

**WS2021**

---

**PPB2**

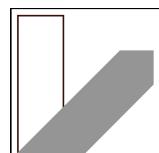
# **Solarzelle**

---

Matteo Kumar - Leonhard Schatt

---

Gruppe 3



# **Informationen**

<b>Versuchstag</b>	06.09.2021
<b>Versuchsplatz</b>	B11   Raum 0.03
<b>Betreuer</b>	Paul Recknagel
<b>Gruppen Nr.</b>	3

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Bändermodell und Halbleiter . . . . .	6
2.1.1 Leitfähigkeit im Bändermodell . . . . .	6
2.1.2 Dotierung von Halbleitern und pn-Übergang . . . . .	7
2.2 Solarzelle . . . . .	9
2.2.1 Funktionsweise . . . . .	9
2.2.2 Ersatzschaltbild . . . . .	9
2.2.3 Wichtige Kenngrößen . . . . .	10
2.2.4 Im Versuch verwendete Solarzelltypen . . . . .	11
2.3 Sonnenspektrum . . . . .	11
2.4 Lock-in Verstärker . . . . .	13
<b>3 Methodik</b>	<b>15</b>
3.1 Versuchsaufbau zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit . . . . .	15
3.2 Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie . . . . .	16
<b>4 Auswertung und Diskussion</b>	<b>18</b>
4.1 Spektrale Empfindlichkeit . . . . .	18
4.1.1 Lock-in-Verstärker . . . . .	18
4.1.2 Spektrale Empfindlichkeit SR und Externe Quanteneffizienz EQE .	19
4.1.3 Ideale Externe Quanteneffizienz . . . . .	24
4.2 Teilauswertung U/I-Kennlinie . . . . .	25
4.3 Fitten der Shockley-Gleichung . . . . .	28
4.3.1 CIS-Solarmodul . . . . .	28
4.3.2 Mono- und MultiSi-Zellen . . . . .	29
4.3.3 Idealitätsfaktor . . . . .	32
4.3.4 Wirkungsgrad . . . . .	32
4.3.5 Extrapolieren der Photostroms . . . . .	33
<b>5 Fazit</b>	<b>35</b>
<b>A Anhang</b>	<b>36</b>
A.1 Methodik . . . . .	36
A.1.1 Versuchsaufbauten . . . . .	36
A.2 Fitten der Shockley-Gleichung . . . . .	40

*Inhaltsverzeichnis*

A.3 Wirkungsgrad . . . . .	48
A.3.1 Messdaten . . . . .	51
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>67</b>

# **1 Einleitung**

Im Jahr 2021 ist der Energiebedarf der Bundesrepublik Deutschland größer denn je. Dieser wird dabei zu großem Teil noch durch das Verbrennen von fossilen Energieträgern gedeckt. Dabei schlittern die Menschheit einer global Katastrophe, der Klimakatastrophe, seherden Auges entgegen. Aus diesem Grund ist die Entwicklung 'klimafreundlicher' Alternativen zur Energiegewinnung unabdingbar. Eine besonders wichtige Rolle spielt dabei die Solarenergie. Dieser Versuch dient dazu dem Teilnehmer Eigenschaften von Solarmodulen näher zu bringen, wie die spektrale Empfindlichkeit, den Wirkungsgrad die externe Quanteneffizienz. Dabei lernt man nebenbei noch den Umgang mit dem Lock-in Verstärker, welcher eines der wichtigsten Messgerät ist.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Bändermodell und Halbleiter

#### 2.1.1 Leitfähigkeit im Bändermodell

Will man die Leitfähigkeit von Materialien anschaulich betrachten, ist das sog. Bändermodell hilfreich, das die erlaubten Energiezustände in einem Festkörper beschreibt. Jedes Band kann eine endliche Zahl an Ladungsträgern enthalten; ist das Band voll besetzt, trägt es nicht zur Leitfähigkeit bei, da keine freien Energieniveaus existieren, um Energie aus einem elektrischen Feld aufzunehmen. Für die Leitfähigkeit wichtig sind vor allem das Valenzband und das Leitungsband. Das Leitungsband ist das energetisch niedrigste Band, das bei tiefen Temperaturen nicht voll besetzt ist; das Valenzband ist das unmittelbar darunter liegende Band. (H. J. Eichler (2001), S. 299f) Elektrische Leiter haben bereits bei sehr niedrigen Temperaturen Ladungsträger im Leitungsband, weshalb sie im Allgemeinen immer leitend sind. Halbleiter und Isolatoren hingegen haben diese Eigenschaft nicht. Der Unterschied zwischen diesen beiden liegt in der Breite sog. Bandlücke, der energetische Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband. Während die Bandlücke von Isolatoren sehr breit ist, ist die von Halbleitern hinreichend schmal, sodass bei geringen (z.B. thermischen) Energien Ladungsträger aus dem Valenz- in das Leitungsband wechseln können und so den Halbleiter leitend machen.

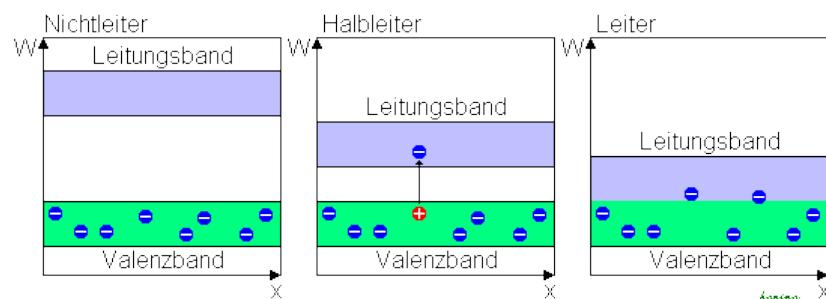


Abbildung 2.1: Bändermodell für Nichtleiter, Halbleiter und Leiter <sup>1</sup>

<sup>1</sup><https://www.virtualuniversity.ch/elektronik/analog/halbleiter/1.html>, Stand: 9.9.21

### 2.1.2 Dotierung von Halbleitern und pn-Übergang

Die Leitfähigkeit von Halbleitern lässt sich durch Dotierungen verbessern. Man hat hierzu zwei Möglichkeiten: p- und n-Dotierung.

Bei der n-Dotierung werden Atome mit einem Valenzelektron mehr als die des Halbleitermaterials eingebracht. Dies hat zur Folge, dass das überschüssige Elektron bereits mit thermischen Energien in das Leitungsband angeregt werden kann. Die Leitfähigkeit wird erhöht und es bleibt ein positiv geladener Atomrumpf zurück.

Die p-Dotierung bedient sich des umgekehrten Prinzips. Das Halbleitermaterial wird mit einer Atomsorte mit einem Elektron weniger verunreinigt. Das Fehlelektron wird auch als "Loch" bezeichnet. Dieses Loch hat eine hohe Elektronenaffinität, weshalb es ein Elektron von einem Atom des Halbleiters bindet, das nun wiederum ein Loch hat. Diese Leitungsart wird auch als Lochleitung bezeichnet. Im Gegensatz zur n-Dotierung bleibt hier ein negativ geladener Atomrumpf zurück. (Göbel (2019) S. 7-11). Bei einer Dotierung verschiebt sich auch die Fermienergie, die im Falle eines undotierten Leiters ungefähr in der Mitte zwischen Unterkante des Leitungsbandes und Oberkante des Valenzbandes liegt. Im Falle einer n-Dotierung verschiebt sich die Fermienergie aufgrund der zusätzlichen Elektronen im Valenzband nach oben, im Falle einer p-Dotierung aufgrund der zusätzlichen Löcher nach unten. (Wellmann (2019), S.60)

Fügt man nun einen p- und einen n-dotierten Halbleiter zusammen, erhält man einen sogenannten pn-Übergang. Im p-dotierten Halbleiter herrscht ein Löcherüberschuss und im n-dotierten ein Elektronenüberschuss. Aufgrund dieses Konzentrationsgefälles wandern Elektronen und Löcher und rekombinieren, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Nun existiert direkt am Übergang zwischen den Materialien eine Zone, in der es keine freien Ladungsträger mehr gibt. Es liegen nur noch die negativ bzw. positiv geladenen Atomrümpfe vor, die ihrerseits wieder eine Potentialdifferenz verursachen.

Legt man nun ein externes Feld an, kann, je nach Anlegrichtung, diese Differenz entweder vergrößert werden und es fließt kein Strom, die Sperrzone vergrößert sich, oder sie wird verringert bis sie schließlich überwunden wird. Es existiert ein Stromfluss.

Dies kann auch im Bändermodell betrachtet werden: Durch die Rekombination von freien Löchern und Elektronen in der Verarmungszone gleichen sich die Fermienergien beider Materialien an. Dabei verbiegt sich das Band und es entsteht eine Potentialdifferenz zwischen p- und n-dotiertem Halbleiter.

---

<sup>2</sup> Wellmann (2019), S.62

<sup>3</sup> <https://www2.physki.de/PhysKi/index.php/Pn-%C3%9Cbergang>, Stand: 19.09.21

## 2 Grundlagen

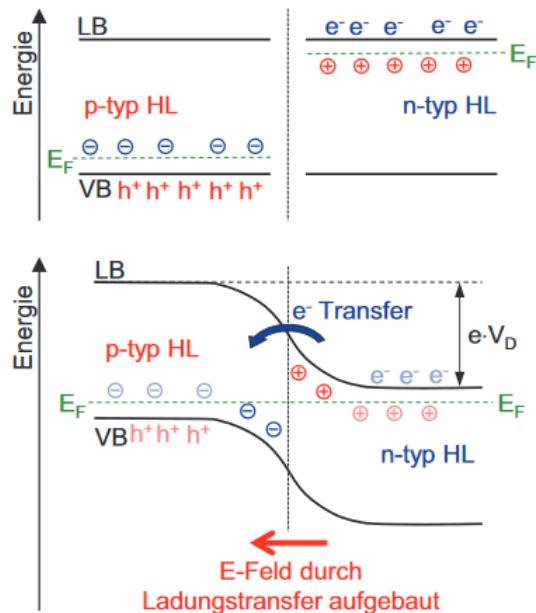


Abbildung 2.2: Bei einem pn-Übergang gleichen sich die Fermienergien (in grün) an. Dadurch verbiegt sich das Band und es entsteht eine Potentialdifferenz <sup>2</sup>

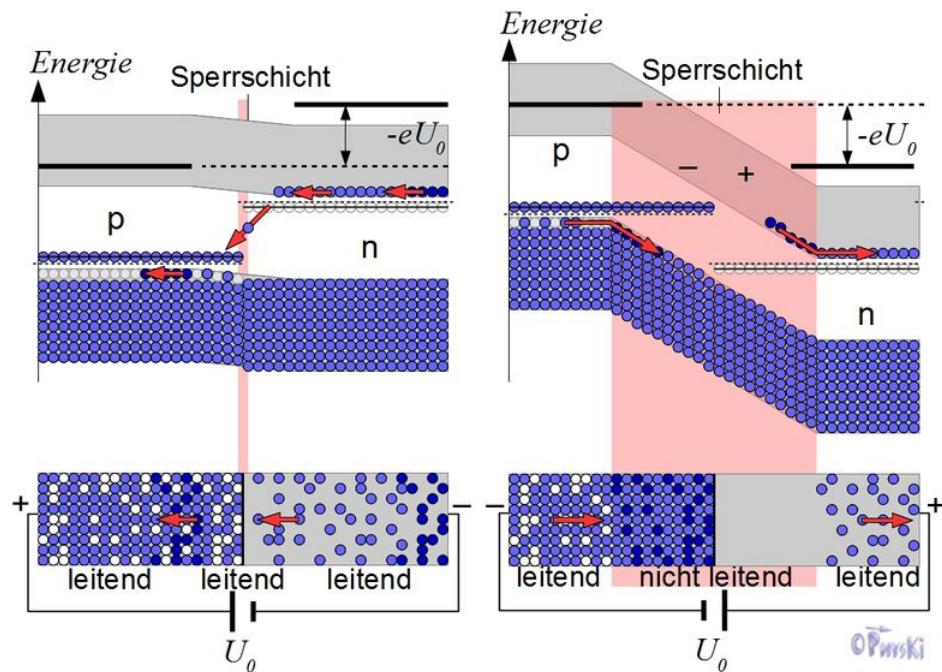


Abbildung 2.3: pn-Übergang mit angelegter Spannung in Durchlass- (links) bzw. Sperrrichtung (rechts) <sup>3</sup>

## 2.2 Solarzelle

### 2.2.1 Funktionsweise

Der Typ von Solarzelle, mit dem sich in diesem Versuch beschäftigt wird, besteht im Wesentlichen aus einem pn-Übergang. Trifft nun Licht, also Photonen, auf die Zelle, werden dadurch freie Elektronen-Löcher-Paare erzeugt. Im einfachsten Fall werden diese durch den Drift des elektrischen Feldes der Atomrümpfe in der Verarmungszone separiert und wandern in Richtung der aufgebrachten Kontakte; ein Strom kann abgegriffen werden. Manche Zellen nutzen zusätzlich noch die durch die Konzentrationsgefälle der Elektronen und Löcher bedingte Diffusion. (Shah (2020), S.46) Unbeleuchtete Solarzellen unterscheiden sich also im prinzipiellen Aufbau nicht von einfachen Dioden; entsprechend stimmt auch der Verlauf ihrer U/I-Kennlinien überein. Wird die Zelle nun beleuchtet, bedingen die entstehenden Elektron-Löcher-Paare einen Kurzschlussstrom; die Kennlinie verschiebt sich im Vergleich zur Diode in negative I-Richtung.

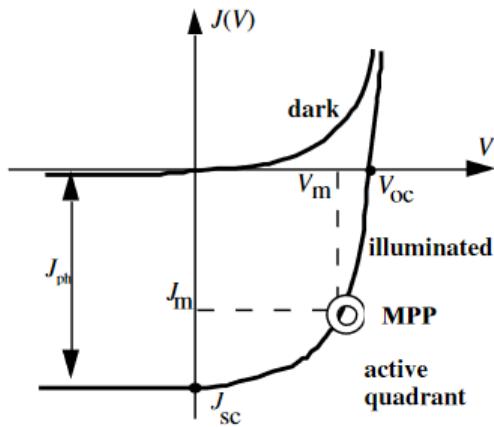


Abbildung 2.4: U/I-Kennlinie einer Solarzelle für den beleuchteten und unbeleuchteten Fall<sup>4</sup>

### 2.2.2 Ersatzschaltbild

Die ideale Solarzelle kann durch eine Stromquelle, die den Photostrom modelliert, und eine Diode dargestellt werden. Erweitert werden kann dieses Modell durch einen Serienwiderstand, der hauptsächlich Widerstände in den Kontakten und Verkabelungen widerspiegelt, und einen Parallelwiderstand, der alle Effekte im Kristall zusammenfasst, die den pn-Übergang überbrücken. (Shah (2020), S.52f) Das Ersatzschaltbild in Abb. 2.5 zu finden.

---

<sup>4</sup>Shah (2020), S.50

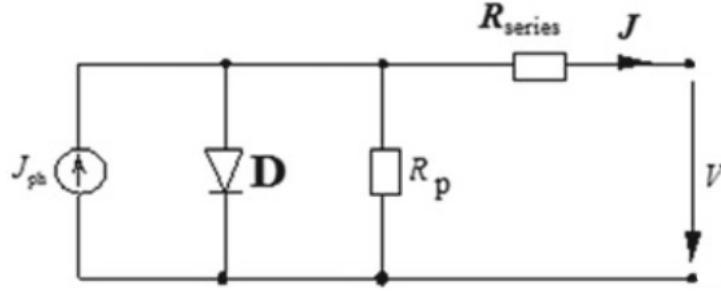


Abbildung 2.5: Ersatzschaltbild einer Solarzelle<sup>5</sup>

Die sich daraus ergebende U/I-Kennlinie wird durch die Shockley-Gleichung beschrieben:

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{q(U - R_S I)}{nkT}\right) - 1 \right) + \frac{U - R_S I}{R_P} - I_{Ph} \quad (2.1)$$

(Gerken (2021), S.3)

### 2.2.3 Wichtige Kenngrößen

Die Leistung berechnet sich nach  $P = |UI|$ , im U/I-Diagramm entspricht ihr also die Fläche des Rechtecks unter der Kennlinie. Am Maximum-Power-Point  $MPP$  ist  $P$  maximal. Der  $MPP$  ist auch in Abb. 2.4 eingezeichnet.

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle berechnet sich aus dem Verhältnis der nutzbaren und der einfallenden Leistung:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{ein}} = \frac{|UI|_{MPP}}{P_{ein}}$$

Ein weiterer Gütefaktor einer Solarzelle ist der Füllfaktor  $FF$ . Er ist das Verhältnis der Leistung am  $MPP$  und des Produktes aus Leerlaufspannung  $U_{OC}$  und Kurzschlussstrom  $I_{SC}$ . Eine ideale Solarzelle hat den Füllfaktor 1, eine reale  $FF < 1$ .

$$FF = \frac{|UI|_{MPP}}{U_{OC} I_{SC}}$$

Die Externe Quanteneffizienz  $EQE$  einer Solarzelle beschreibt das Verhältnis von Photonen, die zum Photostrom beitragen, zu einfallenden Photonen. Man kann sie also auch als Wirkungsgrad bezogen auf Photonen betrachten; im Idealfall gilt  $EQE = 1$ . Es folgt:

$$EQE = \frac{\text{Photonen im Photostrom}}{\text{einfallende Photonen}} = \frac{\frac{I_{Ph}}{e}}{r_{ein} t} = \frac{I_{Ph}}{e r_{ein} t} = \frac{I_{Ph} h \nu}{e P_\lambda} \quad (2.2)$$

---

<sup>5</sup>Shah (2020), S.53

## 2.3 Sonnenspektrum

wobei im letzten Schritt angenommen wurde, dass das einfallende Licht monochromatisch ist, und  $P_\lambda$  die einfallende Strahlungsleistung ist.

Schreibt man nun die Frequenz in die Wellenlänge um, erhält man:

$$EQE = \frac{hc}{e} \frac{I_{\text{Ph}}}{\lambda P_\lambda} = \frac{hc}{e} \frac{SE(\lambda)}{\lambda} \quad (2.3)$$

Im letzten Schritt wurde hierbei ausgenutzt, dass der Vorfaktor konstant ist, um die Spektrale Empfindlichkeit  $SE(\lambda) = \frac{I_{\text{Ph}}}{P_\lambda}$  zu definieren.

### 2.2.4 Im Versuch verwendete Solarzelltypen

Der Unterschied zwischen den im Versuch vorliegenden Silizium- und Kupfer-Indium-Selenoid-(CIS-)Zellen liegt in der Art der Bandlücke der jeweiligen Materialien. CIS-Zellen haben eine sogenannte direkte Bandlücke; auftreffende Photonen können direkt absorbiert werden. Dagegen haben Siliziumzellen eine indirekte Bandlücke; Photonen können erst durch eine Interaktion mit einem geeigneten Phonon absorbiert werden, weshalb die Absorptionswahrscheinlichkeit im Vergleich zur CIS-Zelle deutlich herabgesetzt ist. Aufgrund dessen sind bei Siliziumzellen wesentlich dickere Halbleiterschichten oder spezielle Lichtfallen nötig, um die Stromausbeute zu erhöhen (Shah (2020), S.40).

Des Weiteren werden im Versuch zwei verschiedene Arten von Siliziumzellen verwendet: Mono- und multikristalline. Monokristalline Solarzellen bestehen aus einem einzigen gewachsenem Kristall, im Gegensatz zu polykristallinen Solarzellen. Die Herstellung von Einkristallen ist zwar wesentlich aufwändiger und kostenintensiver, jedoch kann das Solarmodul bei Verwendung dieser einen deutlich höheren Wirkungsgrad erzielen. (Altekrüger (2008), S.26ff) Die Lage der Bandkanten sind für Silizium 1,1242eV (<https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/general-properties-of-silicon>, Stand: 9.9.21) und für CIS 1,02eV (<https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/cuinse2>, Stand: 9.9.21).

