

JUSTUS-LIEBIG-



UNIVERSITÄT
GIESSEN

Versuch 4 des
FORTGESCHRITTENEN-PRAKTIKUMS

UI-Kennlinien

Versuchstermin Freitag, 17.05.2024

Praktikumsbetreuer:

Marius Müller

marius.mueller@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	3
1 Versuchsaufbau und Durchführung	4
2 Auswertung	5
2.1 Diode	5
2.2 Bipolartransistor	6
2.2.1 Vierpolarparameter	7
2.2.2 Bestimmung der Parameter	8
2.3 Feldeffekttransistor	10
2.4 Solarzelle	12
2.4.1 Dunkelkennlinien	12
2.4.2 Hellkennlinien	14
2.4.2.1 Kristalline Solarzelle	14
Leerlaufspannung	14
Kurzschlussstrom	15
MPP	15
Füllfaktor	15
Der Wirkungsgrad	15
2.4.2.2 Amorphe Solarzelle	16
Leerlaufspannung	16
Kurzschlussstrom	17
MPP	17
Füllfaktor	17
Der Wirkungsgrad	18
3 Fazit	19
Abbildungsverzeichnis	20

Literaturverzeichnis	21
Anhang	22

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:

$$I_D = I_S(T) \left(e^{\frac{U}{n U_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Dabei bezeichnet $I_S(T)$ den Sättigungssperrstrom welcher typischerweise zwischen $10 \times 10^{-12} \text{ A}$ und $10 \times 10^{-6} \text{ A}$ liegt, $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$ 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 $U_T = 25 \text{ mV}$.

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 $I_S = (2.1290 \pm 2.0394) \times 10^{-2} \mu\text{A}$
- 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:

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

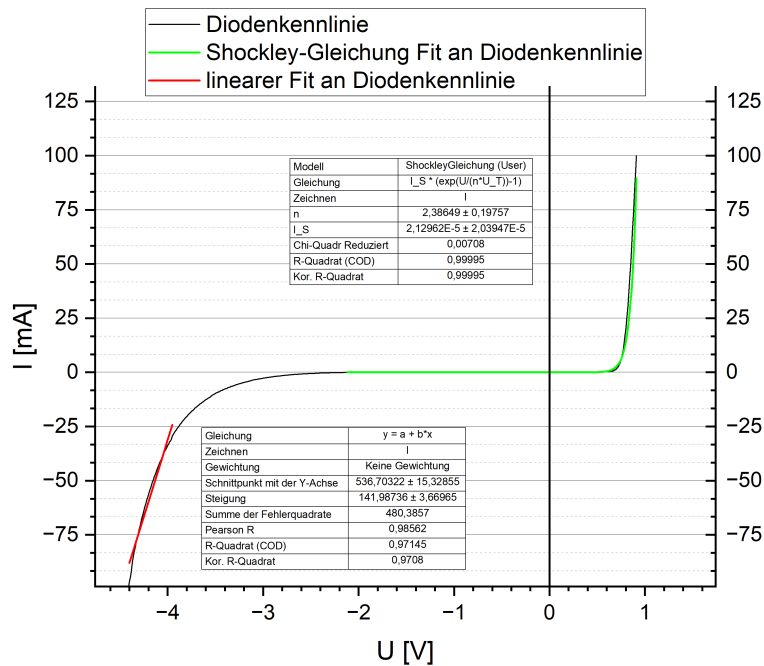


Abbildung 2.1: Kennlinie der Diode

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:

