoch zu einer Verringerung der Spannung führt. In realen Modulen werden Bypassdioden über mehrere Zellen gelegt, typischerweise über 12, 18 oder 24 Zellen. Die Bypassdioden werden demnach über mehrere Zellen verteilt, um eine gleichmäßig geringe Erwärmung des Moduls zu ermöglichen, sodass das Ausfallrisiko unter Verschattung minimiert wird.

Da sich die Ströme bei Reihenschaltung an dem schwächsten Modul orientieren, ist es bei größeren Anlagen mit mehreren Modulen wichtig, die Kurzschlussströme der Module zu kennen. Diese können von Modul zu Modul variieren. In der Praxis werden dementsprechend Module mit gleichem Kurzschlussstrom miteinander in Reihe geschaltet, sodass jedes Modul möglichst mit voller Leistung läuft. [1, S. 150-152]

2.5 Maximaler Wirkungsgrad, Verlustmechanismen und Potentiale

Der Wirkungsgrad einer Photovoltaik-Zelle ist ein Maß dafür, wie effizient die Solarzelle Sonnenlicht in elektrische Energie umwandelt. Er wird in Prozent ausgedrückt und gibt an, welcher Anteil der eingestrahnten Sonnenenergie tatsächlich in elektrische Energie umgesetzt wird. Ein hoher Wirkungsgrad ist wichtig, um möglichst viel elektrische Leistung aus dem verfügbaren Sonnenlicht zu gewinnen. [6]

Die Formel für den Wirkungsgrad η einer Solarzelle lautet:

$$\eta = \frac{P_{\text{elektrisch erzeugt}}}{P_{\text{eingestrahlt}}} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Verluste sorgen dabei dafür, dass die erzeugte elektrische Leistung sinkt und somit auch der Wirkungsgrad. Als Ausblick werden potenzielle Lösungen gezeigt, die den Wirkungsgrad erhöhen, indem Verluste minimiert oder auch die eingestrahlte Leistung künstlich erhöht werden.

2.5.1 Der maximale Wirkungsgrad

Um Elektronen-Loch-Paare generieren zu können, muss das Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben, also die Bandlücke ΔW_G überwunden werden. Dafür muss das Photon mindestens diese Energie besitzen.

$$E = \Delta W_G \quad (2.12)$$

Die Energie lässt sich berechnen als das Produkt des Plankschen Wirkungsquantums h und der Frequenz des Photons f .

$$E = h \cdot f \quad (2.13)$$

Zwischen der Frequenz f und der Wellenlänge λ von Schwingungen besteht unter Nutzung der Lichtgeschwindigkeit c folgender Zusammenhang.

$$c = f \cdot \lambda \quad (2.14)$$

Somit ergibt sich für die Bandlückenwellenlänge, also die Wellenlänge, die das Photon zur Erzeugung eines Elektronen-Loch-Paares maximal haben darf, folgende Gleichung.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W_G} \quad (2.15)$$

Strahlung mit einer Wellenlänge oberhalb der Bandlückenwellenlänge trägt nicht genug Energie, um Elektronen ins Leitungsband zu heben. Daher wird diese Strahlung als Transmissionsverlust betrachtet und trägt nicht zur Stromerzeugung bei.

Ist die Wellenlänge der Strahlung geringer als die Bandlückenwellenlänge, hat also mehr Energie als benötigt, wird neben der Elektronen-Loch-Paar-Generation Energie in Form von Stößen an das Kristallgitter abgegeben, was das Gitter erwärmt. Man spricht hierbei von Thermalisierungsverlusten.

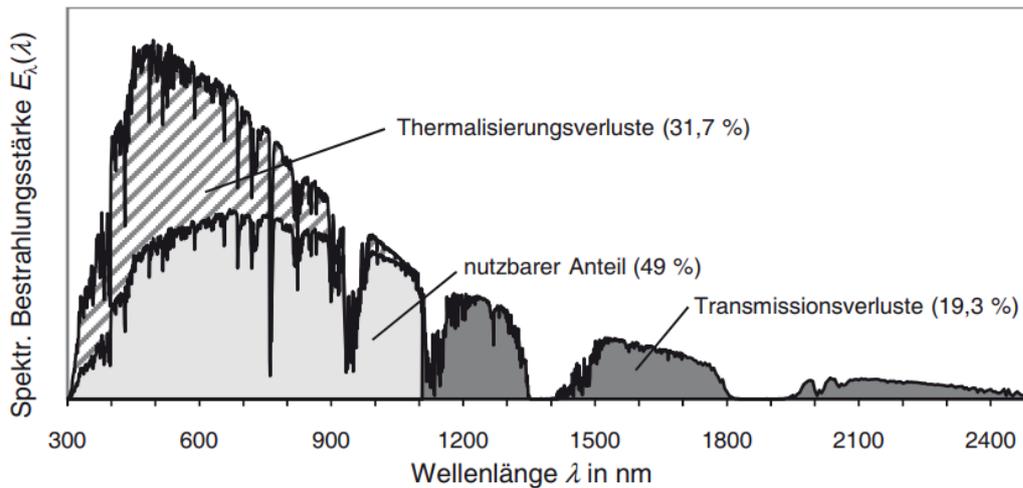


Abbildung 10: Spektrale Verluste einer kristallinen siliziumbasierten Photovoltaik-Zelle [1, S. 105]

Beide Verlustmechanismen sorgen selbst unter Idealbedingungen zu einem Spektralen Wirkungsgrad von 49 %, wie Abbildung 10 zeigt.

Zudem muss beachtet werden, dass Strom und Spannung am Punkt maximaler Leistung kleiner als Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung sind. Unter dieser Voraussetzung, sowie der idealisierten Vorstellung, dass alle Photonen mit einer Energie größer der Bandlücke absorbiert werden und zum Strom beitragen, ergibt sich der theoretische Wirkungsgrad, also der Wirkungsgrad, der maximal erreichbar ist. Für Silizium beträgt der theoretische Wirkungsgrad 28,6 %. [1, S. 105-106]

2.5.2 Verlustmechanismen

Um möglichst den maximal erreichbaren Wirkungsgrad zu erreichen, sollten zusätzliche Verluste vermieden oder zumindest minimiert werden. Man unterscheidet die Verlustmechanismen in optische und elektrische Verluste. [1, S. 107]

2.5.2.1 Optische Verluste

Es gibt drei relevante optische Verlustmechanismen.

Der erste ist die Reflexion der Strahlung an der Oberfläche. Die unterschiedlichen Brechungsindizes von Luft ($n = 1$) und Silizium ($n = 3,9$) hätten zur Folge, dass 35 % des eingestrahnten Lichtes reflektiert werden würde. Dieser Verlust lässt sich auf 3 % reduzieren, indem die Zelle

texturiert und zusätzlich eine Antireflexbeschichtung aufgetragen wird. Bei der Texturierung wird die Oberfläche mit Ätzmitteln wie Kaliumhydroxid KOH behandelt und somit aufgeraut, was winzige Pyramiden mit einem $70,5^\circ$ spitzen Winkel erzeugt. Somit ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass reflektiertes Licht ein zweites Mal in die Zelle gelangt. Die Antireflexschicht besteht in der Regel aus Siliziumnitrid Si_3N_4 und ist so dick, dass zwei aufeinandertreffende Strahlen um 180° -Phasenverschoben sind, sodass es zu destruktiver Interferenz kommt. Dadurch wird reflektierte Strahlung teilweise oder vollständig ausgelöscht und die Reflexion minimiert.

Ein weiterer optischer Verlustmechanismus ist die Verschattung, welche in der Zelle dauerhaft durch die aufliegenden Kontaktfinger vorliegt. Die Abschattungsverluste liegen bei 6-10 %. Die Kontaktfinger und Busbars müssen eine Mindestgröße beibehalten, da mit kleinerem Querschnitt der Widerstand steigt. Es gilt hierbei also ein Optimum zu finden. Dieses liegt bei einer Breite von 100 bis 200 μm . Um die verschattete Fläche zu minimieren, werden die Busbars zum Zellenrand hin verkleinert, da durch diese Zonen weniger Elektronen fließen. Das bezeichnet man als Verjüngungen. Eine zusätzliche Variante ist es, die Kontakte in mittels Laser erzeugte, schmale Rillen zu legen. Man nennt diese Buried Contacts, also vergrabene Kontakte. Sie reduzieren die Verschattungsverluste um 30 %.

Mit einer Dicke von etwa 200 μm sind Solarzellen dünn, was zur Folge hat, dass Licht mit höheren Wellenlängen und somit niedrigerem Absorptionskoeffizienten weniger effizient von der Zelle absorbiert wird. Diese Effekte führen zu Transmissionsverlusten. Um diese Verluste zu minimieren, werden reflektierende Materialien, wie beispielsweise Aluminiumschichten, auf der Unterseite der Zellen angebracht. Diese reflektierende Schicht dient dazu, das Licht, das zunächst nicht absorbiert wird, zurück in die Zelle zu reflektieren, anstatt es zu verlieren. In Kombination mit einer texturierten Oberfläche wird so sichergestellt, dass das Licht innerhalb der Zelle länger verweilt, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass es vom Absorbermaterial aufgenommen wird und somit die Gesamteffizienz der Lichtabsorption steigert. [1, S. 107-109]

2.5.2.2 Elektrische Verluste

Elektrische Verluste lassen sich in ohmsche und rekombinatorische Verluste unterscheiden.

Auf der Oberseite der Photovoltaik-Zelle treten elektrische Verluste hauptsächlich in den Kontaktfingern auf. Um diese Verluste zu minimieren, ist die Verwendung schmaler, hoher Kontaktfinger, auch als Buried Contacts bekannt, die beste Lösung. Aufgrund der begrenzten

Leitfähigkeit des dotierten Materials können ohmsche Verluste im Halbleitermaterial auftreten, insbesondere bei dünnen Emitter-Schichten. Obwohl eine Erhöhung der n-Dotierung die Leitfähigkeit verbessert, kann sie gleichzeitig zu einer verstärkten Rekombination im dotierten Bereich führen. Der Übergang von Metall zu Halbleitern führt ebenfalls zu Verlusten, da er eine Potentialstufe erzeugt, die als Schottky-Kontakt bezeichnet wird. Dieser Kontakt hat eine ähnliche Wirkung wie ein pn-Übergang und verringert die erreichbare Zellenspannung. Um Rekombinationsverluste zu minimieren, wird die n^{++} -Dotierung nur in der Nähe des Metallkontakts angewandt.

In Photovoltaik-Zellen verursachen ungesättigte Bindungen am Rand des Kristallgitters neben der internen Rekombination auch Oberflächenrekombinationen. Um die Rekombination an der Unterseite der Solarzelle zu reduzieren, wird das sogenannte Back-Surface-Field eingesetzt. Dabei wird eine hochdotierte p-Schicht auf der Rückseite der Solarzelle erzeugt, um die Rekombination zu minimieren. Dies wird durch die Verwendung von Bor- oder Aluminiumatomen erreicht. An der Oberseite der Solarzelle wird versucht, möglichst große Flächen mit einer Oxidschicht zu bedecken. Diese Oxidschicht dient dazu, ungesättigte Bindungen zu sättigen und die Oberfläche zu passivieren, wodurch Oberflächenrekombinationsprozesse reduziert werden. Gleichzeitig wird durch die Schaffung einer n^{++} - n^{+} -Struktur am Frontkontakt ein Front-Surface-Field erzeugt, das dazu beiträgt, Löcher von den Kontakten fernzuhalten und somit die Rekombination weiter zu verringern. Das Front-Surface-Field unterstützt die effiziente Trennung von Elektronen und Löchern an der Oberseite der Photovoltaik-Zelle. [1, S. 109-110]

2.5.3 Ausblick

Abbildung 35 zeigt das NREL-Best Research Cell Efficiency Diagramm. Dieses Diagramm von der National Renewable Energy Laboratory (NREL) in den USA zeigt die Entwicklung des Wirkungsgrad neuer Solarzellen im Laufe der Zeit. Das Diagramm enthält verschiedene Arten von Solarzellen, einschließlich der behandelten mono- und polykristallinen, sowie amorphen Siliziumzellen. Das Diagramm zeigt die Fortschritte bei der Steigerung der Effizienz von Solarzellen im Laufe der Zeit. [7]

Es lässt sich herauslesen, dass monokristalline Siliziumzellen in der Spitze einen realen Wirkungsgrad von 26,1 % erreichen können, was dem theoretischen Wirkungsgrad nahekommt. Dieses Forschungsergebnis stammt vom ISFH, dem Institut für Solarenergieforschung in Hameln, aus dem Jahre 2018. Das aktuelle Maximum für siliziumbasierte Solarzellen stellen

monokristalline Konzentratorzellen dar. Dieser liegt leicht höher, bei 27,6 %. Bei Konzentratorzellen wird durch Linsensysteme oder Parabolspiegel die Strahlung auf die Zelloberfläche gebündelt. Dadurch steigt die Bestrahlungsstärke und somit auch der Wirkungsgrad. [1, S. 135]

Die Solarzelle mit dem höchsten Wirkungsgrad aktuell ist eine Stapelzelle des Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Das Maximum dieser Zelle beträgt 47,6%. Es handelt sich wiederum um eine Konzentratorzelle, die mit einer Bestrahlung von umgerechnet 665 Sonnen diesen hohen Wirkungsgrad erreicht. [8] Stapelzellen allgemein sind aktuell teuer und daher nur für Sonderanfertigungen, wie in der Satellitentechnik, vorzufinden. Die grundlegende Idee von Stapelzellen besteht darin, dass verschiedene Schichten in der Lage sind, unterschiedliche Wellenlängen des Lichts zu absorbieren, wobei in jeder Schicht ein Material verwendet, das spezifisch für die Absorption eines bestimmten Wellenlängenbereichs optimiert ist. [1, S. 126]

2.6 Spektren der genutzten Strahlungsquellen

Ein Ziel des Flashens besteht darin, ein Spektrum zu erzeugen, das dem AM1,5-Spektrum möglichst genau entspricht. Dadurch wird sichergestellt, dass die erzielten Kennlinien auf realistischen Bedingungen basieren und für präzise Messungen und Vergleiche verwendet werden können. Die im Versuch genutzten Strahlungsquellen werden in Tabelle 2, in Kapitel 3.2, näher beschrieben.

2.6.1 Sonne

Das Spektrum der Sonne, wie in Abbildung 11 zu sehen, ähnelt dem eines idealen schwarzen Körpers mit einer Oberflächentemperatur von 5.778 K. Dieses lässt sich außerhalb der Erdatmosphäre als AM0-Spektrum messen. AM0 sagt dabei aus, dass die Strahlung null mal die Luftmasse durchquert hat. Um ein durchschnittliches Jahresspektrum darzustellen, wird das AM1,5-Spektrum als Standardspektrum verwendet. Dieses ist durch die eineinhalbfache Durchquerung der Strahlung durch unterschiedliche Einflüsse geschwächt. Zu diesen gehört die Reflexion und Absorption von Licht durch Moleküle, wie Sauerstoffmoleküle, Ozon, Wasser oder Kohlenstoffdioxid. Weitere Einflüsse haben die Rayleigh-Streuung und die Streuung an Aerosolen. [1, S. 38]

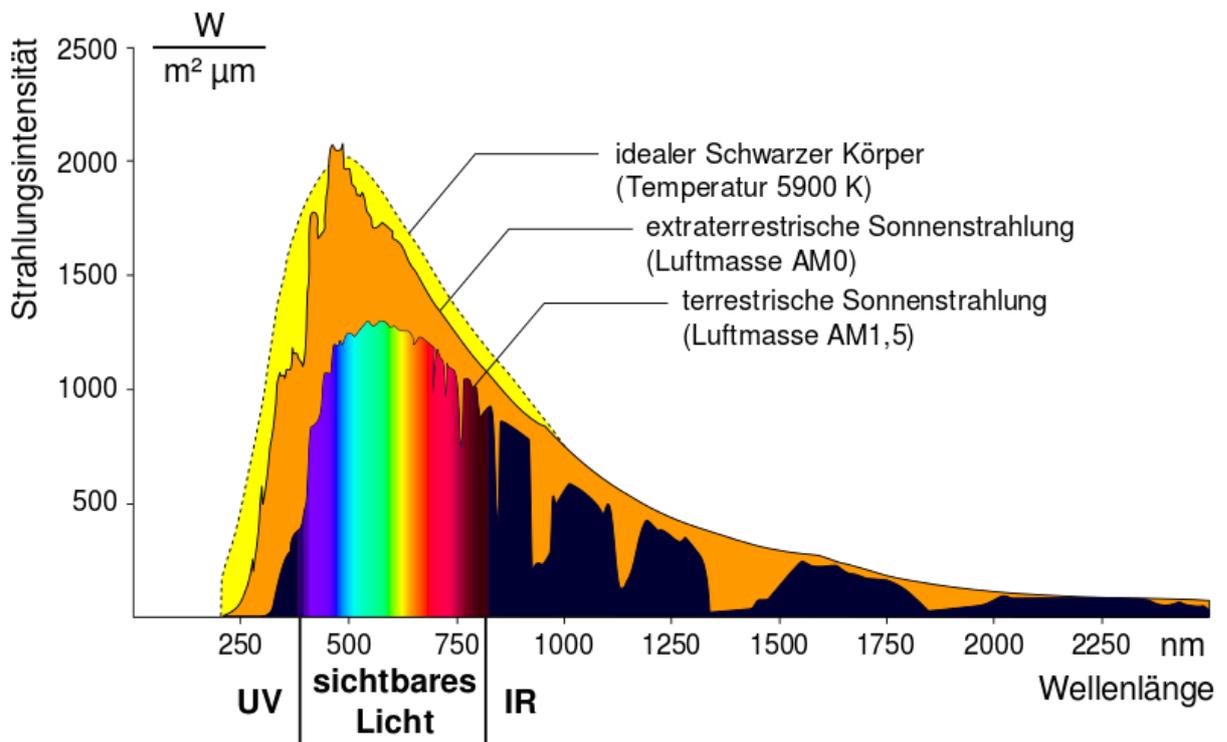


Abbildung 11: Sonnenspektrum [9]

2.6.2 Light Emitting Diode (LED)

LED steht für Light Emitting Diode, also lichtaussendende Diode. Der wichtigste Teil der LED ist der Halbleiterkristall. Dieser ist über eine Reflektorwanne mit der Kathode und einem dünnen Bond Draht mit der Anode verbunden. Alles zusammen ist mit einer Kunststofflinse umschlossen, um es vor äußeren Schäden zu schützen.