## 2.3 Sonnenspektrum

In erster Näherung kann das Spektrum der Sonne als das eines schwarzen Strahlers beschrieben werden. Auf dem Weg zur Erde wird allerdings ein Teil der Strahlung beispielsweise in der Atmosphäre reflektiert oder absorbiert, sodass hier nur ein reduziertes Sonnenpektrum gemessen wird. Ein Vergleich der Spektren findet sich in Abb. 2.6. (<https://www.leifiphysik.de/astronomie/sonne/grundwissen/sonnenspektrum>, Stand: 20.09.21)

## 2 Grundlagen

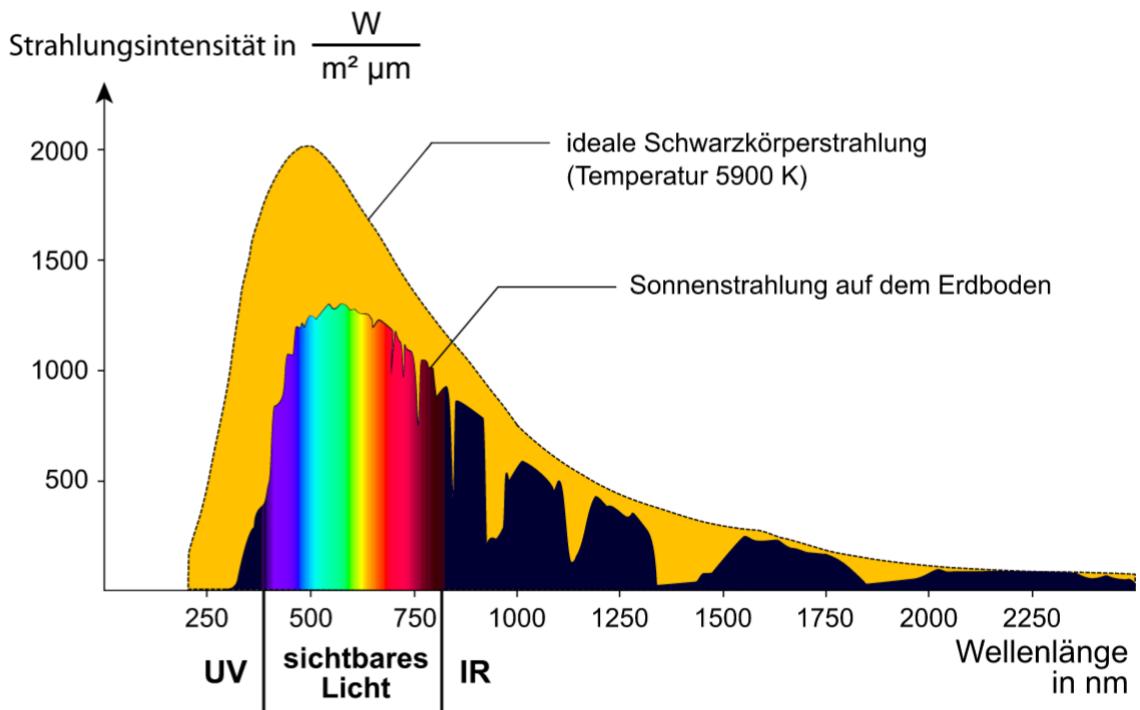


Abbildung 2.6: Ersatzschaltbild einer Solarzelle<sup>6</sup>

Für die Arbeit mit Solarmodulen ist zusätzlich die so genannte *AirMass* kurz *AM* von Bedeutung. Sie gibt an, welche Strecke das Sonnenlicht durch die Erdatmosphäre zurückgelegt hat im Vergleich zum kürzesten Weg (d.h. senkrechtem Einfall). *AM1* entspricht also der Sonnenstrahlung am Mittag oder am Äquator; fällt die Sonnenstrahlung dagegen unter einem flacheren Winkel ein vergrößert sich der Wert der *AM*. Ein oft benutzter Referenzwert ist *AM1,5* (entspricht einem Einfallswinkel von  $48,2^\circ$ ), für den bei klarem Himmel die Intensität der einfallenden Strahlung exakt  $1000 \frac{W}{m^2} = 1sun$  entspricht. *AM0* ist definiert für ungefilterte Sonneneinstrahlung ohne Atmosphären durchquerung, was für sämtliche extraterristischen Regionen von Bedeutung ist. Dort hat die Sonnenstrahlung die Intensität  $E_0 = 1361 \frac{W}{m^2}$ , welche auch als Solarkonstante bekannt ist. (<https://photovoltaiksolarstrom.com/photovoltaiklexikon/air-mass/>, Stand: 20.09.21)

<sup>6</sup><https://www.leifiphysik.de/astronomie/sonne/grundwissen/sonnenspektrum>, Stand: 20.09.21

## 2.4 Lock-in Verstärker

Der Lock-in Verstärker ist ein wichtiges Messgerät. Er wird dazu verwendet schwache Signale, die normalerweise weit unter dem Rauschen liegen noch aufzulösen. Dabei detektiert das Eingangssignal phasenempfindlich. Beim Messen eines Gleichspannungssignals wir das Signal von einem Chopper in den rauscharmen Bereich "hochgemischt". Dies geschieht, da bei niedrigen Frequenzen das "rosa Rauschen" dominiert. (Herink (2021))

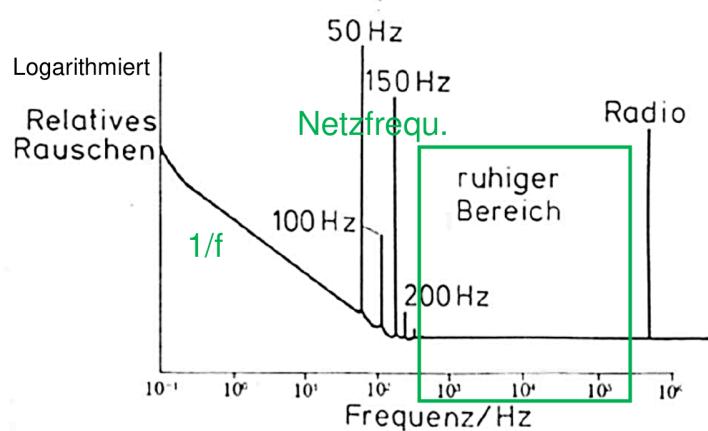


Abbildung 2.7: Spektrum der Rauschleistung in Abhängigkeit der Frequenz <sup>7</sup>

Im Lock-in Verstärker selbst wird das Signal dann verstärkt und mit einem Referenzsignal  $V_R$  gleich der Chopperfrequenz gemischt. Dabei entsteht nach Additionstheoremen für Sinus und Cosinus eine Differenz- und Summenfrequenz. Dann Filtert man die Differenzfrequenz heraus, indem man einen Tiefpassfilter hinter den Mischer stellt. Im Anschluss wird dann die Spannung abgegriffen. Der Vorteil dieses Aufbaus ist, dass die beiden Modulationen durch Chopper und Mischer zusammen wie ein sehr schmalbandiger Filter wirken. Dabei können Bandbreiten von bis zu 0,01Hz erreicht werden. Außerdem mittelt sich das Rauschen weg, das es in Beziehung zu  $V_R$  unkorreliert ist. Die ausgegebene Spannung hängt jetzt aber noch von der Phasenbeziehung zwischen dem modulierten Eingangssignal  $V_S$  und dem Referenzsignal  $V_R$ , das am Mischer ankommt, ab. Deswegen fügt man, wie in Grafik 2.8 zu sehen, einen zweiten Arm ein, auf welchen  $V_R$  um  $90^\circ$  verzögert wird. Aus den beiden Amplituden  $X$  und  $Y$  berechnet man dann die Amplitude  $R$  des Ausgangssignals folgendermaßen:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

<sup>7</sup>Herink (2021)

<sup>8</sup>[https://www.zhinst.com/sites/default/files/li\\_primer/zi\\_whitepaper\\_principles\\_of\\_lock-in\\_detection.pdf](https://www.zhinst.com/sites/default/files/li_primer/zi_whitepaper_principles_of_lock-in_detection.pdf)

## 2 Grundlagen

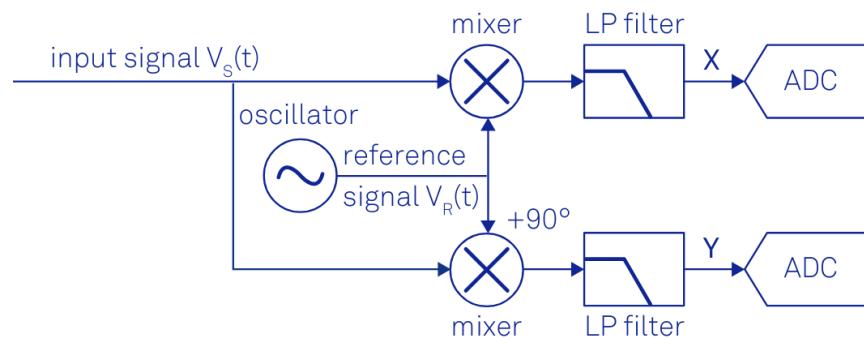


Abbildung 2.8: Lock-in Verstärker mit schon moduliertem Eingangssignal  $V_S$  <sup>8</sup>

# 3 Methodik

## 3.1 Versuchsaufbau zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit

Der Versuchsaufbau wird wie in Abbildung 3.1 gezeigt aufgebaut. Dabei wird das Licht einer 150 W Xe-Bogenlampe auf einen Monochromator gestrahlt. Dieser, ein Gittermonochromator mit Gitterkonstante  $1180\text{mm}^{-1}$ , führt das Licht weiter auf einen Strahlteiler, welcher 50% des Lichtes durchlässt und 50% auf das Power-Meter lenkt. Der durchgelassene Strahl wird von einem Chopper moduliert, bevor das Licht auf die Solarzelle fällt. Der Lock-in Verstärker erhält sein Referenzsignal vom Chopper. Die Solarzelle ist kurzgeschlossen. Dabei wird der Kurzschlussstrom ermittelt, indem man jenen auf einen U/I-Wandler leitet und die von diesem ausgegebene Spannung auf den Lock-in Verstärker gibt.

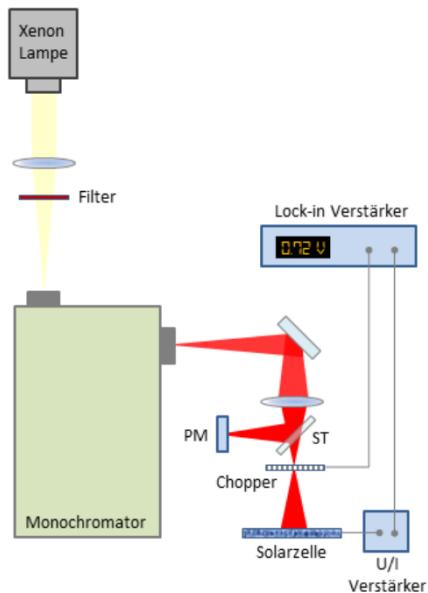


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit. PM: Power-Meter, ST: polka-dot Strahlteiler

Die Wellenlänge des Lichtes, welches auf der Solarzelle ankommt, wird durch ein Drehrad an der Seite des Monochromators eingestellt. Dabei muss ab Wellenlänge größer als

### 3 Methodik

600nm wurde ein Kantenfilter vorgeschoben, um die Beugungsmaxima höherer Ordnung abzublocken. Gemessen werden in beiden Versuchsteilen jeweils die Module mono-Si, multi-Si und CIS. Dabei wird Licht im Bereich 300-1200nm betrachtet. Die Dateien mit den Rohdaten befinden sich im Anhang.

## 3.2 Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie

Bei dieser Messung wird der Aufbau wie in Abbildung 3.2 verwendet. Der Baustrahler ist in diesem Fall die Lichtquelle. Dieser steht hinter zwei Glasscheiben, welche die Infrarotstrahlung abhalten sollen, damit sich die Solarzelle nicht so stark erhitzt. Außerdem wird die Solarzelle mit einem Ventilator gekühlt. Der Abstand, welcher mit einem Stelltransformator betrieben wird, steht in einem Abstand von circa 50cm zur Solarzelle.

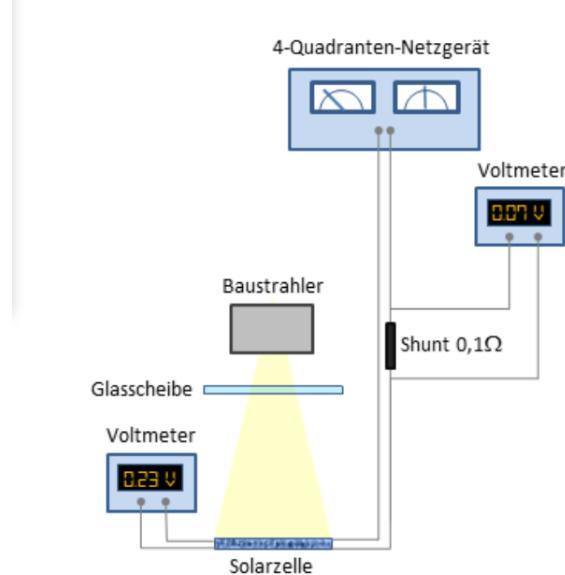


Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zur Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie

Der Spannungsabfall wird dabei über einen hochpräzisen  $0.1\Omega$  Shunt gemessen. Gemessen werden Intensitäten bis 0.25sun. Dies wird bewerkstelligt, indem man am Stelltransformator die Werte 130V, 180V und 230V einstellt. Außerdem verwendet man ein Vier-Quadranten-Netzgerät um die U-I-Kennlinien zu messen. Solange der Anstieg in der Kurve mit der Spannungsregelung noch kontrollierbar ist, verwendet am besten Diesen. Um das Modul vor zu hohen Strömen zu schützen, schaltet man danach auf den Stromregelungsmodus. Gemessen wird in einem Wertebereich von -1V bis 1A, beziehungsweise bei dem CIS Modul nur bis 40mA. Vor jeder Messung wird die Beleuchtungsstärke mit einer kalibrierten Solarzelle gemessen. Bei den größeren Modulen werden 5 Messwerte genommen und anschließend gemittelt, um das ungleichmäßige Strahlen des Baustrahlers

### *3.2 Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie*

zu berücksichtigen. Die Messwerte werden an den Ecken und in der Mitte genommen. Die kalibrierte Solarzelle hat dabei die Kalibration 282mA/sun. Diese wird wieder über einen hochpräzisen Shunt von  $0.1 \Omega$  gemessen.

# 4 Auswertung und Diskussion

## 4.1 Spektrale Empfindlichkeit

### 4.1.1 Lock-in-Verstärker

Um den Photostrom  $I_{\text{Ph}}$  zu berechnen, muss zunächst die am Lock-in-Verstärker abgelesene Spannung in die tatsächlich anliegende Spannung umgerechnet werden. Der Verstärker hat als Output einen Wert zwischen 0V und 10V. Berücksichtigt man noch die Sensitivity des Verstärkers erhält man für die anliegende Spannung  $U_{\text{rms}}$ :

$$U_{\text{rms}} = \frac{U_{\text{angezeigt}}}{10V} \cdot \text{Sensitivity} \quad (4.1)$$

Nun muss noch berücksichtigt werden, dass der Lock-in-Verstärker das Messsignal, das durch den Chopper (annähernd) rechteckförmig moduliert wurde, mit dem sinusförmigen Referenzsignal des Choppers faltet, bevor die Faltung durch einen Tiefpass geleitet wird. Ein Rechtecksignal kann geschrieben werden als:

$$f_{\text{Rechteck}} = \frac{4U_{\text{Rechteck}}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)\omega t)}{2k-1}, \quad (4.2)$$

wobei  $U_{\text{Rechteck}}$  die Amplitude des Signals bezeichnet. Faltet man dieses nun mit einem Signal der Frequenz  $\omega$ , so trägt nach durchlaufen des Tiefpasses nur der Anteil am Rechtecksignal mit ebenfalls  $\omega$  bei, also der Term für  $k = 1$ . Die gemessene Spannung ergibt sich also zu:

$$\begin{aligned} U_{\text{ein}} &= \frac{4U_{\text{Rechteck}}}{\pi} \sin(\omega t) \\ \implies U_{\text{rms}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4U_{\text{Rechteck}}}{\pi} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Stellt man nun nach der Amplitude der Spannung  $U_{\text{Rechteck}}$  um, so erhält man:

## 4.1 Spektrale Empfindlichkeit

$$U_{\text{Rechteck}} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} U_{\text{rms}} \quad (4.4)$$

$$\implies U_{\text{Rechteck}} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} \cdot \text{Sensitivity} \cdot \frac{U_{\text{angezeigt}}}{10V} \quad (4.5)$$

Um den Photostrom  $I_{\text{Ph}}$  zu erhalten, muss jetzt nur noch die tatsächliche Spannung mithilfe des Faktors des U/I-Verstärkers umgerechnet werden. Dabei muss noch ein Faktor 2 berücksichtigt werden, da der Chopper die Hälfte des einfallenden Lichts abhält:

$$\begin{aligned} I_{\text{Ph}} &= \frac{2U_{\text{Rechteck}}}{1 \frac{kV}{A}} \\ &= \frac{\pi\sqrt{2}}{4} \cdot \text{Sensitivity} \cdot \frac{U_{\text{angezeigt}}}{10000 \frac{V^2}{A}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

### 4.1.2 Spektrale Empfindlichkeit SR und Externe Quanteneffizienz EQE

Die Spektrale Empfindlichkeit  $SR$  berechnet sich nach:

$$SR = \frac{I_{\text{Ph}}}{P_{\lambda}}, \quad (4.7)$$

mit Photostrom  $I_{\text{Ph}}$  aus Gl. 4.6. Dabei muss noch berücksichtigt werden, dass für alle Messwerte noch der Photostrom aus der Untergrundsmessung abgezogen wird.

Die in die Zelle einfallende Leistung  $P_{\lambda}$  muss erst noch aus der in das Powermeter einfallende Leistung berechnet werden. Es gilt:

$$\begin{aligned} P_{\text{PM}} &= P_{\text{ges}}R \\ P_{\lambda} &= P_{\text{ges}}T \\ \implies P_{\lambda} &= P_{\text{PM}} \frac{T}{R}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

mit Reflektionskoeffizient des Strahlteilers  $R$ , Transmissionskoeffizient  $T$  und gesamter Lichtleistung vor Auftreffen auf den Teiler  $P_{\text{ges}}$ . Für die Werte von  $\frac{T}{R}$  wurden die Inversen von Abschätzungen der Werte  $\frac{R}{T}$  aus Anhang A.2 des Versuchsskriptes benutzt. Bei der Berechnung der einfallenden Leistung muss für das CIS-Modul noch ein Faktor  $\frac{1}{11}$  berücksichtigt werden, da das Modul aus 11 einzelnen Zellen besteht und die Leistung sich demnach auf diese näherungsweise gleichmäßig aufteilt (tatsächlich wohl eher ungleichmäßig, je nach Positionierung der Zelle im Strahl, dennoch soll dies zur Vereinfachung der Rechnung angenommen werden). Der Photostrom bleibt allerdings gleich dem gemessenen, da die Zellen in Reihe geschalten sind.

#### 4 Auswertung und Diskussion

Aus den Werten für  $SR$  lassen sich nun auch die für die Externe Quanteneffizienz  $EQE$  berechnen:

$$EQE = \frac{hc}{e} \frac{SR}{\lambda} \quad (4.9)$$

Die berechneten Werte finden sich in Tab. 4.1 - 4.3 wieder. Die Messdaten können dem Protokoll entnommen werden.

Wellenlänge(nm)	$I_{Ph}(A)$	$\frac{T}{R}$	$P_{ges}(\mu W)$	$SE(\frac{A}{W})$	$EQE$
363.2	0.000004	1.2262	57.8540	0.0682	0.2330
400.3	0.000013	1.2239	88.2741	0.1521	0.4713
450.8	0.000037	1.2254	150.8578	0.2445	0.6725
499.2	0.000056	1.2004	183.5534	0.3059	0.7597
599.1	0.000099	1.1806	249.8229	0.3959	0.8194
699.9	0.000113	1.1587	229.3163	0.4914	0.8705
799.5	0.000103	1.1876	179.2161	0.5754	0.8924
899.8	0.000156	1.1402	244.3557	0.6393	0.8809
949.4	0.000166	1.0604	245.0689	0.6773	0.8845
1000.5	0.000162	1.0438	250.4175	0.6460	0.8005
1051.2	0.000086	1.0373	177.9045	0.4823	0.5688
1099.6	0.000021	1.0395	84.6465	0.2434	0.2745
1123.3	0.000013	1.0411	83.7376	0.1553	0.1715

Tabelle 4.1: Berechnete Werte für die monokristalline Siliziumzelle

Wellenlänge(nm)	$I_{Ph}(A)$	$\frac{T}{R}$	$P_{ges}(\mu W)$	$SE(\frac{A}{W})$	$EQE$
363.2	0.000003	1.2262	55.2053	0.0492	0.1680
400.3	0.000010	1.2239	84.1738	0.1199	0.3714
450.8	0.000031	1.2254	143.6274	0.2141	0.5889
499.2	0.000052	1.2004	174.9099	0.2982	0.7407
599.1	0.000090	1.1806	237.7804	0.3772	0.7807
699.9	0.000100	1.1587	217.1494	0.4622	0.8188
799.5	0.000088	1.1876	168.8836	0.5193	0.8054
899.8	0.000111	1.1402	210.7183	0.5280	0.7275
949.4	0.000109	1.0604	213.9978	0.5074	0.6626
1000.5	0.000110	1.0438	261.7954	0.4207	0.5213
1051.2	0.000042	1.0373	179.9792	0.2308	0.2722
1099.6	0.000008	1.0395	85.8004	0.0876	0.09879
1123.3	0.000004	1.0411	84.3831	0.0461	0.05088

Tabelle 4.2: Berechnete Werte für die multikristalline Siliziumzelle

#### 4.1 Spektrale Empfindlichkeit

Wellenlänge(nm)	$I_{\text{Ph}}(A)$	$\frac{T}{R}$	$P_{\text{ges}}(\mu W)$	$SE(\frac{A}{W})$	$EQE$
363.2	6.1089e-08	1.2262	4.9607	0.01231	0.04203
400.3	8.5614e-07	1.2239	7.5865	0.1128	0.3495
450.8	3.0420e-06	1.2254	13.0013	0.2339	0.6435
499.2	4.5348e-06	1.2004	15.8245	0.2865	0.7117
599.1	8.1713e-06	1.1806	21.5734	0.3787	0.7838
699.9	9.0599e-06	1.1587	19.8567	0.4562	0.8082
799.5	8.1047e-06	1.1876	15.5581	0.5209	0.8078
899.8	1.1148e-05	1.1402	20.4312	0.5456	0.7518
949.4	1.1281e-05	1.0604	20.3412	0.5546	0.7242
1000.5	1.2347e-05	1.0438	23.4484	0.5265	0.6525
1051.2	7.5271e-06	1.0373	16.3334	0.4608	0.5435
1099.6	2.6954e-06	1.0395	7.7783	0.3465	0.3907
1123.3	2.1823e-06	1.0411	7.6569	0.2850	0.3145

Tabelle 4.3: Berechnete Werte für das CIS-Modul

Die Lage der Bandkanten sind für Silizium 1,1242eV (<https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/general-properties-of-silicon>, Stand: 9.9.21) und für CIS 1,02eV (<https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/cuinse2>, Stand: 9.9.21). Die Lage dieser im Wellenängenraum berechnet sich nach:

$$\lambda_{\text{Bandkante}} = \frac{hc}{E_{\text{Bandkante}}} \quad (4.10)$$

Daraus folgt:

$$\lambda_{\text{Si}} = 1102,866\text{nm}, \quad \lambda_{\text{CIS}} = 1215,531\text{nm} \quad (4.11)$$

In den folgenden Abbildungen 4.1 und 4.2 wurden die spektrale Empfindlichkeit und die externe Quanteneffizienz gegen die Wellenlänge aufgetragen. Dabei wurden auch die jeweiligen Bandkanten aus Gl. 4.11 eingezeichnet.