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

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

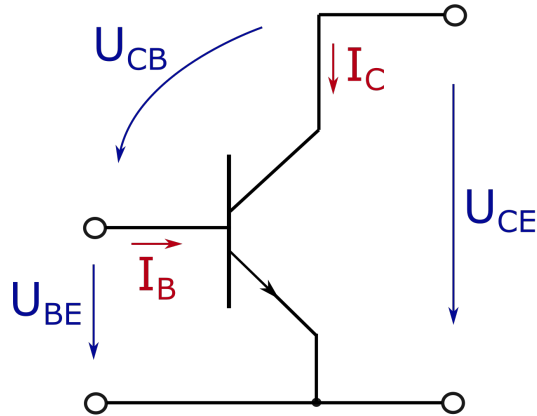


Abbildung 2.2: Schaltskizze eines pnp-Transistors

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

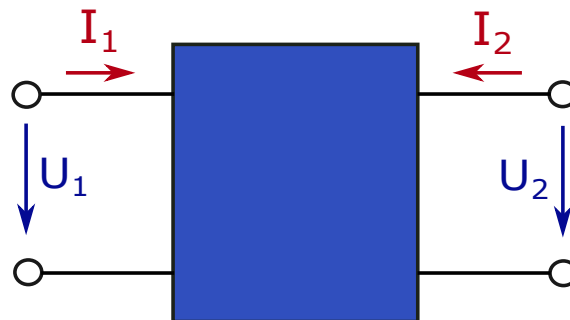


Abbildung 2.3: allgemeiner Vierpol

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 2×2 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:

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

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

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

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:

$$I_B = 0.2 \text{ mA} \quad U_{CE} = 2 \text{ V} \quad (2.5)$$

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:

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad (2.6)$$

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:

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

Der Vierpolparameter h_{22} kann im Ausgangskennlinienfeld über den differentiellen Transistor-Ausgangswiderstand bestimmt werden. Der Widerstand ist die Steigung des Fits, erneut werden die mA in A umgerechnet:

