Versuch 4 des

FORTGESCHRITTENEN-PRAKTIKUMS

UI-Kennlinien

Versuchstermin Freitag, 17.05.2024

Protokoll von:

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

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

Praktikumsbetreuer:

Marius Müller
marius.mueller@physik.uni-giessen.de

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

In der Welt der Elektronik sind die Charakteristiken von Halbleiterbauteilen von entscheidender Bedeutung. Dieser Versuch zielt darauf ab, die typischen Kennlinien einer Diode, eines Bipolartransistors und eines Feldeffekttransistors zu erfassen, um ihre spezifischen Eigenschaften und Verhaltensweisen zu verstehen. Zusätzlich liegt ein Fokus auf der Untersuchung von Solarzellen, bei denen durch die Aufnahme von Dunkel- und Hell-Kennlinien wichtige Kenngrößen ermittelt werden sollen. Die Ergebnisse sollen nicht nur Aufschluss über den Typ der Dioden und Transistoren geben, sondern auch über die Leistungsfähigkeit der Solarzellen, wie etwa den Füllfaktor und die relative Effizienz.

1. Versuchsaufbau und Durchführung

In den Versuchen werden die Kennlinien der Halbleiterbauteile aufgenommen. Dazu werden die fertigen Schaltungen mit dem Messgerät farblich passend verbunden und die Kennlinien mit einem LABVIEW-Programm aufgenommen und auf einen USB-Stick abgespeichert. So können die Daten später ausgewertet werden.

- Im ersten Versuchsteil wird die Kennlinie einer Diode aufgenommen. Dazu wird die Diode in Durchlassrichtung und in Sperrrichtung betrieben.
- Im zweiten Versuchsteil wird die Kennlinie eines Bipolartransistors aufgenommen. Dazu wird der Transistor in der Emitterschaltung betrieben und die vier Kennlinienfelder aufgenommen.
- Im dritten Versuchsteil wird die Kennlinie eines Feldeffekttransistors aufgenommen. Dazu wird der Transistor in der Source-Schaltung betrieben und die vier Kennlinienfelder aufgenommen.
- Im vierten Versuchsteil werden zwei Solarzellen untersucht. Dazu wird die Kennlinie der Solarzellen im Dunkeln und im Licht aufgenommen und die jeweiligen Kennlinien abgespeichert.

2. Auswertung

2.1 Diode

Die auch Diodengleichung (oder auch Shockley-Gleichung) ist:

$$I_{\mathrm{D}} = I_{\mathrm{S}}(T)\left(\mathrm{e}^{\frac{U}{n\,U_{\mathrm{T}}}} - 1\right) \tag{2.1}$$

Dabei bezeichnet $I_{\mathrm{S}}(T)$ den Sättigungssperrstrom welcher typischerweise zwischen $10 \times 10^{-12}\,\mathrm{A}$ und $10 \times 10^{-6}\,\mathrm{A}$ liegt, $U_{\mathrm{T}} = \frac{k \cdot T}{q}$ die Temperaturspannung und n den Idealitätsfaktor oder Emissionskoeffizient. Dieser soll auch bestimmt werden und liegt typischerweise zwischen 1 und 2.
In unserem Fall (bei Raumtemperatur von 25 °C) beträgt die Temperaturspannung $U_T = 25\,\mathrm{mV}$.

In Abbildung 2.1 ist die Kennlinie der Diode dargestellt.
Der rechte Teil der Kennlinie ist mit der Gleichung 2.1 gefittet worden, während der linke Teil nicht mit dieser Gleichung beschrieben werden kann und daher linear gefittet ist.

Im Schockley-Fit kann man den Sättigungssperrstrom I_{S} und den Idealitätsfaktor n bestimmen. Daraus ergibt sich:

- Sättigungssperrstrom $I_{\mathrm{S}} = (2.1290 \pm 2.0394) \times 10^{-2}\,\mu\mathrm{A}$
- Emissionskoeffizient $n = 2.386 \pm 0.198$