#### 4 Auswertung und Diskussion

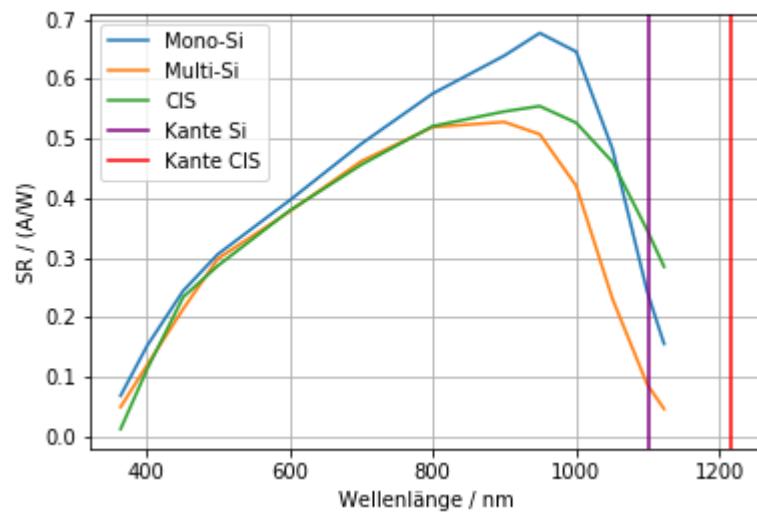


Abbildung 4.1: Verlauf der gemessenen Werte von  $SR$  der verschiedenen Zellen aufgetragen gegen die Wellenlänge

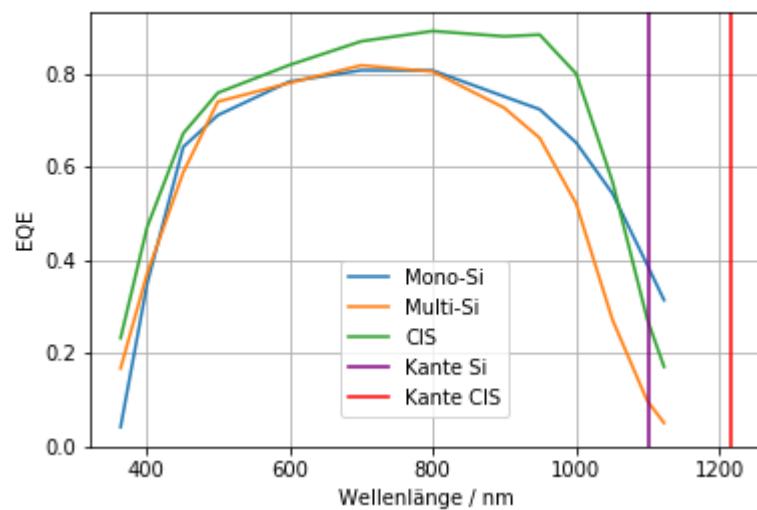


Abbildung 4.2: Verlauf der gemessenen Werte von  $EQE$  der verschiedenen Zellen aufgetragen gegen die Wellenlänge

#### 4.1 Spektrale Empfindlichkeit

Bei den Siliziummodulen ist zu erkennen, dass sich trotz Überschreitung der Bandkante dennoch eine endliche spektrale Empfindlichkeit aus den Messungen ergibt. Die Bandkante des CIS-Moduls liegt bei einer höheren Wellenlänge als der Messpunkt der größten Wellenlänge, deshalb kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob das Problem des Überschreitens der Bandkante hier auch auftreten würde. Dennoch lässt sich an Abb. 4.1 gut erkennen, dass die Lage der Bandkante annäherungsweise mit dem Nulldurchgang des Graphen der spektralen Empfindlichkeit übereinstimmt. Als Erklärung, dass hinter der Bandkante noch Messwerte vorliegen, können Messfehler dienen. Allerdings ist die Überschreitung nicht sehr groß, daher kann auch eine Abweichung der realen Solarzelle vom Bändermodell die Ursache sein.

Als Anhaltspunkt zum Vergleich sollen die Abb. 4.3 und 4.4 dienen, in denen  $SR$  und  $EQE$  für eine multikristalline Solarzelle gegen die Wellenlänge aufgetragen ist. Es ist gut zu erkennen, dass die Form des Verlaufs mit den gemessenen Kurven übereinstimmt. Im Vergleichsgraphen werden zwar deutlich höhere Werte für  $SR$  und  $EQE$  erreicht, es ist aber anzunehmen, dass der Idealitätsfaktor  $n$  der dort in präzisen Labormessungen verwendeten Zellen deutlich besser war und dass infolgedessen die Ausbeute höher war. Aber auch in diesen Messungen ist deutlich zu sehen, dass die Bandkante bei  $\lambda = 1102,866\text{nm}$  deutlich überschritten wird. Somit kann das Überschreiten in unserer Messung wahrscheinlich auf die Abweichungen der realen Zelle im Bändermodell zurückgeführt werden.

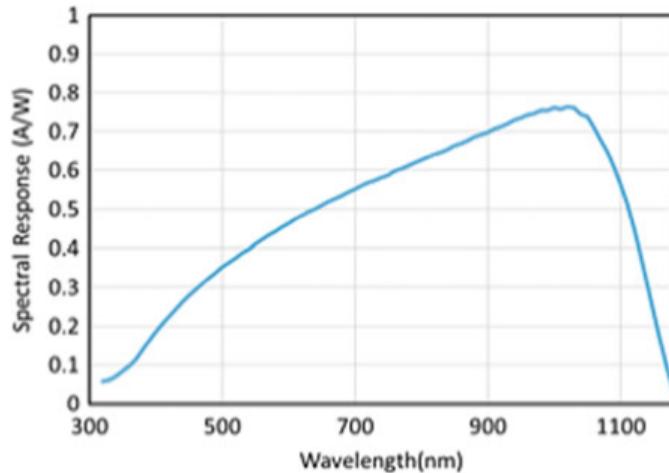


Abbildung 4.3: Vergleichsdaten für den Verlauf von  $SR$  einer multikristallinen Siliziumzelle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shah (2020), S.68

<sup>2</sup>Shah (2020), S.68

#### 4 Auswertung und Diskussion

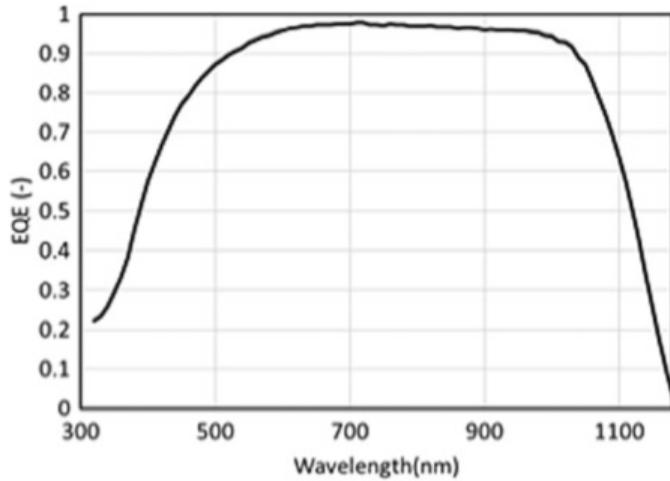


Abbildung 4.4: Vergleichsdaten für den Verlauf von  $EQE$  einer multikristallinen Siliziumzelle <sup>2</sup>

#### 4.1.3 Ideale Externe Quanteneffizienz

Nimmt man nun eine ideale externe Quanteneffizienz von 1 an, folgt aus Gl. 4.9:

$$SR = \frac{e}{hc} \lambda \quad (4.12)$$

Der Graph der spektralen Empfindlichkeit ist somit zunächst eine Gerade mit Steigung  $\frac{e}{hc}$ , bis diese Gerade auf die Vertikale der Bandkante trifft. Da nach Überschreitung der Bandkante kein Stromfluss mehr möglich ist (höhere Wellenlänge  $\leftrightarrow$  niedrigere Energie), fällt die Gerade dort abrupt ab. Der Verlauf ist in Abb. 4.5 zu sehen. Hierbei ist der Verlauf beider Modulararten erst die rote Ursprungsgerade, die dann im Fall der Siliziumzellen mit der violetten Vertikalen, im Fall des CIS-Moduls mit der roten Vertikalen abfallen. Betrachtet man die Graphen der Messwerte wird klar, dass die verwendeten Zellen zwar kein Ideal sind. Dennoch lässt sich in ihrem Verlauf ein Trend zum idealen Graphen erkennen. Dieser Umstand soll in der nächsten Teilaufgabe weiter vertieft werden, wenn der Idealitätsfaktor bestimmt wird.

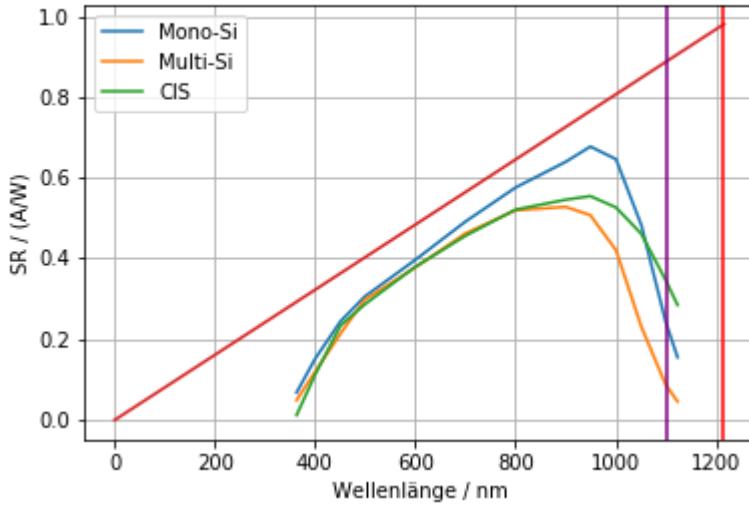


Abbildung 4.5: Verlauf von  $SR$  bei einer idealen  $EQE = 1$ ; der Graph für die Si-Zellen fällt mit der violetten Vertikalen ab, der für das CIS-Modul mit der roten. Zum Vergleich die Messwerte für  $SR$ .

## 4.2 Teilauswertung U/I-Kennlinie

Die Messwerte für die beiden Spannungen finden sich im Protokoll wieder. Dort wurde auch bereits die Werte für die Stromstärke nach dem Ohmschen Gesetz berechnet. Da der  $0,1\Omega$ -Widerstand sehr präzise ist, kann dessen Fehler vernachlässigt werden. Für die Spannungswerte wurden die Fehler wie im Protokoll angegeben abgeschätzt. Die sich daraus ergebenden U/I-Kennlinien für die verschiedenen Beleuchtungsstärken (dunkel, 130, 180 bzw 230V am Baustrahler) sind in den Abb. 4.6 - 4.8 dargestellt.

Dabei ist der Diodenkennliniencharakter bei den Dunkelmessungen bzw die Verschiebung in negative I-Richtung vor allem bei den Siliziumzellen gut zu erkennen. Einzelne Ausreißer, wie z.B. bei der Kennlinie bei 130V in Abb. 4.6 oder bei der Kennlinie bei 180V in Abb. 4.7, dürften auf Messfehler zurückzuführen sein. Der Knick im Graphen bei 230V in Abb. 4.6 beruht auf der Unsauberkeit, dass in diesem Messbereich zu wenige Messpunkte gewählt wurden. Dass sich die Kennlinien der Dunkelmessung und der Messungen bei eingeschaltetem Licht beim CIS-Modul schneiden, kann daran liegen, dass diese Kennlinie nachgemessen wurde und da andere Parameter (Temperatur etc) vorlagen.

Beim CIS-Modul ist außerdem der wesentlich flachere Anstieg der Kennlinie auffällig. Hier war während des Versuchs sogar eine reine Spannungsregelung möglich. Es scheint zumindest so, dass das CIS-Modul am weitesten von einer idealen Solarzelle (und damit einer idealen Diodenkennlinie) entfernt ist. Dies kann in der weiteren Auswertung noch gesehen werden.

#### 4 Auswertung und Diskussion

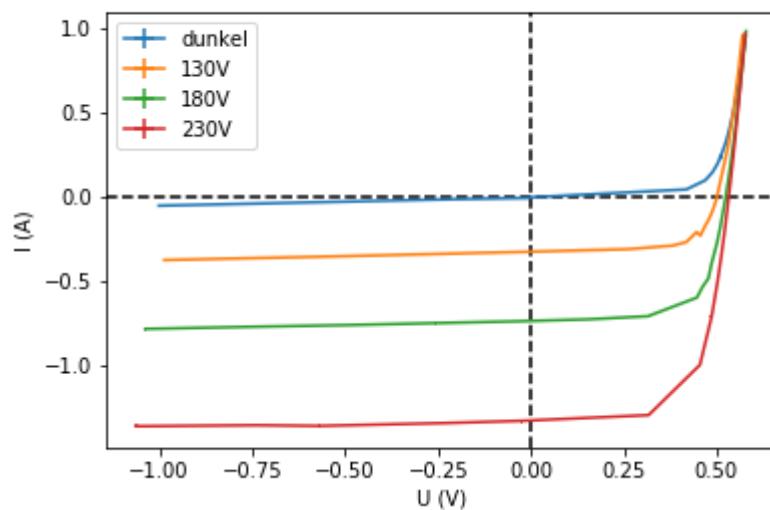


Abbildung 4.6: U/I-Kennlinie für das monokristalline Siliziummodul

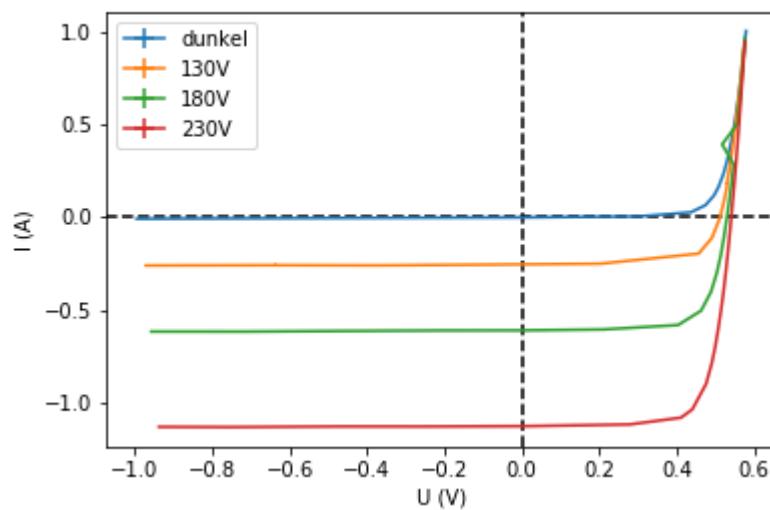


Abbildung 4.7: U/I-Kennlinie für das multikristalline Siliziummodul

#### 4.2 Teilauswertung U/I-Kennlinie

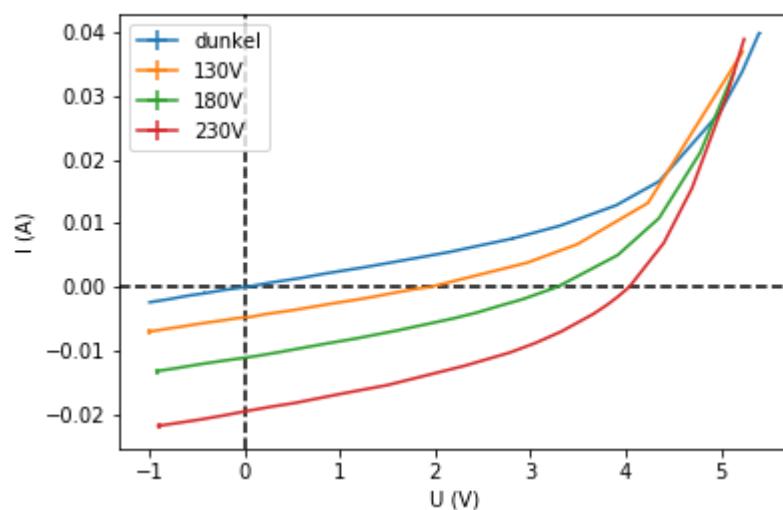


Abbildung 4.8: U/I-Kennlinie für das CIS-Modul

## 4 Auswertung und Diskussion

### 4.3 Fitten der Shockley-Gleichung

Aus den Daten wurde mithilfe eines MatLab-Programmes ref die Parameter, welche in der Shockley-Gleichung vorkommen ref gefittet. Dabei wird beachtet, dass bei der CIS-Zelle einen Reihenschaltung von 11 kleinen Solarmodulen vorhanden ist. Daher wird die Spannung durch 11 geteilt. Leider erhält man trotzdem sehr fragwürdige Parameter, beispielsweise unrealistisch hohe Temperaturen als Umgebungsbedingungen hatten. Diese sind aber ausgeschlossen, da die Temperatur als Referenz gemessen wurde. Interessant ist vor allem, dass sich mit dem Programm vor allem die Multi- und MonoSi besser mit der Shockley-Gleichung gefittet werden, als die CIS Solarzelle, was aber auch gut an der fehlerhaften Anwendung des Programmes oder dem Programm selbst.

#### 4.3.1 CIS-Solarmodul

Nach dem Fitten mit dem oben erwähnten Programm erhält man folgende Abbildungen und Parameter.

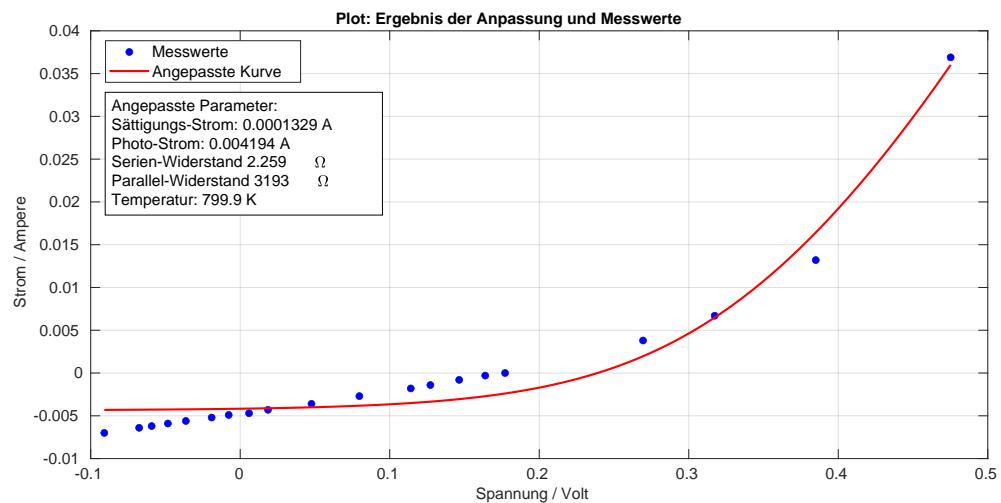


Abbildung 4.9: Gefittete Shockley-Gleichung an das CIS-Modul bei 130V Trafospannung

Dabei fällt vor allem die ungewöhnlich hohe Temperatur. Der Reihenwiderstand ist größer als der der anderen Module. Dies ist jedoch normal, da es ja auch 11 Module sind

### 4.3 Fitten der Shockley-Gleichung

und somit 11 Mal die entsprechenden Kontaktstellen existieren. Der Parallelwiderstand ist groß, was aber ein gutes Zeichen ist, weil das bedeutet, dass der Leckstrom gering ist. Im Gesamten muss man sagen, dass sich bei dem CIS-Modul kein schöner exponentieller Zusammenhang finden lässt. Nicht desto trotz ist dieser eine ausreichend gute Beschreibung der Wirklichkeit um Aussagen über die CIS-Zelle zu machen.