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

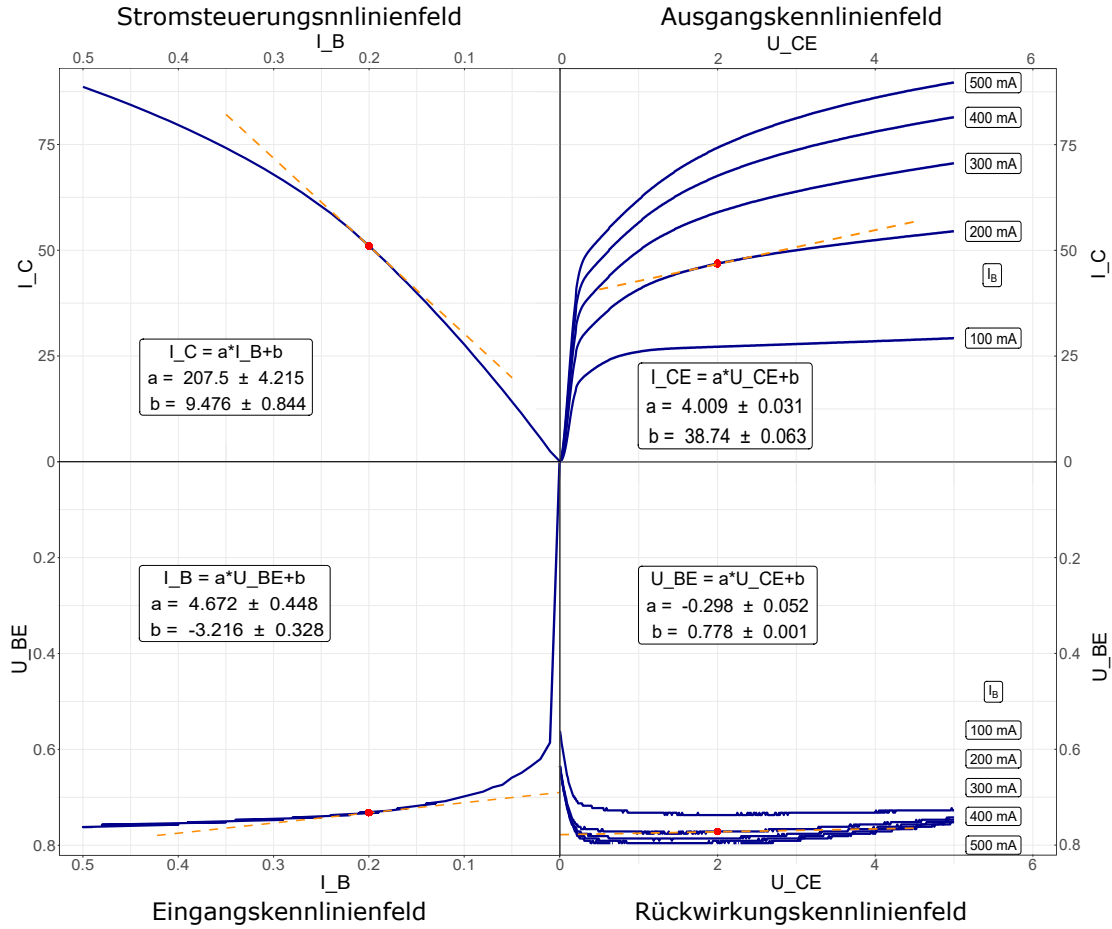


Abbildung 2.4: Vierquadrantenkennlinienfeld des Bipolartransistors

Der dazugehörige Vierpolparameter berechnet sich aus dem Kehrwert des Ausgangswiderstands:

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

Aus dem Stromsteuerungskennlinienfeld I_C - I_B kann der differentielle Stromverstärkungsfaktor β bestimmt werden. Dieser 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} :

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = 207.5 \pm 4.2 = h_{21} \quad (2.10)$$

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.

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

2.3 Feldeffekttransistor

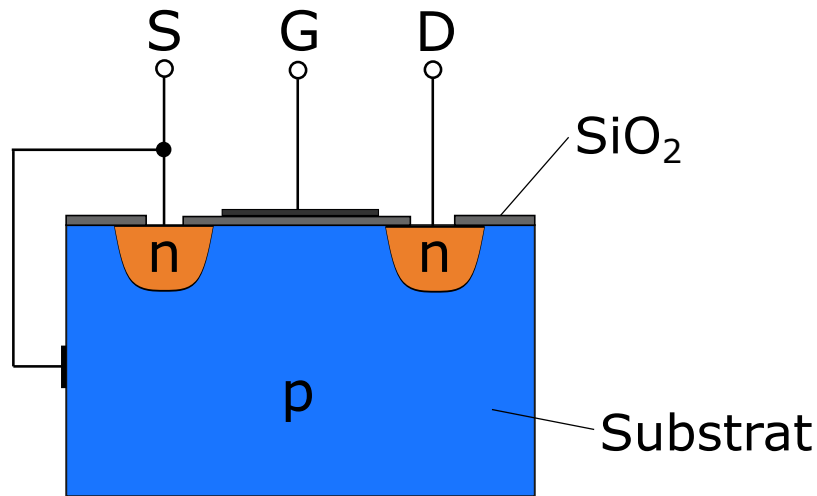


Abbildung 2.5: Grundlegender Aufbau eines Metall-Oxid-Feldeffekttransistors

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 Steuerung 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 Feldeffekttransistors geplottet. Das erstere wird auch Ausgangskennlinienfeld genannt; es wurde für verschiedene Steuerspannungen U_{GS} aufgezeichnet. Ab der Mindest-Gatespannung von etwas unter 1 V, steigen die Kennlinien nur geringfügig an.

Im linken, dem Eingangskennlinienfeld 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 selbstsperrend,