Um die Durchbruchspannung zu bestimmen, betrachten wir den linearen Fit auf der rechten Seite des Diagramms. Davon müssen wir den Schnittpunkt mit der x-Achse (bzw. Spannungsachse) bestimmen. Dazu setzen wir die Gleichung
$I = B \cdot U_D + A \stackrel{!}{=} 0$. Hieraus ergibt sich dann:

$$U_D = \frac{-a}{b} = \frac{-536.703}{141.987} = 3.77\,\mathrm{V}$$

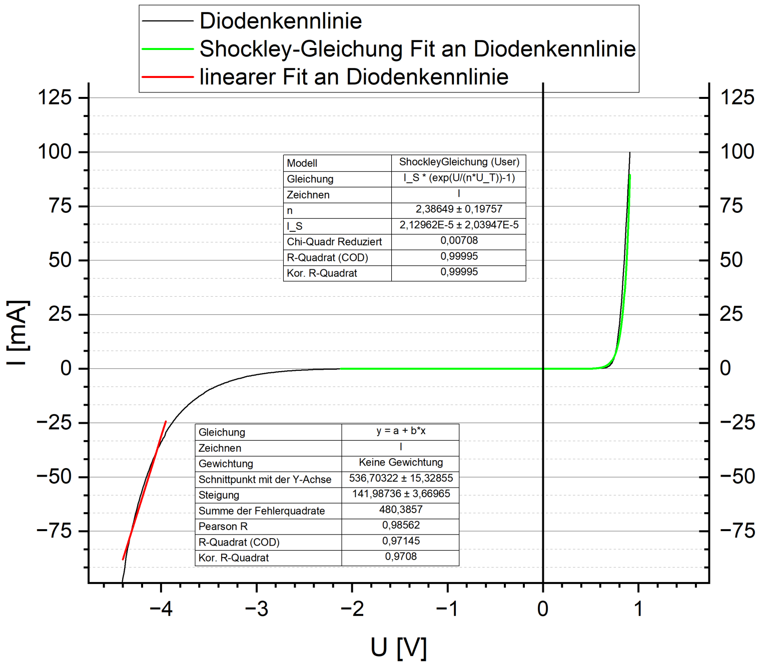

Abbildung 2.1: Kennlinie der Diode

Aus Origin werden folgende Fehler für b und a gegeben:
$\Delta b = \pm 3,670$ und $\Delta a = \pm 15,329$.

Durch Fehlerfortpflanzung erlangen wir:

$$\Delta U = \left|\frac{\partial U_D}{\partial b}\right| \Delta b + \left|\frac{\partial U_D}{\partial a}\right| \Delta a = \left|\frac{a \Delta b}{b^2}\right| + \left|\frac{\Delta a}{b}\right| \approx 0,21\text{V} \tag{2.2}$$

Die bestimmte Durchschlagsspannung ist also:

$$U_D = (3.77 \pm 0.21)\,\text{V}$$

Dieser Wert lässt darauf schließen, dass es sich bei der untersuchten Diode um eine Zener-Diode handelt: Diese Dioden werden beim Betrieb in Sperrrichtung nicht zerstört und lassen sich beispielsweise als Spannungsstabilisatoren einsetzen.

2.2 Bipolartransistor

Im folgenden Versuchsteil werden die typischen Kennlinienfelder eines Bipolartransistors vermessen. Es handelt sich um einen pnp-Transistor des Typs BC550. Ein

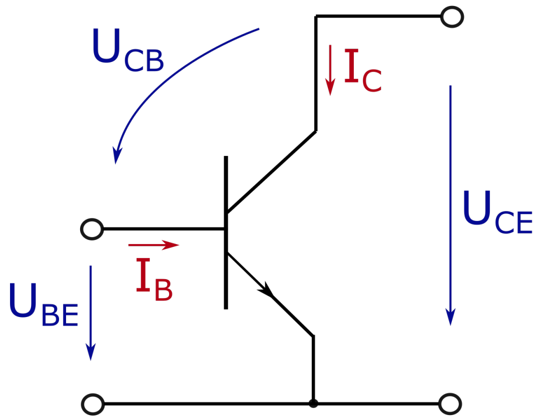

Abbildung 2.2: Schaltskizze eines pnp-Transistors

Schaltplan solch eines Transistors ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Dabei sind die wichtigsten Größen eingetragen, dazu zählen der Kollektor- und Basisstrom I_C und I_B, zudem die jeweiligen Spannungen zwischen Kollektor, Emitter und Basis.

2.2.1 Vierpolarparameter

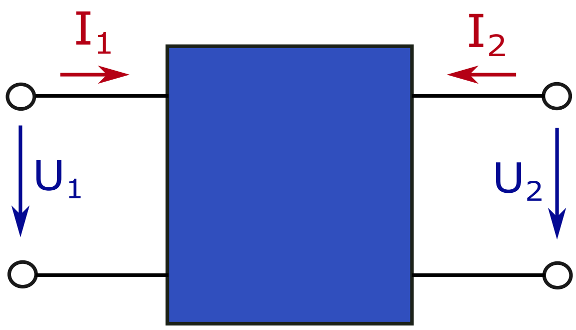

Abbildung 2.3: allgemeiner Vierpol

Jedes elektronische Bauteil kann als Vierpol dargestellt werden, in Abbildung 2.3 ist der Schaltplan eines allgemeinen Vierpols angegeben. Das Modell beschreibt ein elektrisches Netzwerk oder Bauteil durch zwei Ein- und Ausgänge, dabei wird ein lineares Gleichungssystem mit einer 2x2 Matrix verwendet.
Transistoren sind aktive Bauelemente und nicht linear, deshalb müssen sie in einem Punkt linearisiert werden, damit die Beschreibung des Vierpols angewandt werden kann. Dieser Punkt heißt Arbeitspunkt des Transistors. Für Transistoren in der

Emittersschaltung wird häufig die folgende Hybrid-Darstellung verwendet:

$$\begin{pmatrix} u_{BE} \\ i_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_B \\ u_{CE} \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

Wie bereits erwähnt wird am Arbeitspunkt des Transistors linearisiert, deshalb sind die Vierpolparameter Ableitungen in der folgenden Form:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \qquad h_{12} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial U_{CE}} \\ h_{21} &= \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \qquad h_{22} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} \end{aligned} \tag{2.4}$$

2.2.2 Bestimmung der Parameter

In Abbildung 2.4 sind die aufgenommenen, typischen vier Kennlinien des Transistors aufgetragen. In Rot ist jeweils der gewählte Arbeitspunkt eingetragen, dieser wird bei folgenden Werten gewählt:

$$I_B = 0.2\,\mathrm{mA} \qquad U_{CE} = 2\,\mathrm{V} \tag{2.5}$$

Zudem ist in Orange die jeweilige Fit-Gerade eingezeichnet und die Fitparameter sind gegeben.
Der erste Vierpolparameter ergibt sich aus den Eingangskennlinien, also der U_{BE}-I_B Kennlinie. Dieser Parameter ist direkt der differentielle Transistor-Eingangswiderstand:

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \tag{2.6}$$

Im obigen Kennlinienfeld wurde die Gerade in einem Bereich von 0.05 mA um den Arbeitspunkt für I_B zu U_{BE} gefittet. Der differentielle Eingangswiderstand ist damit der Kehrwert des Fitparameters a, zudem werden die mA in A umgerechnet, um die Einheit Ω zu erhalten:

$$r_{BE} = \frac{1}{a} = \underline{(214.041 \pm 20.525)\,\Omega = h_{11}} \tag{2.7}$$

Der Vierpolparameter $h_2 2$ kann im Ausgangskennlinienfeld über den differentiellen Transistor-Ausgangswiderstand bestimmt werden. Der Widerstand ist die Steigung des Fits, erneut werden die mA in A umgerechnet:

$$r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = (4009 \pm 31)\,\Omega \tag{2.8}$$