Bei allen Solarzellen finden sich die Fits im Anhang A.2.

#### 4.3.2 Mono- und MultiSi-Zellen

Auch Mono- und MultiSi-Module wurden versucht mit dem Programm zu fitten. Dabei funktionierte das hier sichtlich besser.

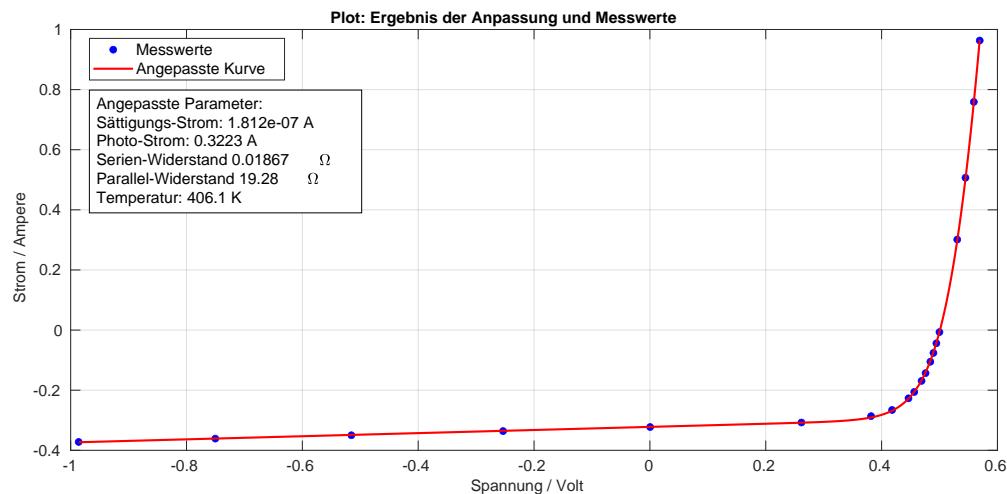


Abbildung 4.10: Gefittete Shockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 130V

Dabei ist, wie erwartet, der Photostrom  $I_{Ph}$  bei steigender Helligkeit immer stärker. Die restlichen Grafiken befinden sich im Anhang. Bei allen ist schön das "nach unten verschieben" bei höherer Lichtleistung beobachtbar.

Die Füllfaktoren  $FF$  und Strom und Spannung am  $MPP$  ergeben sich nach grafischer Auswertung. Dabei wird mit dem Computer das U-I-Paar gesucht, welches die maximale Fläche im vierten Quadranten der U-I-Ebene einschließt. Um den Füllfaktor zu erhalten werden dann noch  $U_{OC}$  und  $I_{Ph}$  bestimmt und dann wird dieser wie in den Grundlagen

#### 4 Auswertung und Diskussion

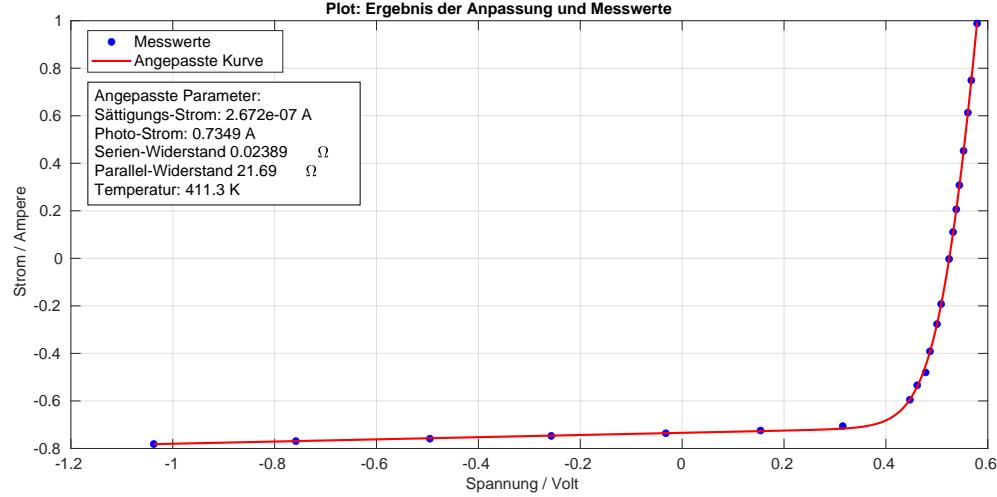


Abbildung 4.11: Gefittete Shockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 180V

beschrieben errechnet. Damit erhält man folgende Werte :

	Spannung am <i>MPP</i> (V)	Strom am <i>MPP</i> (A)	<i>FF</i>
SiMono bei 130V	0.405	-0.27	0.69
SiMono bei 180V	0.416	-0.66	0.71
SiMono bei 230V	0.412	-1.19	0.69
SiMulti bei 130V	0.398	-0.25	0.70
SiMulti bei 180V	0.414	-0.55	0.71
SiMulti bei 230V	0.435	-1.05	0.74
CIS bei 130V	0.151	-0.0029	0.44
CIS bei 180V	0.202	-0.0073	0.48
CIS bei 230V	0.238	-0.0144	0.51

Dabei ist auffällig, dass am *MPP* die Spannungswerte immer nahezu identisch sind. Die Stromwerte steigen aber eindeutig. Außerdem ist der niedrige Füllfaktor bei den CIS-Modul auffällig. Daraus würde man ein langsames Ansteigen der Kurve vermuten, welches man dann im Bild auch beobachten kann. Die CIS-Zelle ist somit am weitesten

### 4.3 Fitten der Shockley-Gleichung

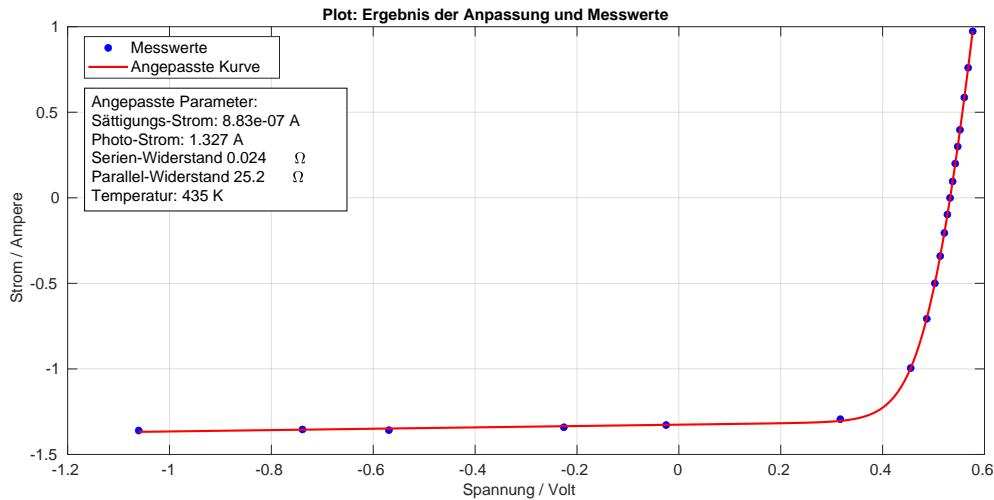


Abbildung 4.12: Gefittete Shockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 230V

von einer idealen Solarzelle entfernt, da sie den langsamen Anstieg hat. Das erklärt auch, warum beim fitten die hohe Temperatur vorgeschlagen wird, da diese zu einem langsameren Anstieg der U-I-Kennlinie führt. Insgesamt beschreibt das Ersatzschaltbild die CIS-Zelle möglicherweise nicht gut.

## 4 Auswertung und Diskussion

### 4.3.3 Idealitätsfaktor

Der Idealitätsfaktor  $n$  ist ein Faktor, der beschreibt, wie gut sich der Halbleiter, beziehungsweise hier der pn-Übergang durch das Bändermodell darstellen lässt. Dabei kann man diesen relativ einfach aus der Shockley-Gleichung gewinnen.

$$n = \frac{qU}{kT} \frac{1}{\ln \left( \frac{I_{\text{Ph}} + \frac{R_S(U-U)}{R_P} + I}{I_0} + 1 \right)} \quad (4.13)$$

Bei der Gleichung ist  $I_0$  der Sättigungsstrom,  $I_{\text{Ph}}$  der Fotostrom,  $U$  die Spannung,  $R_S$  und  $R_P$  der Reihen- und Parallelwiderstand.

Gleichung 4.13 kann man nochmal vereinfachen, indem man an der Stelle  $(U,I) = (U_{\text{OC}}, 0\text{A})$  einsetzt.

$$n = \frac{qU}{kT} \frac{1}{\ln \left( \frac{I_{\text{Ph}} - \frac{U_{\text{OC}}}{R_P}}{I_0} + 1 \right)} \quad (4.14)$$

Setzt man die in Kapitel 4.3 erhaltenen Werte ein, so erhält man als Idealitätsfaktoren die folgenden Werte.

MonoSi-Modul	$n = 1.004$
MultiSi-Modul	$n = 1.004$
CIS-Modul	$n = 1.003$

Tabelle 4.4: Idealitätsfaktoren der Solar-Module

Wie bei den obigen Werten ist es schwer überhaupt Fehler anzugeben, da die einzelnen Parameter aus der Shockley-Gleichung schwer im Fehler abzuschätzen sind. Eine Unsicherheit von 10% wäre jedoch sicher nicht untertrieben. Im Gesamten kann man sagen, dass die obigen Werte durchaus realistisch erscheinen. Eine Diode sollte einen Idealitätsfaktor zwischen 1-2 haben. Hier liegen wir schon nah an 1, dass heißt, dass sich die Solar-Module sehr gut durch das Bändermodell beschreiben lassen.

### 4.3.4 Wirkungsgrad

Eine spannende Frage ist nun, wie es sich mit dem Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke verhält. Dabei berechnet man die Lichtintensität aus den Referenzmessungen mit der kalibrierten Solarzelle. Mithilfe dieser bestimmt man die Lichtleitung  $P_L$ . Der Wirkungsgrad  $\eta$  ergibt sich dann wie im theoretischen Teil beschrieben.

Dabei kann man einen Trend zu einem besseren Wirkungsgrad bei höheren Frequenzen sehen. Dies ist vermutlich ein temperaturbedingter Effekt, da die Module bei höheren Intensitäten deutlich wärmer wurden. Des Weiteren sieht man schön den Unterschied im Wirkungsgrad zwischen der MonoSi- und der MultiSi-Solarzelle. Die monokristalline

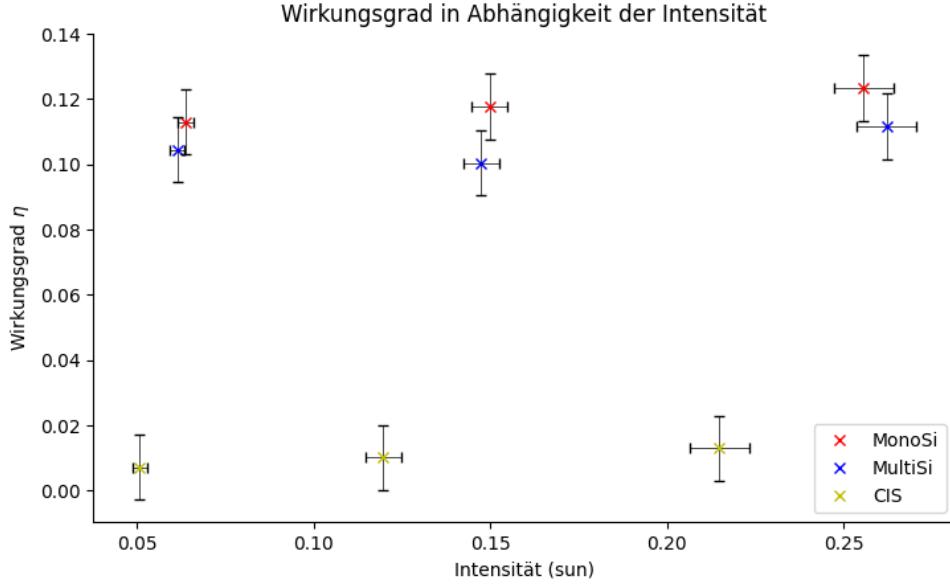


Abbildung 4.13: Wirkungsgrad verschiedener Solarmodule bei Intensitäten bis zu 0,25 sun. Die Fehler sind Fehlerabschätzungen, beispielsweise für die X-Werte aus der Schwankung der Intensität bei der Messung mir der geeichten Solarzelle

Solarzelle hat, wie erwartet, einen etwas höheren Wirkungsgrad. Dabei sind beide etwas zu hoch angesiedelt. Die CIS-Zelle hingegen hat einen deutlich zu niedrigen Wirkungsgrad, was realistisch scheint, da diese immer ein bisschen schlechter als die beiden obigen Module sein sollte. Es ist realistisch, dass man bei Werten unter 20% bleibt für den Wirkungsgrad. Auffällig ist dabei noch, dass die Spannung  $U_{OC}$  relativ konstant bleibt, der Photostrom hingegen linear mit der Beleuchtungsstärke zunimmt. Im Gesamten bleibt die Form der Kurve jedoch ähnlich, was man auch an konstanten Füllfaktoren sieht. Die Grafiken dazu im Anhang.

### 4.3.5 Extrapolieren der Photostroms

Der Photostrom  $I_{Ph}$  wird bis 1sun extrapoliert. Dabei wird ein linearer Zusammenhang angenommen, da eine Zunahme der Lichtintensität direkt proportional zu der Anzahl der Photonen ist. Der Photostrom hängt von der Anzahl der Elektronen ab, die durch den photoelektrischen Effekt zum Photostrom beitragen können. Diese ist proportional zur Anzahl der eintreffenden Photonen. Durch lineare Regression ergibt sich das folgende Bild für die extrapolierten Werte.

Dabei sieht man, dass die Daten sehr gut in einen linearen Zusammenhang zu setzen sind. Die extrapolierten Werte für 1 sun sind in Tabelle 4.5.

#### 4 Auswertung und Diskussion

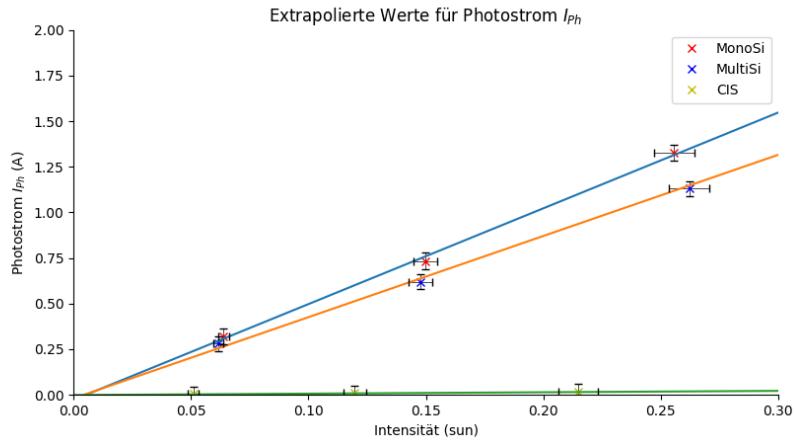


Abbildung 4.14: Ausschnitt der obigen Abbildung

Solarzellenart    Extrapolierter Wert

CIS	0,07 A
MonoSi	5,2 A
MultiSi	4,4 A

Tabelle 4.5: Interpolierte Werte der drei Solarzellen bei 1 sun

## **5 Fazit**

In diesem Versuch wurde sich ausgiebig mit verschiedenen Solarzellen beschäftigt. An den U/I-Kennlinien wurde sichtbar, dass Solarzellen nach den selben Prinzipien wie eine Diode funktioniert, was das Ersatzschaltbild aus den Grundlagen bestätigt. Zudem wurden viele Faktoren betrachtet, an denen die Güte einer Solarzelle gemessen werden kann. Dabei stellte sich heraus, dass die reinen Siliziumzellen wesentlich effektiver sind als die CIS-Zellen. Wichtig war auch die Beschäftigung mit zwei wichtigen Geräten, dem Lock-in-Verstärker und dem Vier-Quanten-Netzgerät. Ersterer war, vor allem wenn man die geringen berechneten Ströme betrachtet, sehr sinnvoll, um ein geeignetes Messergebnis zu bekommen, während das Netzgerät die Sicherheit der Messung gewährleistete, indem es durch die freie Wahl des zu regelnden Parameters einer Überlastung und damit einer Beschädigung der Solarmodule entgegenwirkte.

# A Anhang

## A.1 Methodik

### A.1.1 Versuchsaufbauten

#### Aufbau spektrale Empfindlichkeit

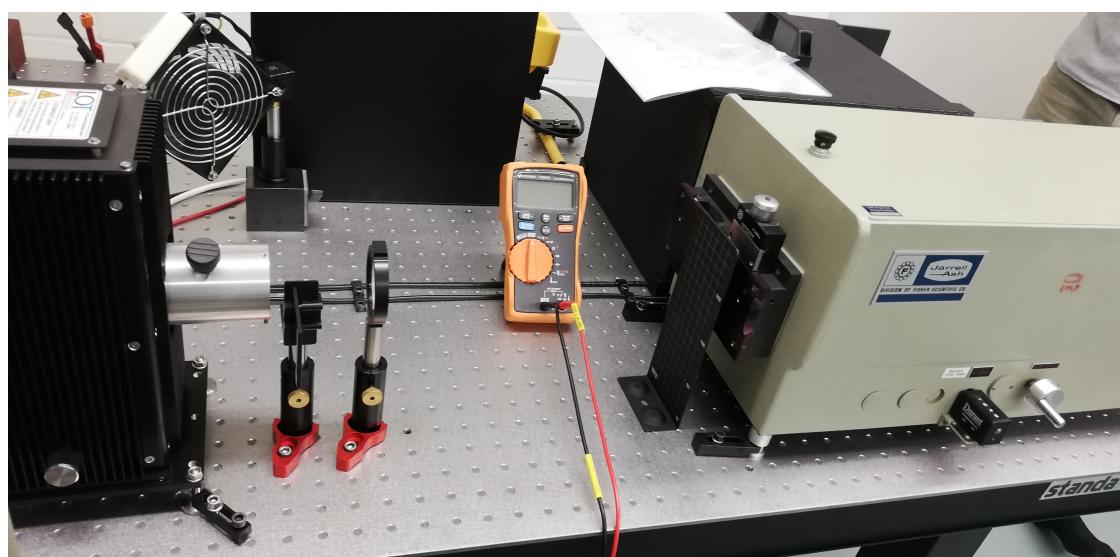


Abbildung A.1: Xenon-Lampe mit vorgelagertem Filter

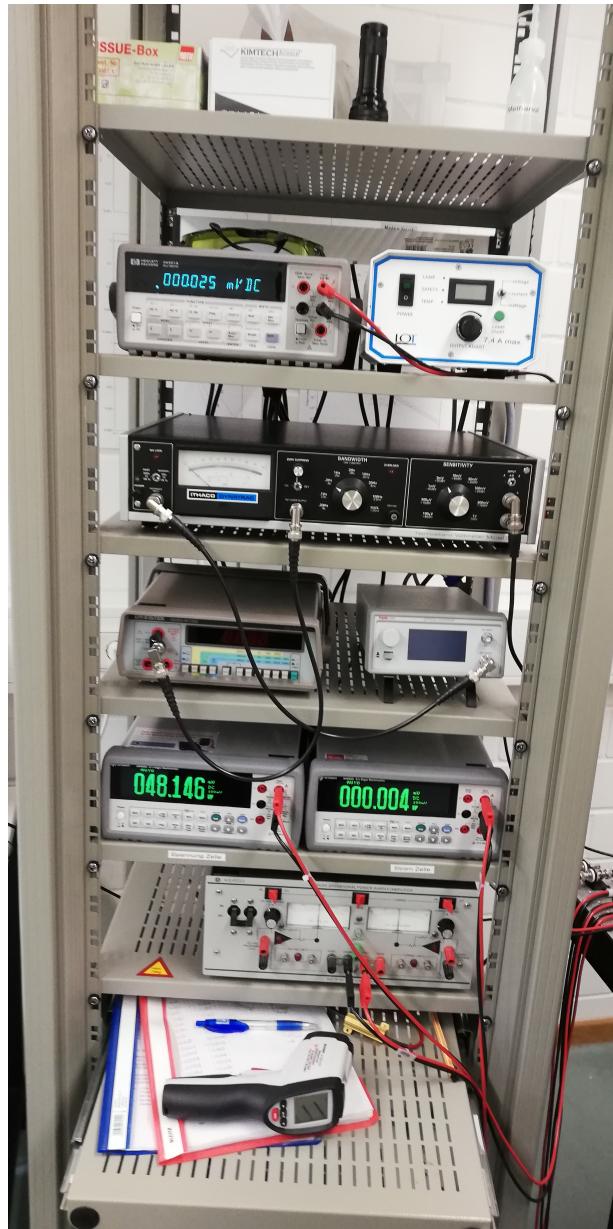


Abbildung A.2: Verwendete Messgeräte (in schwarz der Lock-in Verstärker)