Wie auch in der Photovoltaik-Zelle liegt hier ein pn-Übergang im Halbleiterkristall vor. Jedoch ist hierbei nicht die Umwandlung von Strahlung in elektrische Energie das Ziel, sondern umgekehrt. Durch Anlegen einer Spannung in Flussrichtung rekombinieren Elektronen und Elektronenlöcher in der pn-Übergangsschicht. Dieser Prozess führt zur Emission von Strahlung, unter anderem in Form von sichtbarem Licht. Die LED gibt die erzeugte Strahlung nach außen ab, während gleichzeitig eine geringe Menge an Abwärme entsteht. Solange eine Spannungsquelle die benötigten freien Elektronen bereitstellt, wiederholt sich dieser Vorgang kontinuierlich. [10, S. 41]

2.6.3 Halogen-Strahler

Halogen-Strahler sind eine Art von Glühlampen, die Halogengase, z.B. Iod, enthalten, um die Lebensdauer der Lampe zu verlängern. Eine Halogenlampe besteht aus einem Glaskolben,

der mit einem chemisch inaktiven Gas, meist einem Stickstoff-Argon-Gemisch mit Iodzusatz, gefüllt ist. Im Inneren befindet sich ein wendelförmiger Wolframdraht, der elektrischen Strom leitet und zum Glühen gebracht wird. Wenn elektrischer Strom durch die Wolframdraht fließt, erwärmt sich dieser aufgrund des hohen Widerstands. Dadurch beginnt der Draht zu glühen. Glühlampen sind ineffiziente Lampen, da die zugeführte elektrische Leistung zu 95 % in Wärme und nur zu 5 % in sichtbares Licht umgewandelt wird.

Halogenlampen verwenden den Halogenkreisprozess, um die Lebensdauer der Lampe zu verlängern. In diesen Prozess verdampft der Glühfaden aus Wolfram, wenn die Lampe eingeschaltet wird. Die Halogengase, wie Iod, die sich im Lampenkolben befinden, reagieren jedoch mit den verdampften Wolfram-Atomen und bilden flüchtige Wolfram-Halogenide. Diese Halogenide werden durch die Hitze wieder zum Glühfaden transportiert, wo sie kondensieren und das verdampfte Wolfram wieder absetzen. Dieser kontinuierliche Prozess ermöglicht es, den Glühfaden vor dem Ausbrennen zu schützen und verlängert die Lebensdauer der Halogenlampe erheblich. [11, S. 143]

2.6.4 Xenon-Strahler

Xenon-Strahler sind wie auch die Halogenlampen Gasentladungslampen. Bei Xenonlampen wird jedoch statt eines Halogenids Xenon gasförmig in den Glaskolben gefüllt.

2.6.5 Fazit

Um die Spektren der verwendeten Strahler mit dem AM1,5-Spektrum besser vergleichen zu können, wurden in Abbildung 12 alle Spektren übereinandergelegt. Die einzelnen Spektren sind im Anhang zu finden.

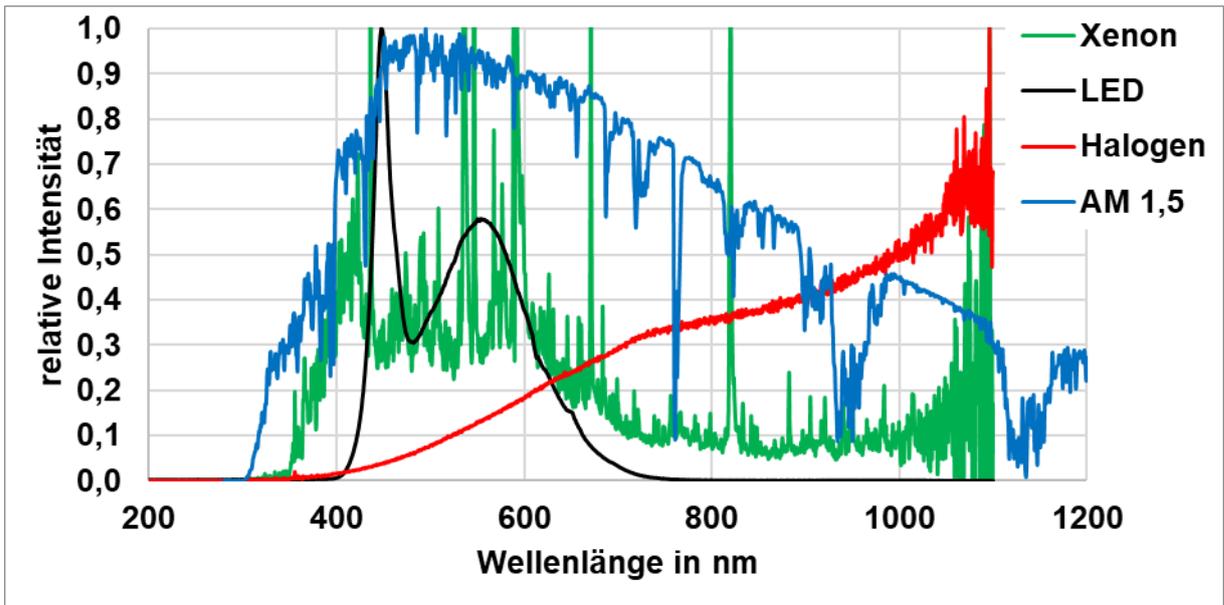


Abbildung 12: Vergleich der Spektren

Die Wellenlänge, ab welcher Photonen Elektronen-Loch-Paare bilden, lässt sich mit der zuvor ermittelten Formel 2.15 aus Kapitel 2.5.1 berechnen.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W} \quad (2.16)$$

Dazu wird verwendet:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (2.17)$$

$$c = 299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2.18)$$

$$\Delta W(c - Si) = 1,12 \text{ eV} = 1,12 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,795 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (2.19)$$

Damit ergibt sich eine Wellenlänge von:

$$\lambda = 1.109 \text{ nm} \quad (2.20)$$

Strahlung mit einer Wellenlänge unterhalb von 1.109 nm hat demnach genug Energie, um Elektronen-Loch-Paare in kristallinen Siliziumzellen zu bilden. Strahlung einer höheren Wellenlänge liefert als Transmissionsverlust keinen Beitrag zur Stromerzeugung und muss damit nicht beachtet werden.

Das AM1,5-Spektrum zeigt einen graduellen Anstieg der Intensität ab 300 nm, der sein Maximum bei 500 nm erreicht. Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Intensität ab. Dieser Verlauf ist aufgrund der in Abschnitt 2.6.1 beschriebenen Einflüsse zwar unregelmäßig, bleibt jedoch über den betrachteten Bereich hinweg nach dem Peak fallend.

Im Spektrum des LED-Strahlers treten zwei Spitzen im sichtbaren Wellenlängenbereich auf, ähnlich wie im Sonnenspektrum. Im Gegensatz zum Sonnenspektrum ist die Intensität im infraroten Bereich jedoch nahezu null.

Die Spektralanalyse der verwendeten Halogenlampe zeigt, dass die Intensität mit zunehmender Wellenlänge ansteigt. Der Großteil der abgestrahlten Energie liegt im infraroten Bereich, während die relative Intensität im sichtbaren Lichtbereich gering ist.

Das Spektrum der eingesetzten Xenonlampe erstreckt sich über den gesamten relevanten Wellenlängenbereich, sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Bereich. Abgesehen davon zeigt sich das Spektrum recht stabil und ähnelt am meisten dem Sonnenspektrum.

2.7 Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Kennlinie einer Photovoltaik-Zelle ist die umgekehrte einer Photodiode, da statt des Verbraucherzählpfeilsystems das Erzeugerzählpfeilsystem angewandt wird (siehe Abbildung 13).

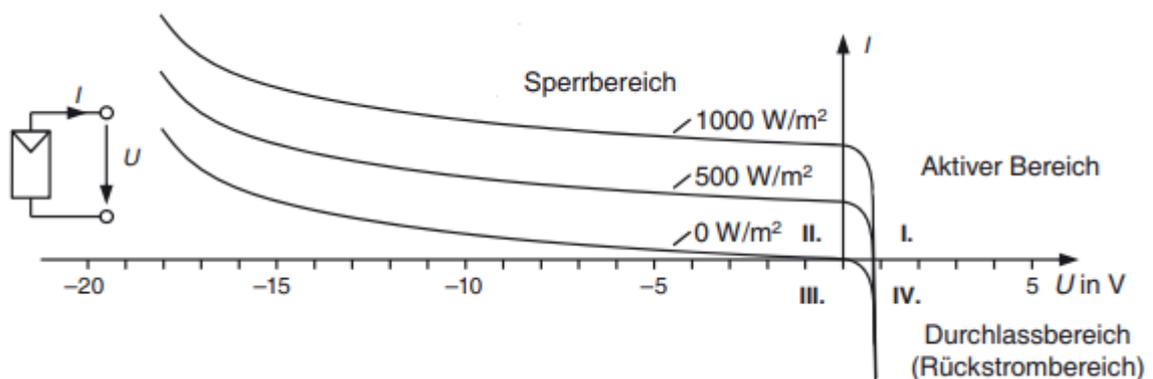


Abbildung 13: Kennlinie einer Photovoltaik-Zelle [1, S. 147]

Im Erzeugerzählpfeilsystem wird die Spannung an der Energiequelle gemessen und der Strom, der von der Energiequelle zum Verbraucher fließt, wird positiv erfasst. Die aus der Shockley-Gleichung hergeleitete Kennliniengleichung lautet:

$$I = I_{Ph} - I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{m \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (2.21)$$

Relevant sind die Daten aus dem ersten Quadranten (siehe Abbildung 14).

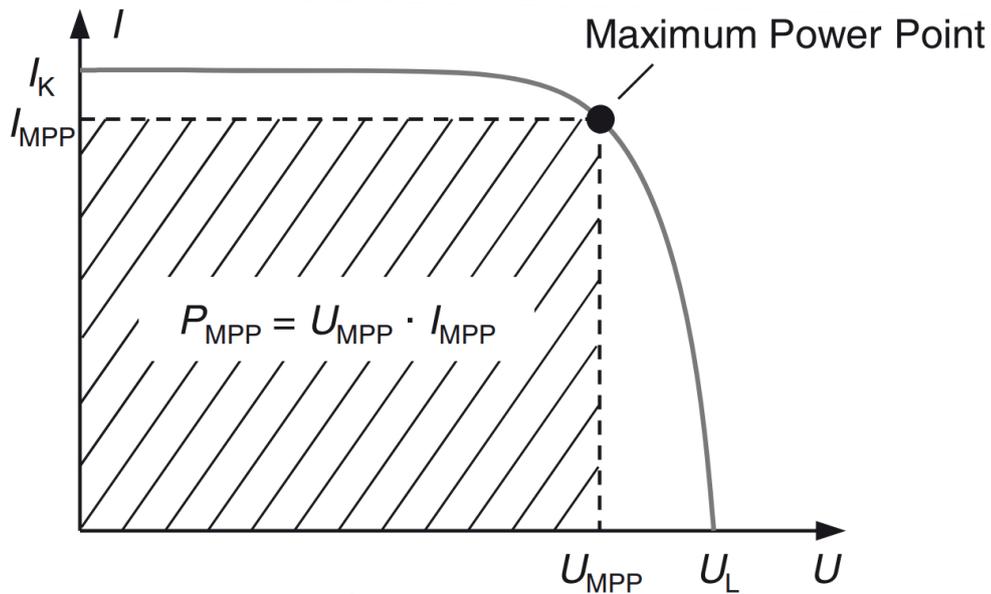


Abbildung 14: Kennlinie einer Photovoltaik-Zelle im ersten Quadranten [1, S. 92]

Die Kenngrößen der Photovoltaik-Zelle lassen sich gut in dieser Kennlinie ablesen.

Den Kurzschlussstrom I_K liefert eine Photovoltaik-Zelle, wenn an dieser eine Spannung von 0 V anliegt, also ein Kurzschluss vorliegt. I_K ist gleich dem Photostrom I_{ph} und proportional zur Bestrahlungsstärke.

Die Leerlaufspannung U_L andererseits erhält man im Falle des Leerlaufs, also wenn ein Strom von 0 A fließt. Sie unterliegt ausschließlich einer Veränderung proportional zum natürlichen Logarithmus der Bestrahlungsstärke E , ist von dieser also wesentlich unabhängiger.

Der Arbeitspunkt, an dem die Solarzelle die maximale Leistung abgibt, wird als Maximum Power Point (MPP) bezeichnet. Da die Leistung eines Arbeitspunktes der Fläche $U \cdot I$ entspricht, muss diese Fläche im Falle des MPP maximal sein. Die dazugehörigen Strom- und Spannungswerte werden mit den Abkürzungen I_{MPP} und U_{MPP} bezeichnet. [1, S. 92-95]

Das Verhältnis vom MPP zu dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom wird als Füllfaktor bezeichnet. Dieser ist ein gutes Maß für die Qualität einer Photovoltaikzelle.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_L \cdot I_K} \quad (2.22)$$

2.7.1 Standard-Testbedingungen

Die Standard-Testbedingungen, kurz STC (engl. Standard Test Conditions), sind Messbedingungen, die sich für das Testen von Photovoltaik-Zellen etabliert haben.

Die STC sind:

- Bestrahlungsstärke = $1.000 \frac{W}{m^2}$

- Zelltemperatur = $25^{\circ}C$

- Luftmasse = 1,5 [12, S. 365]

Die Einstrahlung von $1.000 \frac{W}{m^2}$ entspricht der durchschnittlichen Globalstrahlung an einem klaren Sommertag. Diese ist die Summe aus direkter und diffuser Sonnenstrahlung. Die Direktstrahlung ist jene Strahlung, welche auf direktem Weg von der Sonne auf die Erde gelangt. Außerhalb der Erdatmosphäre beträgt die Bestrahlungsstärke $1.367 \frac{W}{m^2}$. Durch diverse Wechselwirkungen mit den in der Atmosphäre befindlichen Teilchen, wie Absorption und Streuung, sinkt diese auf $835 \frac{W}{m^2}$. Die Differenz zu den $1.000 \frac{W}{m^2}$ wird durch Diffusstrahlung gedeckt. Diese gelangt über Streuung oder Reflexion auf die Erdoberfläche. Die restliche Strahlung wird von der Erdatmosphäre reflektiert. Die $1.000 \frac{W}{m^2}$ stellen einen Durchschnittswert dar. Durch äußere Einflüsse, wie vor allem Bewölkung, ist dieser Wert in der Realität niedriger, kann aber auch höher sein. [1, S. 40]

Die Zelltemperatur von $25^{\circ}C$ wird verwendet, da diese in vielen Regionen der Welt die Durchschnittstemperatur ist. Es ist ein Kompromiss aus tatsächlichen Betriebsbedingungen, bei denen die Temperatur variabel ist, und den praktischen Anforderungen für standardisierte Tests. Die Standardisierung der Testbedingungen erleichtert die Durchführung von Messungen und Vergleichstests.

Als Spektrum wird das AM 1,5-Spektrum verwendet. Es wird als Standardspektrum verwendet, da es ein durchschnittliches Jahresspektrum abbildet. AM steht dabei für Air Mass, also Luftmasse, und die anschließende Zahl steht entsprechend dafür, wie oft diese von der Strahlung durchquert wird, bis die Erdoberfläche erreicht ist. [1, S. 39]

2.7.2 Einfluss der Bestrahlungsstärke

Der Kurzschlussstrom einer Solarzelle steigt linear mit der Bestrahlungsstärke, da er direkt proportional zu ihr ist. Dies zeigt sich, wenn man die Kennliniengleichung aus Kapitel Strom-Spannungs-Kennlinie 2.7 anwendet und die Spannung null setzt:

$$I_K = I_{ph} - I_S \cdot (e^0 - 1) = I_{ph} = const \cdot E \quad (2.23)$$

Löst man die Kennliniengleichung nach U auf zeigt sich, dass die Leerlaufspannung der Solarzelle logarithmisch mit der Bestrahlungsstärke steigt.

$$U_L = U(I = 0) = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_K}{I_S}\right) \quad (2.24)$$

Dies führt zu einer Erhöhung der Gesamtleistung der Solarzelle. Wenn die Bestrahlungsstärke abnimmt, spricht man von einer relativen Wirkungsgradverringerung. Dies zeigt Abbildung 15. Die dargestellten Kennlinien wurden mithilfe eines Solarworld SW-165 Photovoltaik-Moduls erfasst. Dieses monokristalline Modul weist eine Nennleistung von 165 Wp, einen Kurzschlussstrom von 5,1 A und eine Leerlaufspannung von 44 V auf. [13]

Während der Messung wurde die Einstrahlung variiert, wobei die Modultemperatur konstant bei 25°C gehalten wurde.

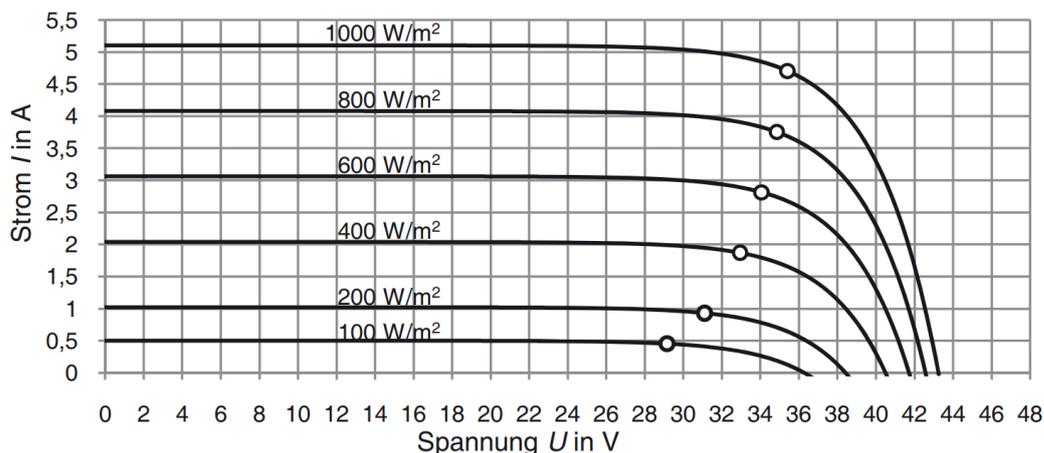


Abbildung 15: Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Kennlinie [1, S. 155]

Diese Verringerung des Wirkungsgrades wird durch verschiedene Faktoren verursacht, einschließlich der Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Einstrahlung. Bei geringem Photostrom entsteht eine niedrige Spannung U_D an der Diode des Ersatzschaltbildes, wodurch ihre Leitfähigkeit stark abnimmt. Anstatt durch die Diode zu fließen, wird ein Teil des

Photostroms im Parallelwiderstand R_P in Form von Wärme umgewandelt. Dies führt zu einer Verringerung der Gesamtleistung und somit des Wirkungsgrades der Solarzelle. [1, S. 155]

2.7.3 Einfluss der Temperatur

Der Einfluss der Modultemperatur ist in Abbildung 16 abgebildet. Bei dem verwendeten Photovoltaik-Modul handelt es sich erneut um ein Solarworld SW-165, welches bei einer Einstrahlung von $1.000 \frac{W}{m^2}$ im AM1,5-Spektrum bei verschiedenen Temperaturen vermessen wird.