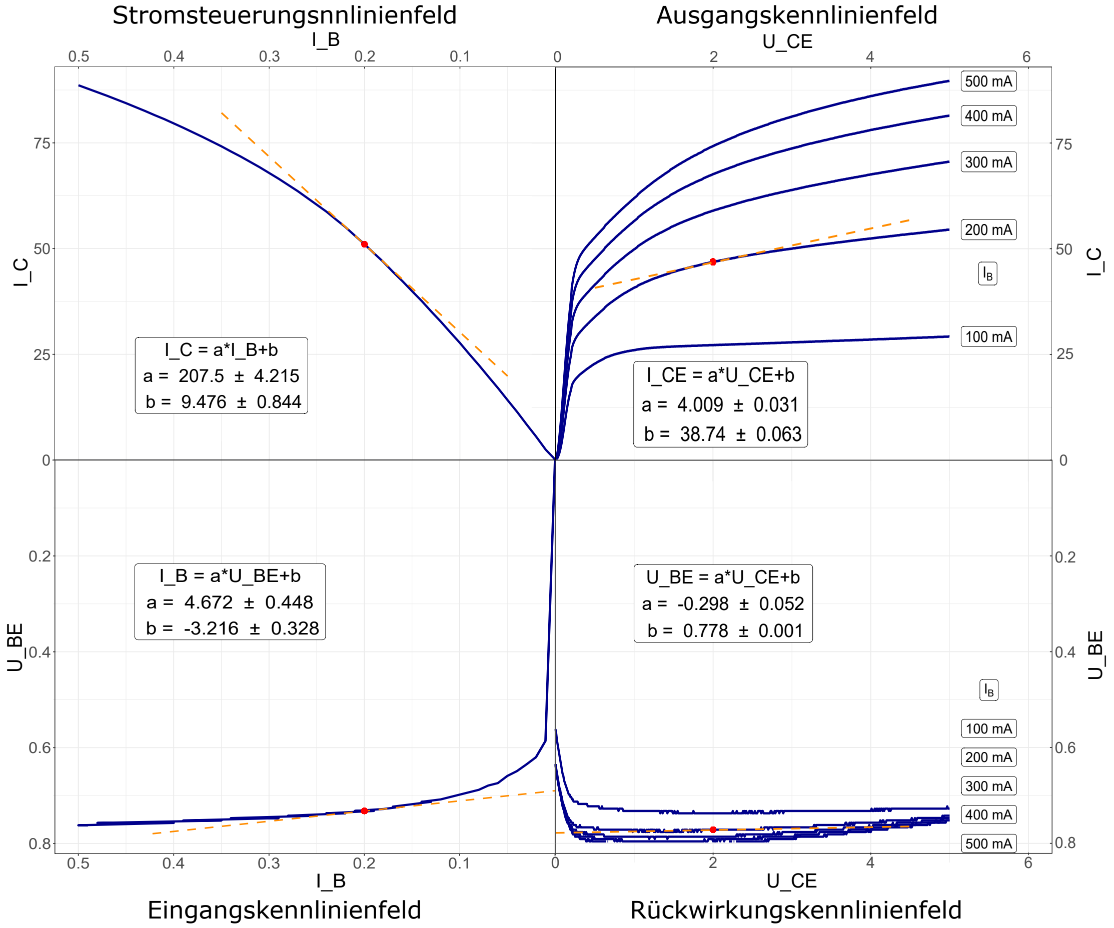

Abbildung 2.4: Vierquadrantenkennlinienfeld des Bipolartransistors

Der dazugehörige Vierpolparameter berechnet sich aus dem Kehrwert des Ausgangswiderstands:

$$\underline{h_{22} = (2.494 \pm 0.019) \times 10^{-4}\, 1/\Omega} \tag{2.9}$$

Aus dem Stromsteuerungskennlinienfeld I_C-I_B kann der differentielle Stromverstärkungsfaktor β bestimmt werden. Dieser ist entspricht dem Anstieg der gefitteten Geraden und gibt in gewisser Weise an, um welchen Faktor der Transistor den Kollektorstrom verstärkt. Dieser Faktor ist auch der Vierpolparameter h_{21}:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \underline{207.5 \pm 4.2 = h_{21}} \tag{2.10}$$

Der letzte Vierpolparameter ist im Rückwirkungskennlinienfeld der differentielle Rückwirkungsfaktor D. Dieser gibt an, wie stark Änderungen der Ausgangsspannung U_{CE} auf die Eingangsspannung U_BE zurückwirken. Solche sind unerwünscht und sollen möglichst klein sein.

$$D = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \underline{-0.298 \pm 0.052 = h_{12}} \tag{2.11}$$

2.3 Feldeffektransistor

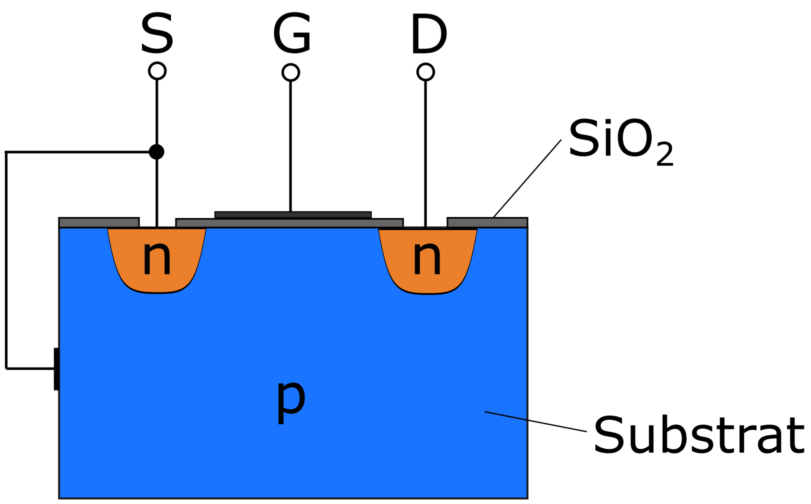

Abbildung 2.5: Grundlegender Aufbau eines Metall-Oxid-Feldeffekttransistors

Die Abbildung 2.5 zeigt den Grundlegenden Aufbau eines MOS-FET, die drei Anschlüsse heißen Source, Drain und Gate. Wenn zwischen Gate und Source eine Spannung angelegt wird, bildet sich eine leitende Brücke zwischen Source und Drain aus. Für die Stereung von U_{GS} ist fast kein Strom notwendig, daher ist die Steuerung eines MOS-FET's quasi leistungslos möglich.

In Abbildung 2.6 sind die das I_D-U_{DS} und I_D-U_{GS} Kennlinienfeld, des Feldeffektransistors geplottet. Das erstere wird auch Ausgangskennlinienfeld genannt, es wurde für verschiedene Steuerspannungen U_GS aufgezeichnet. Ab der Mindestgatespannung von etwas unter 1 V, steigen die Kennlinien nur geringfügig an.

Im linkem, dem Eingangkennlinienfeld wird deutlich, dass es sich tatsächlich um einen Metall-Oxid-Feldeffekttransistors handelt, da der Strom I_D bei einer Gate-Source-Spannung unter etwa 1.4 V gleich null ist, der Transistor ist demnach selbst-

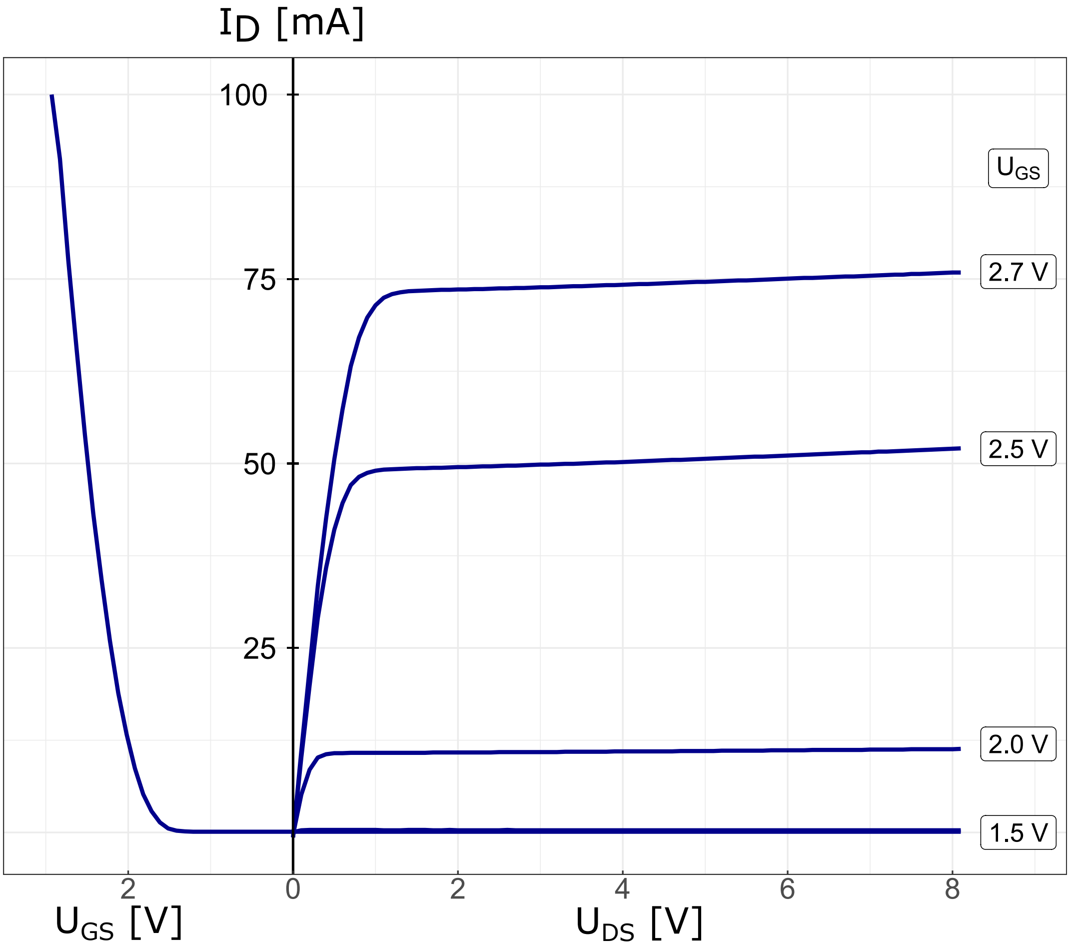

Abbildung 2.6: Kennlinienfelder des Feldeffektransistors

sperrend, danach steigt der Strom sprungartig an. Das I_D-U_{GS} Kennlinienfeld zeigt die Steuerungseigenschaft des MOS-FET´s.

2.4 Solarzelle

Grundlagen - wichtige Kenngrößen

Das Strom-/Spannungsverhältnis ist durch

$$I(U) = I_S \left(e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right) - I_P \tag{2.12}$$

näherungsweise beschrieben. Die Gleichung entspricht bis auf I_P (Photostrom) der Diodengleichung, denn da eine Solarzelle eigentlich nur eine große lichtsensitive Diode ist, gilt für sie, solange sie abgedunkelt ist die Schockley-Gleichung.
.

Die Leerlaufspannung ist als die ohne Stromfluss durch die Solarzelle erzeugte Potentialdifferenz definiert. $\rightarrow I(U_{OC}) \stackrel{!}{=} 0$ Wenn man dies in Gleichung 2.12 einsetzt ergibt sich:

$$U_{OC} = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_P}{I_S}$$

Der Kurzschlussstrom ist der Strom, der ohne anliegende Spannung fließt.

$$I_{SC} = I(0) = I_S \left(e^{\frac{e \cdot 0}{nkT}} - 1 \right) - I_P = I_S (1 - 1) - I_P = -I_P.$$

Der negierte Photostrom entspricht also dem Kurzschlusstrom

Der Maximum-Power-Point ist der Punkt der maximalen Leistung P_{Max} einer Solarzelle. Um ihn zu erreichen gilt es $P = I \cdot U$ zu maximieren.

Der Füllfaktor $FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}}$ ist ein Gütekriterium. Er sollte nahe 1 liegen.

Der Wirkungsgrad ist der Quotient aus maximaler Leistung und durch die Bestrahlung gegebenen:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}}$$

2.4.1 Dunkelkennlinien

Die Gleichung der Dunkelkennlinie ist äquivalent zur Diodengleichung 2.1. Nach Rechnungen und Fits gleicher Art, wie zuvor im Versuchteil der Dioden erhalten wir folgende Ergebnisse aus den Fits:

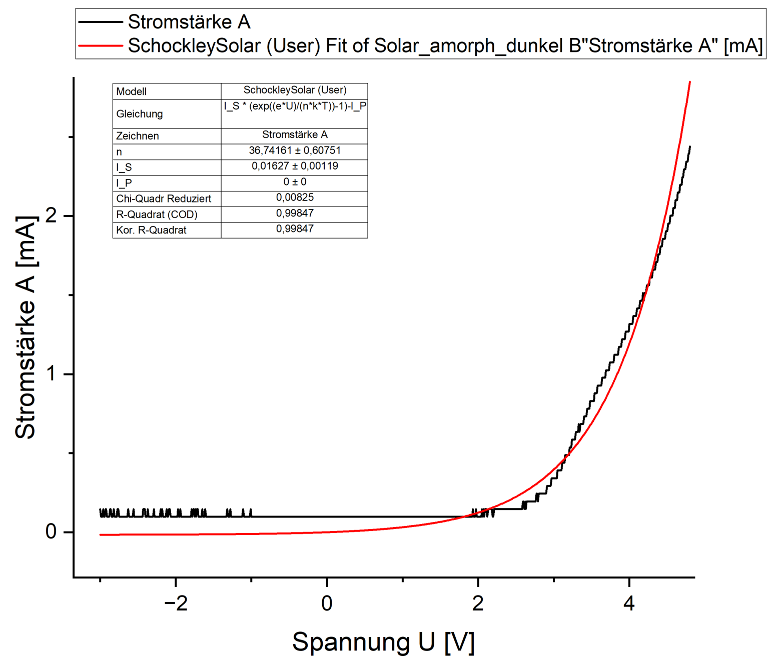

Abbildung 2.7: Kennlinie der amorphen Solarzelle im Dunkeln

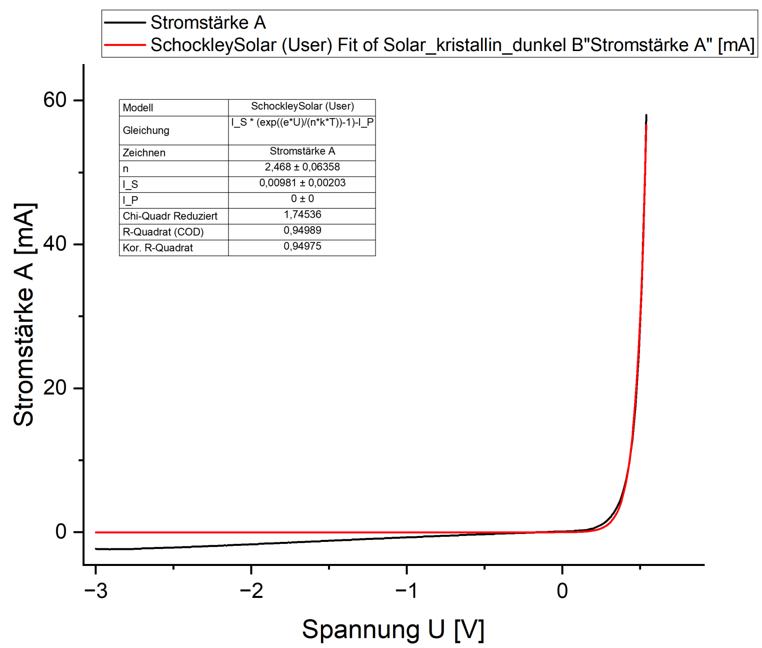

Abbildung 2.8: Kennlinie der kristallinen Solarzelle im Dunkeln

- Amorphe Solarzelle:
  - Sättigungsstrom $I_\mathrm{S} = (0.016\,27 \pm 0.001\,19)\,\mathrm{mA}$
  - Emissionskoeffizient $n = 36.742 \pm 0.608$

  - Die amorphe Solarzelle zeigt starke Abweichungen zur idealen Diode auf. Dies ist auch zu erwarten, da in der Zelle keine Fernordnung existiert, und sie somit einer idealen Diode recht unähnlich ist.
- Kristalline Solarzelle:
  - Sättigungsstrom $I_\mathrm{S} = (0.009\,81 \pm 0.002\,03)\,\mathrm{mA}$
  - Emissionskoeffizient $n = 2.4680 \pm 0.0636$
  - Die Ähnlichkeit zur idealen Diode lässt sich auf den strukturellen Aufbau der Zelle zurückführen.

2.4.2 Hellkennlinien

Aus dem Graph der Hellkennlinie, lassen sich die anderen Werte ablesen:

Der Kurzschlussstrom I_{SC} ist der Achsenabschnitt der vertikalen Achse, der nach Ablesen noch durch die Fläche der Zelle zu teilen ist. Im Fall der amorphen Zelle ist für diesen und andere Werte entweder ein Faktor (Strom) oder Divisor (Spannung) 5 hinzuzufügen, da es sich um fünf Einzelzellen handelt.

Die Leerlaufspannung U_{OC} ist der Achsnabschnitt der horizontalen Achse.

Der Füllfaktor ergibt sich aus dem Minimum der Leistungs-Spannungs-Kurve. Der Punkt dieser Stelle im I-U-Diagramm ist der MPP. Der Füllfaktor ist dann $Ff = \frac{I_{MP}U_{MP}}{I_{SC}U_{OC}}$.

Der Wirkungsgrad ist $\mu = \frac{\text{maximale Leistung}}{\text{Lichtleistung}}$.

2.4.2.1 Kristalline Solarzelle

Die Solarzelle hat einen Durchmesser von $5\,\mathrm{cm}$ was eine Fläche von $\pi \cdot 2.5^2 = 19.63\,\mathrm{cm}^2$ entspricht. Die Werte der Solarzelle sind:

Leerlaufspannung

$$U_{OC} = 0,472\,\mathrm{V}$$

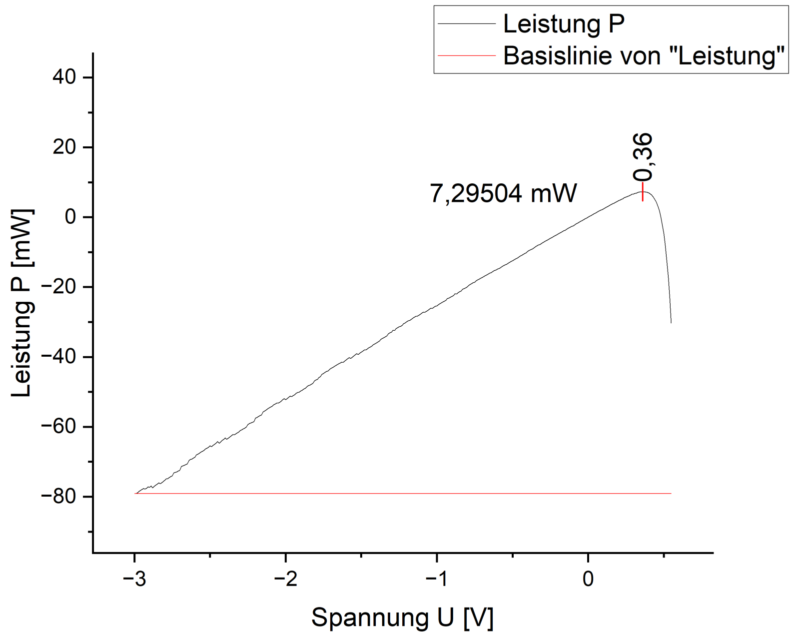

Abbildung 2.9: Leistungskennlinie der kristallinen Solarzelle im Licht

Kurzschlussstrom

$$\left|\frac{I_{SC}}{A}\right| = \frac{23,9\,\mathrm{mA}}{19.63\,\mathrm{cm}^2} \approx 1.22\,\mathrm{mA\,cm}^{-2}$$

MPP Siehe hierzu Graph 2.9

$$U_{MP} = 0,36\,\mathrm{V}$$

$$|I_{MP}| = 20,264\,\mathrm{mA}$$

Dieser Punkt impliziert eine Leistung von 7,295mV.

Füllfaktor

$$Ff = \frac{I_{MP}U_{MP}}{I_{SC}U_{OC}} = \frac{20.264\,\mathrm{mA}\cdot 0.36\,\mathrm{V}}{23.9\,\mathrm{mA}\cdot 0.472\,\mathrm{V}} = 0.646\,678 \approx 64.67\,\%$$

Der Wirkungsgrad ist über die Leistung der Lampe zu errechnen. Auf einen Messkopf mit einem Durchmesser von $1\,\mathrm{cm} = 0.01\,\mathrm{m}$ strahlt die Lampe am Ort der Messung (der Solarzellen und des Messkopfs) eine Leistung von $P = 9.2\,\mathrm{mW}$ ab. Das entspricht einer Leistungsdichte von $\frac{P}{A} = \frac{9.2\,\mathrm{mW}}{\pi\cdot(0.005\,\mathrm{m})^2} = \frac{9.2\,\mathrm{mW}}{7.854\times10^{-5}\,\mathrm{m}^2} = 117.138\,\mathrm{W\,m^{-1}}$ Auf Die Solarzelle fällt also eine Leistung von:

$$P = 117.138\,\mathrm{W\,m^{-1}} \cdot 19.63\,\mathrm{cm}^2 = 22.99\,\mathrm{W}$$

Der Wirkungsgrad ist somit:

$$\eta = \frac{I_{MP}U_{MP}}{P_{Ges}A} = \frac{9,37\,\mathrm{mW}}{300\,\mathrm{mW}} = 3,12\%.$$

Die Kennlinie ist in Abbildung **??** zu sehen.

2.4.2.2 Amorphe Solarzelle

Wir gehen hier davon aus, dass die Fläche von 6cm^2 auf alle fünf Zellen bezogen ist.

Leerlaufspannung

$$U_{OC} = \frac{3,15\,\mathrm{V}}{5} = 630\,\mathrm{mV}$$

Kurzschlussstrom

$$\frac{I_{SC}}{A} = \frac{5\cdot 0,781\,\mathrm{mA}}{\frac{6}{5}\,\mathrm{cm}^2} = 3,254\,\frac{\mathrm{mA}}{\mathrm{cm}^2}$$

MPP Siehe hierzu Graph **??**

$$U_{MP} = \frac{2,1}{5}\,\mathrm{V} = 0,42\,\mathrm{V}|I_{MP}| = 3,49\,\mathrm{mA}$$

mit einer Leistung von 1,4643mV

Füllfaktor

$$Ff = \frac{I_{MP}U_{MP}}{I_{SC}U_{OC}} = \frac{0,99\,\mathrm{mW}}{5\cdot 0,781\cdot\frac{3,15}{5}\,\mathrm{mW}} = 40,2$$

Der Wirkungsgrad ist erneut über die Leistung der Lampe zu errechnen. Diese strahlt 150W aus. Die Solarzelle ist 41,7cm entfernt und mit einem Flächeninhalt von in Summe 6cm^2 ergibt sich so eine Lichtleistung auf allen fünf Solarzellen von $150W\cdot\frac{6cm^2}{262,01cm^2} = 3,43\,\mathrm{W}$

3. Fazit

Abbildungsverzeichnis

Literaturverzeichnis

[1] I. Physikalisches Institut, „Versuch 1.8: I-U-Kennlinien an Halbleitern und Solarzellen “, 2024.

[2] K. Beuth, „Elektronik 2 – Bauelemente“, Vogel Buchverlag (Bauelemente)

[3] S. Hunklinger, „Festkörperphysik“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag (Grundlagen)

Anhang