*A Anhang*



Abbildung A.3: Innenansicht des Gitterspektrometers

**Versuchsteil U-I-Kennlinien**

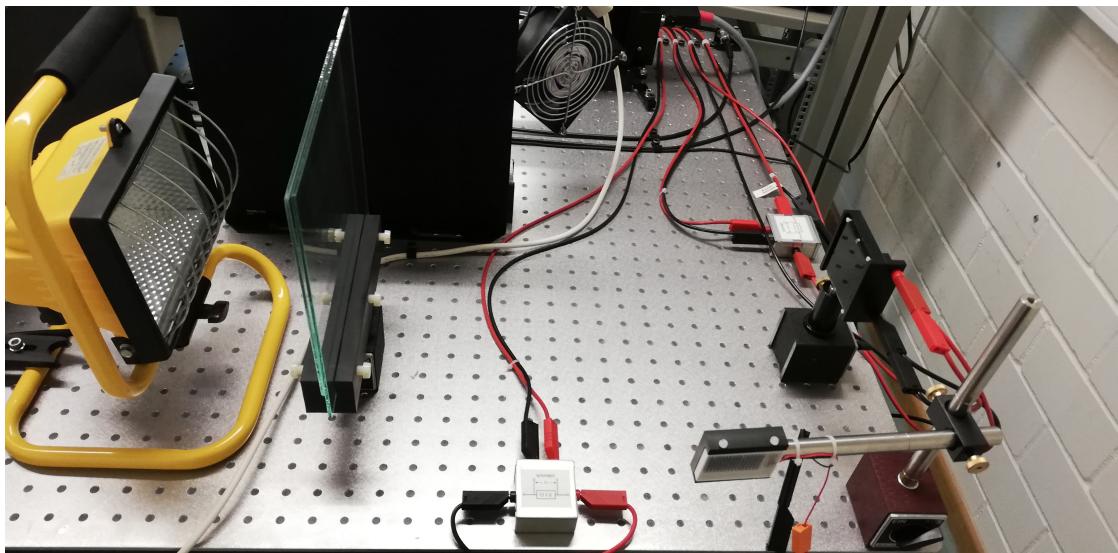


Abbildung A.4: Baustrahler mit vorgelagerten Glasplatten

## A Anhang

### A.2 Fitten der Shockley-Gleichung

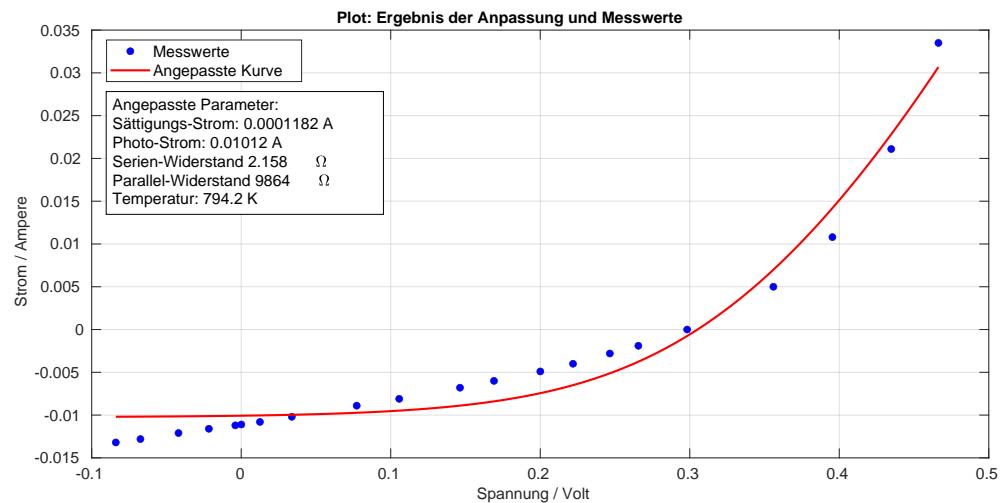


Abbildung A.5: Gefittete Shockley-Gleichung an das CIS-Modul bei 180V Trafospannung

## A.2 Fitten der Shockley-Gleichung

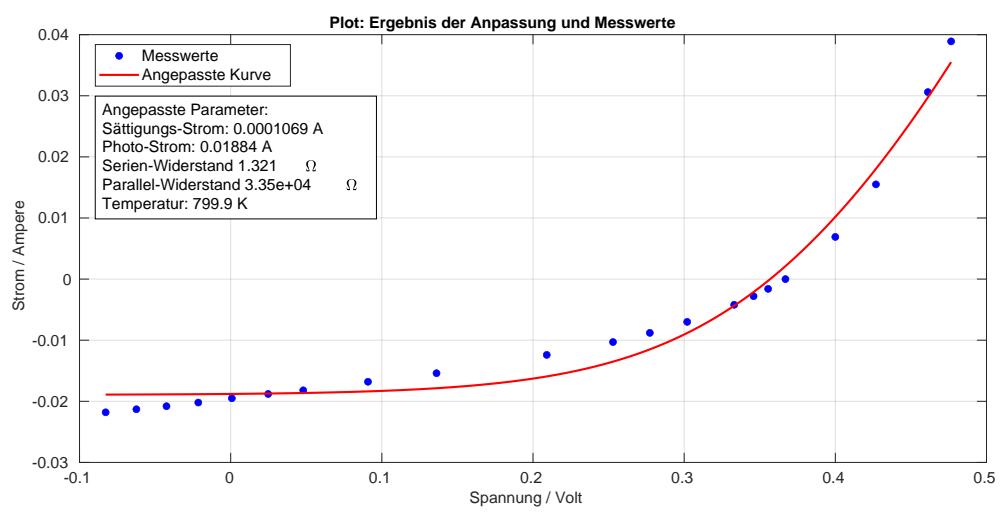


Abbildung A.6: Gefittete Shockley-Gleichung an das CIS-Modul bei 230V Trafospannung

## A Anhang

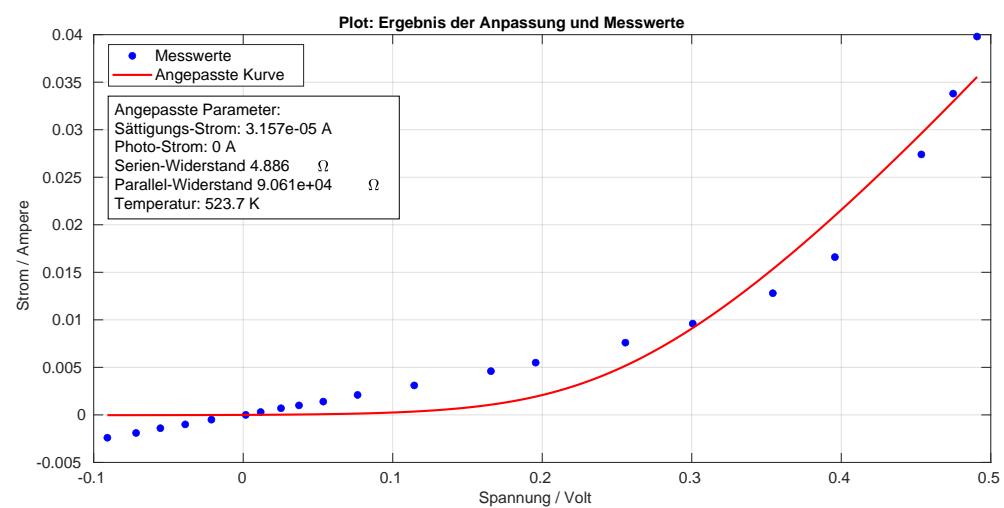


Abbildung A.7: Gefittete Schockley-Gleichung an Dunkelmessung der CIS-Zelle

## A.2 Fitten der Shockley-Gleichung

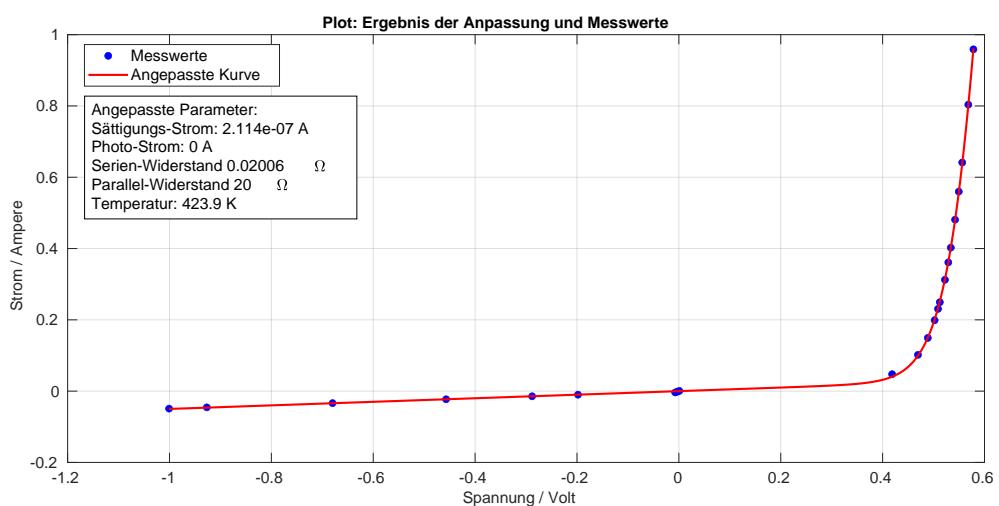


Abbildung A.8: Gefittete Shockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 130V

## A Anhang

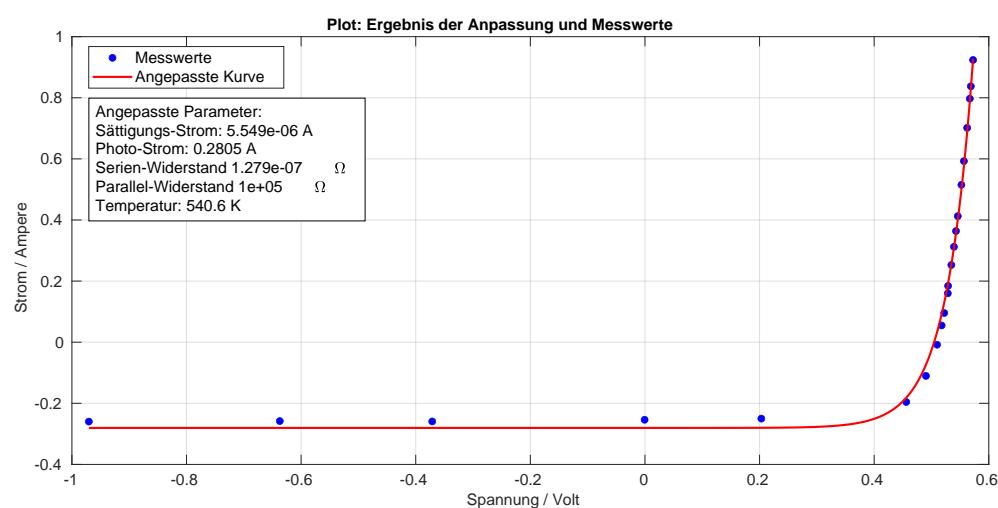


Abbildung A.9: Gefittete Schockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 130V

## A.2 Fitten der Shockley-Gleichung

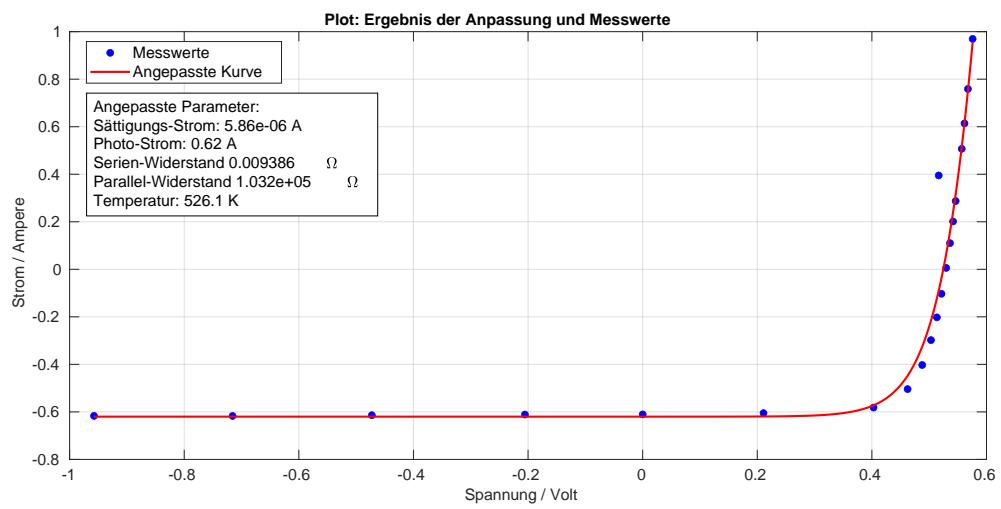


Abbildung A.10: Gefittete Shockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 130V

## A Anhang

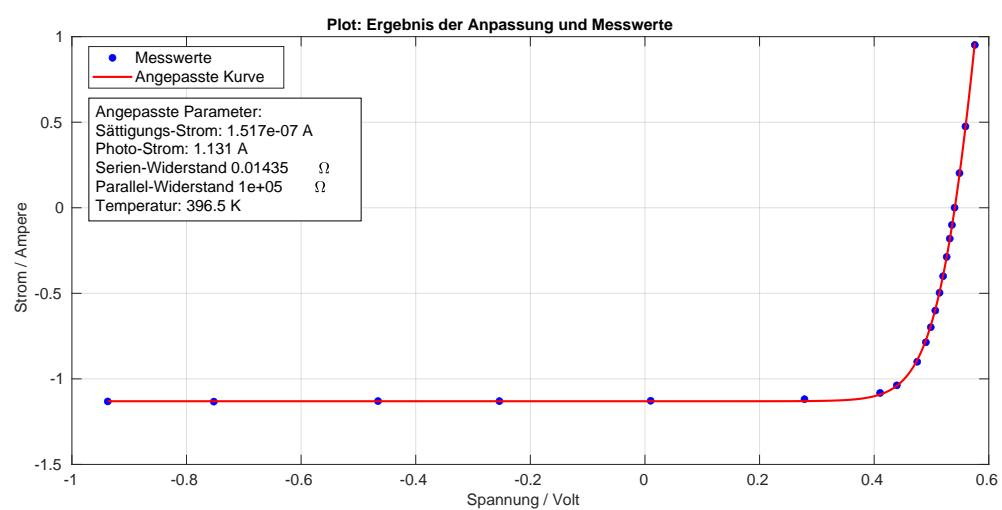


Abbildung A.11: Gefittete Shockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 130V

## A.2 Fitten der Shockley-Gleichung

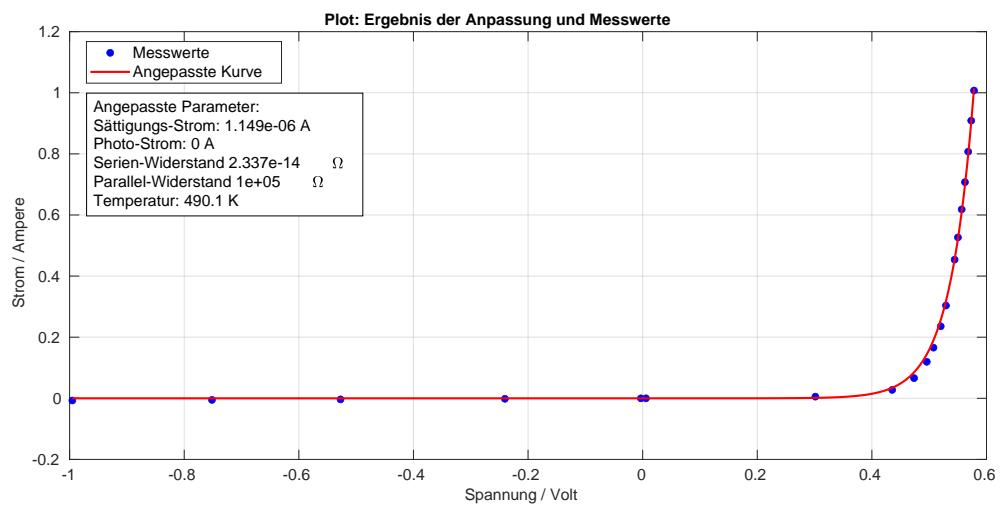


Abbildung A.12: Gefittete Shockley-Gleichung an das Mono-Si-Modul bei 130V

### A.3 Wirkungsgrad

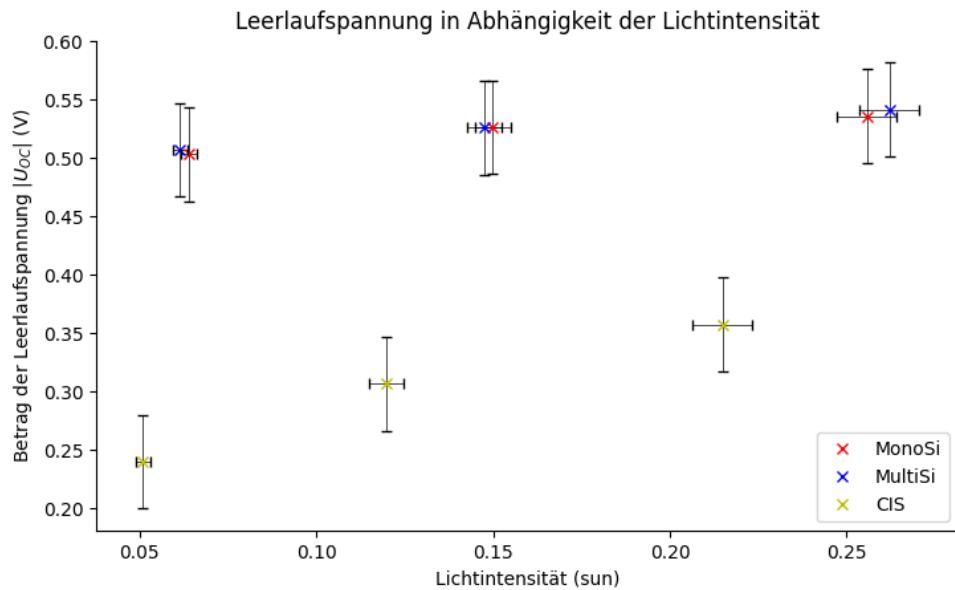


Abbildung A.13: Leerlaufspannung in Abhängigkeit der Lichtintensität bei drei unterschiedlichen Solarmodulen. Die Fehler sind aus Schwankungen geschätzt

### A.3 Wirkungsgrad

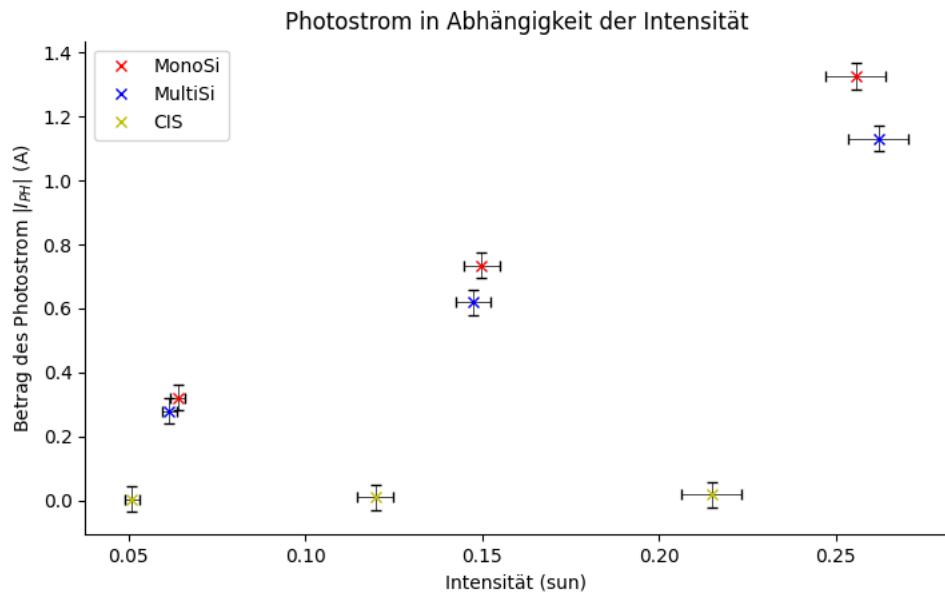


Abbildung A.14: Photostrom in Abhängigkeit der Lichtintensität bei drei unterschiedlichen Solarmodulen. Die Fehler sind aus Schwankungen geschätzt