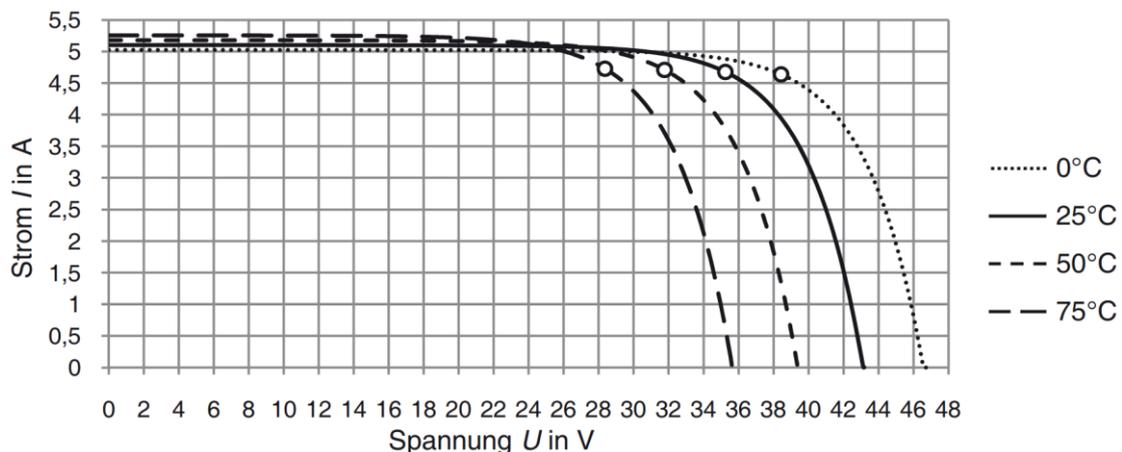


Abbildung 16: Einfluss der Temperatur auf die Kennlinie [1, S. 156]

Eine höhere Temperatur in Halbleitern sorgt für mehr thermische Bewegung im Kristallgitter. Elektronen werden so vermehrt aus ihren Bindungen gerissen und gelangen in das Leitungsband, was die Eigenleitendichte n_i und somit den Sättigungsstrom I_s erhöht. Mit diesem Wissen und der Kennliniengleichung lässt sich erschließen, dass die Leerlaufspannung verringert wird. Diese Verringerung lässt sich auf $-0,4 \frac{\%}{K}$ berechnen. Da die Temperaturerhöhung außerdem die Bandlücke verkleinert, erhöht sich der Photostrom, da nun zusätzlich Photonen mit höheren Wellenlängen Elektronen-Loch-Paare bilden können. Dies belegt die Varshni-Formel [14, S. 9], wobei es sich bei α und β und Fitparameter handelt:

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha \cdot T^2}{(T + \beta)} \quad (2.25)$$

Der Kurzschlussstrom ist proportional zum Photostrom und steigt daher um $0,06 \frac{\%}{K}$. Der sich ergebende Leistungsverlust einer siliziumbasierten Photovoltaikzelle lässt sich auf $0,5 \frac{\%}{K}$ ermitteln. [1, S. 97]

2.8 Wie wird aktuell geflasht

Das Hauptziel des Flashens besteht darin, die Leistung und Qualität der Photovoltaik-Zellen zu charakterisieren. Durch das Flashen können verschiedene Parameter der Solarzelle gemessen werden, einschließlich des Stroms, der Spannung und der Leistung, welche die Zelle unter standardisierten Bedingungen erzeugt. Darüber hinaus hilft das Flashen auch bei der Identifizierung von Defekten oder Unregelmäßigkeiten in den Solarzellen. So können eventuelle Schwachstellen oder Fehlstellen in der Zelle sichtbar gemacht werden, die ihre Leistung beeinträchtigen könnten. Dies ermöglicht es den Herstellern, die Qualität der Solarzellen zu verbessern und gegebenenfalls fehlerhafte Zellen zu identifizieren.

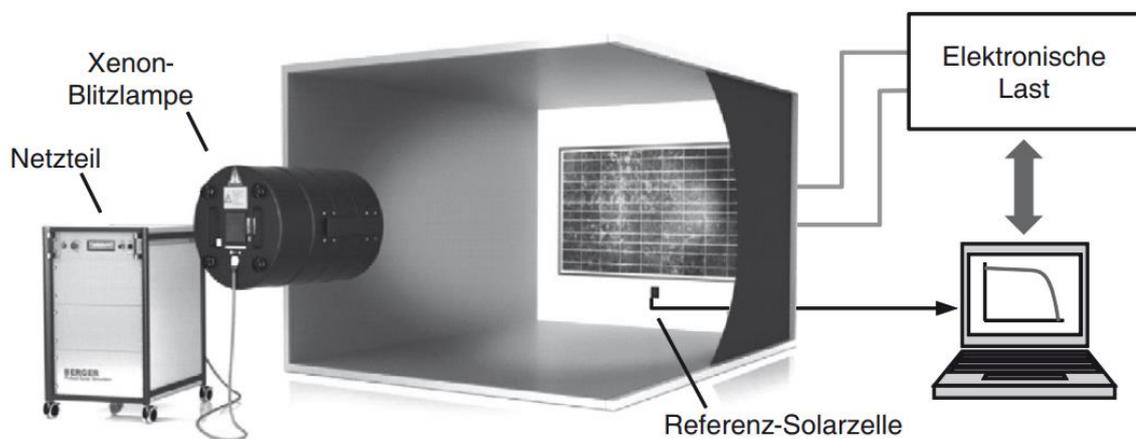


Abbildung 17: Modulflasher [1, S. 220]

Die Leistungsmessung von Solarmodulen erfolgt beim Modulhersteller mittels eines Modulflashers, auch Solarsimulator genannt. Ein solcher ist in Abbildung 17 dargestellt. Genutzt wird eine Xenon-Blitzlampe, die einen 10 ms andauernden Lichtblitz erzeugt, welcher noch gefiltert wird, um möglichst dem AM1,5-Spektrum zu entsprechen. Während der Beleuchtungszeit wird über eine elektrische Last der Widerstand variiert und Strom und Spannung am Modul gemessen. Durch die kurze Beleuchtung wird das Modul nicht erwärmt und die Temperatur kann konstant gehalten werden. Um eine homogene Beleuchtung zu gewährleisten, liegt ein großer Abstand von 5 m zwischen Modul und Lampe vor. Damit sichergestellt wird, dass die Beleuchtungsstärke möglichst exakt bei $1.000 \frac{W}{m^2}$ liegt, wird ein Referenzmodul, auch goldenes Modul, mit getestet, welches unter Normbedingungen immer dasselbe Ergebnis ausgibt. [1, S. 219-220]

3 Experimenteller Teil

3.1 Zielstellung

Das Ziel des Versuchs besteht darin, die elektrischen Eigenschaften von Photovoltaik-Modulen unter verschiedenen äußeren Bedingungen reproduzierbar zu bestimmen. Dazu werden der Strom und die Spannung des Moduls gemessen, um damit die Leistung zu ermitteln. Ein besonderes Augenmerk liegt sowohl auf den Unterschieden der Kennlinien, welche durch verschiedene Strahlungsquellen verursacht werden, als auch auf den unterschiedlichen Ergebnissen der mono- und polykristallinen Photovoltaik-Modulen. Die Messbedingungen werden sowohl durch die Beleuchtungsstärke als auch durch die Temperatur variiert.

3.2 Material

Als Strahlungsquellen wurden drei verschiedene Strahler verwendet. Diese werden in Tabelle 2 auf Grundlage ihrer Eigenschaften verglichen. Abbildungen der Strahler sind im Anhang.

Tabelle 2: Verwendete Strahlungsquellen

Titel	LED-Strahler	Halogen-Strahler	Xenon-Strahler
Name	Hychika LED Work-Light WL30	Grandlite HL-510Q	(handelsüblicher Xenonstrahler)
Leistung P	30 W	500 W	60 W
Maße (Höhe-Breite)	70 mm · 105 mm	110 mm · 155 mm	85 mm · 85 mm
Fläche A	0,00735 m ²	0,01705 m ²	0,007225 m ²
Leistung / Fläche	4.081 $\frac{W}{m^2}$	29.325 $\frac{W}{m^2}$	8.304 $\frac{W}{m^2}$

Auffallend ist, dass der Halogen-Strahler der leistungsfähigste Strahler ist. Gleichzeitig ist dieser der Größte. Der LED-Strahler und der Xenon-Strahler sind etwa gleich groß, wobei der Xenon-Strahler die doppelte Leistung erreicht.

In Tabelle 3 werden die verwendeten mono- und polykristallinen Module beschrieben und miteinander verglichen.

Tabelle 3: Verwendete Module

Titel	Monokristallines Modul [15]	Polykristallines Modul [16]
Hersteller	Offgrid	Velleman
Nennleistung P_{Nenn}	30 Wp	30 Wp
Wirkungsgrad η	22,3 %	18 %
Leerlaufspannung U_L	24,0 V	22,0 V
Kurzschlussstrom I_K	1,62 A	1,81 A
Maße (Höhe·Breite)	360 mm · 560mm	350 mm · 650 mm
Fläche A	0,2016 m^2	0,196 m^2
Leistung / Fläche	148,810 $\frac{W}{m^2}$	153,061 $\frac{W}{m^2}$

Ziel der Beschaffung war es, dass beide Modultypen vorhanden sind, welche dieselbe Nennleistung erreichen können. Außerdem sollten sie ähnliche Maße haben, damit sie im Praktikumsbetrieb problemlos gewechselt werden können.

Neben den großen Modulen wurde noch ein zusätzliches, kleineres, monokristallines Modul beschafft, ein SM850 von Sol-Expert. Die geringe Größe von 60 mm · 60 mm ermöglicht es, dass auch kleinere Strahler das Modul vollständig bestrahlen, was bei den größeren Modulen nicht der Fall ist. Die technischen Daten des Moduls sind aufgrund der Größe ebenfalls wesentlich geringer. Nach Herstellerangaben beträgt die Leerlaufspannung 0,6 V und der Kurzschlussstrom 0,85 A. Somit können auch die kleinen Strahler einen messbaren Strom erzeugen.

Um eine gleichmäßige Bestrahlungsstärke auf der Moduloberfläche zu schaffen, wurde mit einem digitalen Luxmeter, dem Maolux 5032C/B USB von Gossen Foto- und Lichttechnik GmbH, gearbeitet. Dabei wurde der Strahler so auf das Modul gerichtet, sodass in jeder Ecke des Moduls dieselbe Beleuchtungsstärke vorliegt.

Die Temperaturmessung fand über einen an ein Multimeter angebrachten Temperatursensor (Thermoelement Typ K) statt. Dieser wurde so an das Modul angebracht, dass dauerhafter Kontakt mit der Moduloberfläche besteht und dabei keine Zellen des Photovoltaik-Moduls verdeckt, um Verschattungsverluste zu vermeiden.

Nicht nur zur Temperaturmessung, sondern auch als Volt- und Amperemeter zur Messung des kleinen Moduls wurden Multimeter verwendet. Bei dem genutzten Modell handelt es sich um das Keysight-U-1231B.

Für die Messung des kleinen Moduls wurde zudem ein Arbeitswiderstand genutzt. Dieser stammt aus dem Bestand der Hochschule und kann Widerstände zwischen 0Ω und 400Ω erzeugen.

Die elektrische Last, an die die großen Module angeschlossen wurden, ist die EA-EL 9750-40 B von Elektro-Automatik. Diese Last arbeitet in einem Strombereich von 0 A bis 40 A und einem Spannungsbereich von 0 V bis 750 V . Sie bietet die Fernsteuerung über USB, was den Ablauf eines Programms sowie die Speicherung der daraus gewonnenen Daten ermöglicht.

3.3 Versuchsaufbau

Da der Versuch langfristig als Teil eines Praktikums durchgeführt werden soll, wurde der Aufbau simpel und übersichtlich gehalten, um Studierenden einen guten Überblick für die einzelnen Bestandteile zu ermöglichen und den Einfluss jeder Variable auf die Kennlinie zu verstehen.

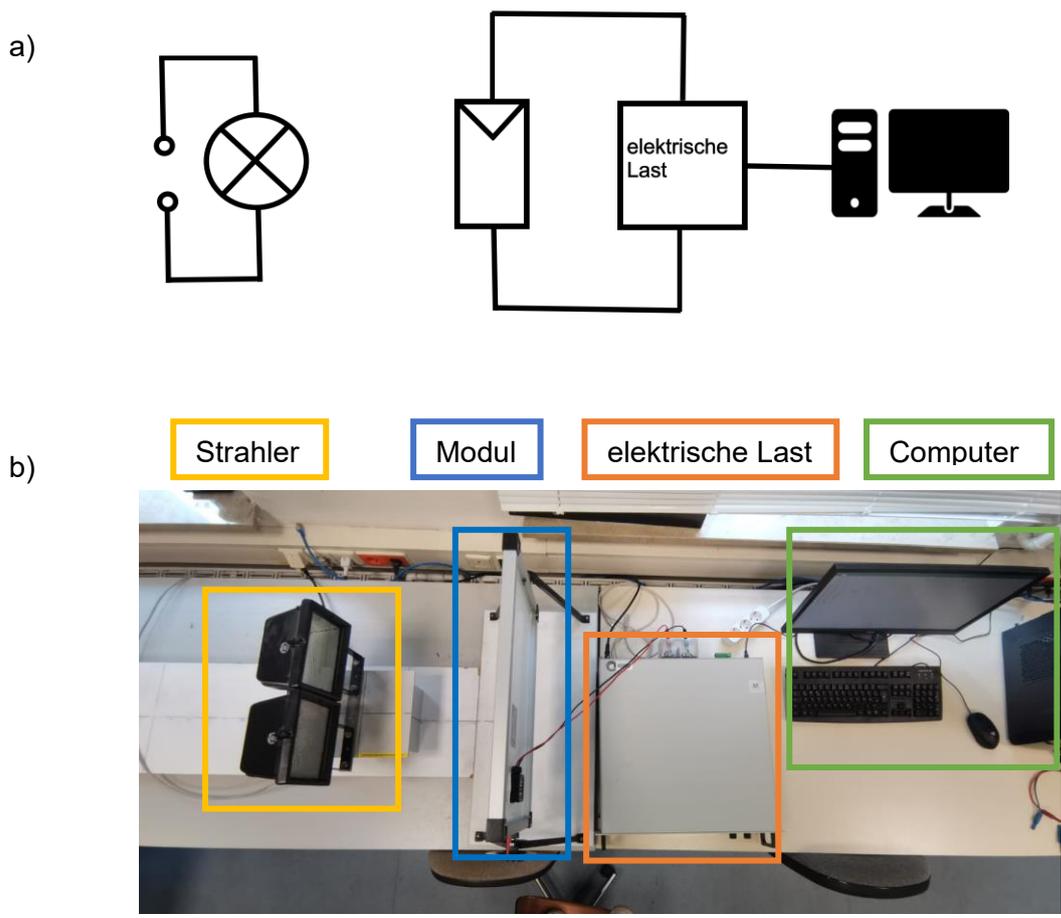


Abbildung 18: Versuchsaufbau 1 schematisch (a) und real (b)

Der Hauptbestandteil ist das Photovoltaik-Modul. Dieses wird in einem Winkel von 90° mit einem variablen Abstand, je nach Bestrahlungsstärke, von der jeweiligen Strahlungsquelle

beleuchtet. Das Modul ist mit einer Elektrischen Last verbunden, welche Strom- und Spannungswerte misst und an einen angeschlossenen Computer übermittelt.

Alternativ können die Messwerte auch über Voltmeter und Amperemeter gemessen werden, wobei sich die Werte über einen regelbaren Widerstand verändern lassen und man so die Kennlinie abfährt. Die Ergebnisse werden dabei manuell übertragen.

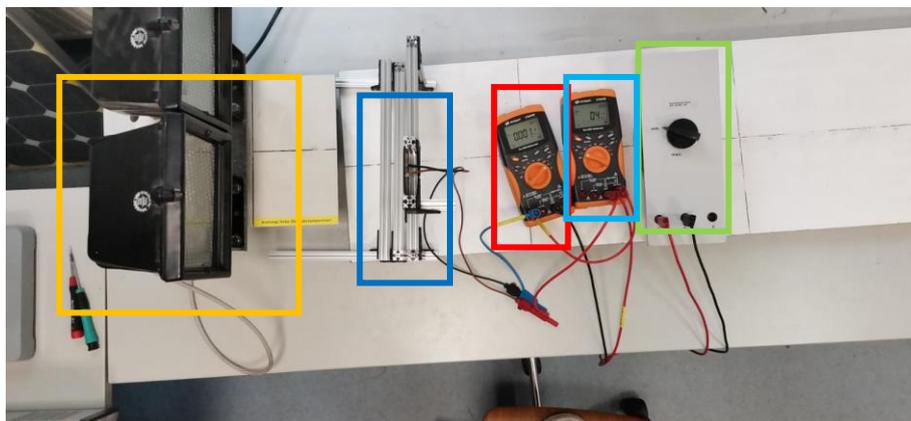
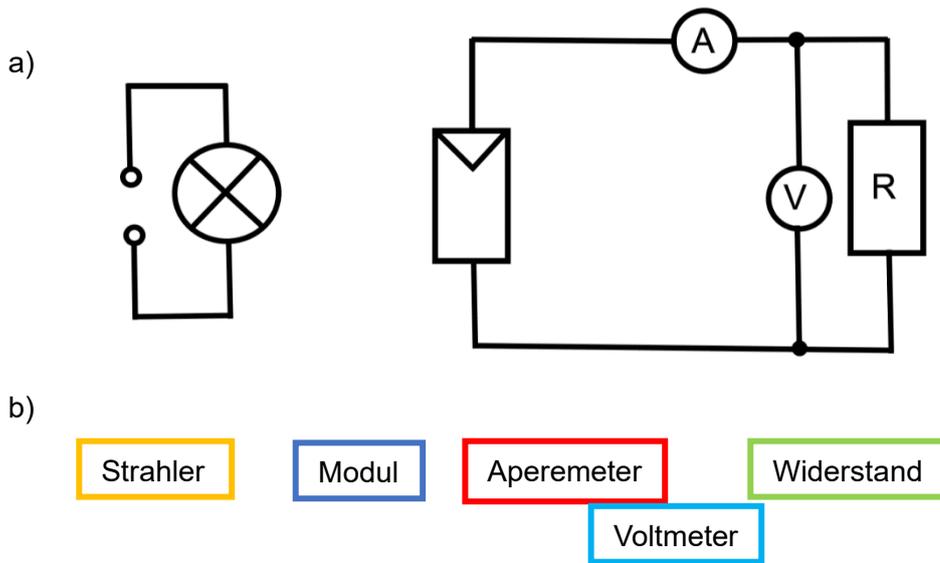


Abbildung 19: Versuchsaufbau 2 schematisch (a) und real (b)

3.4 Kennlinienaufnahme

Um die Kennlinien aufzunehmen, wurden zwei verschiedene Varianten verwendet. Für beide Varianten wurde ein Excel Visual Basic for Applications (VBA) -Programm entwickelt, um den Prozess der Kennlinienerstellung zu automatisieren. Bei der Befehlsstruktur es sich jeweils um Standardbefehle für programmierbare Instrumente (SCPI, Standard Command for

Programmable Instruments). Für beide Varianten besteht eine Vorlage in Excel, in der das VBA-Programm arbeitet und die Kennlinie erstellt wird.

Die Messergebnisse sowie die Vorlagen zur Aufnahme der Kennlinien sind der Arbeit digital beigelegt.

3.4.1 Variante 1

In der ersten Variante ist dem VBA-Programm ein Programm des Herstellers der elektrischen Last mit dem Namen EA Power Control vorausgelaufen. In diesem können über eine Sequenzierungs-Datei Parameter vorgegeben werden, mit denen die Messung erfolgt. So ist in jedem Schritt der vorgegebene Strom um 0,01 A höher zu stellen als im vorherigen Schritt und die Spalte mit der vorgegebenen Spannung ist leer zu halten, da diese Werte gemessen werden.

Auch die Zeit, die für eine Messung verwendet wird, lässt sich vorgeben. Nach Herstellerangaben ist die Mindestzeit für einen Messschritt 200 ms. Messungen mit dieser Zeitvorgabe sind ungenau, was sich darin äußert, dass Soll- und Istwerte um bis zu 20 % auseinander liegen. Erst ab einer Zeit von 500 ms pro Messschritt stimmen Soll- und Istwerte vollständig überein. Erhöht man die Zeit zwischen den Messungen weiter, so werden zwei Messungen pro Schritt vorgenommen, was die Auswertung verkompliziert. Damit lässt sich festhalten, dass 500 ms pro Messschritt das Optimum ist, da so am schnellsten die geforderten Messungen vorgenommen werden.

Da der maximale Kurzschlussstrom der verwendeten Module experimentell nie über 0,51 A liegt, kann die Sequenzierungs-Datei schrittweise bis zu diesem Strom erhöht werden. Jeder der 52 Schritte erfordert 500 ms, was eine Gesamtmesszeit von 26 s ergibt. Wenn der Kurzschlussstrom bereits bekannt ist, können in der Sequenzierungs-Datei unnötige Schritte entfernt werden, um die Messzeit zu verkürzen.

Die Datei mit den Messergebnissen wird als CSV-Datei neu angelegt. Die relevanten Daten werden über eine Verknüpfung in der Vorlagen-Datei kopiert. Mit den vorhandenen Werten wird die entsprechende U/I-Kennlinie sowie U/P-Kennlinie generiert.

3.4.2 Variante 2

Zur Vereinfachung des Verlaufs dieses Programms dient das Blockdiagramm in Abbildung 42.

In der zweiten Variante erfolgt die Fernsteuerung der elektrischen Last diesmal direkt aus dem VBA-Programm über eine Schnittstelle. Dazu wird im ersten Schritt die Geräteadresse initialisiert und die Fernsteuerung aktiviert. Nach der Aktivierung des Outputs können Befehle an die Last übermittelt werden.

Wie auch in Variante 1 wird der Strom bei 0,00 A beginnend in jedem Schritt um 0,01 A erhöht. Anschließend werden Strom und Spannung gemessen und in die Vorlagen-Datei eingetragen. Darüber hinaus erfolgt sofort die Berechnung und Eintragung der Leistung.

Die ermittelten Messdaten werden direkt in die Vorlagen-Datei übertragen, auf deren Grundlage die entsprechenden Kennlinien generiert werden.

3.4.3 Fazit

Variante 2 ist der ersten vorzuziehen, da diese schneller und ohne Umwege funktioniert.

Da das EA Power Control-Programm eher hinderlich ist und es wesentlich schneller geht, direkt über die Schnittstelle zu kommunizieren, wurde Variante 2 zur Aufnahme der Kennlinien verwendet.

Jedoch sind beide Varianten nicht perfekt. Ströme unterhalb von 0,05 A werden von der Last nicht gemessen und werden automatisch null gesetzt. Dies ist in den Kennlinien an der Stelle der Leerlaufspannung sichtbar.

3.5 Berechnungen für die Messungen

Für unterschiedliche Messungen wurden unterschiedliche Abstände und damit auch unterschiedliche Bestrahlungsstärken angewandt. Grundlage der Berechnungen ist das Invers-Quadrat-Gesetz:

$$E = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (2.26)$$

Setzt man die Strahlungsleistung der Sonne und den mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde in die Formel ein, so erhält man die Solarkonstante:

$$P_{\text{Sonne}} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

$$d_{\text{Sonne}} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}$$

$$E_0 = \frac{P_{\text{Sonne}}}{4 \cdot \pi \cdot d_{\text{Sonne}}^2} = \frac{3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot (149,6 \cdot 10^9 \text{ m})^2} = 1,367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (2.27)$$

3.5.1 Abstände für eine Bestrahlungsstärke von $1.000 \frac{W}{m^2}$

Wie die oben genannte Gleichung zeigt, hängt der benötigte Abstand, um eine Bestrahlungsstärke gemäß der Standard Test Conditions von $1.000 \frac{W}{m^2}$ zu erreichen, von der Leistung der Strahlungsquelle ab.

Umgestellt auf den Abstand erhält man folgende Gleichung:

$$d = \sqrt{\frac{P}{4 \cdot \pi \cdot E}} \quad (2.28)$$

Mit $E = 1.000 \frac{W}{m^2}$ ergeben sich für die verwendeten Strahler folgende Abstände:

$$P_{Halogen} = 500 W \quad \rightarrow \quad d = 0,199 m$$

$$P_{Xenon} = 60 W \quad \rightarrow \quad d = 0,069 m$$

$$P_{LED} = 30 W \quad \rightarrow \quad d = 0,049 m$$

Diese Abstände sind bei Messungen einzuhalten, um eine Bestrahlungsstärke von $1.000 \frac{W}{m^2}$ zu erreichen.

3.5.2 Variation der Bestrahlungsstärken

Um mit den Bestrahlungsstärken zu variieren, die auf das Photovoltaik-Modul treffen, wurden die Abstände verändert. Diese Messungen wurden nur mit zwei der Halogenstrahler durchgeführt, da diese als einzige leistungsstark genug sind, um Ströme in den größeren Modulen fließen zu lassen. Die Leistung der Strahler ergibt sich zu $P = 1.000 W$. Außerdem sind die Ergebnisse allgemeingültig.

Für die gewünschten Bestrahlungsstärken ergeben sich demnach mit einer Strahlungsleistung $P = 1.000 W$ folgende Abstände:

$$E = 100 \frac{W}{m^2} \quad \rightarrow \quad d = 0,892 m$$

$$E = 200 \frac{W}{m^2} \quad \rightarrow \quad d = 0,631 m$$

$$E = 400 \frac{W}{m^2} \quad \rightarrow \quad d = 0,446 m$$

$$E = 600 \frac{W}{m^2} \quad \rightarrow d = 0,364 m$$

$$E = 800 \frac{W}{m^2} \quad \rightarrow d = 0,315 m$$

$$E = 1.000 \frac{W}{m^2} \quad \rightarrow d = 0,282 m$$

$$E = 2.000 \frac{W}{m^2} \quad \rightarrow d = 0,199 m$$

3.6 Temperatureinfluss

Die Auswirkungen der Temperatur auf die Messungen wurden auf drei Arten analysiert. Zuerst erfolgte eine Untersuchung der Temperaturänderungen der Photovoltaik-Module unter verschiedenen Strahlungsquellen und Bestrahlungsstärken. Darüber hinaus wurden Kennlinien bei unterschiedlichen Zelltemperaturen aufgezeichnet.

3.6.1 Temperaturentwicklung der Photovoltaik-Zellen

Für die Messung der Temperaturentwicklung wurde der Temperatursensor mittig auf dem Photovoltaik-Modul befestigt. Gemessen wurde jeweils eine Minute lang, beginnend bei einer den Standard Test Conditions entsprechenden Oberflächentemperatur von 25°C. Die hohe Messdauer soll die Wichtigkeit einer schnellen Messung aufzeigen.

3.6.1.1 Unterschiede der Temperaturentwicklung durch verschiedene Strahlungsquellen

Verwendet wurden für diesen Versuch ein einzelner und zwei kombinierte Halogen-Strahler, ein Xenon-Strahler sowie ein LED-Strahler. Es wurden jeweils die Abstände angewandt, die für $1.000 \frac{W}{m^2}$ benötigt werden.

Die Ergebnisse in Abbildung 20 zeigen, dass Halogen die stärkste Temperaturerhöhung des Photovoltaikmoduls bewirkt. Dabei erwärmen zwei Strahler das Modul wesentlich stärker als ein Strahler, da das Modul mit der doppelten Intensität bestrahlt wird. Innerhalb einer Minute wird das Modul auf 41,9°C erwärmt, was einer Temperaturdifferenz von 16,9K entspricht. Diese Messungen stehen nicht im Zusammenhang mit den Standard Test Conditions und

deuten darauf hin, dass unter bestimmten Bedingungen eine deutliche Überhitzung auftreten kann.

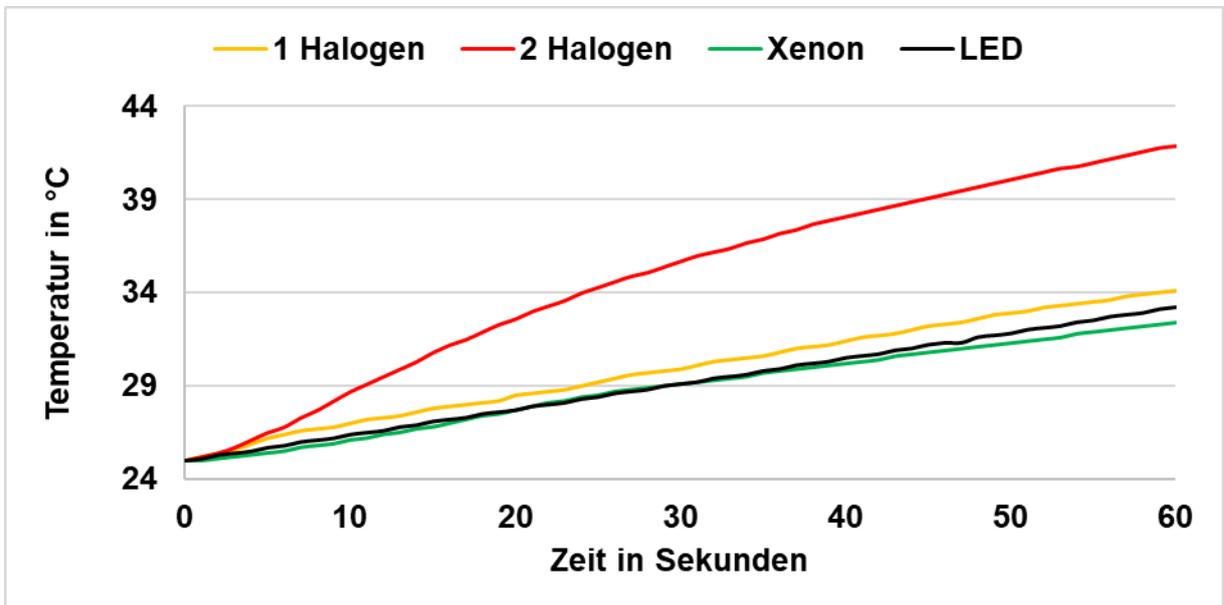


Abbildung 20: Temperaturverlauf der unterschiedlichen Strahler bei $1.000 \frac{W}{m^2}$ (60 s)

Bei Verwendung nur eines Strahlers bleibt die Temperaturerhöhung gering. Xenon weist dabei die niedrigste Endtemperatur von 32,4°C auf, gefolgt von LED mit 33,2°C und Halogen mit 34,1°C.

Die Unterschiede zwischen den Strahlungsquellen werden in Abbildung 21 genauer betrachtet, wobei der Fokus auf den ersten zehn Sekunden der Temperaturentwicklung liegt.

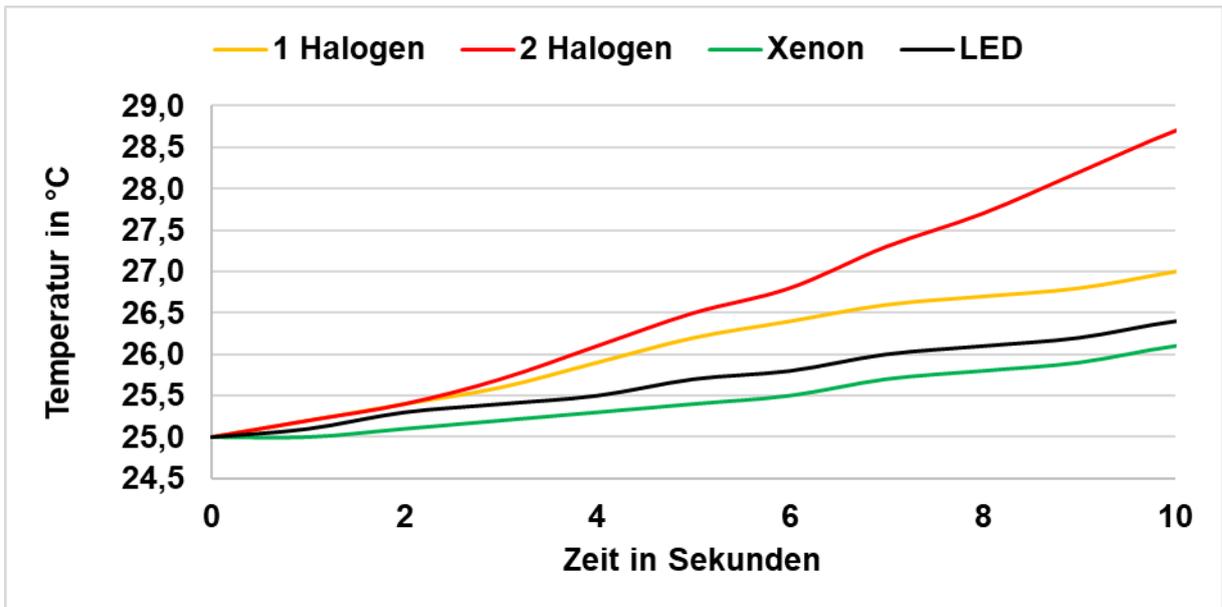


Abbildung 21: Temperaturverlauf der unterschiedlichen Strahler bei $1.000 \frac{W}{m^2}$ (10 s)

Die Temperaturverläufe aller Strahler zeigen nahezu lineare Verläufe, was es ermöglicht, die Temperaturerhöhung pro Sekunde zu berechnen. Der Xenon-Strahler erhöht die Modultemperatur um durchschnittlich $0,11 \frac{K}{s}$, während der LED-Strahler eine Rate von $0,14 \frac{K}{s}$ aufweist. Ein einzelner Halogen-Strahler erhöht die Temperatur des Moduls mit einer Rate von $0,20 \frac{K}{s}$. Wenn jedoch zwei Halogen-Strahler verwendet werden, steigt die Erwärmungsrate auf $0,37 \frac{K}{s}$.

Der stärkere Temperaturanstieg bei den Halogen-Strahlern könnte auf das in Abbildung 12 dargestellte Spektrum zurückgeführt werden. Das Halogen-Spektrum weist eine deutlich erhöhte Intensität im Infrarotbereich auf, was zu verstärkten Transmissionsverlusten führt und in der Folge zu einer stärkeren Erwärmung des Moduls beiträgt. Im Gegensatz dazu zeigen die Xenon- und LED-Strahler eine geringere Intensität im Infrarotbereich, was zu weniger Transmissionsverlusten führt und somit zu einer geringeren Erwärmung des Moduls beiträgt.

3.6.1.2 Unterschiede der Temperaturentwicklung bei verschiedenen Bestrahlungsstärken

Mit zwei Halogenstrahlern wurden unter Verwendung verschiedener Abstände entsprechend unterschiedliche Bestrahlungsstärken erzeugt. In den Diagrammen symbolisiert ein intensiveres blau eine höhere Bestrahlungsstärke.

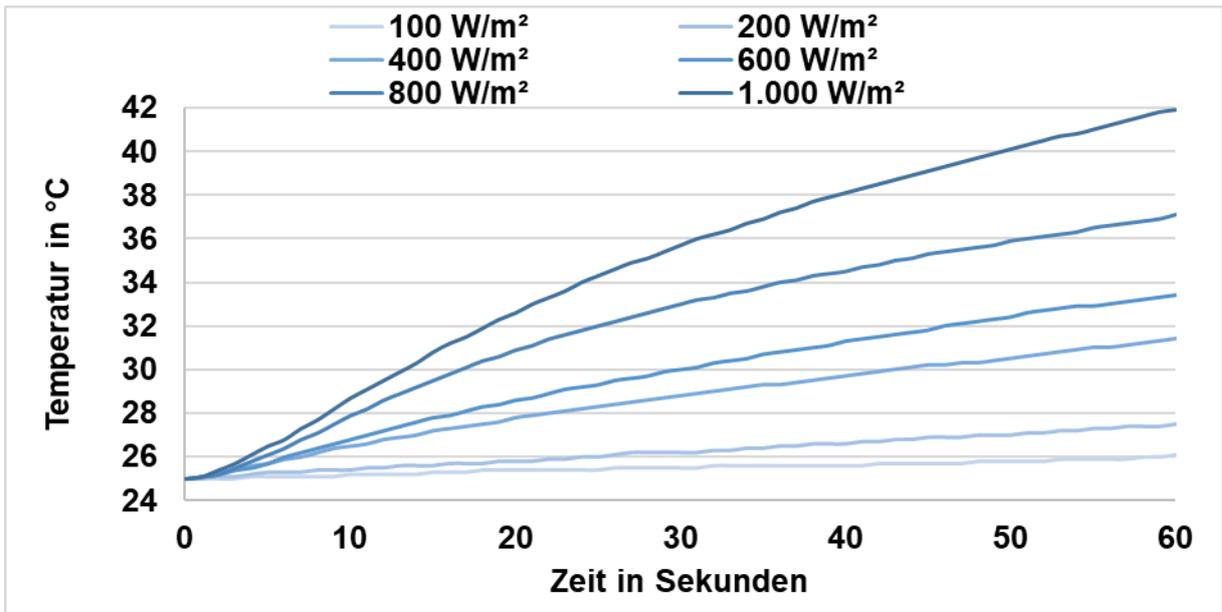


Abbildung 22: Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken (60 s)

Die Ergebnisse in Abbildung 22 verdeutlichen den Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Temperaturerhöhung des Photovoltaik-Moduls. Es wird festgestellt, dass mit steigender Bestrahlungsstärke auch die Modultemperatur zunimmt. Eine einminütige Bestrahlung des Moduls gemäß den Standard Test Conditions mit einer Bestrahlungsstärke von $1.000 \frac{W}{m^2}$ führt zu einer Erwärmung des Moduls um 16,9 K, wie bereits zuvor erwähnt. Reduziert man die Bestrahlungsstärke auf ein Zehntel, also auf $100 \frac{W}{m^2}$, beträgt die Temperaturerhöhung lediglich 1,1 K. Eine solche Reduzierung der Bestrahlungsstärke hat den Vorteil, dass die Messung reproduzierbarer wird, da die Abkühlzeit von Modul und Strahler verkürzt wird.

Neben der Bestrahlungsstärke kann auch die Betriebstemperatur der Strahlungsquelle einen Einfluss auf die Modultemperatur haben. Insbesondere bei höheren Bestrahlungsstärken befindet sich die Strahlungsquelle näher am Modul. Während des Messverlaufs erwärmt sich die Strahlungsquelle und kann dadurch die Modultemperatur und somit das Messergebnis beeinflussen.

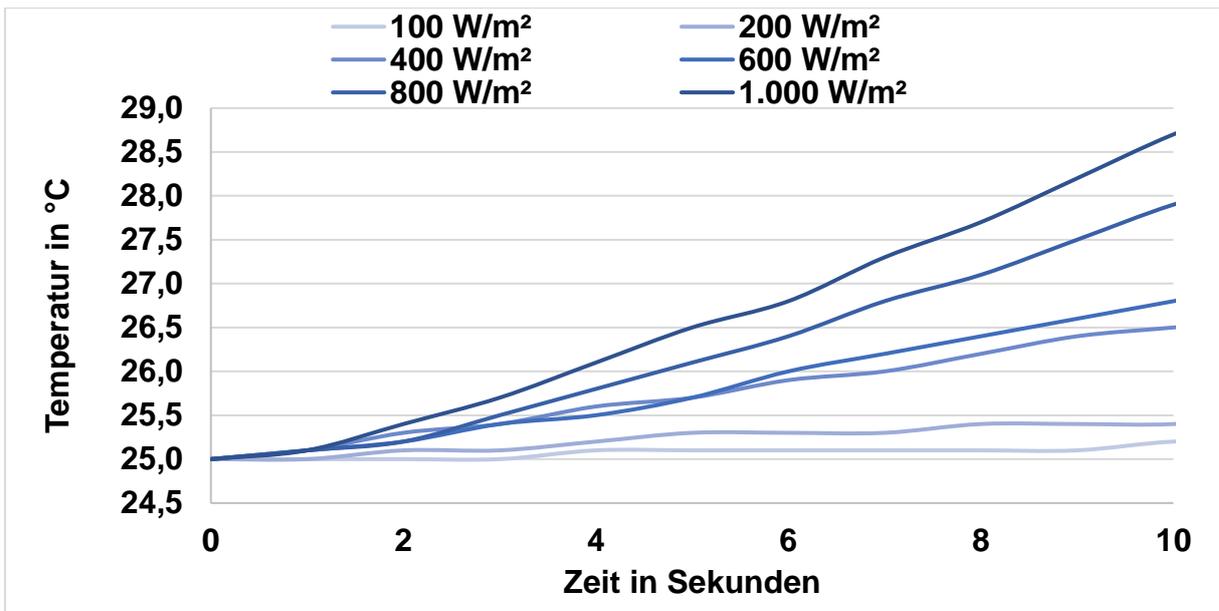


Abbildung 23: Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken (10 s)

Abbildung 23 zeigt die ersten zehn Sekunden der Temperaturentwicklung und ermöglicht eine genauere Analyse der Veränderungen. Die Temperaturverläufe der Messungen zeigen nahezu lineare Kurven, was die Berechnung der Temperaturerhöhung pro Sekunde ermöglicht. Bei einer Bestrahlungsstärke von $100 \frac{W}{m^2}$ beträgt die Temperaturerhöhung $0,02 \frac{K}{s}$. Steigt die Bestrahlungsstärke auf $200 \frac{W}{m^2}$, erhöht sich die Rate auf $0,04 \frac{K}{s}$. Bei $400 \frac{W}{m^2}$ beträgt die Erhöhung $0,15 \frac{K}{s}$, bei $600 \frac{W}{m^2}$ um $0,18 \frac{K}{s}$, bei $800 \frac{W}{m^2}$ um $0,29 \frac{K}{s}$ und bei $1.000 \frac{W}{m^2}$ um $0,37 \frac{K}{s}$.

Diese Messwerte verdeutlichen den zunehmenden Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Temperaturerhöhung des Moduls und liefern grundlegende Informationen für die Bewertung der Leistung des Photovoltaik-Moduls unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Zudem wird deutlich, dass die Messungen in möglichst kurzer Zeit vorgenommen werden müssen, um die Erwärmung des Photovoltaik-Moduls zu minimieren.

3.6.2 Einfluss der Temperatur auf die Kennlinie

Um den Einfluss der Temperatur auf die Strom-Spannungs- und Leistung-Spannungs-Kennlinie zu bestimmen, wurden Messungen bei $25^{\circ}C$, $30^{\circ}C$, $35^{\circ}C$, $40^{\circ}C$ und $45^{\circ}C$ vorgenommen. Die Bestrahlungsstärke wurde auf $100 \frac{W}{m^2}$ festgelegt, um Temperaturschwankungen zu minimieren. Verwendet wurden ein monokristallines sowie ein polykristallines Photovoltaik-Modul. Ähnlich wie zuvor geht nun die Intensität der Farbe in dem Diagramm mit der Temperatur einher. Je dunkler das Blau ist, desto höher ist die Modultemperatur.

3.6.2.1 Monokristallines Photovoltaik-Modul

Abbildung 24 veranschaulicht die Abhängigkeit von Strom und Spannung von der Temperatur der Zellen im Photovoltaikmodul. Es ist erkennbar, dass der Strom nahezu von der Temperatur unabhängig ist. So beträgt der Kurzschlussstrom durchgehend 0,20 A. Wendet man den in Kapitel 2.7.3 genannten Koeffizienten von $0,06 \frac{\%}{K}$ an, ergibt sich eine theoretische Steigerung über die 20 K von 1,2 %, was sich bei einem Kurzschlussstrom von 0,20 A auf 0,0024 A beläuft und somit mit der verwendeten Last nicht nachgewiesen werden kann.

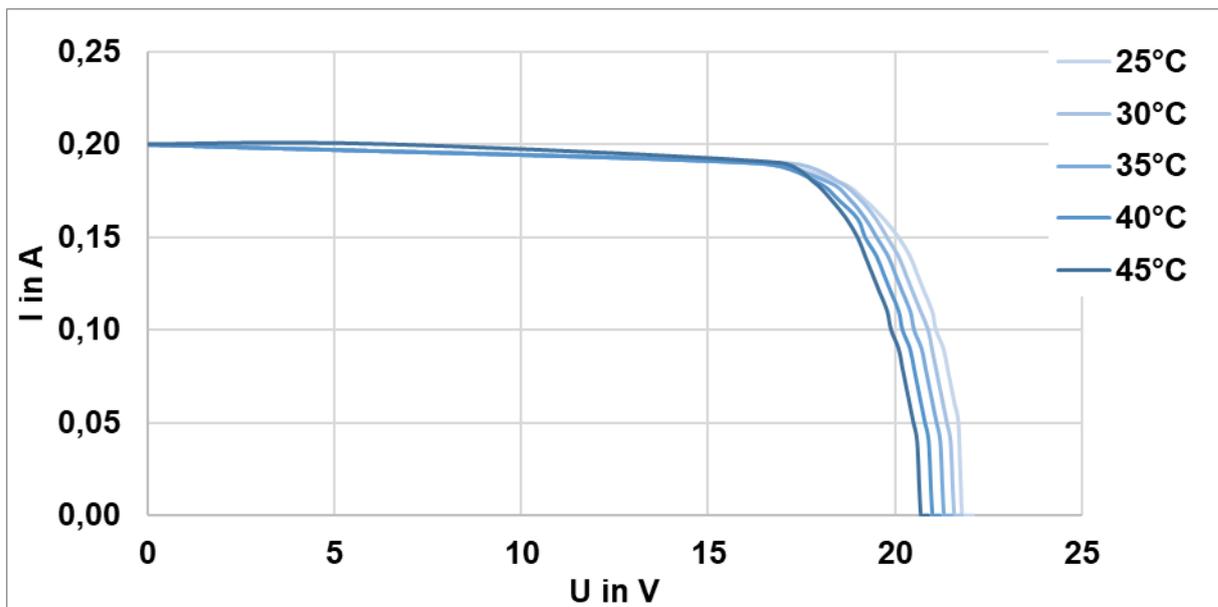


Abbildung 24: Strom-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen

Anders jedoch verhält sich die Spannung. Die Leerlaufspannung sinkt, startend bei 22,1 V bei 25°C, mit jeder Erwärmung um 5 K um -0,3 V. Der theoretische Wert beträgt $-0,4 \frac{\%}{K}$ (siehe Kapitel 2.7.3), für diese Messung demzufolge $-0,884 \frac{V}{K}$. Somit weicht der reelle Wert vom theoretischen ab, da dieser für eine Erwärmung um 5 K eine Verringerung der Leerlaufspannung um -0,442 V vorgibt.

Es gibt mehrere Faktoren, die zu dieser Abweichung beitragen könnten. Zunächst sollte die Fehleranfälligkeit der Messmethode in Betracht gezogen werden. Kleine Messfehler könnten die Ergebnisse beeinflusst haben. Außerdem könnte das vereinfachte theoretische Modell, auf dem die Erwartungen basieren, ungenau sein. Es gilt zu beachten, dass dieses Modell möglicherweise nicht alle realen Einflussfaktoren berücksichtigt. Es ist auch möglich, dass andere, nicht identifizierte Faktoren eine Rolle spielen. Möglicherweise hat sich die Modultechnik im Laufe der Zeit verbessert, was zu geringeren Spannungsverlusten bei Temperaturänderungen führen könnte.

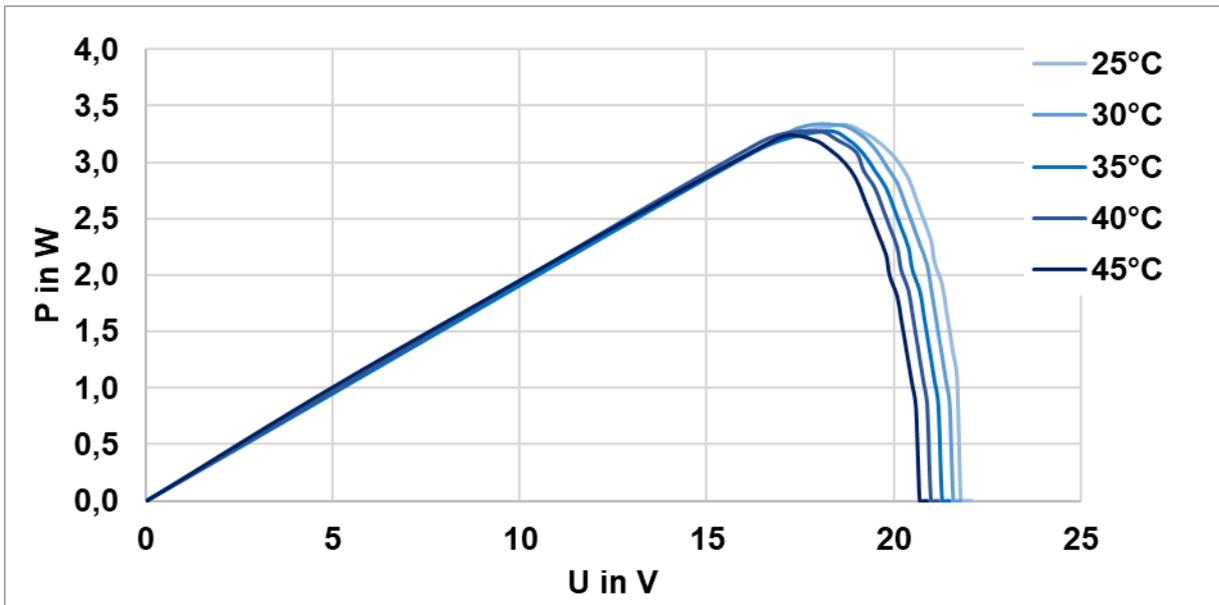


Abbildung 25: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen

Abbildung 25 zeigt den Verlauf der Leistung in Abhängigkeit von der Zelltemperatur. Die Messungen zeigen, dass der Punkt maximaler Leistung mit steigender Temperatur sinkt, wenn auch nicht stark. Bei 25°C befindet sich der MPP bei 3,33 W, bei 45°C bei 3,21 W. Die Leistung sinkt daher um 0,12 W pro 20 K, was einen Koeffizienten von $-0,006 \frac{W}{K}$ ergibt. Dieser Faktor fällt erst bei höheren Temperaturen auf.

3.6.2.2 Polykristallines Photovoltaik-Modul

Die Strom-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Moduls zeigt wie in Abbildung 26 zu sehen im Gegensatz zu der eines monokristallinen Moduls neben der Temperaturabhängigkeit der Spannung auch eine Temperaturabhängigkeit des Stroms. Dieser steigt, wie bereits erwähnt, mit der Temperatur des Moduls minimal an, von 0,18 A bei 25°C zu 0,19 A bei 45°C. Eine naheliegende Erklärung ist, dass die Messmethode zu ungenau ist, und daher eine kleine Änderung des Stroms im Milliampere-Bereich dafür sorgt, dass ein anderer Wert gemessen wird.

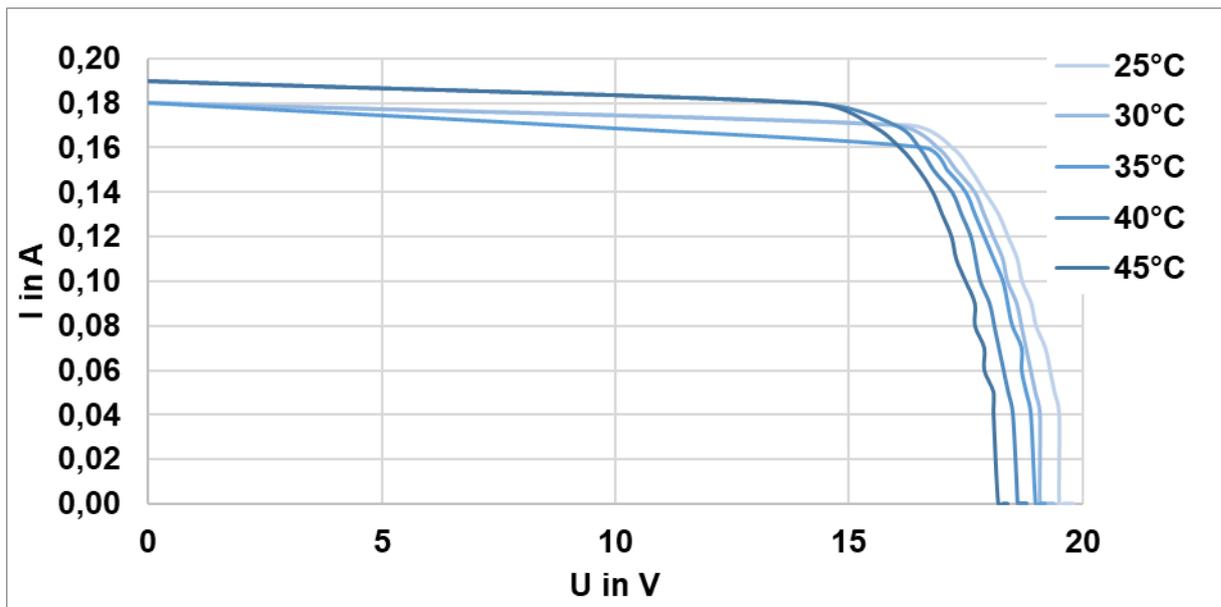


Abbildung 26: Strom-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen

Wie auch bei den monokristallinen Photovoltaik-Modulen sinkt die Spannung mit der Temperatur. Die Leerlaufspannung sinkt von 19,7V bei 25°C auf 18,4 V bei 45°C. Der Koeffizient für die Spannung berechnet sich daher zu $-0,065 \frac{V}{K}$.