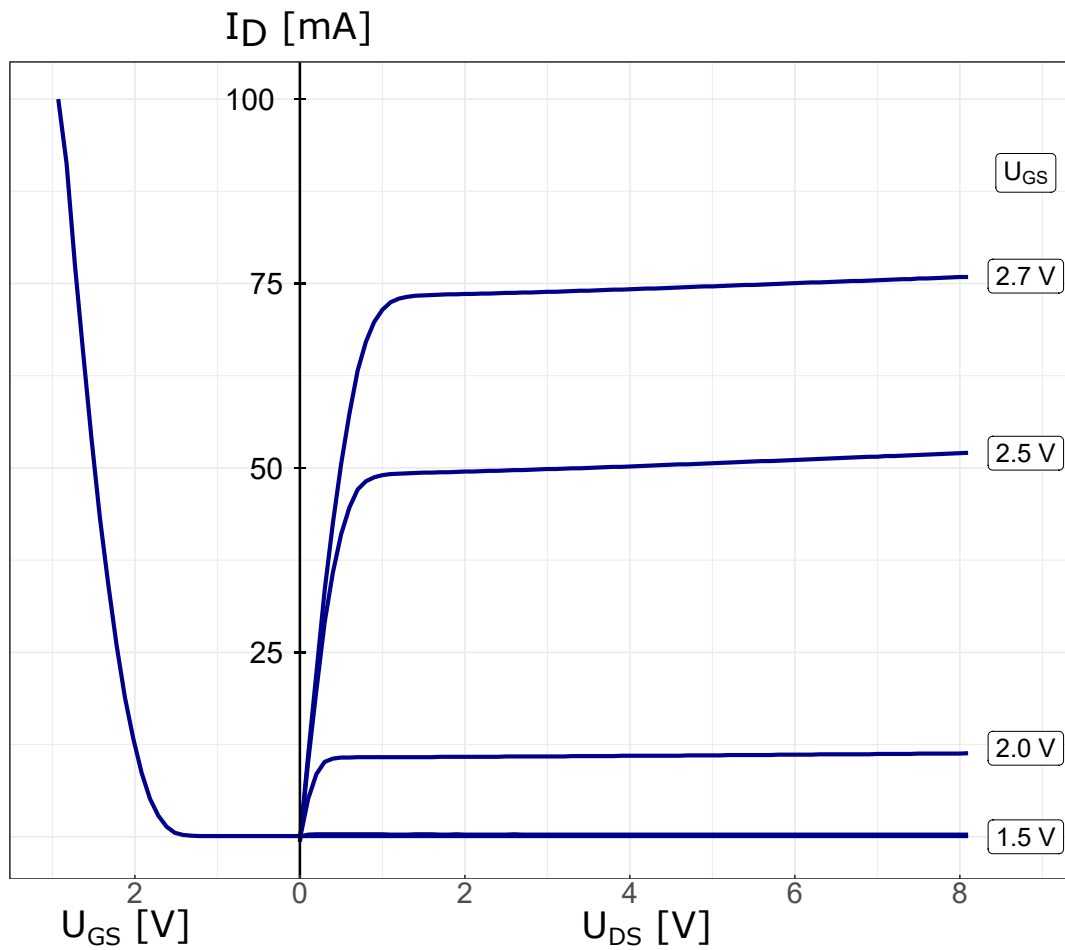


Abbildung 2.6: Kennlinienfelder des Feldeffekttransistors

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

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

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

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 Versuchsteil der Dioden, erhalten wir folgende Ergebnisse aus den Fits:

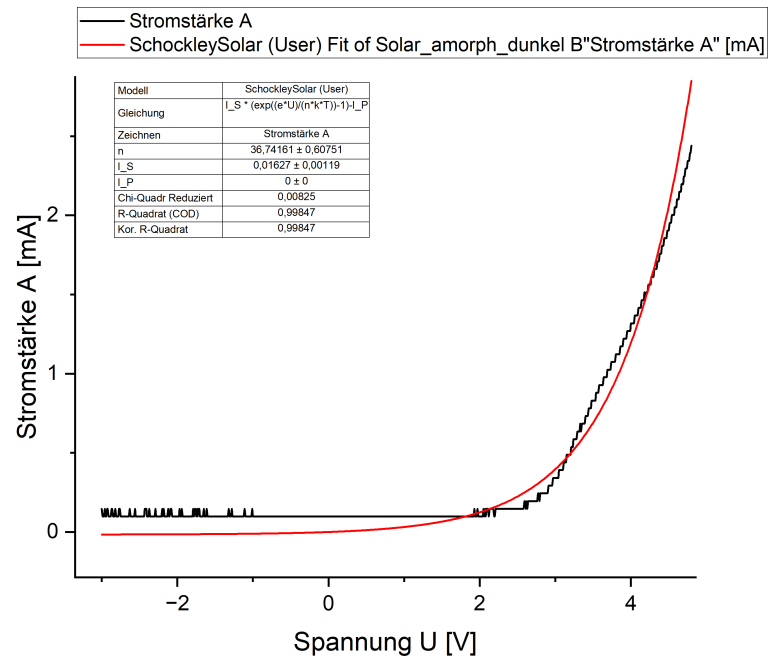


Abbildung 2.7: Kennlinie der amorphen Solarzelle im Dunkeln

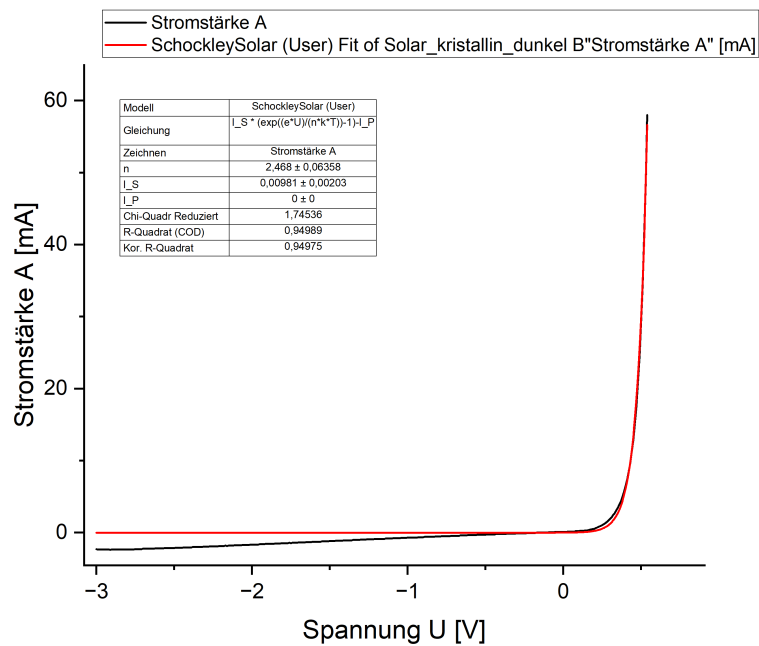


Abbildung 2.8: Kennlinie der kristallinen Solarzelle im Dunkeln

- Amorphe Solarzelle:
 - Sättigungsstrom $I_S = (0.016\,27 \pm 0.001\,19) \text{ mA}$
 - 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 $I_S = (0.009\,81 \pm 0.002\,03) \text{ mA}$
 - 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 Achsenabschnitt 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 cm was eine Fläche von $\pi \cdot 2.5^2 = 19.63 \text{ cm}^2$ entspricht. Die Werte der Solarzelle sind:

Leerlaufspannung

$$U_{OC} = 0.472 \text{ V}$$

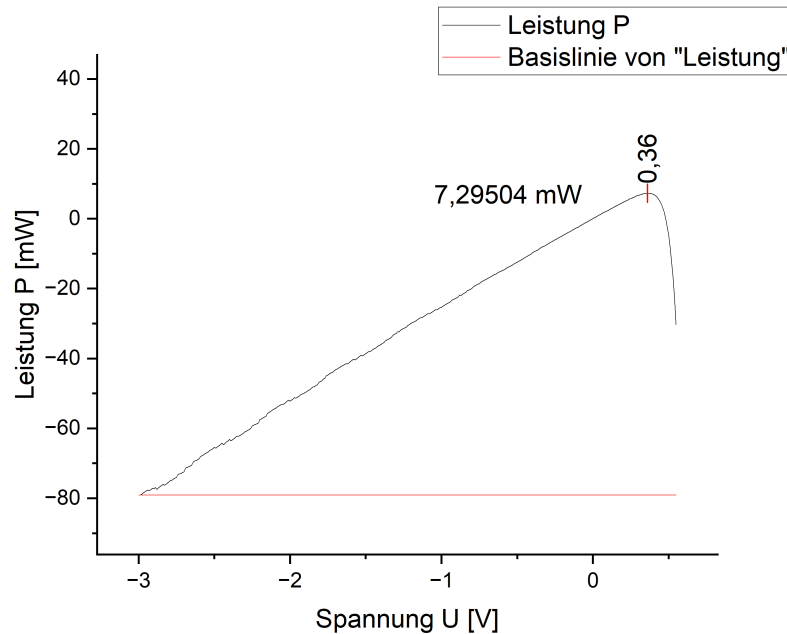


Abbildung 2.9: Leistungskennlinie der kristallinen Solarzelle im Licht

Kurzschlussstrom

$$\left| \frac{I_{SC}}{A} \right| = \frac{23.9 \text{ mA}}{19.63 \text{ cm}^2} \approx 1.22 \text{ mA cm}^{-2}$$

MPP Siehe hierzu Graph 2.9

$$U_{MP} = 0.36 \text{ V}$$

$$|I_{MP}| = 20.264 \text{ mA}$$

dieser Punkt impliziert eine Leistung von 7.295 mW.

Füllfaktor

$$Ff = \frac{I_{MP} U_{MP}}{I_{SC} U_{OC}} = \frac{20.264 \text{ mA} \cdot 0.36 \text{ V}}{23.9 \text{ mA} \cdot 0.472 \text{ V}} = 0.646678 \approx 64.67\%$$

Der Wirkungsgrad ist über die Leistung der Lampe zu errechnen. Auf einen Messkopf mit einem Durchmesser von $1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$ strahlt die Lampe am Ort der Messung (der Solarzellen und des Messkopfs) eine Leistung von $P = 9.2 \text{ mW}$ ab. Das

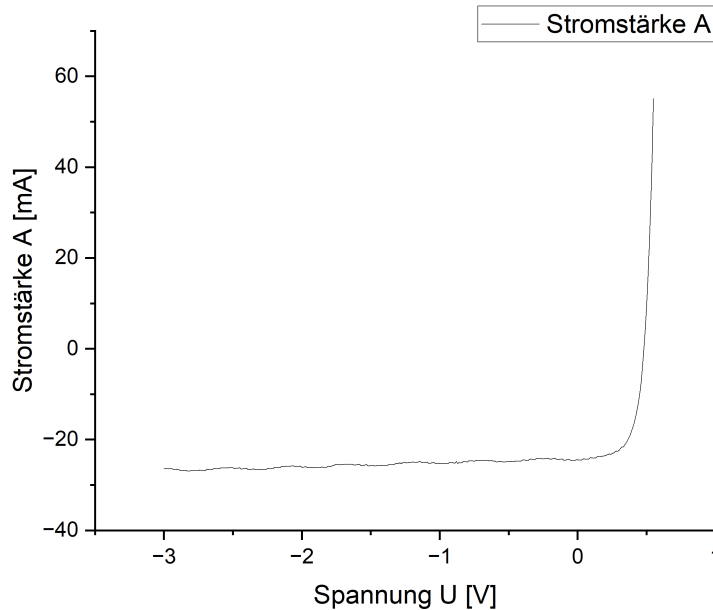


Abbildung 2.10: Kennlinie der kristallinen Solarzelle im Licht

entspricht einer Leistungsdichte von $\frac{P}{A} = \frac{9.2 \text{ mW}}{\pi \cdot (0.005 \text{ m})^2} = \frac{9.2 \text{ mW}}{7.854 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 117.138 \text{ W m}^{-1}$
 Auf die Solarzelle fällt also eine Leistung von:

$$P_{beleucht} = 117.138 \text{ W m}^{-1} \cdot 19.63 \text{ cm}^2 = 22.99 \text{ W}$$

Der Wirkungsgrad ist somit:

$$\eta = \frac{P_{MMP}}{P_{beleucht}} = \frac{7.295 \text{ mW}}{22.99 \text{ W}} = 3.173 \times 10^{-4} \approx 0.03 \text{ \%}.$$

Die Kennlinie der Solarzelle ist in Abbildung 2.10 zu sehen.

2.4.2.2 Amorphe Solarzelle

Die Solarzelle hat die Maße: 2.2 cm x 2.8 cm, was einer Fläche von 6.16 cm² entspricht.
 Die Werte der Solarzelle sind:

Leerlaufspannung

$$U_{OC} = \frac{3.076 \text{ V}}{5} = 0.6352 \text{ V}$$

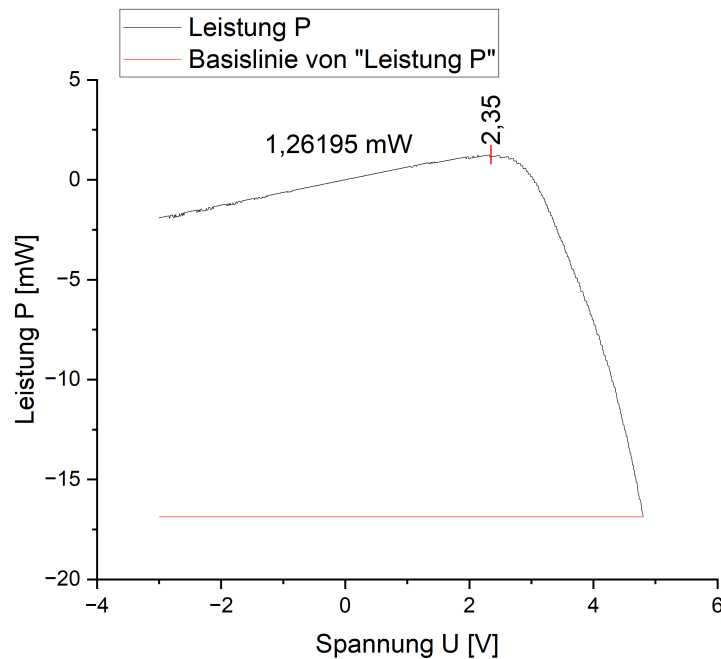


Abbildung 2.11: Leistungskennlinie der amorphen Solarzelle im Licht

man beachte, dass man hier durch die Anzahl der verwendeten Einzelzellen teilen muss,

Kurzschlussstrom

$$\left| \frac{I_{SC}}{A} \right| = \frac{735 \mu\text{A}}{6.16 \text{ cm}^2} \cdot 5 \approx 0.597 \text{ mA cm}^{-2}$$

MPP Siehe hierzu Graph 2.11

$$U_{MP} = 2.35 \text{ V}$$

$$|I_{MP}| = 0.537 \text{ mA}$$

dieser Punkt impliziert eine Leistung von 1.262 mW.

Füllfaktor

$$Ff = \frac{I_{MP} U_{MP}}{I_{SC} U_{OC}} = \frac{0.537 \text{ mA} \cdot 2.35 \text{ V}}{3.675 \text{ mA} \cdot 0.6352 \text{ V}} = 0.5406 \approx 54.06 \%$$

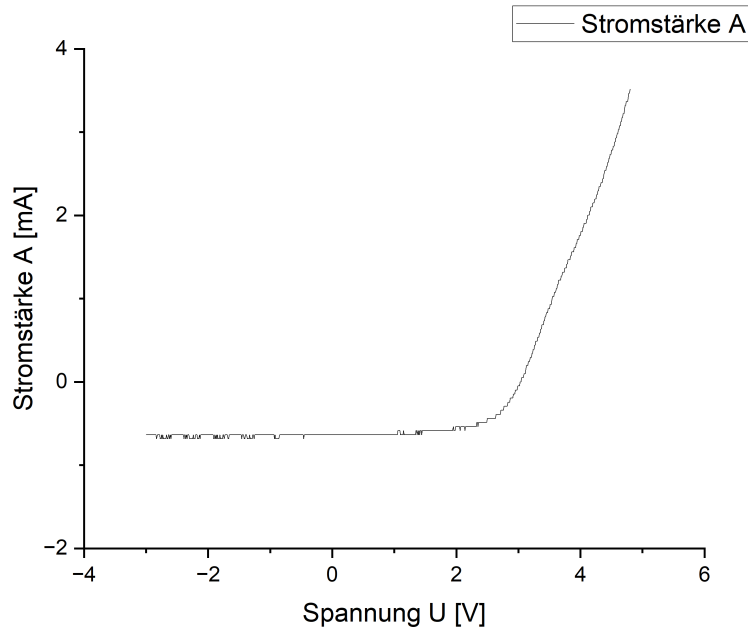


Abbildung 2.12: Kennlinie der amorphen Solarzelle im Licht

Der Wirkungsgrad ist über die Leistung 117.138 W m^{-1} der Lampe zu errechnen.

Auf die Solarzelle fällt dann eine Leistung von:

$$P_{\text{beleucht}} = 117.138 \text{ W m}^{-1} \cdot 6.16 \text{ cm}^2 \approx 7.22 \text{ W}$$

Der Wirkungsgrad ist somit:

$$\eta = \frac{P_{MMP}}{P_{\text{beleucht}}} = \frac{1.262 \text{ mW}}{7.22 \text{ W}} = 1.74792 \times 10^{-4} \approx 0.017 \text{ \%}.$$

Die Kennlinie der Solarzelle ist in Abbildung 2.12 zu sehen.

3. Fazit

In diesem Protokoll zu U - I -Kennlinien von Halbleiterbauelementen, konnten Einblicke in die Funktionsweise dieser gewonnen und charakteristische Eigenschaften der Bauelemente bestimmt werden.

Im Fall der Diode konnte ihr Verhalten als Gleichrichter beobachtet werden, da die Kennlinie in Durchlass- und Sperrrichtung ein anderes Verhalten aufweist. Durch das Fitten der Shockley-Gleichung, wurden der Sättigungsstrom und Emissionskoeffizient bestimmt.

Für den Bipolartransistor wurde ein Vierquadrantenfeld aufgenommen und durch einen gewählten Arbeitspunkt die Vierpolparameter des Transistors bestimmt. Dafür wurde nicht direkt der jeweilige Anstieg am Arbeitspunkt verwendet, sondern ein Bereich um diesen, da es sich um Messdaten handelt und diese natürlicherweise Schwankungen aufweisen. Mit einem Stromverstärkungsfaktor von rund 200, wurde ein sehr typischer Wert für Kleinsignaltransistoren in der Emitterschaltung bestimmt. An diesem Wert wird deutlich, dass Transistoren nicht nur als elektrische Schalter genutzt werden können, sondern auch als Verstärker; so finden sie zum Beispiel Anwendung in den Schaltungen von Operationsverstärkern.

Der Feldeffekttransistor konnte klar als Metall-Oxid-Feldeffekttransistor identifiziert werden, da er bei nicht angelegter Steuerspannung sperrend war und kein Strom geflossen ist. Der Vorteil von Feldeffekttransistoren gegenüber Bipolartransistoren ist, dass sie quasi leistungslos gesteuert werden können, da sie spannungsgesteuert sind und kein Strom fließen muss.

Die Solarzellen hatten erstaunlich geringe Wirkungsgrade (wobei auch die anfängliche Beleuchtungsmessung fehlerhaft sein könnte) und nach unserer Messung hatte die kristalline Solarzelle einen höheren Wirkungsgrad.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kennlinie der Diode	6
2.2	Schaltskizze eines pnp-Transistors	7
2.3	allgemeiner Vierpol	7
2.4	Vierquadrantenkennlinienfeld des Bipolartransistors	9
2.5	Grundlegender Aufbau eines Metall-Oxid-Feldeffekttransistors	10
2.6	Kennlinienfelder des Feldeffekttransistors	11
2.7	Kennlinie der amorphen Solarzelle im Dunkeln	13
2.8	Kennlinie der kristallinen Solarzelle im Dunkeln	13
2.9	Leistungskennlinie der kristallinen Solarzelle im Licht	15
2.10	Kennlinie der kristallinen Solarzelle im Licht	16
2.11	Leistungskennlinie der amorphen Solarzelle im Licht	17
2.12	Kennlinie der amorphen Solarzelle im Licht	18

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