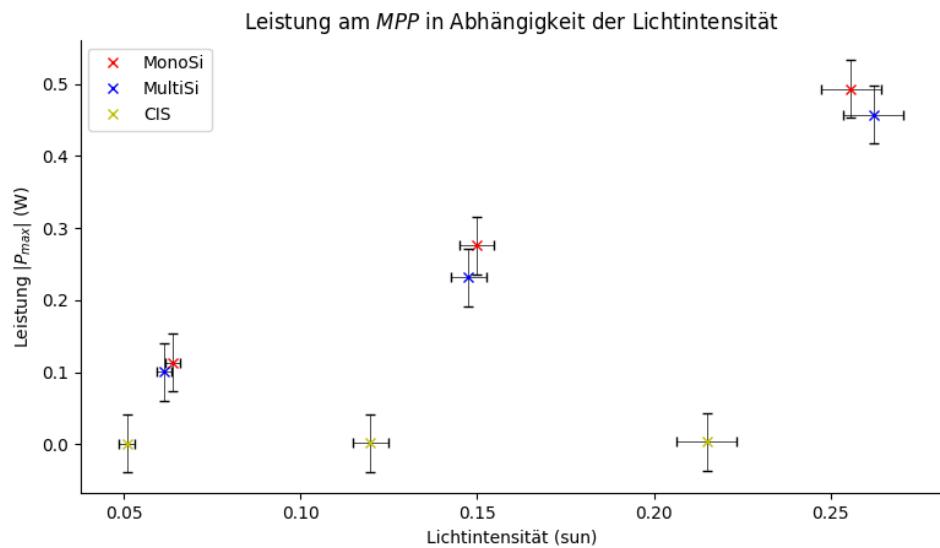


Abbildung A.15: Maximale Leistung  $P_{Max}$  in Abhängigkeit der Lichtintensität bei drei unterschiedlichen Solarmodulen. Die Fehler sind aus Schwankungen geschätzt

## A Anhang

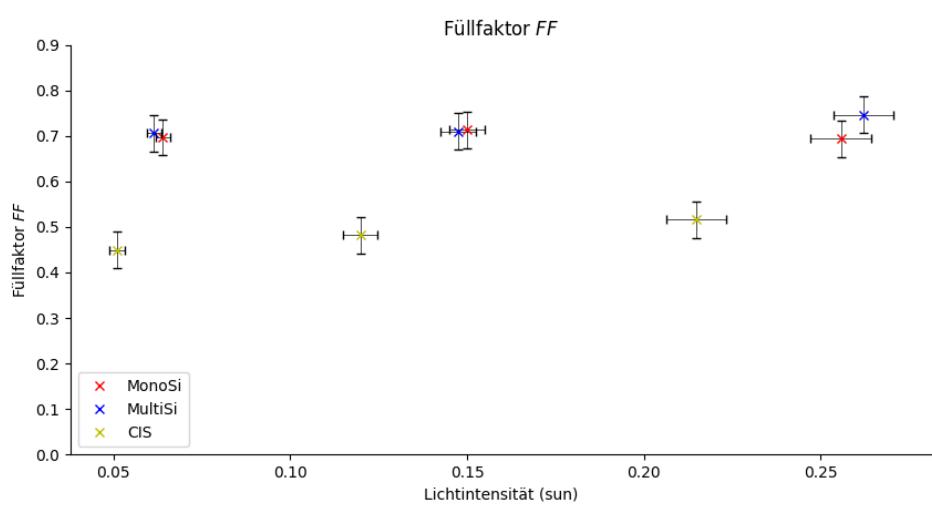


Abbildung A.16: Füllfaktor  $FF$  in Abhängigkeit der Lichtintensität bei drei unterschiedlichen Solarmodulen. Die Fehler sind aus Schwankungen geschätzt

### **A.3.1 Messdaten**

## A Anhang

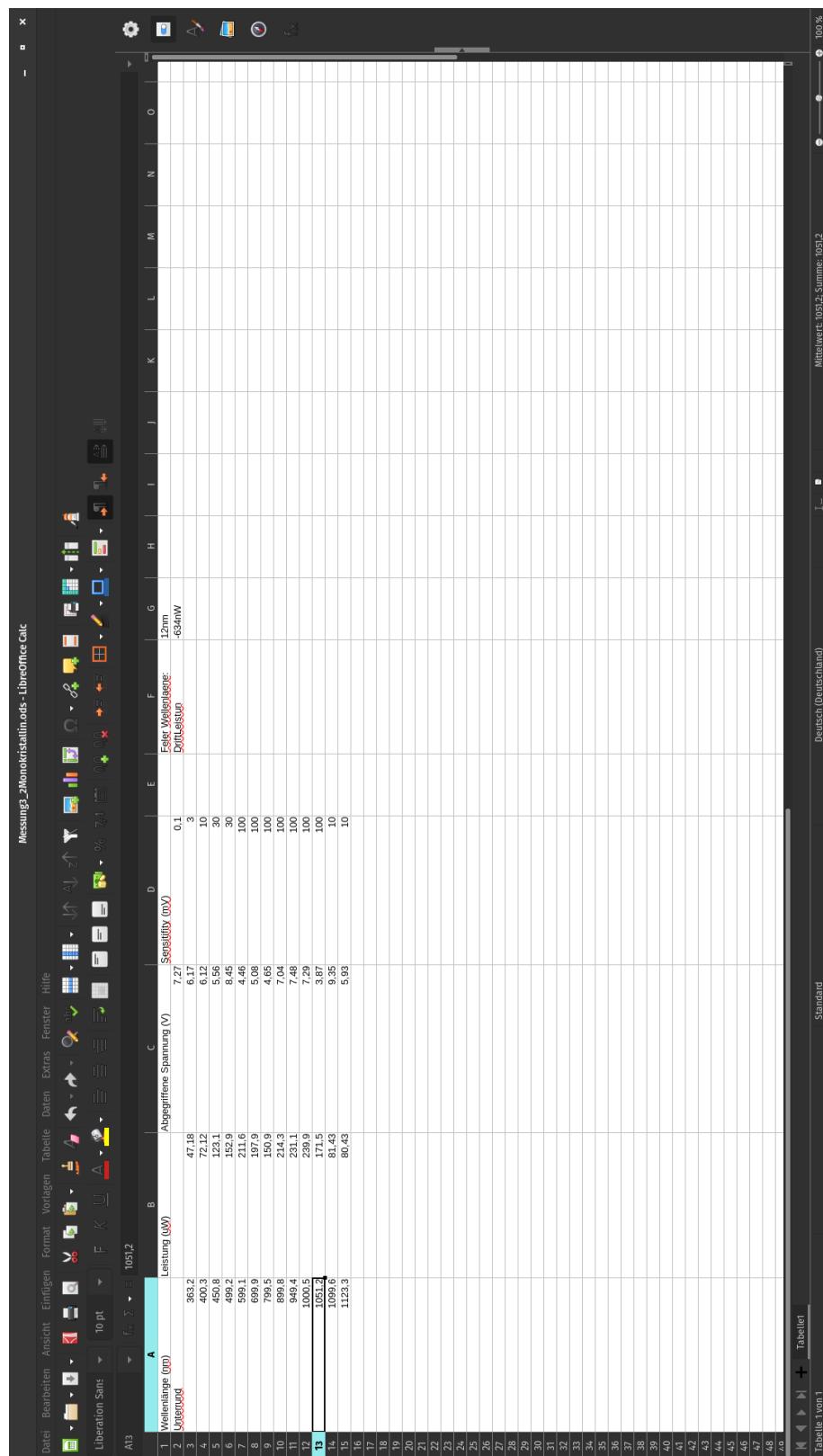


Abbildung A.17: Messdaten zur Messung der spektralen Empfindlichkeit der MonoSi-Zelle