Der theoretische Koeffizient von $-0,4 \frac{\%}{K}$ (siehe Kapitel 2.7.3) beträgt nun, ausgehend von 19,7 V, $-0,079 \frac{\%}{K}$. Gründe für die Abweichung können erneut unter anderem die begrenzte Genauigkeit der Messmethode, Messfehler sowie das vereinfachte theoretische Modell sein. Erneut kann die Verbesserung der Modultechnik als Ursache genannt gezogen werden.

Im Gegensatz zu der Leistung-Spannungs-Kennlinie des monokristallinen Photovoltaik-Moduls zeigt die des polykristallinen Photovoltaik-Moduls in Abbildung 27 keinen linearen Wachstum der Leistung. Grund dafür ist die messbare Erhöhung des Stroms bei höherer Temperatur, was die Leistung erhöht, da diese proportional zum Strom ist.

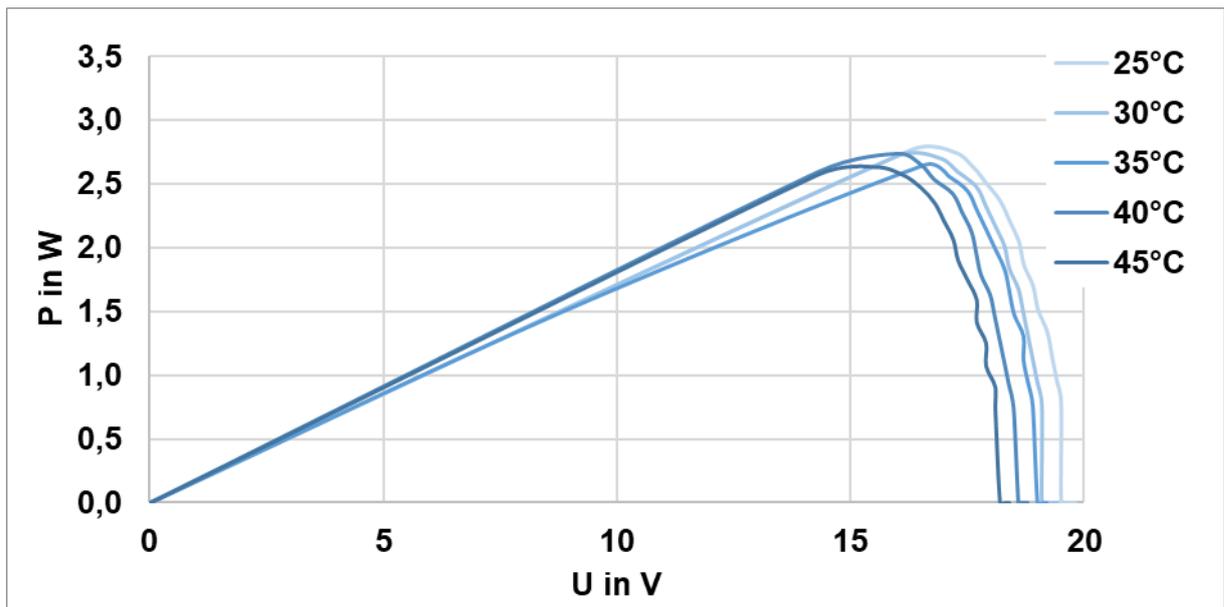


Abbildung 27: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Zelltemperaturen

Der MPP bei 25°C liegt bei 2,77 W, der von 30°C bei 2,72 W und der bei 35°C bei 2,66 W. Des Weiteren liegt der von 40°C bei 2,74 W und der von 45°C bei 2,64 W. Das ergibt einen Leistungsverlust von durchschnittlich $0,07 \frac{W}{K}$, wenn man den Sprung zwischen 35°C und 40°C außer Acht lässt. Verglichen mit monokristallinen ist die Leistung der polykristallinen Photovoltaik-Module um mehr als den Faktor zehn temperaturabhängiger.

3.7 Kennlinien der Strahler

Bei den verwendeten Strahlungsquellen handelt es sich um jeweils einen LED-, Xenon- und Halogen-Strahler. Auf diese wurde in Tabelle 2 bereits eingegangen.

Um die Kennlinien der Strahler qualitativ vergleichen zu können, wurde unter Bedingungen gemessen, die den Standard Test Conditions den Umständen entsprechend nahekommen.

Es wurde jeweils mit einer Bestrahlungsstärke von $1.000 \frac{W}{m^2}$ und einer Zelltemperatur von, zu Beginn der Messung, 25°C gemessen. Um eine Luftmasse, welche AM1,5 entspricht, zu simulieren, würde ein Filter benötigt, welcher individuell auf das Spektrum des Strahlers angepasst werden müsste, und daher den Rahmen des Versuches sprengt, weshalb diese Bedingung nicht erfüllt werden kann.

Bei dem bestrahlten Modul handelt es sich um das kleine, monokristalline Modul.

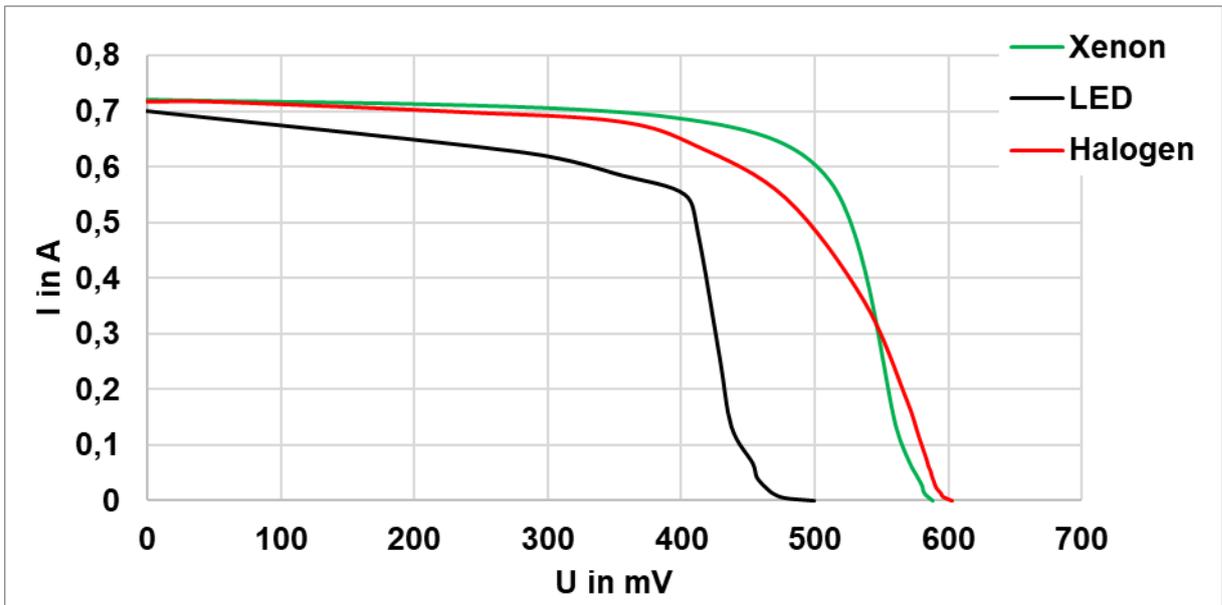


Abbildung 28: Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Strahlungsquellen

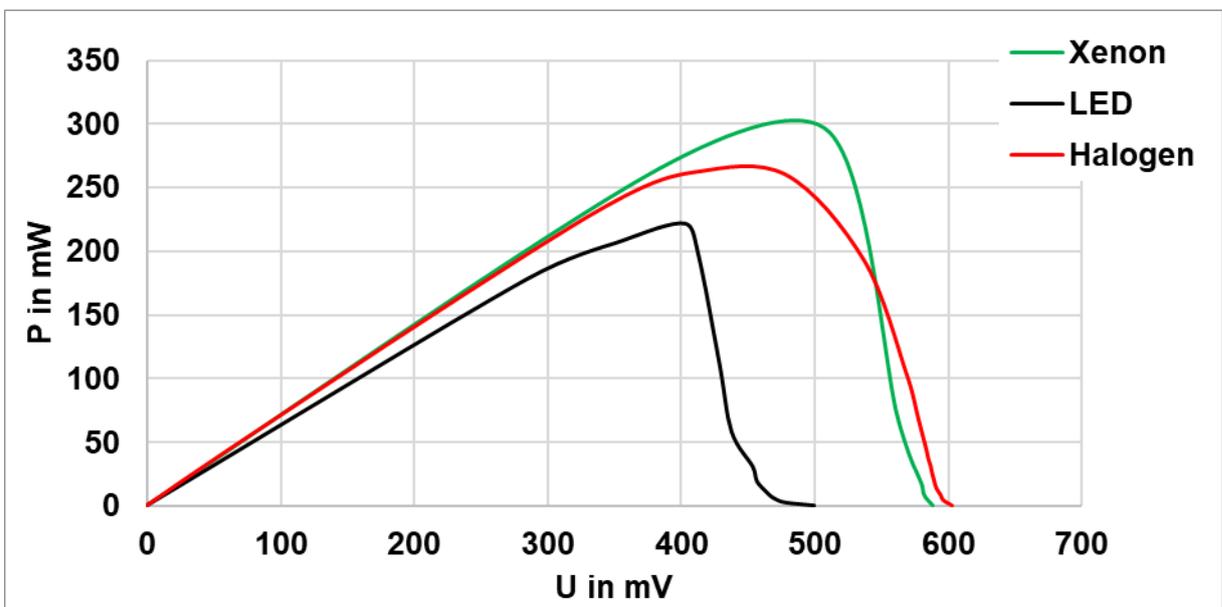


Abbildung 29: Leistung-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Strahlungsquellen

Die auffallendste Kennlinie weist der LED-Strahler auf. Diese besitzt kaum Ähnlichkeiten zu den anderen beiden Kennlinien in Abbildung 28 und Abbildung 29. Da die Bestrahlungsstärke mit $1.000 \frac{W}{m^2}$ bei allen Strahlern gleich ist, sollte Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom ebenfalls gleich sein. Die Leerlaufspannung der LED-Kennlinie ist jedoch mit 0,5 V wesentlich geringer als die von Xenon oder Halogen bei 0,6 V. Außerdem wächst der Strom von dort aus weniger steil an, sondern eher schleppend und exponentiell. Auch von dem Kurzschlussstrom ausgehend ist die Kennlinie nicht linear, sondern verhältnismäßig steil fallend.

Die geringere Leistung des Photovoltaik-Moduls bei Bestrahlung mit LED im Vergleich zur Bestrahlung mit Xenon und Halogen kann auf die unterschiedliche spektrale Verteilung der Strahlungsquellen zurückgeführt werden (siehe Abbildung 12). LEDs haben eine spezifische spektrale Verteilung, die durch die verwendeten Halbleitermaterialien und die Dotierung bestimmt wird. Diese spezifische Verteilung führt dazu, dass die Zellen des Moduls weniger effizient auf das Licht der LED reagieren, was für eine geringere Leerlaufspannung sorgt und damit eine geringere Leistung ermöglicht. Im Gegensatz dazu emittiert beispielsweise der Xenon-Strahler ein breiteres Spektrum an Licht, das besser von den Solarzellen absorbiert wird und somit zu einer höheren Leistung führt.

Die Halogen- und Xenon-Strahler sorgen beide für eine wesentlich bessere Kennlinie. Die Spektren beider Strahler erstrecken sich über einen breiten Spektralbereich, was dafür sorgt, dass die Leerlaufspannung des Moduls erreicht wird.

Dadurch, dass sich das Modul wesentlich schneller erhitzt, wenn es vom Halogen-Strahler bestrahlt wird, ist der Wärmeeinfluss in Form der flachen Kurve klar erkennbar. Außerdem ist so die maximale Leistung geringer als die des Moduls, wenn es von dem Xenon-Strahler bestrahlt wird.

Der Xenon-Strahler liefert die besten Kennlinien der verglichenen Strahlungsquellen. Das Spektrum des Xenon-Strahlers ähnelt am ehesten dem der Sonne und sorgt gleichzeitig für die geringste Modulerwärmung bei einer Bestrahlungsstärke von $1.000 \frac{W}{m^2}$.

3.8 Einfluss der Bestrahlungsstärken

Verwendet wurden erneut die beiden verfügbaren Halogenstrahler mit einer Strahlungsleistung von 1.000 W . Um Messungen bei verschiedenen Bestrahlungsstärken durchzuführen, wurden die in Kapitel 3.5.2 berechneten Abstände angewandt. Die Kennlinien wurden sowohl an einem monokristallinen als auch einem polykristallinen Photovoltaikmodul aufgenommen.

3.8.1 Monokristallines Photovoltaik-Modul

Abbildung 30 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Moduls bei verschiedenen Bestrahlungsstärken, beginnend mit $100 \frac{W}{m^2}$, bis zu $2.000 \frac{W}{m^2}$.

Bei einer Bestrahlungsstärke von $100 \frac{W}{m^2}$ erhält das Photovoltaik-Modul am wenigsten Leistung, was zu einer niedrigen Stromproduktion führt. Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung sind hier am geringsten.

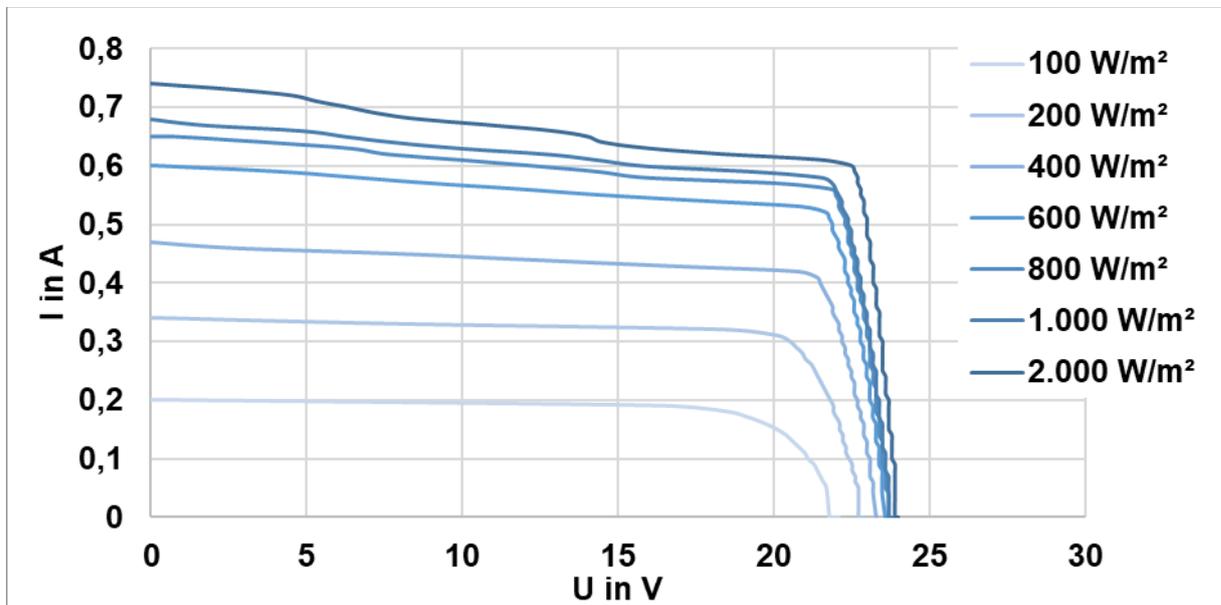


Abbildung 30: Strom-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken

Mit steigender Bestrahlungsstärke erhält das Photovoltaik-Modul mehr Leistung, wodurch die Stromproduktion im Modul zunimmt. Dies macht sich an dem wachsenden Kurzschlussstrom sowie der wachsenden Leerlaufspannung bemerkbar.

Ab einer Bestrahlungsstärke von $800 \frac{W}{m^2}$ benötigt man größere Sprünge in der Erhöhung der Bestrahlungsstärke, um größeres Wachstum des Kurzschlussstroms zu bewirken. Die Leerlaufspannung hat ihr Maximum von 24 V nahezu erreicht und wird auch nicht mit höherer Bestrahlungsstärke größer. Vergleicht man die Kennlinie der $800 \frac{W}{m^2}$ - und $1.000 \frac{W}{m^2}$ -Bestrahlung, so sind kaum Unterschiede mehr erkennbar. Selbst die Kennlinie der Bestrahlung mit $2.000 \frac{W}{m^2}$ zeigt kaum einen großen Unterschied zu den vorherigen.

Auffallend ist, dass nicht wie in der theoretischen Betrachtung gesehen, der Kurzschlussstrom mit erhöhter Bestrahlungsstärke zunimmt, sondern schwächer (siehe Formel 2.23). Theoretisch sollte der Kurzschlussstrom sich verdoppeln, wenn die Bestrahlungsstärke verdoppelt wird. Dies ist hier nicht der Fall. Grund dafür ist, dass mit jeder Erhöhung der Bestrahlungsstärke der Strahler näher an das Modul gerückt wird, wodurch das Modul immer ungleichmäßiger bestrahlt wird. Auch der Temperatureintrag kann eine Rolle spielen.

In Abbildung 31 ist die Leistung-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken dargestellt, wobei wiederum die Bestrahlungsstärken von $100 \frac{W}{m^2}$ bis $2.000 \frac{W}{m^2}$ dargestellt sind.

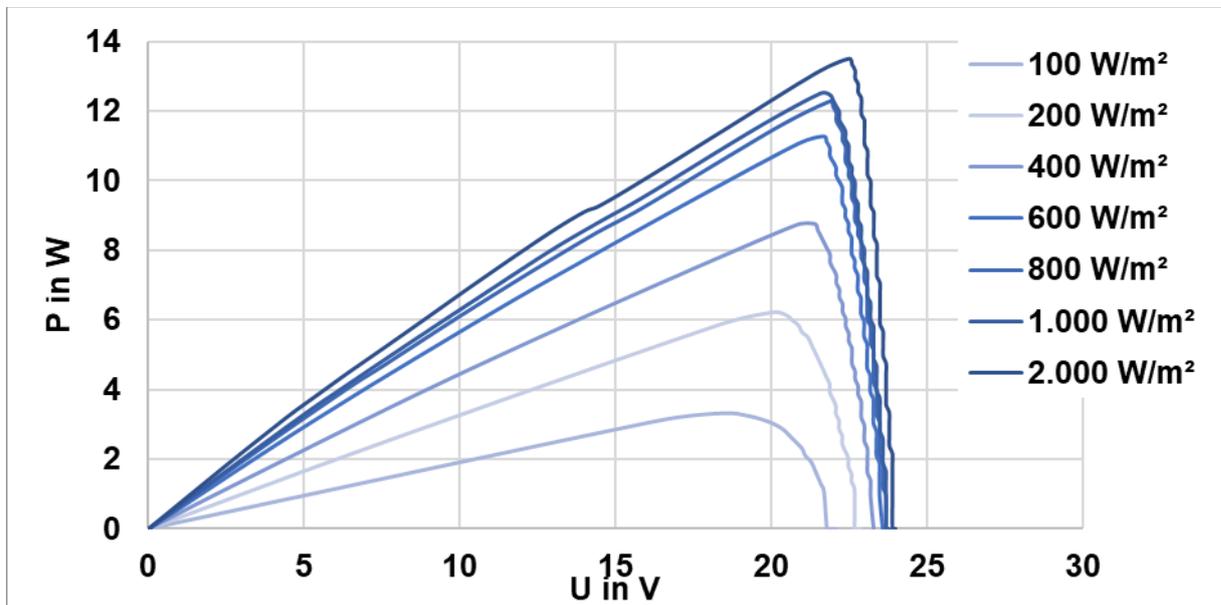


Abbildung 31: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines monokristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken

Die maximale Leistung bei einer Bestrahlung von $100 \frac{W}{m^2}$ beträgt 3,33 W und ist bei einer Spannung von 18,5 V messbar. Verdoppelt man die Bestrahlungsstärke, erhält man eine maximale Leistung von 6,00 W, die bei 20,7 V messbar ist. Verdoppelt man die Bestrahlungsstärke erneut, also bestrahlt mit $400 \frac{W}{m^2}$, ist bei 21,6 V die maximale Leistung von 8,4 W messbar.

Auch hier wird deutlich, dass die Leistung nicht gleichmäßig mit der Bestrahlungsstärke wächst. Außerdem fällt auf, dass die Spannung am Punkt maximaler Leistung ebenfalls größer wird.

Es wird deutlich, dass mit jeder Erhöhung der Bestrahlungsstärke die Leistung steigt.

3.8.2 Polykristallines Photovoltaik-Modul

Die Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen, dass die Bestrahlungsstärke auf polykristalline Photovoltaik-Module einen ähnlichen Einfluss auf die Kennlinien hat wie auf die der monokristallinen Photovoltaik-Module.

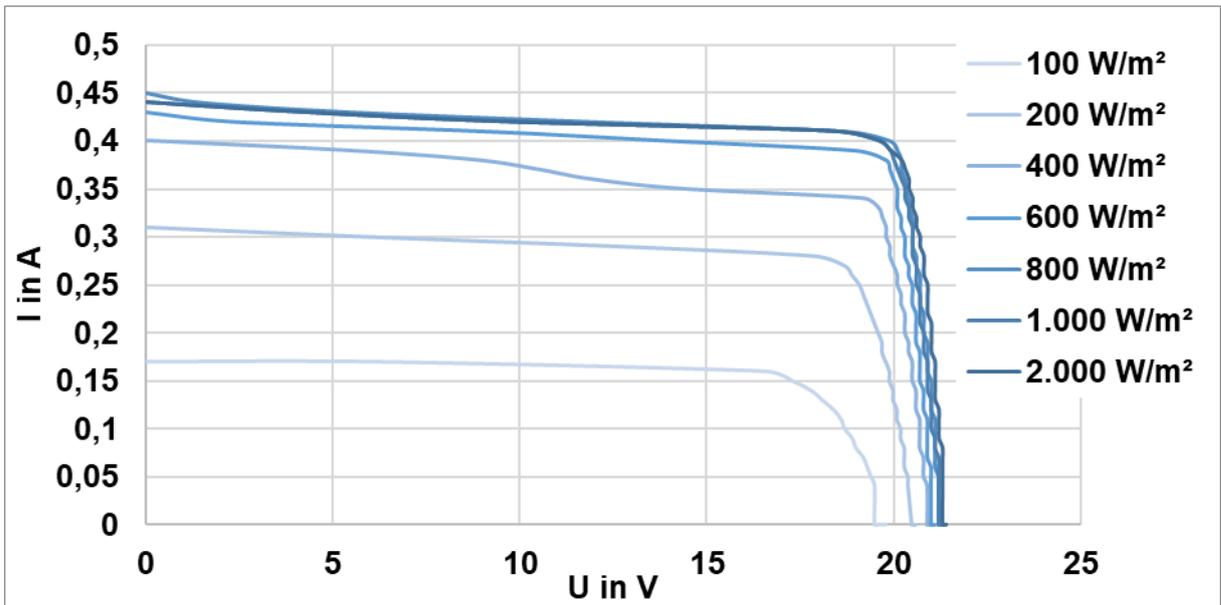


Abbildung 32: Strom-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken

Besonders auffallend ist hierbei, dass es kaum einen messbaren Unterschied zwischen den Bestrahlungen bei $800 \frac{W}{m^2}$, $1.000 \frac{W}{m^2}$ und $2.000 \frac{W}{m^2}$ gibt. Grund dafür kann sein, dass mit jeder Erhöhung der Bestrahlungsstärke der Strahler näher an das Modul gerückt wird, wodurch das Modul immer ungleichmäßiger bestrahlt wird.

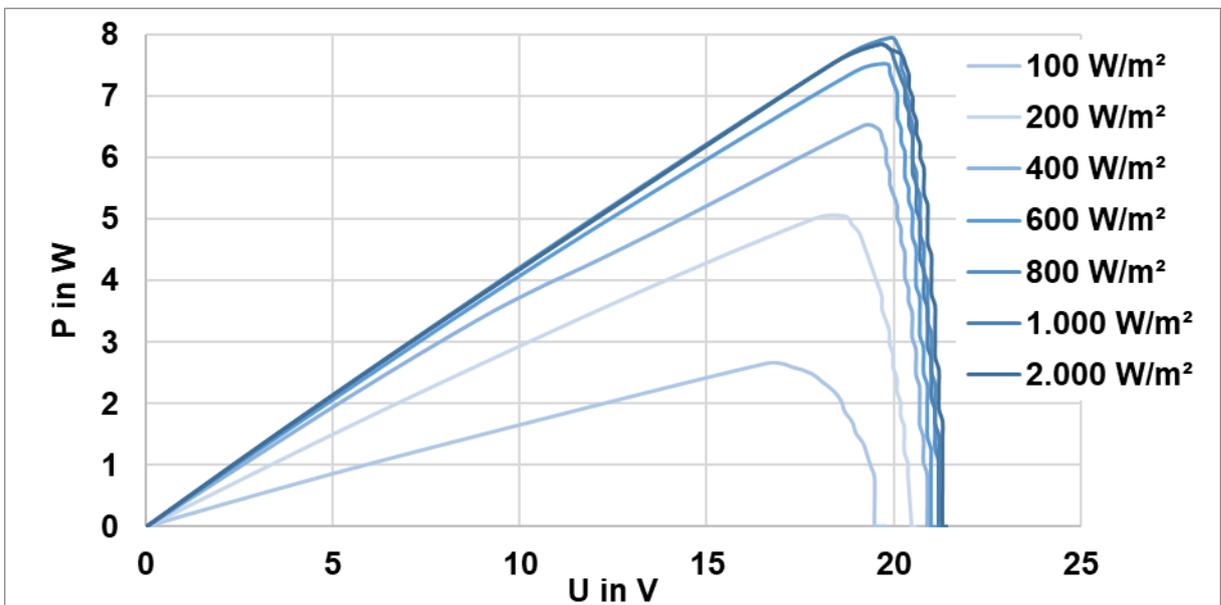


Abbildung 33: Leistung-Spannungs-Kennlinie eines polykristallinen Photovoltaik-Modules bei verschiedenen Bestrahlungsstärken

4 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Experimente sowohl an mono- als auch polykristallinen Photovoltaik-Modulen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, welchen Einfluss Temperatur und Bestrahlungsstärke auf die Module haben. Des Weiteren wurde gezeigt, dass Xenonstrahler LED- und Halogenstrahlern für das Flashen von Photovoltaik-Modulen vorzuziehen sind, da diese dem erwünschten AM1,5-Spektrum am nächsten kommen und dabei den geringsten Wärmeeinfluss auf das Modul haben.

Das in der Arbeit geschriebene Programm, welches ein automatisiertes Abfahren der Kennlinie ermöglicht, ist dem manuellen Abfahren und Eintragen vorzuziehen. Das Programm benötigt für eine Messung drei bis zehn Sekunden, je nach Bestrahlungsstärke. Stellt man per Hand einen Widerstand ein, um Strom- um Spannungswerte zu messen und aufzuschreiben, dauert das, selbst wenn man mit der Handhabung vertraut ist, nahezu eine Minute. In dieser Zeit erwärmt sich das Modul und verfälscht das Ergebnis, was aus Abbildung 34 hervorgeht.

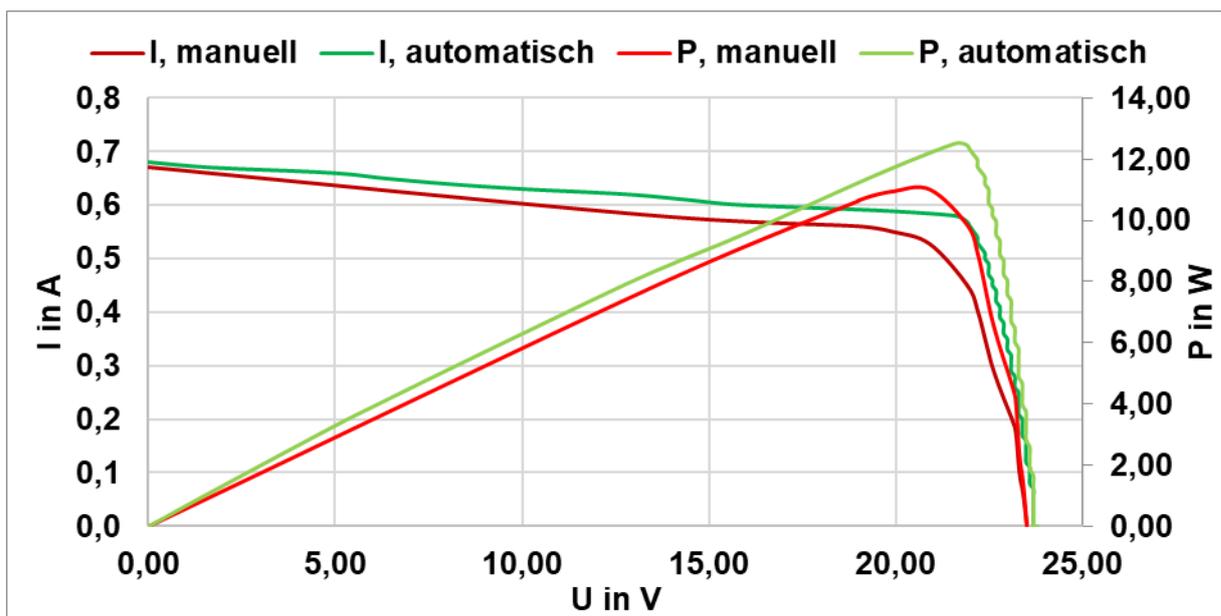


Abbildung 34: Vergleich automatisch und manuell aufgenommener Kennlinien

Da der Versuchsstand im Rahmen eines Praktikums genutzt werden soll, ermöglicht das automatische Aufnehmen der Kennlinie einen exakteren und reibungsloseren Ablauf der Experimente.

Um den Versuchsstand weiterhin zu verbessern, könnte über die Anschaffung leistungsfähigerer Xenonstrahler nachgedacht werden. Dieser zeigte in den Experimenten mit einem kleinen Photovoltaik-Modul die besten Ergebnisse, ist jedoch für handelsübliche Module zu leistungsschwach, um einen messbaren Stromfluss zu liefern.

Eine weitere Verbesserung des Versuchsstandes wäre das Integrieren einer aktiven Kühlung. Finden mehrere Versuche aufeinanderfolgend statt, so erwärmt sich das Modul stetig, was die Ergebnisse verfälscht. Ist die Raumtemperatur unter der gewünschten Arbeitstemperatur des Moduls, so kühlt dieses auch im Laufe der Zeit ab, was allerdings lange dauern kann.

Zusammenfassend trägt diese Arbeit dazu bei, die Methoden zur Untersuchung von Photovoltaik-Modulen zu verfeinern und legt somit den Grundstein für künftige Forschung und Innovation in diesem bedeutsamen Bereich der erneuerbaren Energien.

5 Quellenverzeichnis

- [1] Mertens, Konrad: Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2011.
- [2] Solaranlage-Rattgeber.de: Photovoltaik-Module im Vergleich, unter: <https://www.solaranlage-rattgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-technik/photovoltaik-module-im-vergleich> (Stand: 14.09.2023)
- [3] DS New Energy: 9BB Multibusbar Monokristalline 166mm Solarzelle, unter: [China 9BB Multibusbar Monokristalline 166mm Solarzelle Lieferanten & Hersteller & Fabrik - Made in China - Dongshuo \(dsisolar.com\)](https://www.dsisolar.com/). (Stand: 14.09.2023)
- [4] Exeo Energy: Polycrystalline Solar Cell, unter: <https://www.exeoenergy.co.uk/solar-panels/solar-panel-aesthetics>. (Stand: 14.09.2023)
- [5] SecondSol: Solibro SL2-90Wp, unter: <https://www.secondsol.com/de/anzeige/22604/pv-module/duenschicht/cis-cigs/solibro/sl2-90-90wp-ungerahmt>. (Stand: 14.09.2023)
- [6] Joachim-Herz-Stiftung: Wirkungsgrad, unter: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/grundwissen/wirkungsgrad>. (Stand: 14.09.2023)
- [7] National Renewable Energy Laboratory: Best Research-Cell Efficiency Chart, unter: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. (Stand: 14.09.2023)
- [8] Bächle, Sophia: Fraunhofer ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency, unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/fraunhofer-ise-develops-the-worlds-most-efficient-solar-cell-with-47-comma-6-percent-efficiency.html>. (Stand: 14.09.2023)
- [9] StackExchange: Explanation for the spectrum of the sun?, unter: <https://physics.stackexchange.com/questions/203411/explanation-for-the-spectrum-of-the-sun>. (Stand: 14.09.2023)
- [10] Slabke, Uwe: LED-Beleuchtungstechnik: Grundwissen für Planung, Auswahl und Installation. Berlin: VDE Verlag, 2018.

- [11] Hentschel, Hans-Jürgen: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik. Auflage 5. Heidelberg: Hütting, 2002.
- [12] Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas: Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Auflage 6. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2020.
- [13] pvXchange: Sunmodule SW 165 mono, unter: <https://www.pvxchange.com/Solarmodule/SolarWorld/Sunmodule-plus-SW-165-mono-2100533>. (Stand 14.09.2023)
- [14] Prof. Dr. Donat J. As: Optoelektronische Halbleiterbauelemente: Temperaturabhängigkeit der Diodenkennlinie, unter: https://physik.uni-paderborn.de/fileadmin-nw/physik/Arbeitsgruppen/AG_As/Vorlesungen/Optoelectronic_Semiconductor_devices/05_Vorlesung4-Temperatureffekte-moderne-Strukturen-Packaging.pdf. (Stand: 14.09.2023)
- [15] Reichelt: OFF 3-01-001530 Solarpanel, Mono, 12 V, 30 W, unter: https://www.reichelt.de/solarpanel-mono-12-v-30-w-off-3-01-001530-p310259.html?&trstct=pos_0&NBC=1. (Stand: 14.09.2023)
- [16] ELV-Elektronik: Velleman Polykristallines Solarmodul SOL30P, 12 V, 30 W, unter: <https://de.elv.com/velleman-polykristallines-solarmodul-sol30p-12-v-30-w-144250?fs=1736413095>. (Stand: 14.09.2023)

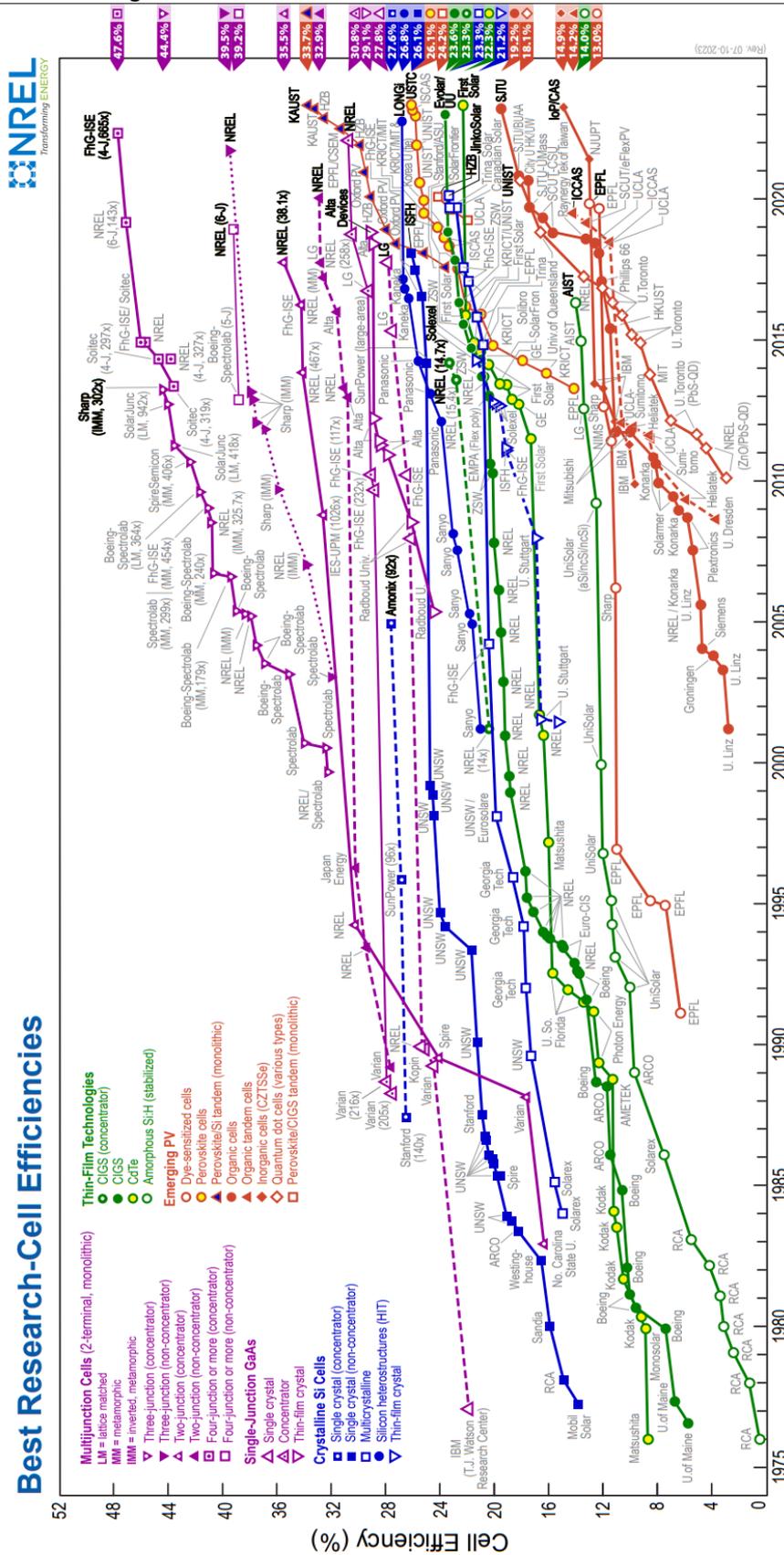


Abbildung 35: Best Research-Cell Efficiency Chart des National Renewable Energy Laboratory (NREL) [7]

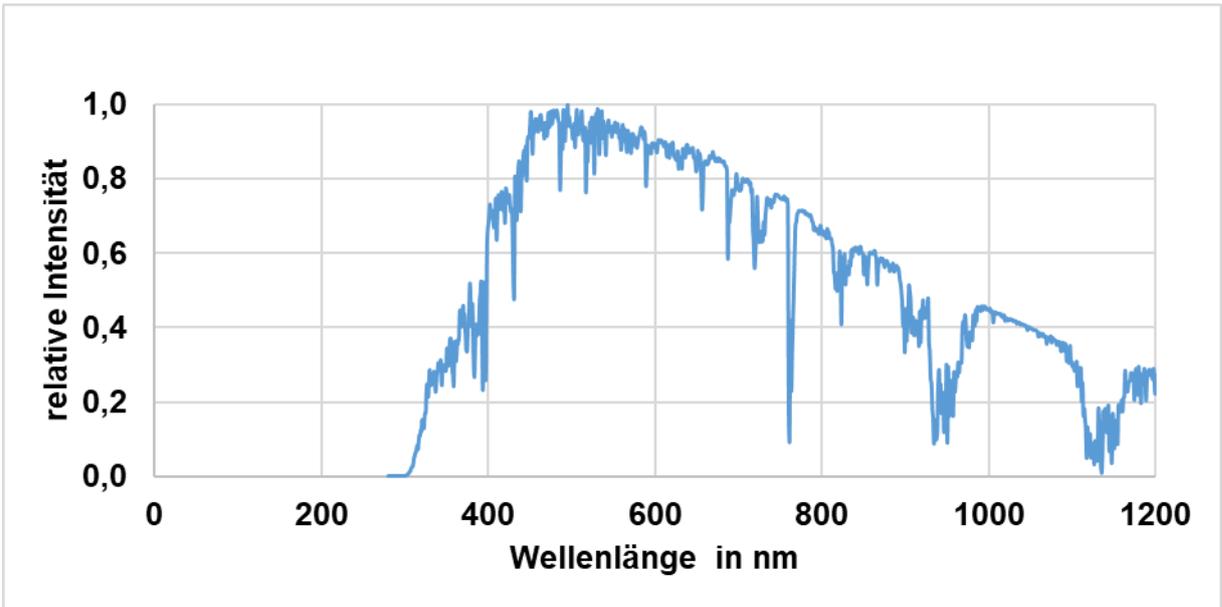


Abbildung 36: AM1,5-Spektrum

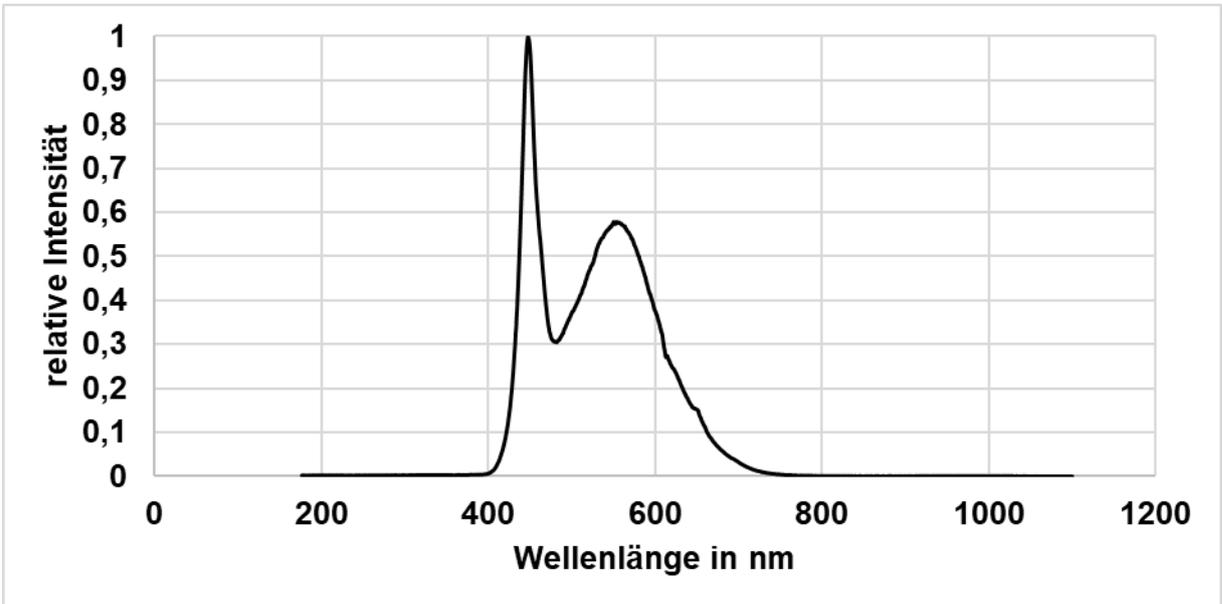


Abbildung 37: LED-Strahler-Spektrum

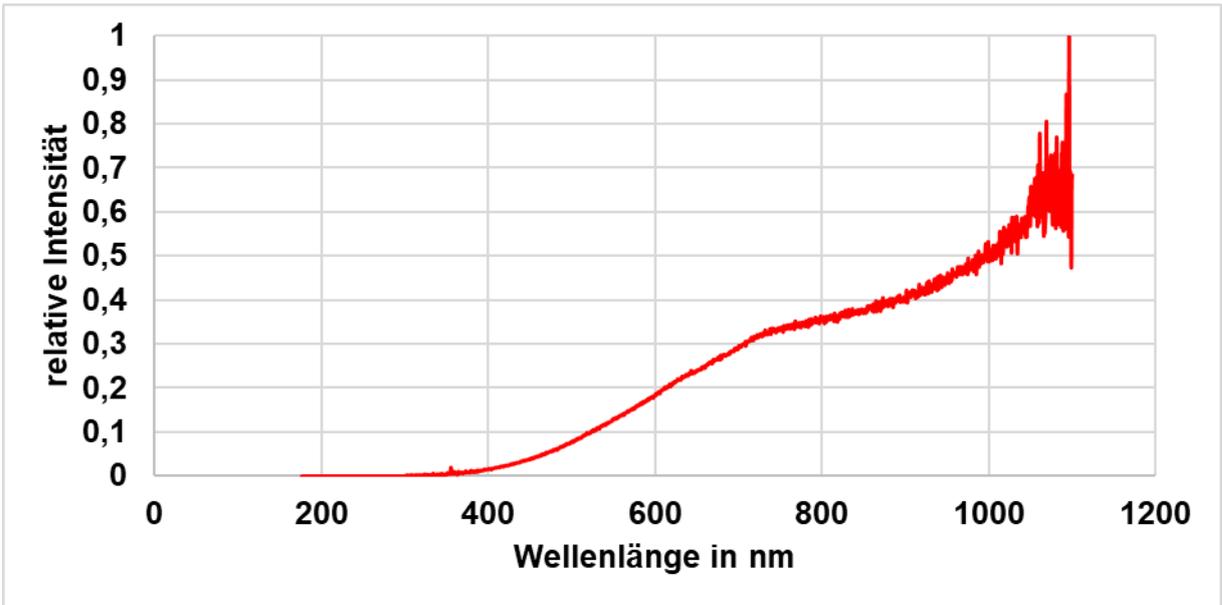


Abbildung 38: Halogen-Strahler-Spektrum

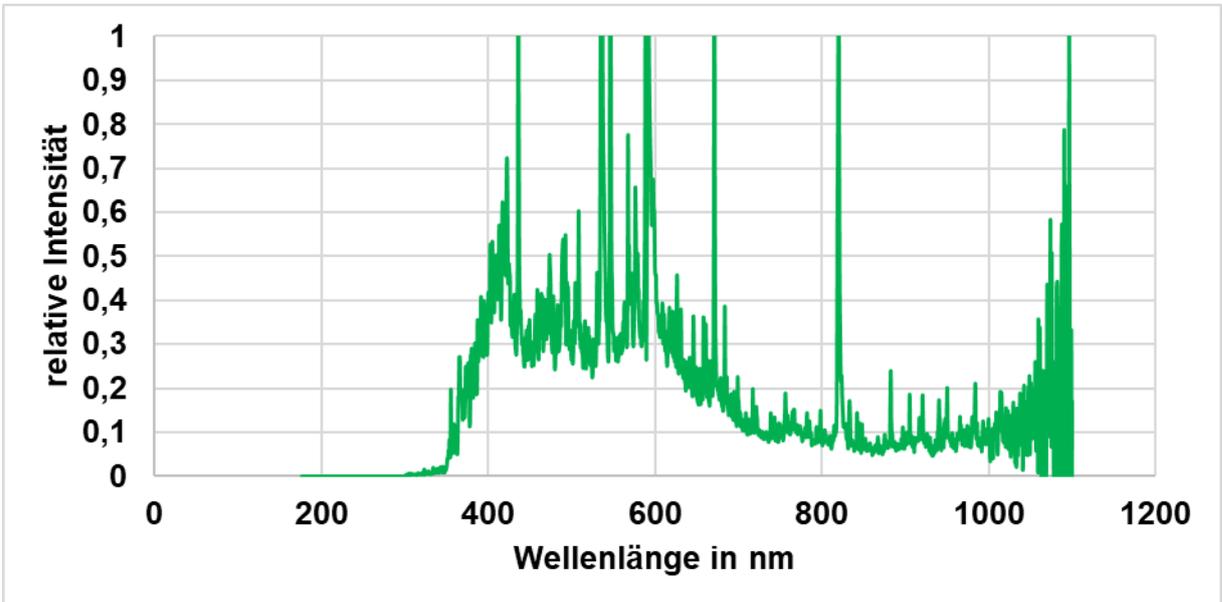


Abbildung 39: Xenon-Strahler-Spektrum



Abbildung 40: verwendeter LED-Strahler

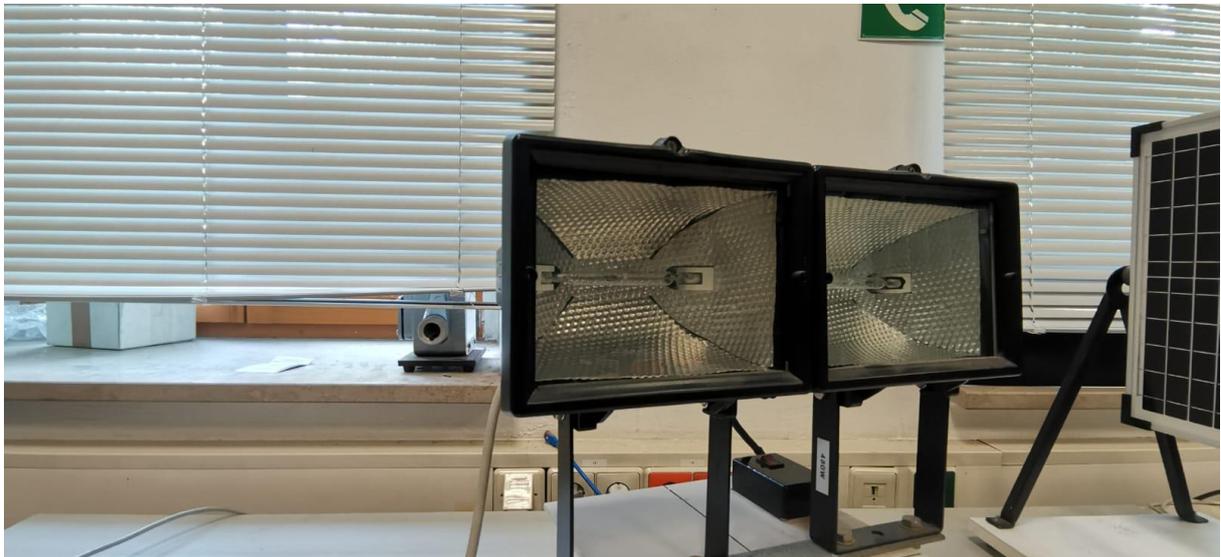


Abbildung 41: verwendeter Halogen-Strahler



Abbildung 43: verwendeter Xenon-Strahler

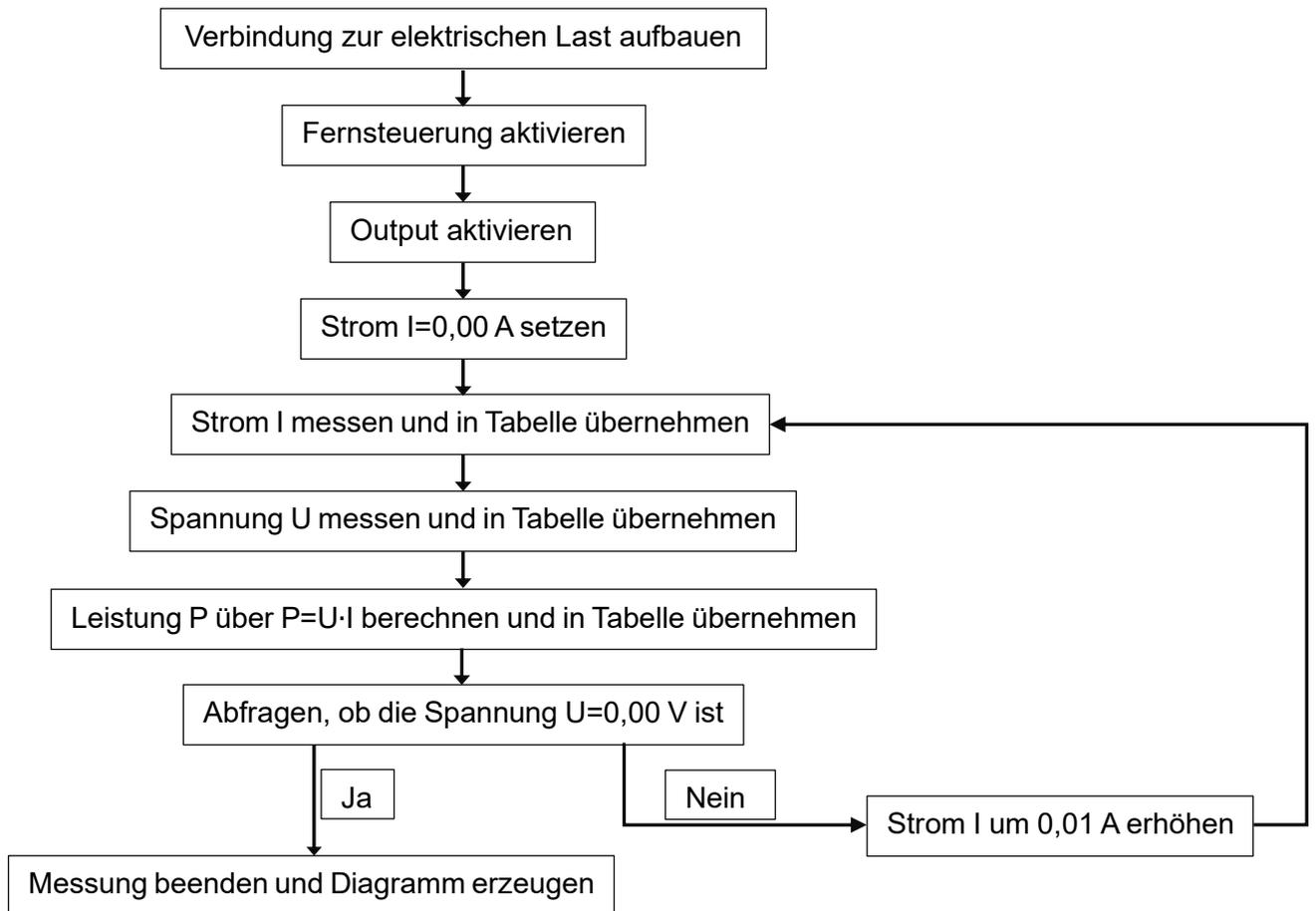


Abbildung 42: Blockdiagramm des Programms zur Erfassung der Kennlinien

Selbstständigkeitserklärung gem. § 14 Absatz 5 BPO

Hiermit versichere ich, David Mai, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel
Konzeption eines Versuchsstandes zur Charakterisierung der elektrischen Kenngrößen von
Solarmodulen

selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfs-
mittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen
Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.
Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt
worden.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'D' followed by a series of loops and a long horizontal stroke.

Leipzig, der 15.09.2023