

JUSTUS-LIEBIG-



UNIVERSITÄT
GIESSEN

Versuch 6 des
FORTGESCHRITTENEN-PRAKTIKUMS

Perowskitesolarzellen

Versuchstermin 21.6.2024

Praktikumsbetreuer:
M.Sc. Tim P. Schneider
tim.schneider@ap.physik.uni-giessen.de

Protokoll von:
Frederik Uhlemann
frederik-vincent.uhlemann@physik.uni-
giessen.de

Florian Adamczyk
florian.marius.adamczyk@physik.uni-
giessen.de

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
1 Theorie	3
1.1 Kenngrößen von Solarzellen	3
1.2 Aufbau einer Perowskitesolarzelle	5
2 Versuchsdurchführung	8
2.1 Materialien	8
2.2 Durchführung	9
3 Auswertung	11
3.1 Absorptionsspektren	11
3.2 Tauc-Plot	12
3.3 Charakteristika der Solarzelle	13
3.3.1 Kennlinien	13
3.3.2 Maximum Power Point's	14
3.3.3 Übersicht über die ermittelten Kenngrößen	15
3.4 Idealitätsfaktor	16
4 Fazit	18

Einleitung

Im Rahmen dieses Versuchs steht die Herstellung und Untersuchung von Perowskit-solarzellen im Mittelpunkt, einem vielversprechenden und aktuellen Thema in der Photovoltaikforschung. Der Versuch bietet eine spannende Gelegenheit, tief in die Welt der modernen Solarzellen einzutauchen und ein besseres Verständnis für die Technologien zu gewinnen, die unseren Alltag nachhaltig beeinflussen.

Es geht darum, eine Perowskitsolarzelle herzustellen und deren Eigenschaften zu analysieren. Zunächst wird auf einem transparenten leitfähigen Oxid (TCO) eine Titandioxidschicht präpariert. Diese Schicht dient als Grundlage für die lichtabsorbierende Methylammoniumbleiiodid-Schicht, die wiederum von einem Lochtransportmaterial überdeckt wird. Dieser mehrschichtige Aufbau ist entscheidend für die Effizienz der Solarzelle und ihre Fähigkeit, Sonnenlicht in elektrische Energie umzuwandeln.

Die optischen Eigenschaften der Perowskitschicht werden anschließend im UV-Vis-Spektrometer untersucht. Diese Analyse ermöglicht es, das Absorptionsverhalten und die Lichtdurchlässigkeit der Schicht zu verstehen, was für die Optimierung der Solarzelle von großer Bedeutung ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt des Versuchs ist die Messung des Verhaltens von Strom und Spannung der gesamten Solarzelle unter Bestrahlung mit Weißlicht unterschiedlicher Intensitäten. Diese Messungen sind entscheidend, um die Leistungsfähigkeit der Solarzelle zu bewerten und ihre Effizienz zu bestimmen.

Perowskitsolarzellen sind aufgrund ihrer hohen Effizienz und vergleichsweise geringen Herstellungskosten von großem Interesse für die Forschung und Industrie. Ihre Entwicklung könnte einen bedeutenden Beitrag zur Energiewende und zur Reduktion der CO₂-Emissionen leisten, indem sie eine kostengünstige und effiziente Alternative zu herkömmlichen Silizium-Solarzellen bieten. Damit bietet dieser Versuch nicht nur einen tiefen Einblick in die Funktionsweise und Herstellung von Perowskitsolarzellen, sondern zeigt auch deren enormes Potenzial für eine nachhaltige Energiezukunft auf. Dies macht den Versuch nicht nur wissenschaftlich relevant, sondern auch äußerst bedeutsam für den Alltag und die zukünftige Energieversorgung.

1. Theorie

1.1 Kenngrößen von Solarzellen

Als wird folgend auf die grundsätzlichen Eigenschaften von Solarzellen eingegangen, damit die Eigenschaften der hergestellten Perowskitsolarzelle eingeordnet werden können.

Eine allgemeine Solarzelle verhält sich elektronisch ähnlich wie eine Halbleiterdi-

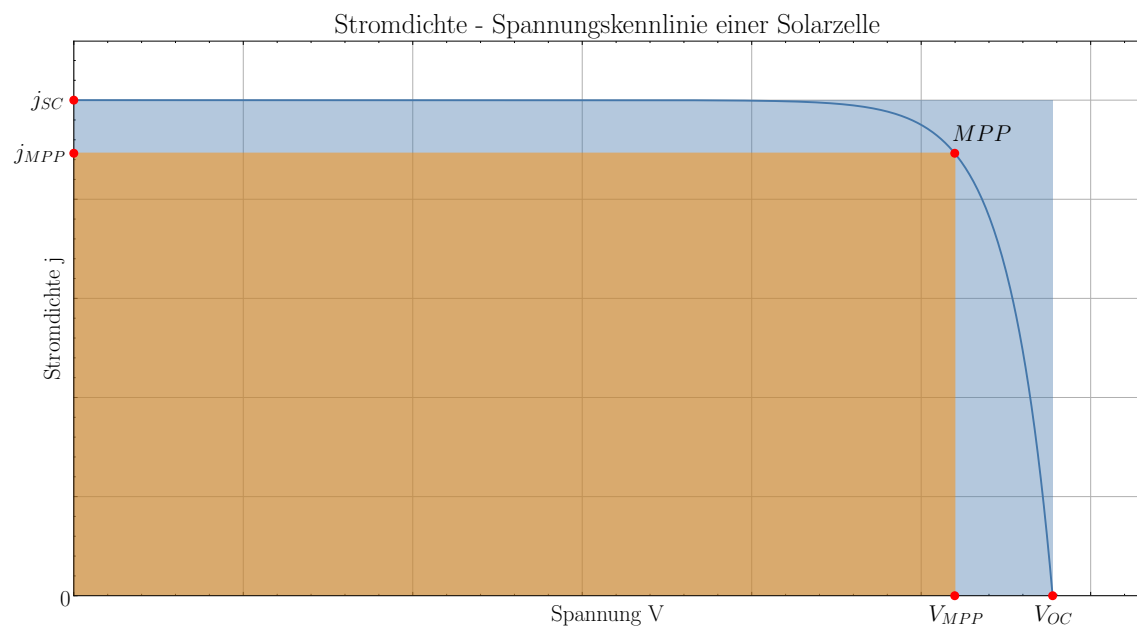


Abbildung 1.1: Stromdichte - Spannungskennlinie einer idealen Solarzelle, eingetragen sind zusätzlich wichtige Kenngrößen

ode. In Abbildung 1.1 ist eine Solarzellenkennlinie abgebildet, der Unterschied zur Diodenkennlinie liegt allein in der Verschiebung in y-Richtung durch den Wert des Photostroms j_{ph} . Aus diesem Grund ist auch die Formel für die Stromcharakteristik

bis auf diesen Wert identisch:

$$j(V) = j_S \left(\exp \left(\frac{eV}{mk_B T} \right) - 1 \right) - j_{ph} \quad (1.1)$$

Der Photostrom kann für Perowskitesolarzellen folgendermaßen ausformuliert werden:

$$j_{ph} = eI_0\eta_{CC}\eta_{inj}(1 - \exp(-\alpha d)) \quad (1.2)$$

Die dabei bisher aufgetretenen Variablen sind:

- Spannung V
- Sättigungsstromdichte j_S
- Elementarladung e und Boltzmannkonstante k_B
- Idealitätsfaktor m
- Temperatur T
- Intensität des einfallenden Lichts I_0
- Effizienz für erzeugte Löcher/Elektronen transportierende Schichten zu erreichen η_{CC}
- Effizienz für Löcher/Elektronen in die Schichten einzutreten η_{inj}
- Absorptionskoeffizient α
- Dicke der absorbierenden Schicht d

Nach dieser kurzen Einführung können die typischen Kenngrößen von Solarzellen erläutert werden.

Kurzschlussstromdichte j_{SC} Die Kurzschlussstromdichte ist gerade die Stromdichte bei einer Spannung von 0 V, bei Belichtung einer Solarzelle. Sie ist in Abbildung 1.1 eingetragen, und entspricht dem Schnittpunkt mit der y-Achse der Kennlinie. Deshalb lässt sie sich folgend berechnen:

$$j_{SC} = j(V = 0) = eI_0\eta_{CC}\eta_{inj}(1 - \exp(-\alpha d)) = j_{ph} \quad (1.3)$$

Leerlaufspannung V_{OC} Die Leerlaufspannung ist die Spannung bei einem Strom von 0 A, sie ist daher im Kennlinienfeld 1.1 als Nullstelle zu finden. Sie kann erneut

aus der Gleichung 1.1 bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 0 &\stackrel{!}{=} j_S \left(\exp \left(\frac{eV_{OC}}{mk_B T} \right) - 1 \right) - j_{ph} \\
 j_{ph} &= j_S \exp \left(\frac{eV_{OC}}{mk_B T} \right) \\
 \Rightarrow V_{OC} &= \ln \left(\frac{j_{ph}}{j_S} \right) \frac{mk_B T}{e}
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Dabei wurde angenommen, dass $\exp \left(\frac{eV_{OC}}{mk_B T} \right) \gg 1$ und die Sättigungsstromdichte j_{SC} entspricht gerade der Kurzschlussstromdichte j_{SC} , wie im Abschnitt davor gezeigt.

Wirkungsgrad η In der Abbildung 1.1 ist der sogenannte Maximum Power Point (MPP) eingetragen, er ist dort definiert, wo das Produkt aus der Stromdichte j und der Spannung V maximal ist. Die orangefarbene Fläche mit diesem Punkte, ist die maximale Leistungsdichte. Der Wirkungsgrad ist daher, dass Verhältnis aus dieser maximalen Leistungsdichte zur Leistungsdichte des eingestrahnten Lichts:

$$\eta = \frac{p_{max}}{p_0} = \frac{V_{MPP} \cdot j_{MPP}}{p_0} \tag{1.5}$$

Füllfaktor FF Aus den bisher beschriebenen Kenngrößen, kann der Füllfaktor angegeben werden, in der Abbildung 1.1 ist eher das Verhältnis des orangen Rechtecks zum blauen Rechteck. Dieser Faktor gibt demnach das Verhältnis der Maximalleistung zur Leerlaufleistung an:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot j_{MPP}}{V_{OC} \cdot j_{SC}} \tag{1.6}$$

1.2 Aufbau einer Perovskitsolarzelle

In Abbildung 1.2 ist schematisch der schichtweise Aufbau einer Perovskit-Solarzelle abgebildet. Die einzelnen Schichten werden folgend von unten nach oben erläutert:

Substrat Die Solarzelle wird nach der Abbildung von der Unterseite beleuchtet, deshalb müssen die ersten Schichten transparent sein. ~~Die erste Glas Schicht~~ bildet eine stabile Unterlage für den Aufbau, ~~dabei ist das Glas~~ mit einem transparenten und leitfähigem Oxid beschichtet. ~~zum Beispiel~~ wird Fluordotiertes Zinnoxid (FTO) verwendet, dieses transportiert die entstehende Ladung zu einer Elektrode.

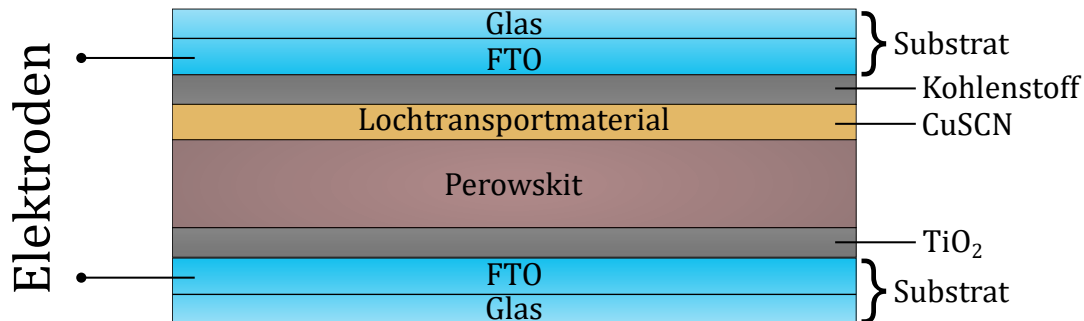


Abbildung 1.2: Schematischer Aufbau der Perowskit-Solarzelle

n-leitende Schicht Es folgt eine n-leitende Schicht, sie muss ebenfalls transparent sein und transportiert die in der Perowskitschicht entstehenden Elektronen ab. Häufige Verwendung findet hier Titanoxid TiO_2 .

Perowskitschicht In der Perowskitschicht werden Elektronen durch einstrahlende Photonen in das Valenzband gehoben, deshalb ist wichtig, dass diese Schicht einen hohen Absorptionskoeffizienten besitzt. In diesem Versuch wird Methylammoniumbleiiodid $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ verwendet, es kristallisiert bei über 60°C , die dabei entstehende Kristallstruktur ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Zudem besitzt ~~die~~ ^{es} Perowskit halbleitende Eigenschaften, da ~~es~~ ^{es} eine direkte Bandlücke mit 1.55 eV aufweist.

p-leitende Schicht Diese Schicht transportiert die entstehenden Löcher ab, dafür wird Kupferthiocyanat CuSCN verwendet

Gegenelektrode Damit ein elektrischer Stromkreis geschlossen werden kann, folgt nun eine Schicht, welche die Löcher zur Gegenelektrode transportiert. Hier sind verschiedenste leitende Materialien verwendbar, im Versuch wird eine Kohlenstoffschicht verwendet.

Substrat Zuletzt folgt erneut das Substrat vom Anfang aus Glas und FTO, um die Solarzelle zu stabilisieren und einen äußeren Gegenelektrodenkontakt herzustellen.

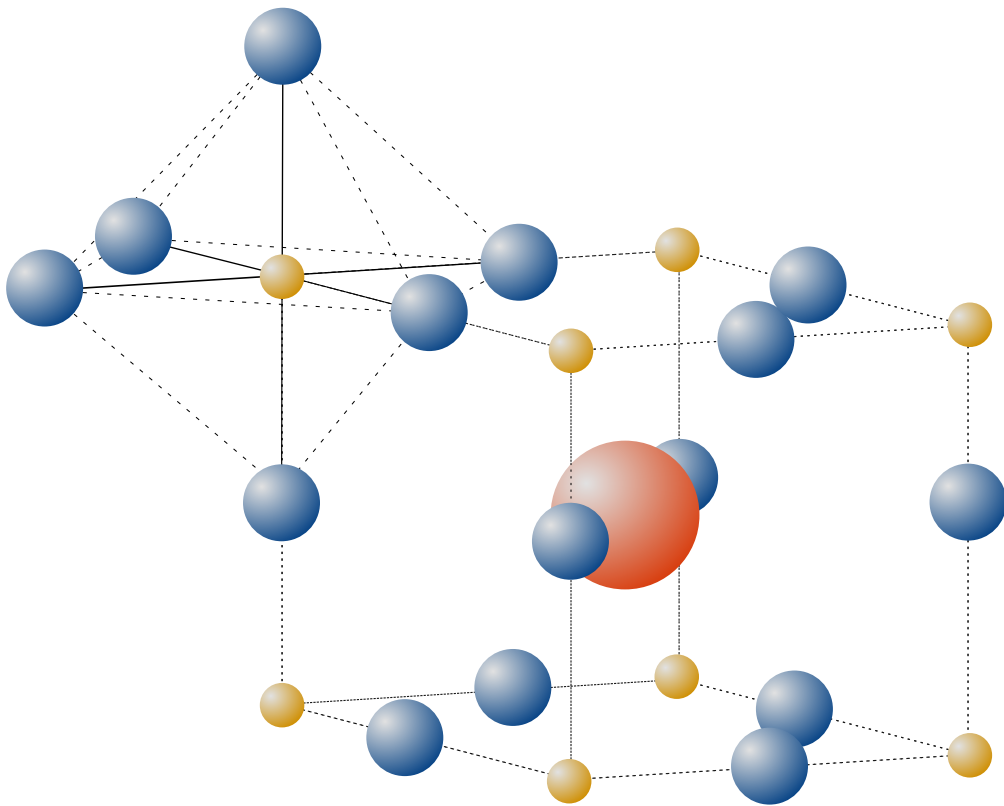


Abbildung 1.3: Einheitszelle des Methylammoniumbleiiodid, in Rot das organische Kation, Blau das Blei-Anion und gelb das Halogen-Ion

2. Versuchsdurchführung

Sicherheitsmaßnahmen Bevor mit dem Versuch begonnen wird, ist es notwendig, sich mit den Sicherheitsdatenblättern der verwendeten Chemikalien vertraut zu machen. Dies gewährleistet ein sicheres Arbeiten im Labor.

2.1 benötigte Materialien

- Substrate und Chemikalien
 - FTO-beschichtete Glassubstrate
 - Klebeband
 - Titanisopropoxid ($\text{Ti}(\text{OCH}_2)_4$)
 - Ethanol
 - Salzsäure (HCl)
 - Bleiiodid (PbI_2)
 - Dimethylformamid (DMF)
 - Wasser (H_2O)
 - Methylammoniumiodid ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$)
 - Isopropanol
 - Kupferthiocyanat (CuSCN)
 - Propylsulfid
- Geräte und Ausrüstung
 - Multimeter
 - UV/Ozon-Reiniger
 - Spin-Coater
 - Eppendorf-Pipetten
 - Röhrenofen
 - Heizplatte
 - Pinzette
 - Absorptionsspektrometer
 - Programm „MultiSpec Pro“
 - Potentiostat (z.B. Iviumstat)
 - Messrechner mit IviumSoft

- Krokodilklemmen
- Pyranometer
- Kerze oder Feuerzeug
- Kupferklebeband
- Leitsilber
- Maske zur Flächenabdeckung
- Klammern zur Befestigung der Rückelektrode
- optische Filter (für Messungen bei verschiedenen Lichtintensitäten)
- Schutz- und Verbrauchsmaterialien
 - Handschuhe
 - Pipettenspitzen
 - Tücher
 - Gefahrstoffabfallbehälter

2.2 Herstellung der Perowskitsolarzellen

Vorbehandlung der Substrate und des Spin-Coaters Zunächst werden die FTO-Substrate mit Klebeband abgedeckt, um Bereiche für die spätere elektrische Kontaktierung freizuhalten. Die Substrate werden dann im UV/Ozon-Reiniger für 5 Minuten behandelt, um eine bessere Oberflächenbenetzung zu gewährleisten. Während dieser Zeit wird das Innere des Spin-Coaters abgedeckt, um Verunreinigungen zu vermeiden.

Herstellen der Titandioxid-Schicht Das FTO-beschichtete Substrat wird mit einer Prekursorlösung (0.18 M Titanisopropoxid in Ethanol und HCl) per Spin-Coating bei 2000 rpm beschichtet. Danach werden die Substrate im Röhrenofen bei 450 °C für 20 Minuten erhitzt, um die Titandioxid-Schicht auszubilden.

Präparation der Perowskit-Schicht Die Perowskit-Prekursor-Lösung, bestehend aus 0.8 M Bleiiodid (PbI_2) in DMF und 2% H_2O , wird auf die Substrate aufgeschleudert. Nach 30 Sekunden wird eine 0.3 M Methylammoniumiodid ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) Lösung in Isopropanol hinzugefügt. Die Substrate werden anschließend für 10 Minuten auf einer 100°C vorgeheizten Heizplatte erhitzt.

Aufnahme der Absorptionsspektren Zur Bestimmung des Absorptionsverhaltens der Perowskitschicht wird eine Dunkelmessung, eine Referenzmessung und eine Absorptionsmessung durchgeführt. Die Integrationszeit wird so eingestellt, dass bei der Referenzmessung 95-100% Intensität erreicht werden. Danach wird die Perowskit-Probe gemessen und die Ergebnisse gespeichert.

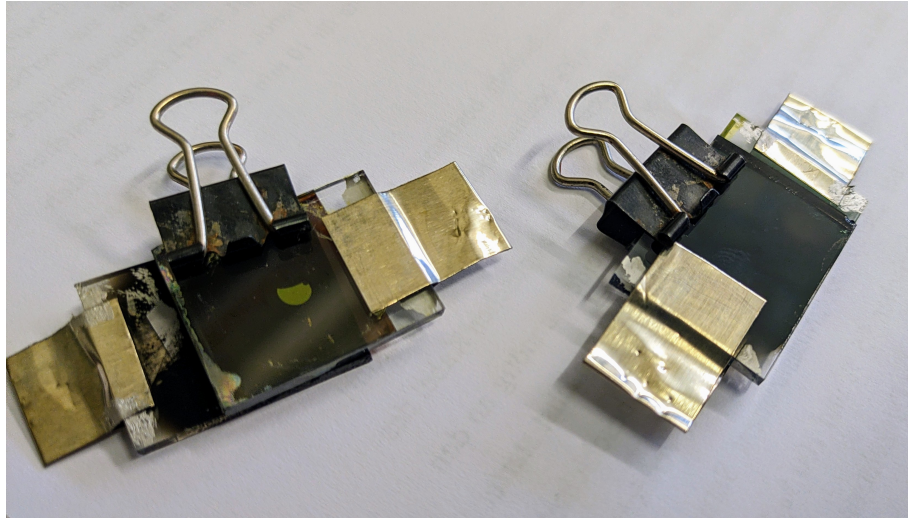


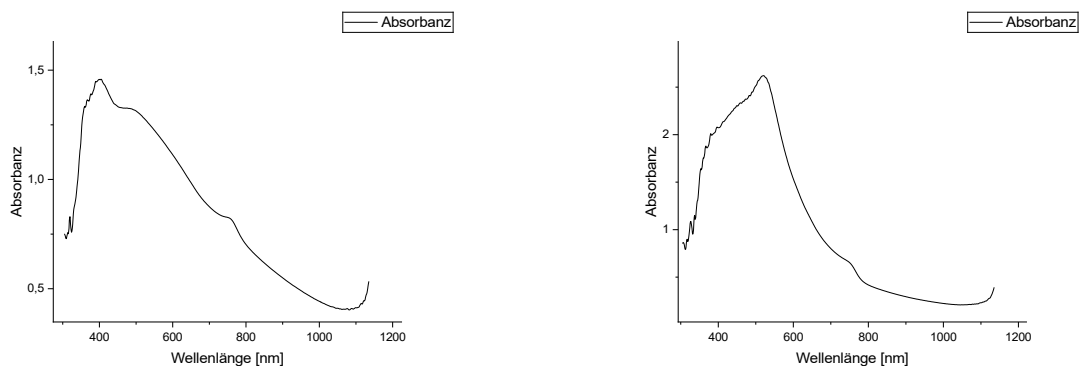
Abbildung 2.1: zusammengebaute Perovskitsolarzellen

Aufbringen der Kupferthiocyanat-Schicht Die CuSCN-Schicht wird durch Spin-Coating aufgetragen. 100 μL einer 0.05 M CuSCN-Lösung in Propylsulfid werden auf das rotierende Substrat gegeben und bei 100 °C für 5 min ausgeheizt.

Herstellen der Rückelektrode und Zusammenbau der Solarzelle Die Rückelektrode wird durch Halten der leitfähigen Seite des FTO-Substrats über eine Flamme ~~ruß~~^{an} beschichtet. Rückelektrode und Probe werden mit Kupferklebeband und Leitsilber kontaktiert. Eine Maske wird auf die Rückseite der Perovskitschicht geklebt, um die belichtete Fläche zu definieren. Die Rückelektrode wird so befestigt, dass kein Kurzschluss entsteht.

Messung von Photoströmen und -spannungen Zur Messung von Photoströmen und -spannungen wird die Solarzelle mit einer Lichtintensität von 100 mW cm^{-2} belichtet. Anode und Kathode werden mit Heftklammern wie in Abbildung 2.1 zu sehen elektrisch kontaktiert. Die j-V-Kennlinien werden im Dunkeln und unter Belichtung bei verschiedenen Lichtintensitäten gemessen.

3. Auswertung



(a) Absorptionsspektrum der ersten Solarzelle

(b) Absorptionsspektrum der zweiten Solarzelle

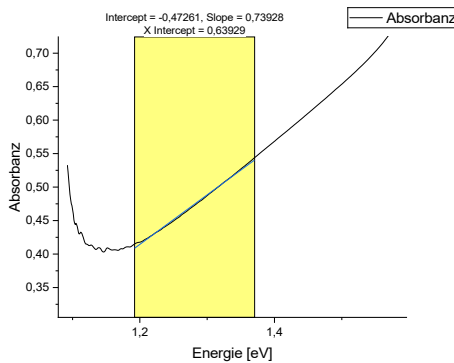
Abbildung 3.1: Absorptionsspektren der beiden Solarzellen

3.1 Absorptionsspektren

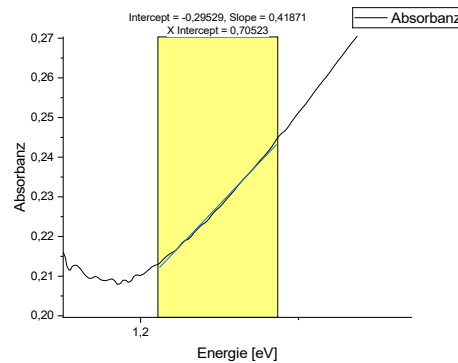
Die Absorptionsspektren der beiden Solarzellen sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Absorption beginnt bei einer Wellenlänge von etwa 300 nm und steigt bis zu einer Wellenlänge von 400 nm (Solarzelle 1) bzw. 500 nm an. Die Absorptionsspektren zeigen, dass die Perowskitschicht in beiden Solarzellen Licht im sichtbaren Bereich absorbiert. Die Absorption ist bei der zweiten Solarzelle stärker als bei der ersten, was auf eine höhere Absorptionsfähigkeit der Perowskitschicht hinweist. Dies ist ein wichtiger Faktor für die Effizienz der Solarzelle, da eine höhere Absorption mehr Photonen einfängt und somit mehr Elektronen erzeugt. Gegen Ende des sichtbaren Bereichs nimmt die Absorption ab, was darauf hindeutet, dass die Perowskitschicht nicht das gesamte Licht absorbiert. Dies könnte auf eine geringere Dicke der Schicht oder eine geringere Absorptionseffizienz zurückzuführen sein. Ab 750 nm ist das Absorptionsminimum der Zellen erreicht. Über dieser Energie liefert die Lichtquelle

nicht mehr genügend Intensität, um eine aussagekräftige Absorption zu messen, darum steigt die Kurve wieder an. Dies ist jedoch ein Messfehler und keine tatsächliche Absorption.

3.2 Tauc-Plot



(a) Tauc-Plot der ersten Solarzelle



(b) Tauc-Plot der zweiten Solarzelle

Abbildung 3.2: Energie-Absorptionsspektren der beiden Solarzellen mit Tauc-Plot

Der Tauc-Plot ist eine Methode, um die Bandlücke eines Halbleiters zu bestimmen. Dazu wird die Absorption gegen die Energie aufgetragen und die Steigung der Geraden im Bereich der Absorptionskante bestimmt. Die Bandlücke entspricht der Energie, bei der die Absorption einen Wert von 0 erreicht. In den Tauc-Plots der Solarzellen sind die Absorptionskanten bei etwa **0,64 eV** (Solarzelle 1) und **0,71 eV** (Solarzelle 2) zu erkennen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Perovskitschicht in beiden Solarzellen eine direkte Bandlücke aufweist, was für die Effizienz der Solarzelle von entscheidender Bedeutung ist. Jedoch ist die Bandlücke beider Solarzellen viel geringer als die von idealem Perowskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) mit circa 1,55 eV. Dies könnte auf eine unvollständige Kristallisation der Perovskitschicht oder eine ungleichmäßige Schichtdicke zurückzuführen sein. Eine geringere Bandlücke führt zu einer geringeren Spannung und damit zu einer geringeren Leistung der Solarzelle. ~~Daher ist es wichtig, die Bandlücke der Perovskitschicht genau zu kontrollieren, um eine hohe Effizienz zu gewährleisten.~~ Die im folgenden Kapitel 3.3.1 aufgenommenen Kenngrößen der Solarzellen werden die hier zu erwartende geringe Effizienz der Zellen bestätigen.

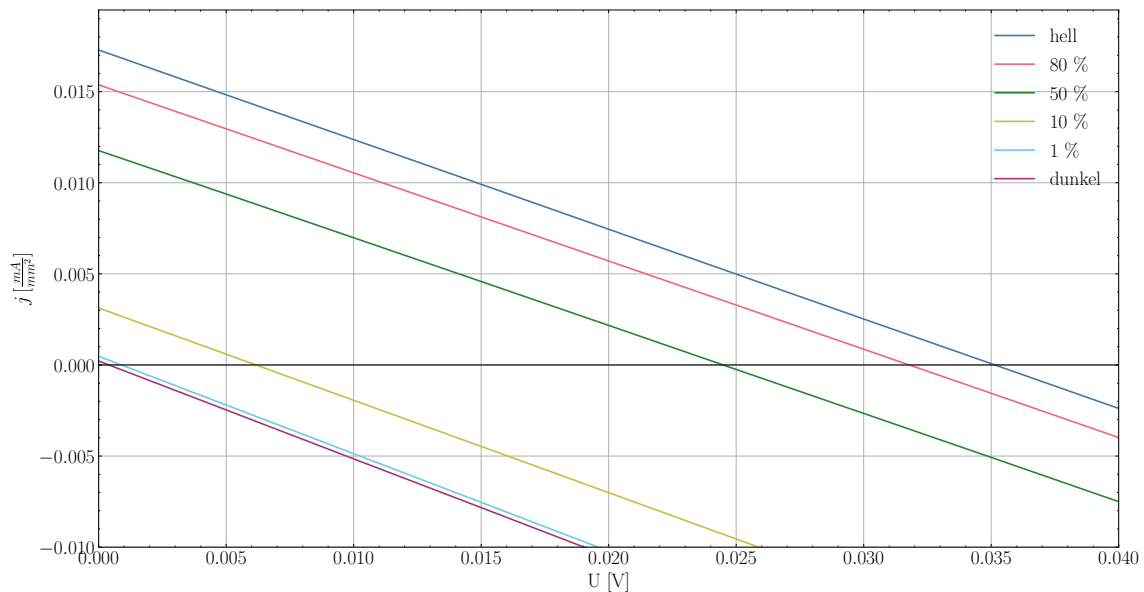


Abbildung 3.3: Stromdichte-Spannungskennlinien, Dunkel- und Hellkennlinie, zudem Kennlinien bei unterschiedlichen Belichtungsintensitäten

3.3 Charakteristika der Solarzelle

Beim aufnehmen der Kennlinien hat die hergestellte Solarzelle 1, nur extrem kleine Ströme bei Beleuchtung gezeigt. Die Kennlinien konnten nur in einem minimalen Spannungsbereich aufgenommen werden. Da Solarzelle 2 ein besseres Verhalten gezeigt hat, werden ihre Messdaten im folgenden ausgewertet. Das war in der Auswertung der Tauc-Plots auch zu erwarten, denn die zweite Solarzelle hat eine etwas größere Bandlücke als die erste.

3.3.1 Kennlinien

In Abbildung 3.3 sind die Stromdichte-Spannungskennlinien für alle gemessenen Lichtintensitäten aufgetragen. Die y-Achse wird in eine Stromdichte umgerechnet, dies geschieht mit der bekannten beleuchteten Fläche A . Diese ist kreisrund und hat einen Durchmesser von 7 mm. Insgesamt sehen alle Linien sehr ohmisch aus, in Abbildung 3.4 ist zu erkennen, dass die Solarzelle dennoch minimal ein Diodenverhalten ausweist. Denn bei logarithmischer y-Achse ist die typische Form, wie sie im Theoriekapitel 1.1 beschrieben wurde, erkennbar.

Ab einer Beleuchtungsstärke von 10 % und mehr, liegt ein Teil der Graphen im positiven Bereich der y-Achse, demzufolge wird tatsächlich Leistung erzeugt, die Solarzelle

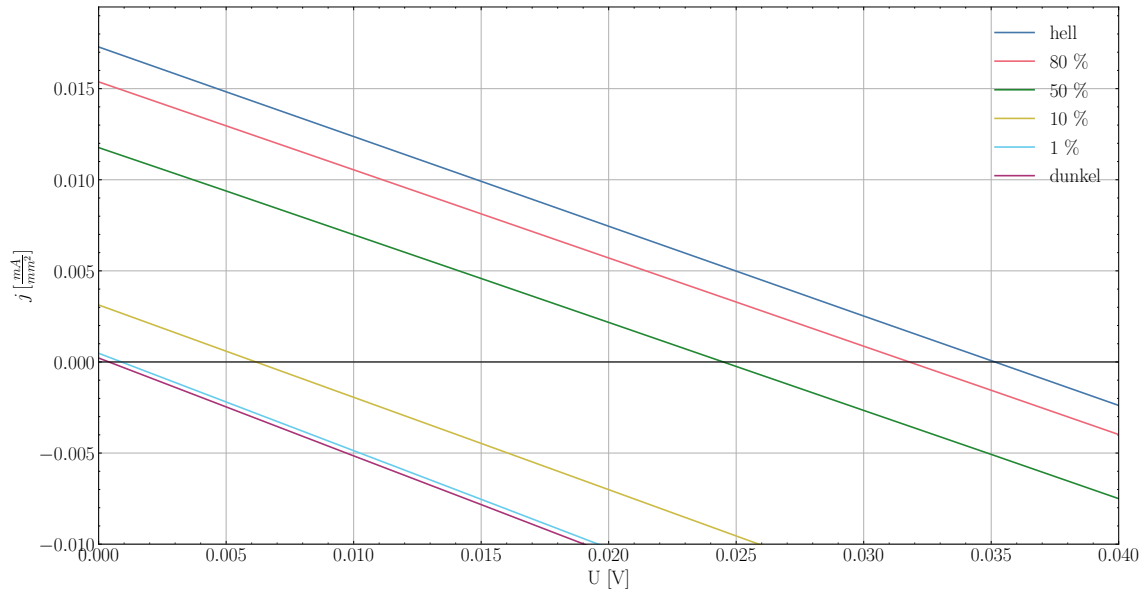


Abbildung 3.4: Logarithmische Stromdichte-Spannungskennlinien

funktioniert also prinzipiell.

Durch lineare Interpolation werden die Kurzschlussstromdichten und Leerlaufspannungen bestimmt, Stromdichten werden über die Fläche wieder in Ströme umgerechnet. Die Ergebnisse daraus sind in Tabelle 3.1 aufgetragen.

Beleuchtung	V_{OC} [mV]	j_{SC} [mA mm ⁻²]	I_{SC} [mA]
<u>hell</u>	35.15	0.01729	1.353
80 %	31.79	0.01537	1.223
50 %	24.45	0.01176	0.943
10 %	6.17	0.00313	0.237
1 %	0.89	0.00048	0.034
dunkel	0.40	0.00022	0.016

Tabelle 3.1: Kurzschlussstromdichten und Leerlaufspannungen

3.3.2 Maximum Power Point's

Um die weiteren Kenngrößen der Solarzelle zu berechnen, wird nun nach dem jeweiligen Maximum Power Point (MPP) gesucht. Dieser ergibt sich als Maximum im Leistungsdichte-Spannungs-Diagramm 3.5. Nur für die Hellkennlinie, 80 % und 50 % Belichtung konnte der MPP sinnvoll bestimmt werden. Die Spannung an diesem

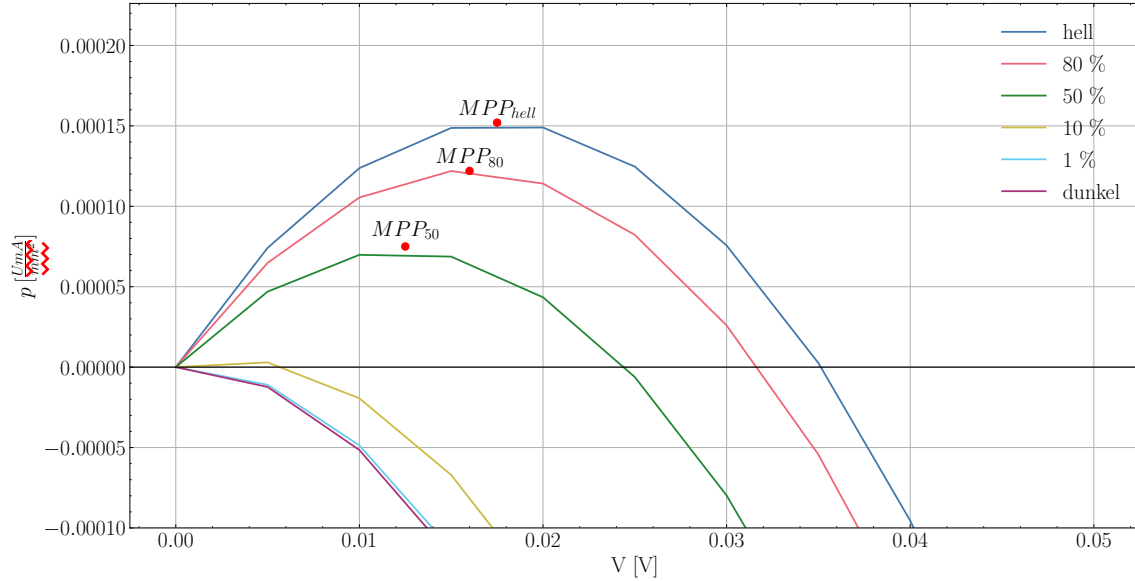


Abbildung 3.5: Leistungsichte zur Spannung, da wo sie bestimmbar waren, sind die Maximum Power Point's eingetragen

Punkt V_{MPP} , kann direkt aus dem Diagramm abgelesen werden, die Stromstärke I_{MPP} muss durch einsetzen von V_{MPP} im Kennlinienfeld 3.3.1 bestimmt werden, wie in Abbildung 3.6 zu erkennen. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 3.2 festgehalten.

Beleuchtung	V_{MPP} [mV]	j_{SC} [mA mm ⁻²]	I_{SC} [mA]
hell	17.5	0.00868	0.334
80 %	16.0	0.00764	0.294
50 %	12.5	0.00578	0.222

Tabelle 3.2: MPP-Daten

3.3.3 Übersicht über die ermittelten Kenngrößen

Zur Übersicht werden nun alle bisher ermittelten Werte in der Tabelle 3.3 zusammengetragen. Zudem wird der Füllfaktor FF wie im Kapitel 1.1 erläutert, berechnet. Auch der Wirkungsgrad η wird berechnet, wobei die Leistungsichte des eingestrahelten Lichts gerade die Lichtintensität multipliziert mit der maximalen Leistungsichte von 100 mW cm^{-2} .

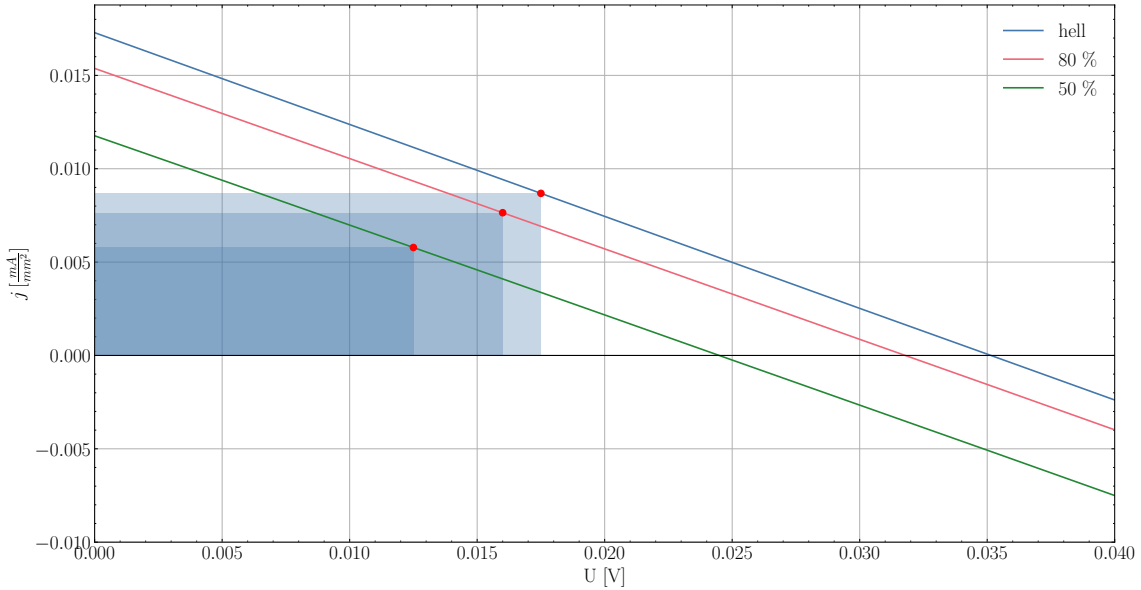


Abbildung 3.6: MPP's im Kennlinienfeld

Beleuchtung	V_{OC} [mV]	j_{SC} [mA mm ⁻²]	I_{SC} [mA]	FF	η
hell	35.15	0.01729	1.353	0.123	1.519E-4 = 0.015%
80 %	31.79	0.01537	1.223	0.121	1.528E-4 = 0.015%
50 %	24.45	0.01176	0.943	0.120	1.445E-4 = 0.014%
10 %	6.17	0.00313	0.237	-	-
1 %	0.89	0.00048	0.034	-	-
dunkel	0.40	0.00022	0.016	-	-

Tabelle 3.3: Übersicht über die ermittelten Kenngrößen der Solarzelle 2

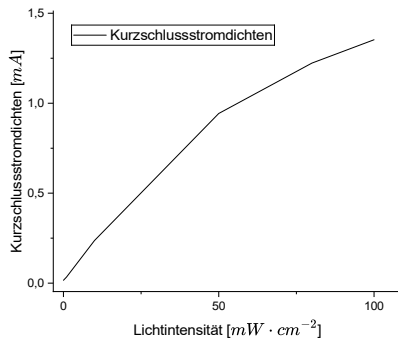
3.4 Idealitätsfaktor

Der Idealitätsfaktor m ist ein Maß für die Güte der Diode; er gibt an, wie stark die Diode ideal ist. Ein Wert von $m = 1$ bedeutet, dass die Diode ideal ist; ein Wert von $m > 1$ bedeutet, dass die Diode nicht ideal ist. Der Idealitätsfaktor wird aus der Steigung der Kennlinie im Bereich des Maximum Power Points (MPP) bestimmt. Die Steigung wird durch lineare Regression bestimmt, die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 aufgetragen. Der Idealitätsfaktor wird dann durch fitten der Gleichung bestimmt:

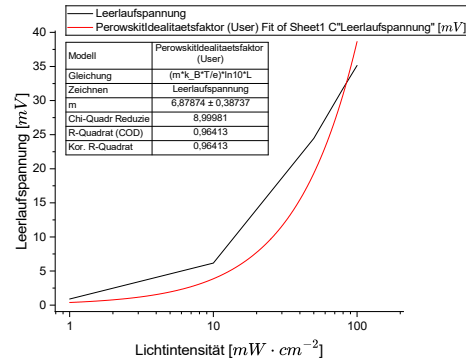
$$U = \frac{mk_b T}{e} \cdot \ln(10) \cdot L \quad (3.1)$$

Dabei ist L die eingestrahlte Lichtintensität, welche logarithmisch aufgetragen wird. In Abbildung 3.7a ist die Kurzschlussstromdichte gegen die Lichtintensität aufgetragen. Da die Kurve der Kurzschlussstromdichte nicht streng proportional zur Lichtintensität ist, lässt sich darauf schließen, dass die Ladungsträgerinjektion und die Ladungsträgerkollektion nicht unabhängig von der Bestrahlungsstärke sind und der Strom durch die Solarzelle durch verschiedene Faktoren wie z.B. den Ladungstransport im HTM begrenzt wird. Dies erklärt das Abflachen der Kurve bei höheren Lichtintensitäten.

In Abbildung 3.7b ist die Leerlaufspannung gegen die Lichtintensität aufgetragen. Eine ideale Kennlinie würde, wie in der Anleitung [1] auf Seite 4 erläutert, eine lineare Gerade mit Steigung 59 mV/Dekade aufzeigen. In der realen Solarzelle sinkt die V_{OC} mit abnehmender Lichtintensität stärker, als im Idealfall zu erwarten wäre. Also ist der Idealitätsfaktor m größer als 1. Dies bedeutet, dass die Solarzelle nicht ideal ist und die Rekombination der Ladungsträger in der Solarzelle nicht vernachlässigt werden kann. Der Idealitätsfaktor der von uns hergestellten Solarzelle lässt sich durch den Fit mit der Gleichung 3.1 zu $m = 6,9$ bestimmen. Dieser Wert ist sehr hoch und zeigt, dass die Solarzelle keineswegs ideal ist. Das konnte man auch schon an den Kennlinien erkennen, da sie nicht ideal diodisch waren.



(a) Lichtintensität-Strom-Kennlinie



(b) Lichtintensität-Spannung-Kennlinie

Abbildung 3.7: Lichtintensität-Strom- und Spannungskennlinie

4. Fazit

In diesem Versuch wurden Perowskitesolarzellen hergestellt und charakterisiert. Die Absorptionsspektren zeigen, dass die Perowskiteschicht Licht im sichtbaren Bereich absorbiert. Aus den Tauc-Plots geht hervor, dass die Schicht eine direkte Bandlücke besitzt. Die Stromdichte-Spannungskennlinien verdeutlichen, dass die Solarzellen bei höheren Lichtintensitäten Leistung erzeugen. Die ermittelten Kenngrößen weisen jedoch auf eine sehr geringe Effizienz hin. Mit einem Idealitätsfaktor von $m = 6,9$ wird deutlich, dass die Solarzelle nicht ideal ist und die Rekombination der Ladungsträger eine Rolle spielt. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Solarzellen den Anforderungen an eine effiziente Solarzelle noch nicht gerecht werden. Weitere Untersuchungen und Optimierungen sind notwendig, um die Effizienz zu steigern.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kennlinie ideale Solarzelle	3
1.2	Aufbau der Perowskit-Solarzelle	6
1.3	Einheitszelle von $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	7
2.1	zusammengebaute Perowskitsolarzellen	10
3.1	Absorptionsspektren der beiden Solarzellen	11
3.2	Tauc-Plots	12
3.3	Stromdichte-Spannungskennlinien	13
3.4	Logarithmische Stromdichte-Spannungskennlinien	14
3.5	Leistungsdichte zur Spannung, da wo sie bestimmbar waren, sind die Maximum Power Point's eingetragen	15
3.6	MPP's im Kennlinienfeld	16
3.7	Tauc-Plots	17

Literaturverzeichnis

- [1] Anleitung zum Fortgeschrittenen-Praktikum.
„Versuch: Organisch-anorganisch hybride Perowskitesolarzellen“.
Justus-Liebig-Universität Gießen. Sommersemester 2024.
- [2] Boix, P. P., Nonomura, K., Mathews, N., & Mhaisalkar, S. G. (2014). Current progress and future perspectives for organic/inorganic perovskite solar cells. *Materials Today*, 17(1), 16–23. doi:10.1016/j.mattod.2013.12.002.
- [3] Grätzel, M. (2014). The light and shade of perovskite solar cells. *Nature Materials*, 13(9), 838–842. doi:10.1038/nmat4065.
- [4] Kojima A et al. (2009). Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society*. DOI: 10.1021/ja809598r.
- [5] Sharma R et al. (2022): Stability and efficiency issues, solutions and advancements in perovskite solar cells: A review. *Solar Energy*. DOI: 10.1016/j.solener.2022.08.001.
- [6] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Best Research-Cell Efficiencies.
- [7] Green MA et al. (2019). Solar cell efficiency tables (version 55). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. DOI: 10.1002/pip.3171.
- [8] Holzhey P et al. (2023): Toward commercialization with lightweight, flexible perovskite solar cells for residential photovoltaics. *Joule*. DOI: 10.1016/j.joule.2022.12.012.
- [9] Perovskite-Info. The Perovskite Handbook. URL: <https://www.perovskite-info.com/>.