### A.3 Wirkungsgrad

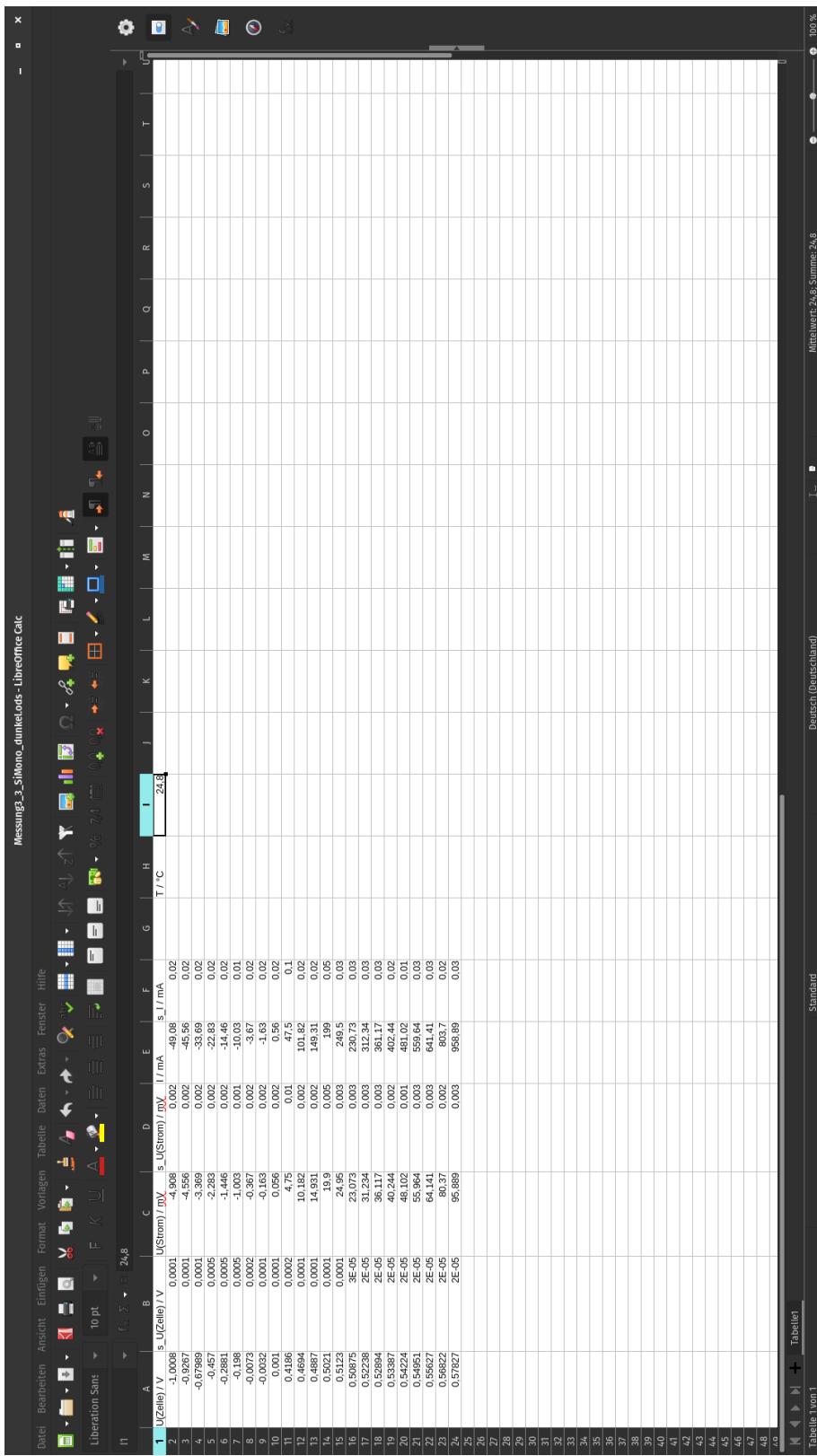


Abbildung A.18: Dunkelmessung der MonoSi-Zelle

## A Anhang

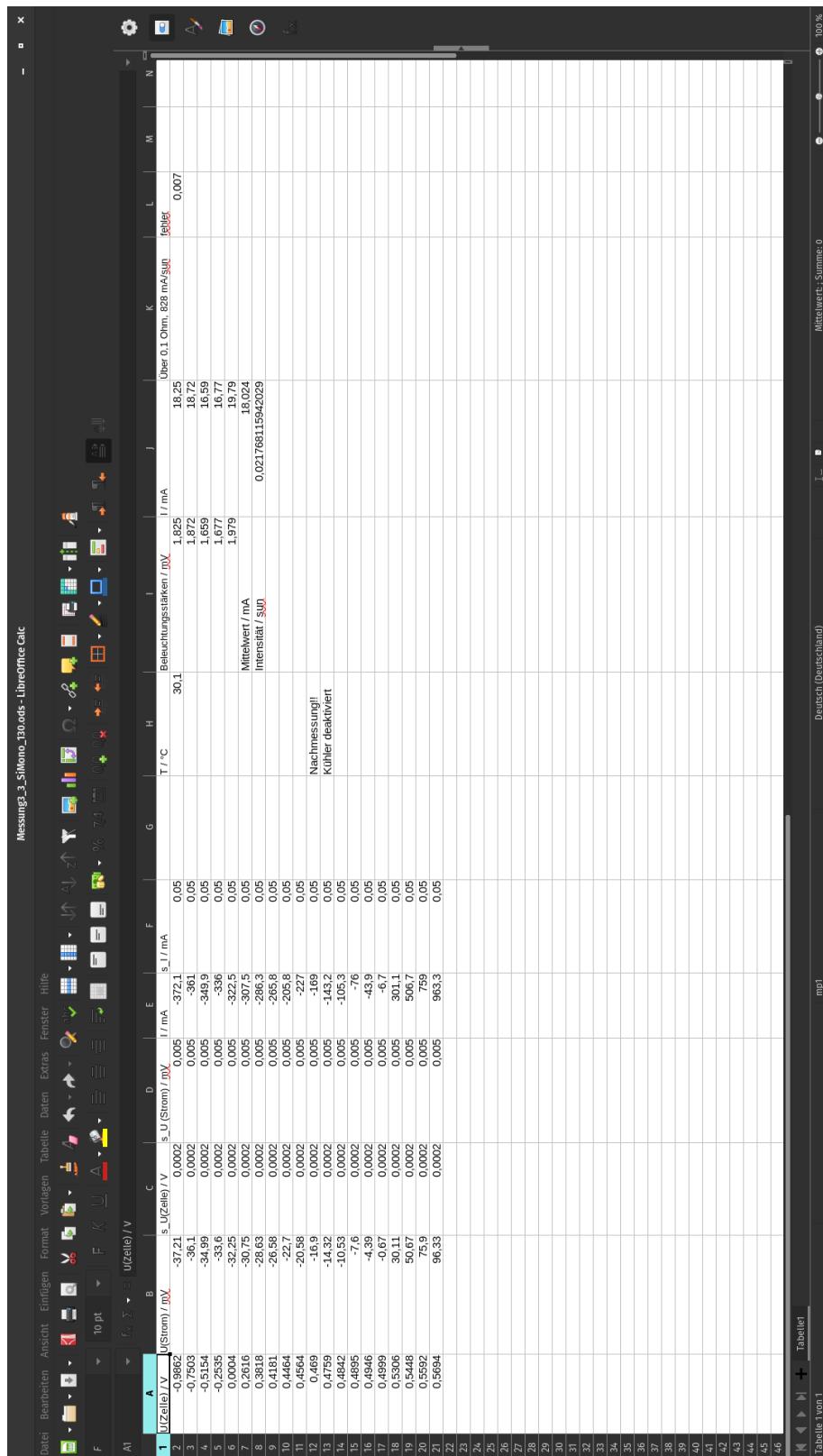


Abbildung A.19: Beleuchtete Messung bei 130V am Stelltransformator

### A.3 Wirkungsgrad

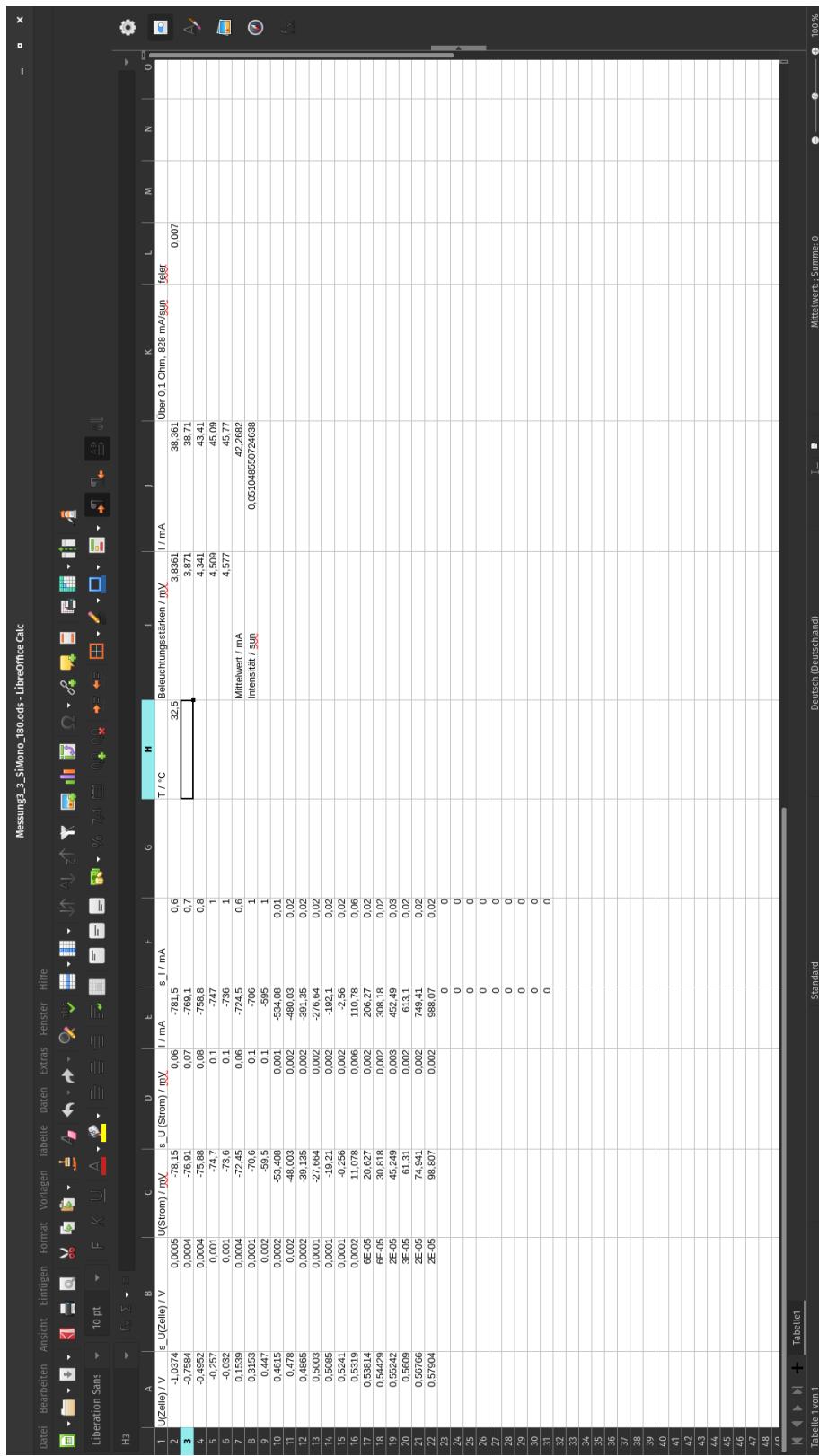


Abbildung A.20: Beleuchtete Messung bei 180V am Stelltransformator

## A Anhang

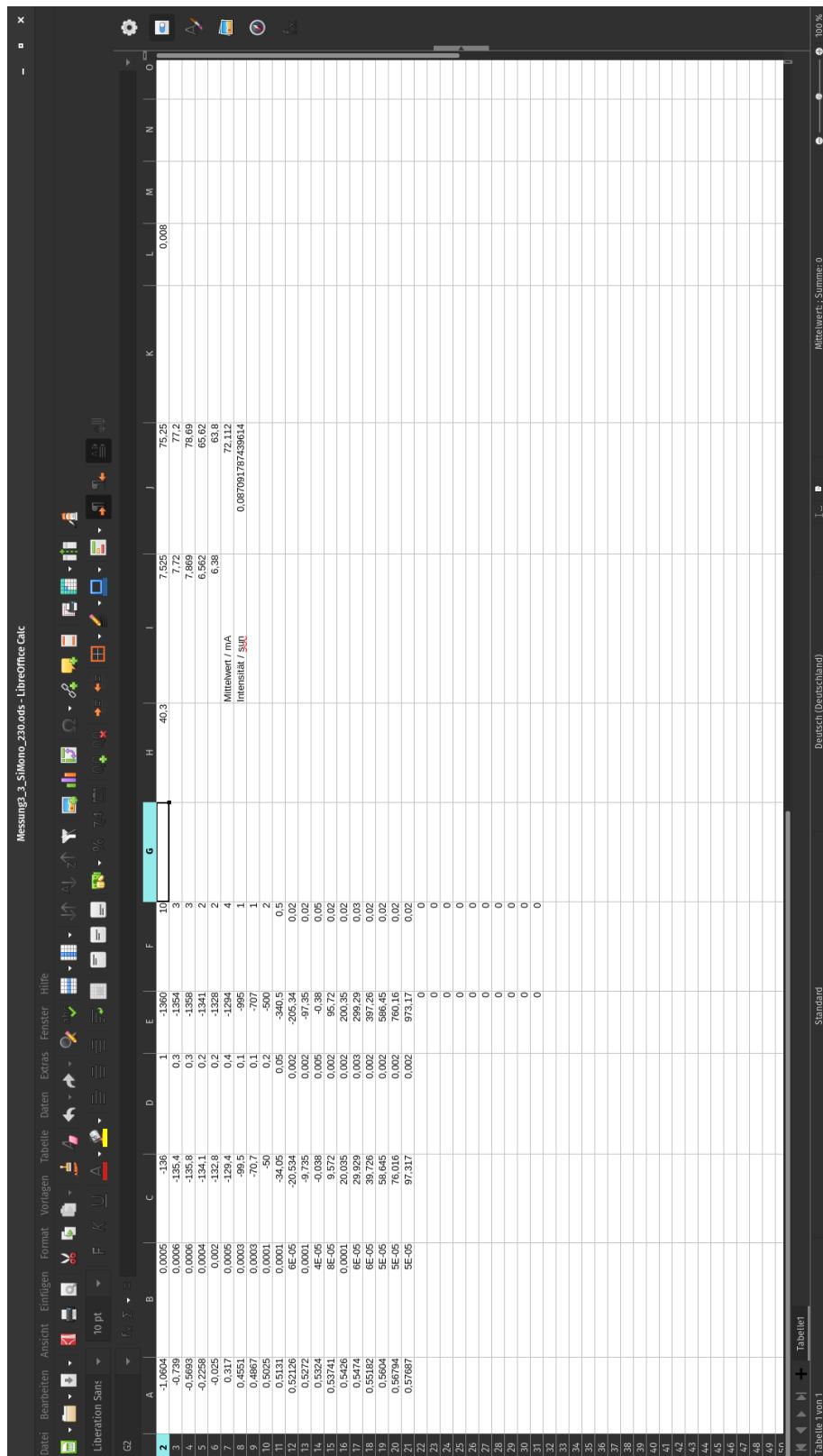


Abbildung A.21: Beleuchtete Messung bei 230V am Stelltransformator

### A.3 Wirkungsgrad

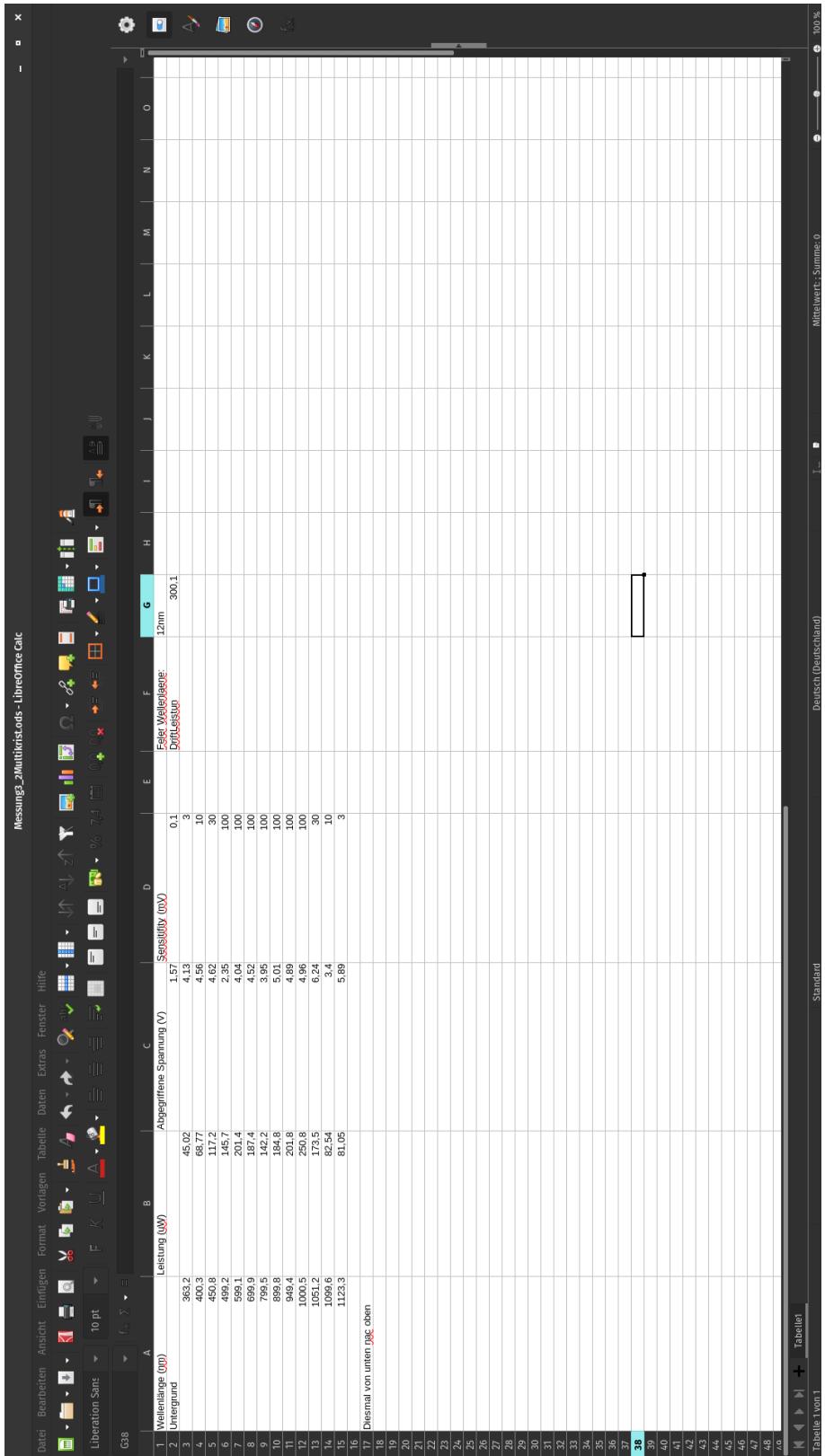


Abbildung A.22: Messdaten zur Messung der spektralen Empfindlichkeit der MultiSi-Zelle

## A Anhang

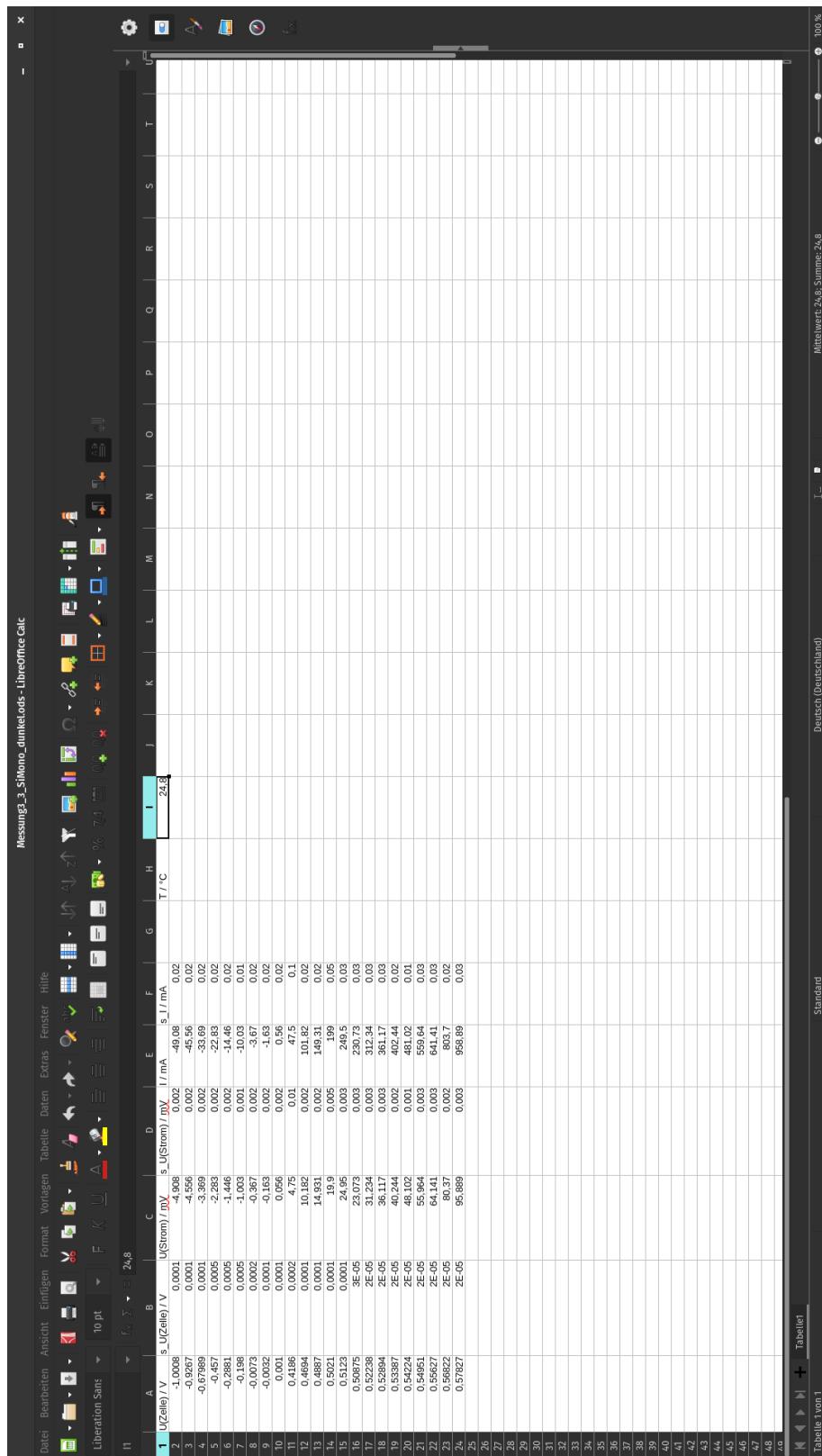


Abbildung A.23: Dunkelmessung der MultiSi-Zelle

### A.3 Wirkungsgrad

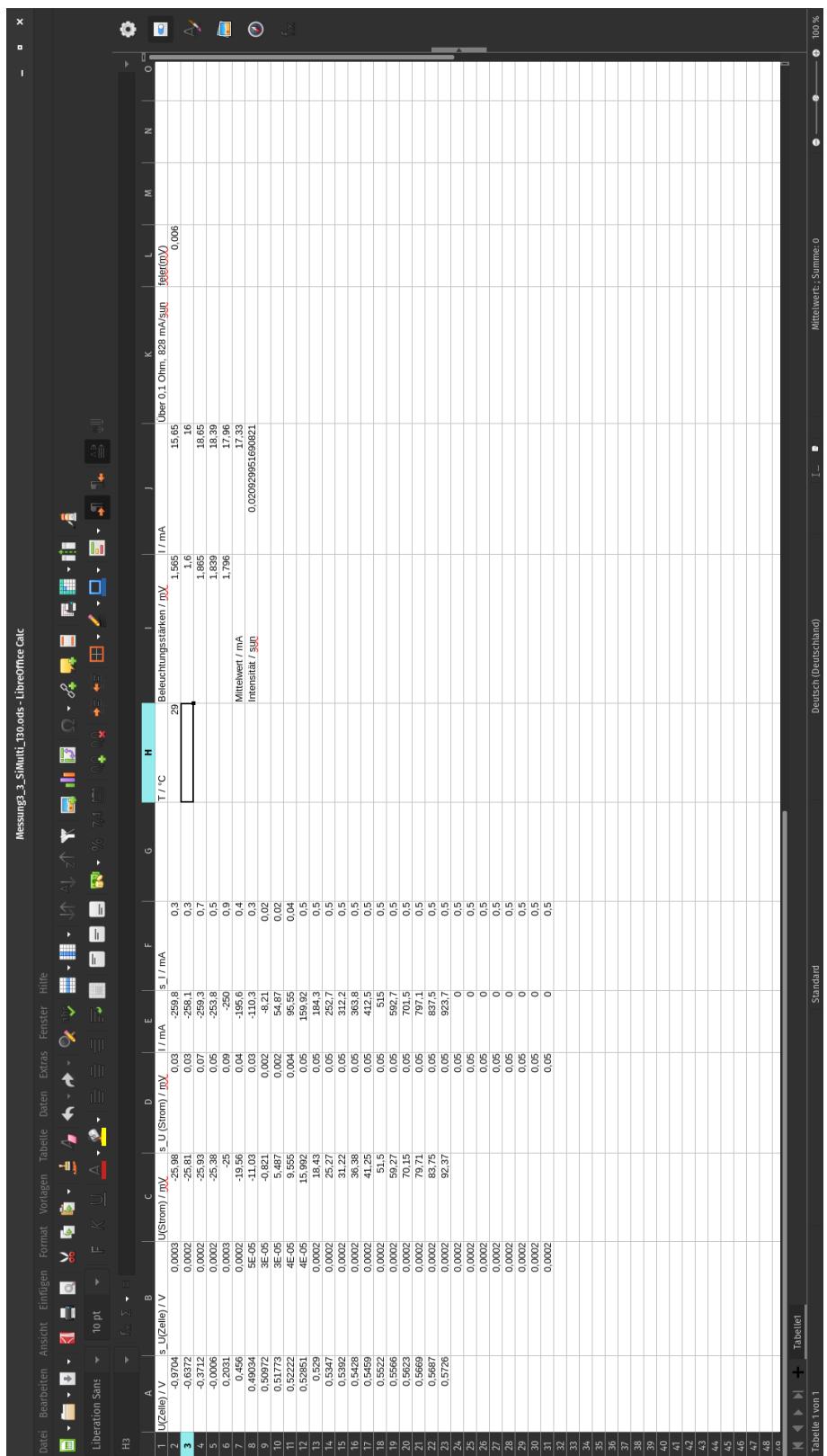


Abbildung A.24: Beleuchtete Messung bei 130V am Stelltransformator an der Multi-Si-Zelle

## A Anhang

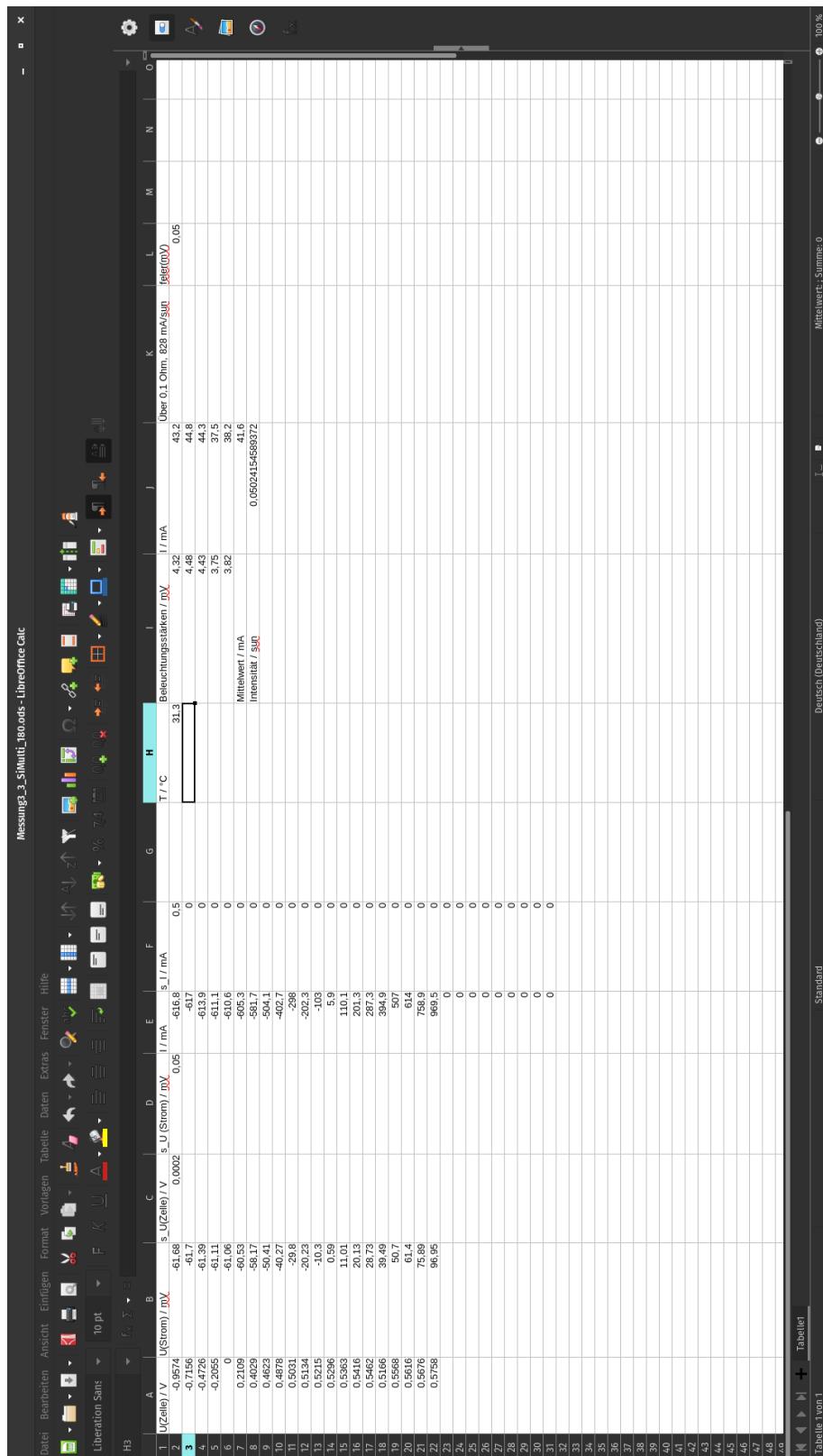


Abbildung A.25: Beleuchtete Messung bei 180V am Stelltransformator an der Multi-Si-Zelle

### A.3 Wirkungsgrad

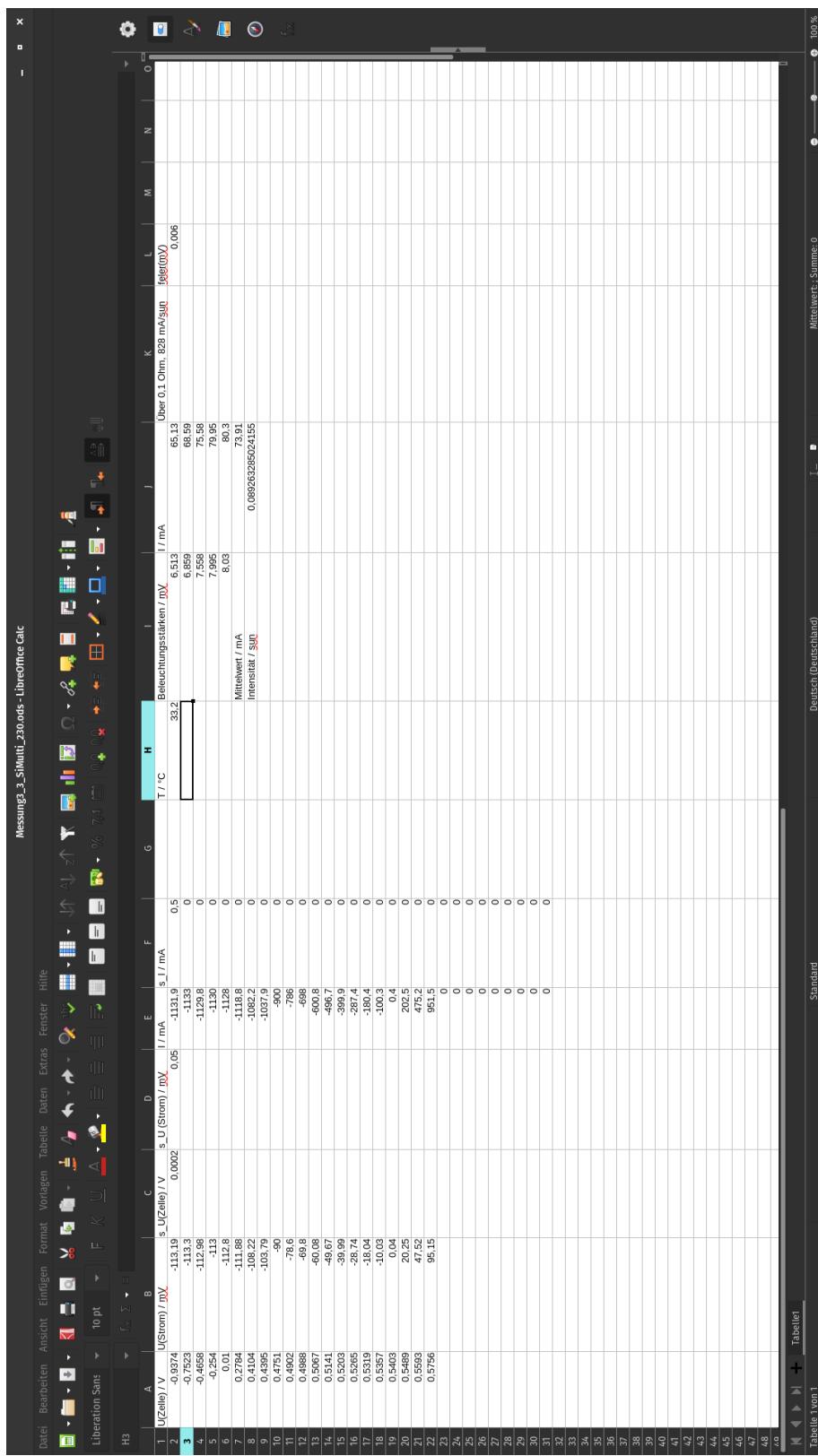


Abbildung A.26: Beleuchtete Messung bei 230V am Stelltransformator an der Multi-Si-Zelle

## A Anhang

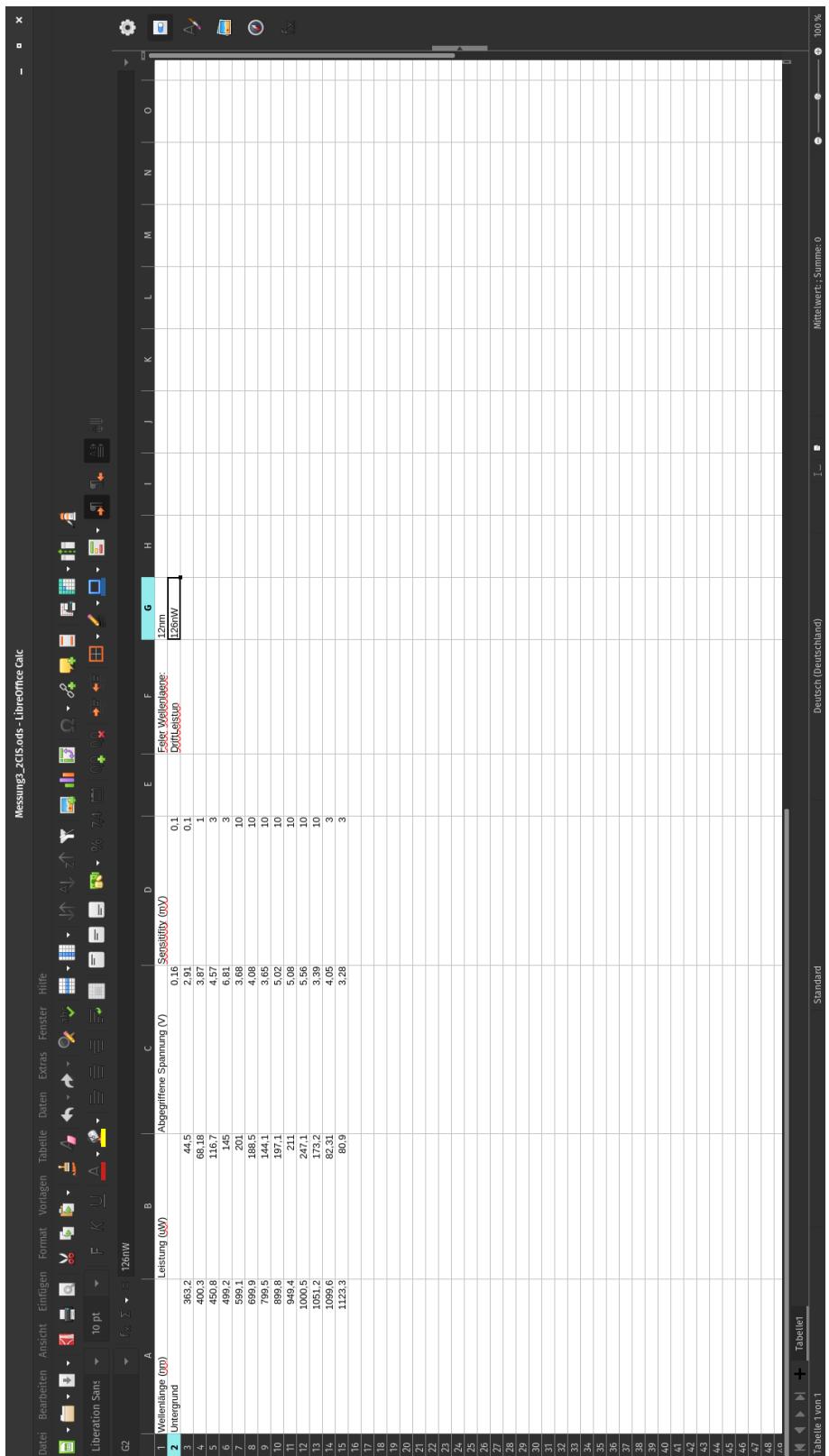


Abbildung A.27: Messdaten zur Messung der spektralen Empfindlichkeit an der CIS-Zelle  
62

### A.3 Wirkungsgrad

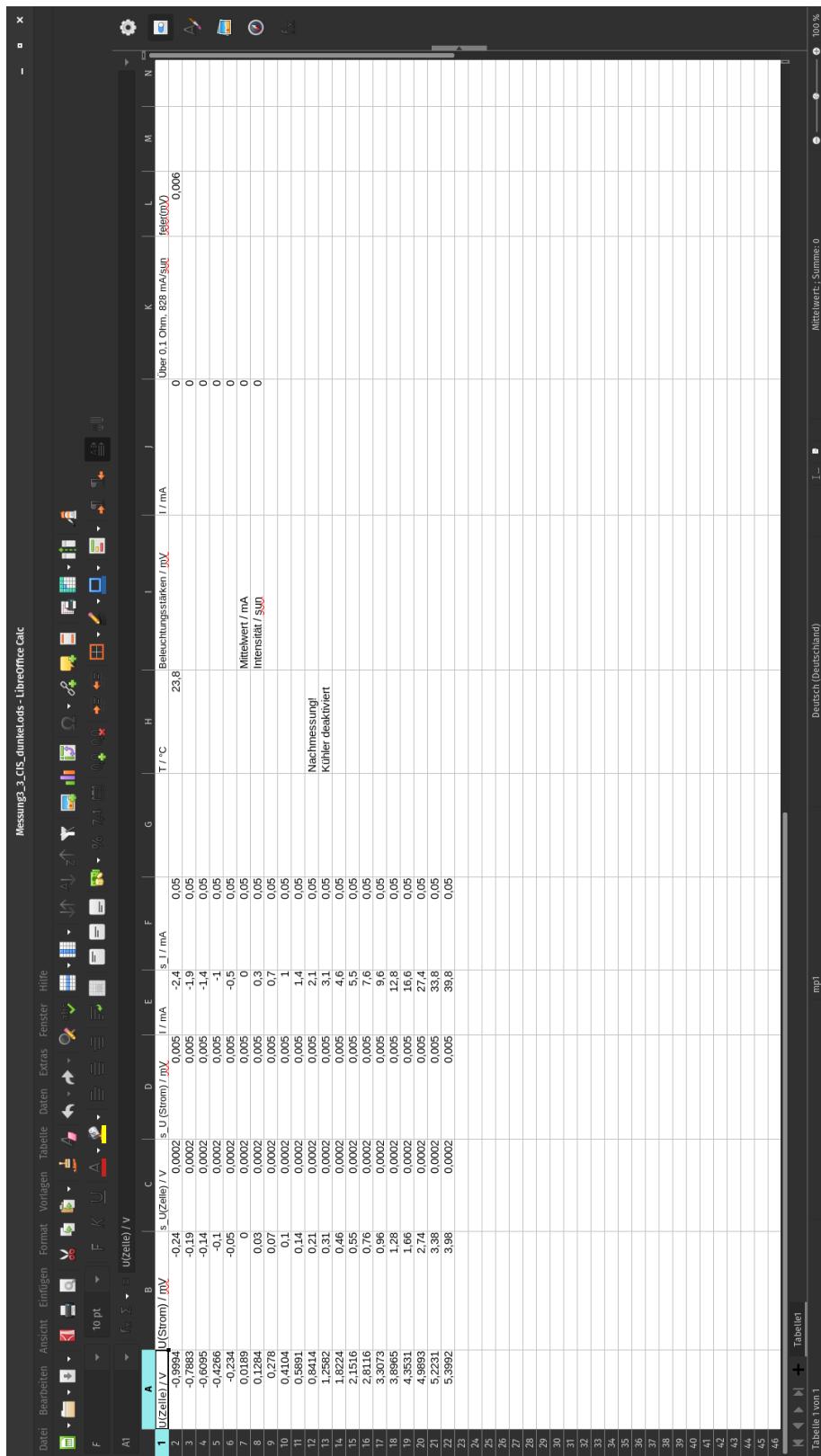


Abbildung A.28: Dunkelmessung an der CIS-Zelle

## A Anhang

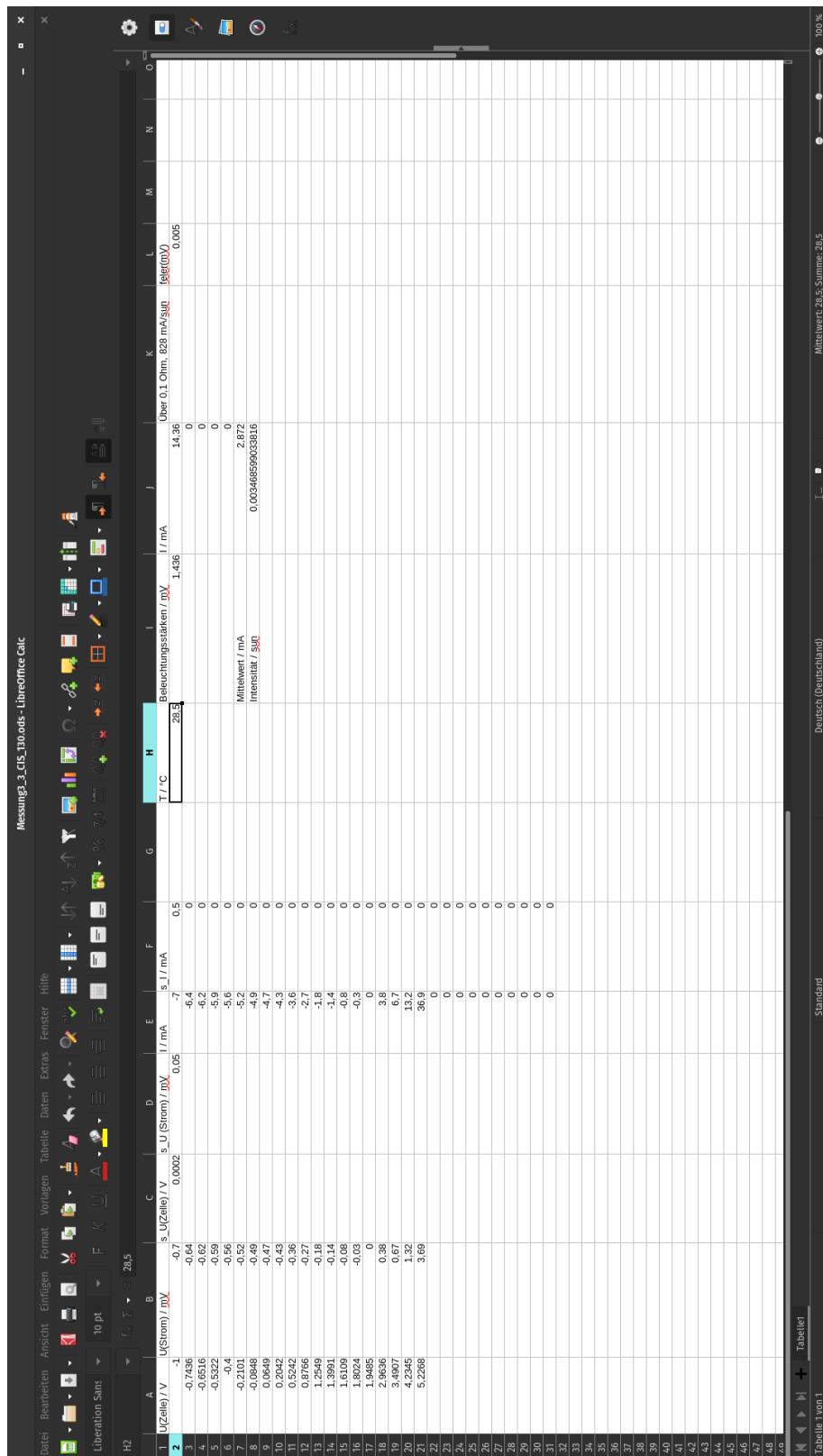


Abbildung A.29: Beleuchtete Messung bei 130V am Stelltransformator an der CIS-Zelle

### A.3 Wirkungsgrad

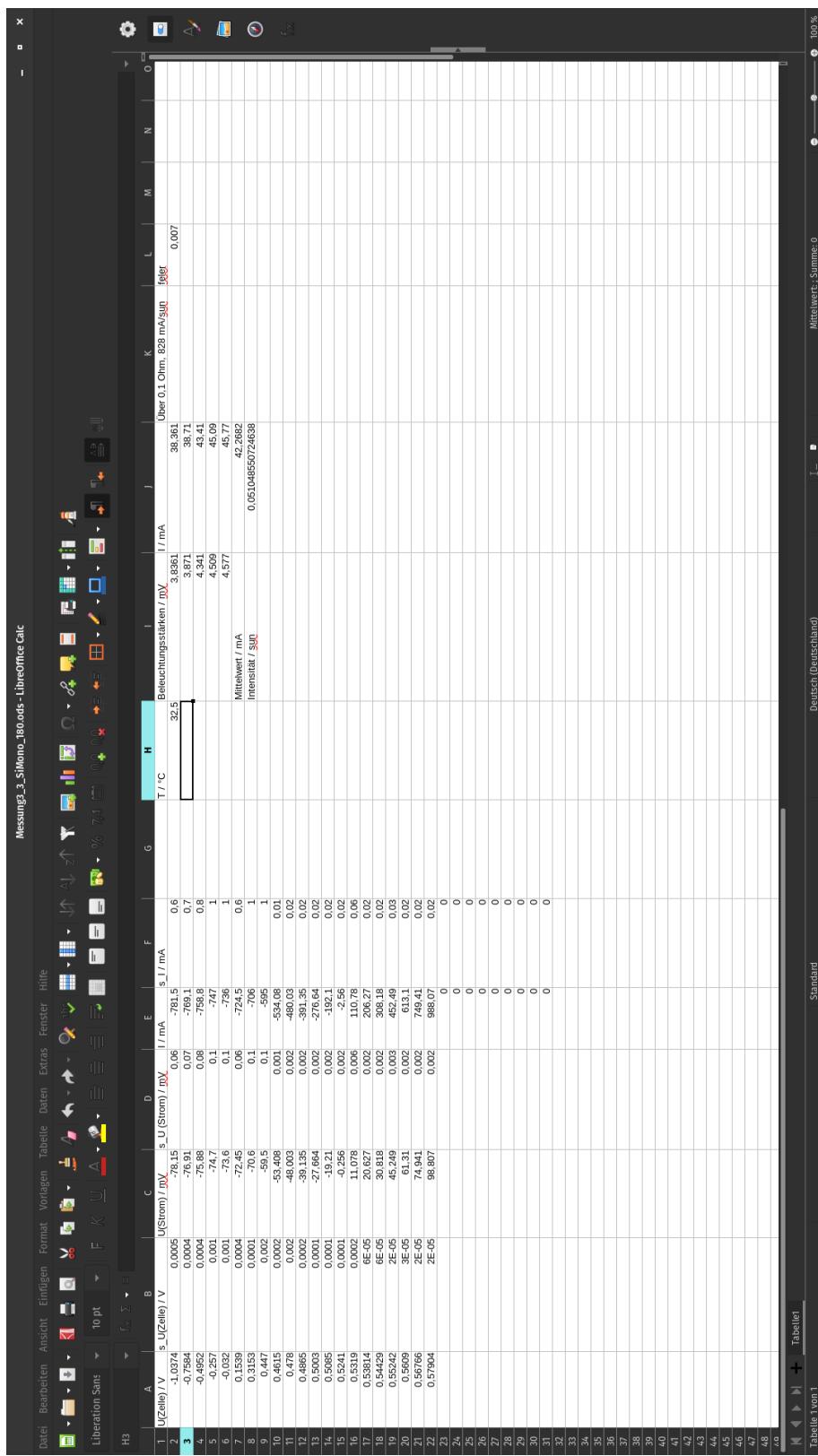


Abbildung A.30: Beleuchtete Messung bei 180V am Stelltransformator an der CIS-Zelle

## A Anhang

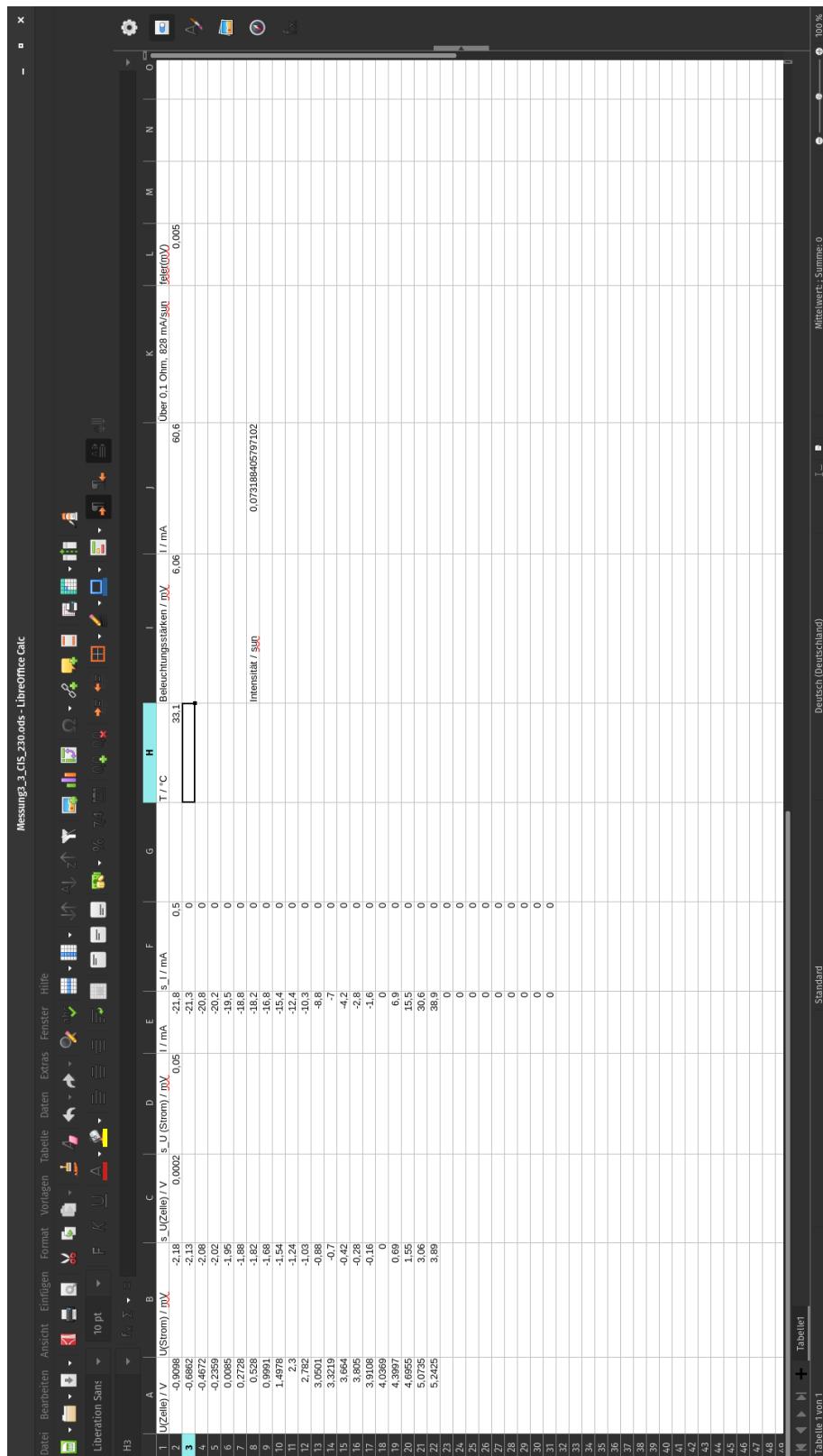


Abbildung A.31: Beleuchtete Messung bei 230V am Stelltransformator an der CIS-Zelle

## **Literaturverzeichnis**

ALTEKRÜGER, C. 2008 *Solarzellen. Aufbau eines Praktikumsversuchs..* Zulassungsarbeit zum 1. staatsexamen, Universität Bayreuth.

GERKEN, DR. U. 2021 Praktikumsskript zum Versuch Solarzelle.

GÖBEL, H. 2019 *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik*, 6., überarbeitete Auflage. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag.

H. J. EICHLER, H.-D. KRONFELDT, J. SAHM 2001 *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag.

HERINK, PROF. DR. GEORG 2021 Vorlesung Messmethodik.

SHAH, A. 2020 *Solar Cells and Modules*. Cham (CH): Springer Verlag.

WELLMANN, P. 2019 *Materialien der Elektronik und Energietechnik*, 2., erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag.