



physikalisches Institut
Fortgeschrittenenpraktikum

Prak.: P2 Semester: SS18 Wochentag: Mo Gruppennr.: 42

Name: Bernhardt Vorname: Felix

Name: Vosteen Vorname: Lars

Emailadresse(n): Felix.Bernhardt@physik.uni-giessen.de, Lars.B.Vosteen@physik.uni-giessen.de

Versuch: U-I-Kennlinien von Halbleitern und Solarzellen Fehlerrech.: Ja

Betreuer: Fabian Michel Durchgeführt am: 02.07.'18

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

Abgabe am: _____

Rückgabe am: _____ Note: _____

Begründung:

Inhaltsverzeichnis

0. Zielsetzung	1
1. Versuch	2
1.1. Diode	2
1.1.1. Grundlagen - Diodengleichung	2
1.2. Bipolartransistor	4
1.2.1. Grundlagen	4
1.3. Feldeffekttransistor	4
1.4. Solarzelle	4
1.4.1. Dunkelkennlinien	6
1.4.1.1. Monokristalline Solarzelle	6
1.4.1.2. Amorphe Solarzelle	6
1.4.2. Hellkennlinien	7
1.4.2.1. Monokristalline Solarzelle	7
1.4.2.2. Amorphe Solarzelle	9
2. Fazit	11
2.0.1. Diode	11
2.0.2. Bipolartransistor	11
2.0.3. Feldeffekttransistor	11
2.0.4. Solarzellen	11
Anhang	12
A. Graphen	12
Literaturverzeichnis	14

Abbildungsverzeichnis

1.1. Diodenkennlinie	3
1.2. Kennlinienfeld des Bipolartransistors	5
1.3. Kennlinienfeld des Feldeffekttransistors	5
1.4. Dunkelkennlinie der monokristallinen Solarzelle	7
1.5. Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle.	8
1.6. Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle.	9
1.7. Hellkennlinie der amorphen Solarzelle.	10

A.1. Eingangslinie des Feldeffekttransistors	12
A.2. MPPbestimmung der Hellkennlinie der amorphen Solarzelle	13
A.3. MPPbestimmung der Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle	13

Tabellenverzeichnis

0. Zielsetzung

Es sollen die typische Kennlinien einer Diode, eines Bipolartransistors sowie eines Feldeffekttransistors aufgenommen werden. Ebenso sind gängige Kenngrößen verschiedener Solarzellen durch Aufnahme einer Dunkel- sowie Hellkennlinie zu bestimmen.

1. Versuch

1.1. Diode

Durchführung

Am Anfang dieses Versuchsteils bestimmten wir Sperr- und Durchlassrichtung der Diode. Dann nutzten wir das gegebene Programm um die Diodenkennlinie aufzunehmen.

1.1.1. Grundlagen - Diodengleichung

Die auch Shockley-Gleichung genannte Diodengleichung ist:

$$I_D = I_S(T) \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

$I_S(T)$ bezeichnet den Sättigungssperrstrom, $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$ die Temperaturspannung und n den Idealitätsfaktor. Dieser soll bestimmt werden.

In unserem Fall (Raumtemperatur) beträgt die Temperaturspannung $U_T = 25 \text{ mV}$.

Rechnung - Idealitätsfaktor

Durch Variation der angelegten Spannung erhalten wir Abbildung 1.1. Dafür wurde die rechte Seite der Grafik mit der Shockley-Gleichung gefittet. Der Idealitätsfaktor kann dann über den Parameter B bestimmt werden:

$$n = \frac{e}{BkT} = \frac{e}{13.44 \frac{J}{C} k \cdot 300K} \approx 2.88 \quad (1.2)$$

Fehlerrechnung - Idealitätsfaktor

Um den Fehler durch Fehlerfortpflanzung zu bestimmen nehmen wir den auf dem Fit gegebenen Wert für den angepassten Parameter $\frac{1}{nU_T}$, welchen origin uns mit $\Delta(nU_T)^{-1} = \pm 0.687$ angibt. Der Gesamtfehler beträgt somit:

$$\Delta n = \left| \frac{\partial n}{\partial B} \right| \Delta B = \left| \frac{e}{B^2 k T} \right| \Delta B = \frac{e}{13.44^2 \frac{J^2}{C^2} k \cdot 300K} \cdot 0.69 \frac{J}{C} \approx 0.15 \quad (1.3)$$

Ergebnis - Idealitätsfaktor

Der bestimmte Idealitätsfaktor der Diode ist somit:

$$n = (2.88 \pm 0.15) \quad (1.4)$$

Typische Idealitätsfaktoren für ideale Dioden liegen im Bereich 1-2. Wir haben also keine ideale Diode vorliegen.

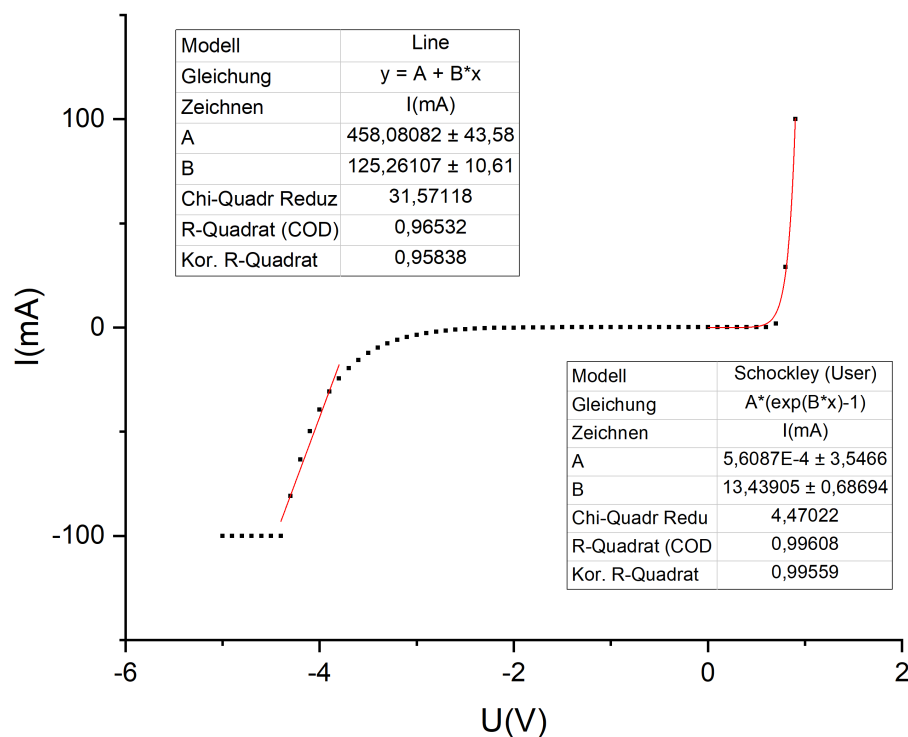


Abbildung 1.1.: Diodenkennlinie

Rechnung - Durchschlagsspannung

Um die Durchschlagsspannung zu bestimmen fitten wir den linearen Ansatz $I(U) = B \cdot U + A$ an den Bereich der starken Steigung auf der Sperrrichtungsseite. Der Betrag des horizontalen Achsenabschnitts ist die gesuchte Spannung.

Aus der Messung (siehe Grafik 1.1) ergeben sich die Werte $A = 458.08 \text{ mA}$ und $B = 125,26 \frac{1}{\Omega}$, die mit der Gleichung $I = B \cdot U_D + A \stackrel{!}{=} 0$

$$U_D = \frac{-A}{B} \approx -3.66 \text{ V}$$

ergeben.

Fehlerrechnung - Durchschlagsspannung

Aus Origin werden folgende Fehler für B und A gegeben: $\Delta B = \pm 10.61$ und $\Delta A = \pm 43.58$.

Erneut durch Fehlerfortpflanzung erlangen wir:

$$\Delta U = \left| \frac{\partial U_D}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial U_D}{\partial A} \right| \Delta A = \left| \frac{A \Delta B}{B^2} \right| + \left| \frac{\Delta A}{B} \right| \approx 0.66 \text{ V} \quad (1.5)$$

Ergebnis - Durchschlagsspannung

Die bestimmte Durchschlagsspannung ist:

$$U_D = (-3.66 \pm 0.66) \text{ V}. \quad (1.6)$$

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.

1.2. Bipolartransistor

Durchführung

Ab hier stehen uns fremde Messdaten zur Verfügung, da das Messgerät aufgab.

1.2.1. Grundlagen

Um einen Bipolartransistor zu klassifizieren, werden die vier relevanteren Kombinationen der Größen I_E , I_C , I_B , U_{CE} , U_{BE} und U_C aufgetragen. Dies ist in Abbildung 1.2 geschehen.

Die Vierpolparameter als Elemente der $U_{1,2}$ mit $I_{1,2}$ verbindenden Matrix definiert.

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

Hierbei ist:

h_{11} die Kurzschluss-Eingangsimpedanz,

h_{12} die Leerlauf-Spannungsrückwirkung,

h_{21} die negative Kurzschluss-Stromübersetzung und

h_{22} die Leerlauf-Ausgangsadmittanz.

Mit dem von uns gewählten Arbeitspunkt ($U_{CE} = 2V$ und $I_B = 0,2mA$) bestimmen wir die folgenden Werte durch Annäherung der einzelnen Sektoren durch lineare Funktionen:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} = (77,3 \pm 5,3) \Omega \\ h_{12} &= \frac{\partial U_{BE}}{\partial U_{CE}} = (-0,0038 \pm 0,0001) \\ h_{21} &= \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = (179,28 \pm 1,85) \\ h_{22} &= \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} = \frac{0,817 \pm 0,018}{k\Omega} \end{aligned}$$

Die angegebenen Fehler sind die der Fitparameter.

1.3. Feldeffekttransistor

Die in Abbildung 1.3 dargestellten Kennlinien eines Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (FET) belegen, dass es ein selbstsperrender ist, da bei abnehmender Drain-Source-Spannung der Drain-Source-Strom abnimmt.

Auf der linken Seite der Grafik ist das Eingangsfeld, auf der rechten Seite das Ausgangsfeld dargestellt. Im Falle des Eingangsfeldes ist die Gate-Source-Spannung U_{GS} gegen den Strom aufgetragen, beim Ausgangsfeld die Drain-Source Spannung U_{DS} .

1.4. Solarzelle

Grundlagen - wichtige Kenngrößen

Das Strom-/Spannungsverhältnis ist durch

$$I(U) = I_S \left(e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right) - I_P \quad (1.8)$$

näherungsweise beschrieben. Die Gleichung entspricht bis auf I_P (Photostrom) der Diodengleichung.

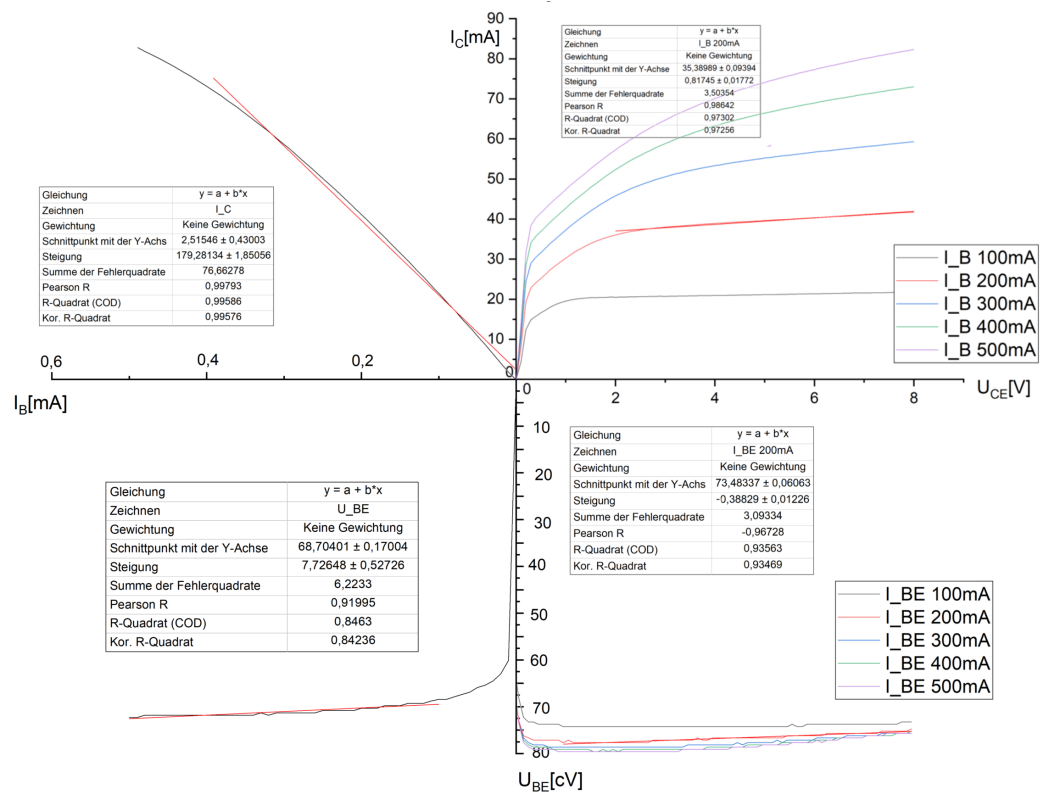


Abbildung 1.2.: Kennlinienfeld des Bipolartransistors

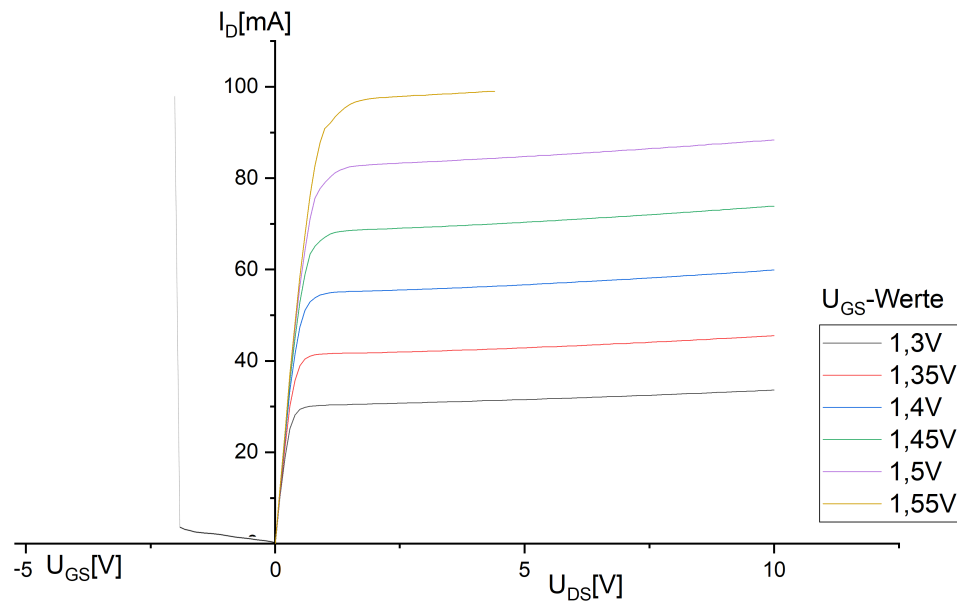


Abbildung 1.3.: Kennlinienfeld des Feldeffekttransistors

Die Leerlaufspannung ist als die ohne Stromfluss durch die Solarzelle erzeugte Potentialdifferenz definiert. $\rightarrow I(U_{OC}) \stackrel{!}{=} 0$ Wenn man dies in Gleichung 1.8 einsetzt ergibt sich:

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

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

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

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:

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

1.4.1. Dunkelkennlinien

Die Gleichung der Dunkelkennlinie ist äquivalent zur Diodengleichung 1.1. Nach Rechnungen und Fits gleicher Art, wie zuvor im Versuchteil der Dioden erhalten wir folgende Ergebnisse:

1.4.1.1. Monokristalline Solarzelle

$$n = \frac{e}{B k T} = \frac{e}{17.84 \frac{J}{C} \cdot k \cdot 300 K} = 2.17$$

$$\Delta n = \left| \frac{e}{B^2 k T} \right| \Delta B = \frac{e}{17.84^2 \frac{J^2}{C^2} k \cdot 300 K} \cdot 0.14 \frac{J}{C} \approx 0.02$$

$$\Rightarrow n = 2.17 \pm 0.02$$

Die Kennlinie ist in Abbildung 1.4 zu sehen. Die Ähnlichkeit zur idealen Diode lässt sich auf den strukturellen Aufbau der Zelle zurückführen.

1.4.1.2. Amorphe Solarzelle

$$n = \frac{e}{B k T} = \frac{e}{0.69 \frac{J}{C} \cdot k \cdot 300 K} = 56.06$$

$$\Delta n = \left| \frac{e}{B^2 k T} \right| \Delta B = \frac{e}{0.69^2 \frac{J^2}{C^2} k \cdot 300 K} \cdot 0.002 \frac{J}{C} \approx 0.16$$

$$\Rightarrow n = 56.06 \pm 0.16$$

Die Kennlinie ist in Abbildung 1.5 zu sehen. 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.

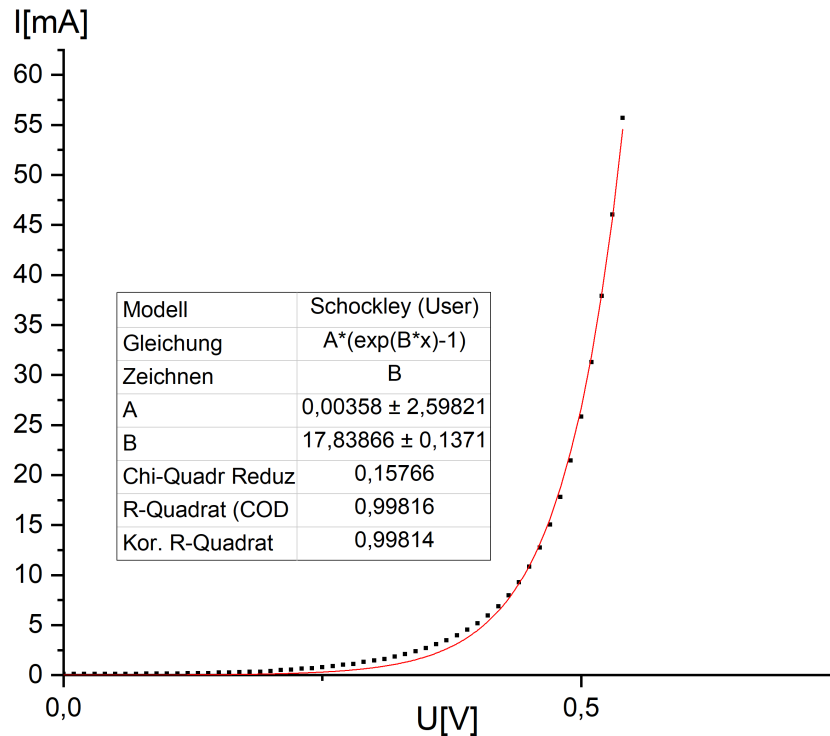


Abbildung 1.4.: Dunkelkennlinie der monokristallinen Solarzelle

1.4.2. 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 $\mu = \frac{\text{maximale Leistung}}{\text{Lichtleistung}}$.

1.4.2.1. Monokristalline Solarzelle

Leerlaufspannung

$$U_{OC} = 0,4955 \text{ V}$$

Kurzschlussstrom

$$\left| \frac{I_{SC}}{A} \right| = \frac{28,995 \text{ mV}}{25 \text{ cm}^2} = 1,160 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

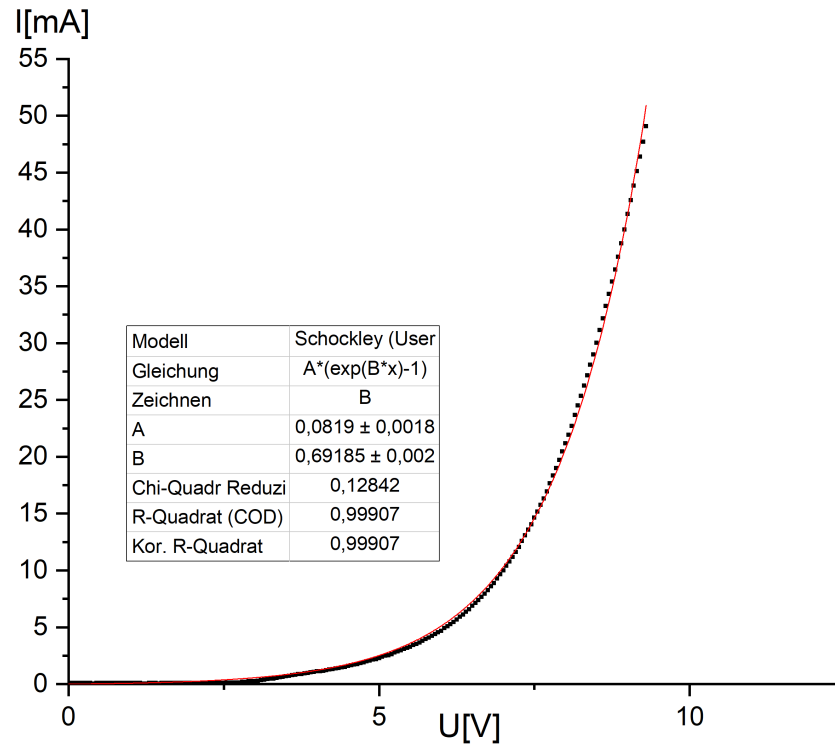


Abbildung 1.5.: Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle.

MPP

Siehe hierzu Graph A.3

$$U_{MP} = 0,39 \text{ V}$$

$$|I_{MP}| = 24,658 \text{ mA}$$

Dieser Punkt impliziert eine Leistung von 9,37 mW.

Füllfaktor

$$Ff = \frac{I_{MP} U_{MP}}{I_{SC} U_{OC}} = \frac{99,1 \text{ mV} \cdot 144,775 \text{ mA}}{390 \text{ mV} \cdot 24,658 \text{ mA}} = 65,3\%$$

Der Wirkungsgrad

ist über die Leistung der Lampe zu errechnen. Diese strahlt in Summe 150W aus. Die Solarzelle ist 44,7cm von der Lampe entfernt und mit einem Flächeninhalt von 25 cm^2 ergibt sich so eine Lichtleistung von $150 \text{ W} \cdot \frac{25 \text{ cm}^2}{12554 \text{ cm}^2} = 0,300 \text{ W}$

Der Wirkungsgrad ist somit:

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

Die Kennlinie ist in Abbildung 1.6 zu sehen.

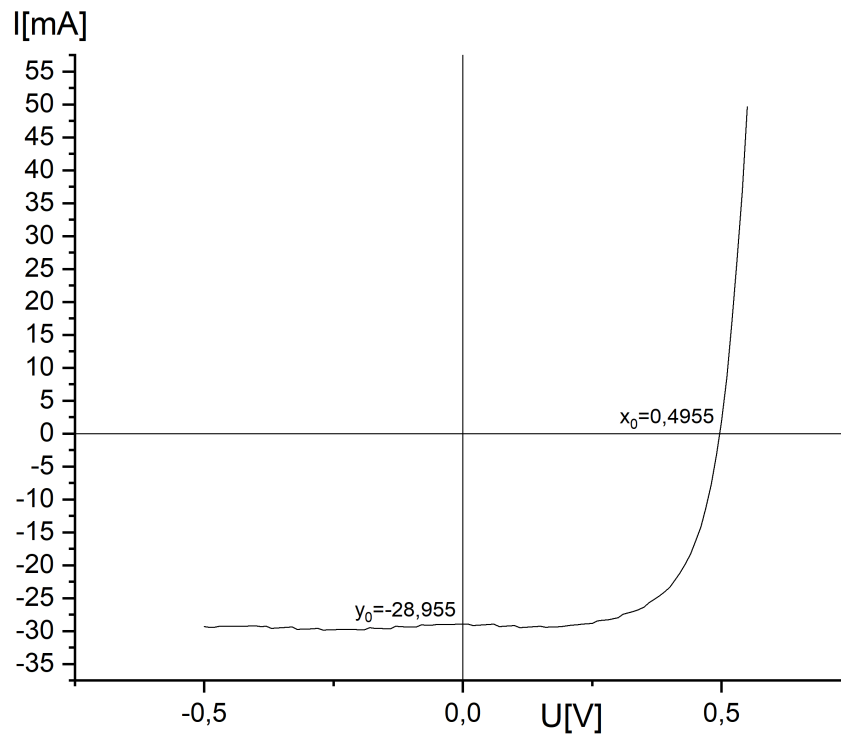


Abbildung 1.6.: Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle.

1.4.2.2. Amorphe Solarzelle

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

Leerlaufspannung

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

Kurzschlussstrom

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

MPP

Siehe hierzu Graph A.2

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

mit einer Leistung von $1,4643\text{ mW}$

Füllfaktor

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

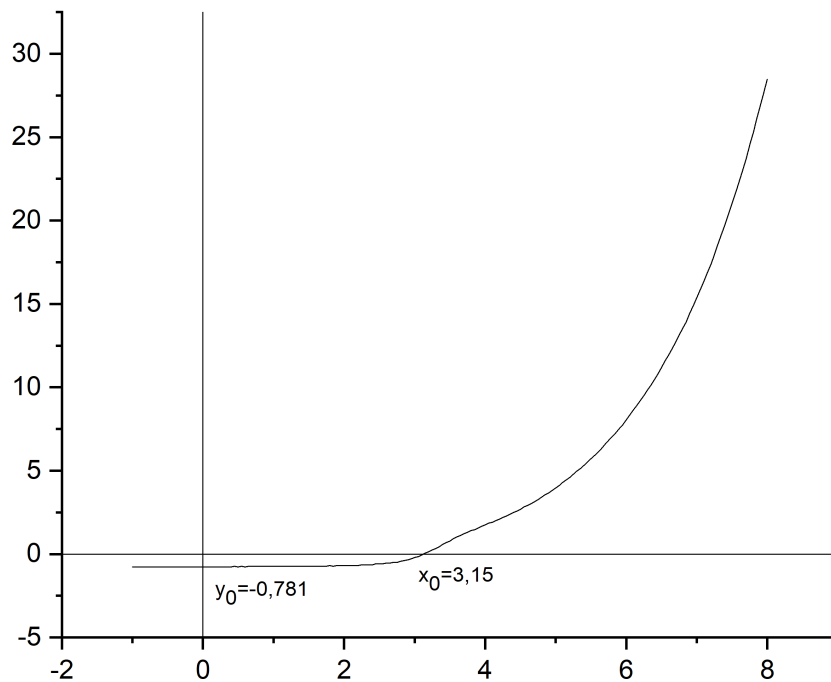


Abbildung 1.7.: Hellkennlinie der amorphen Solarzelle.

Der Wirkungsgrad

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

Der Wirkungsgrad ist somit:

$$\eta = \frac{I_{MP}U_{MP}}{P_{Ges}A} = \frac{1,4364\text{mW}}{\frac{3,43}{5}\text{W}} = 0,2\%.$$

Die Kennlinie ist in Abbildung 1.7 zu sehen.

2. Fazit

2.0.1. Diode

Der Idealitätsfaktor unserer Diode ist mit $2,88 \pm 0,15$ deutlich >2 . Sie ist somit keine optimale Diode.

Der Bereich der Durchbruchspannung von 3,66 V ist klein genug, dass es sich vermutlich um eine Zenerdiode handelt. Diese besitzen eine bewusst kleine Durchbruchspannung, sodass sie ebendiesen überleben.

2.0.2. Bipolartransistor

Der Bipolartransistor zeigt erwartetes Verhalten.

2.0.3. Feldeffekttransistor

Der FET ist selbstsperrend, da bei $U_{GS} = 0$ kein Strom fließt¹. Dass Elektronen die hauptsächlichen Ladungsträger sind, erkennt man daran, dass $U_{GS} > 0$, wenn ein Strom I fließt, woraus für die Potentiale $\Phi_{\text{Gate}} > \Phi_{\text{Source}}$ folgt.

Es handelt sich also um einen selbstsperrenden n-Kanal-FET.

2.0.4. Solarzellen

Die Monokristalline Solarzelle hat einen Wirkungsgrad nahe 3,5%, der eine Größenordnung über dem der amorphen liegt. Der besonders kleine Wert für μ lässt sich durch die Verfehlung der optimalen Wellenlänge für diese Zelle erklären. Die Füllfaktoren zwischen 0,4 und 0,7 liegen im für Solarzellen typischen[1] Bereich.

¹siehe hierzu den Graph der Eingangskennlinie A.1

Anhang

A. Graphen

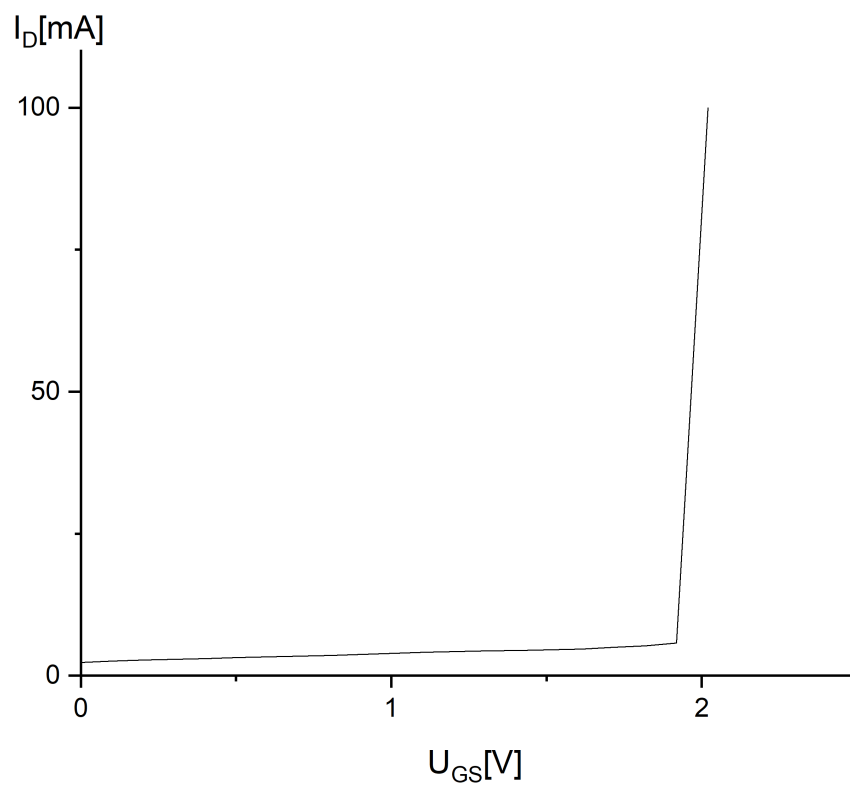


Abbildung A.1.: Eingangslinie des Feldeffekttransistors

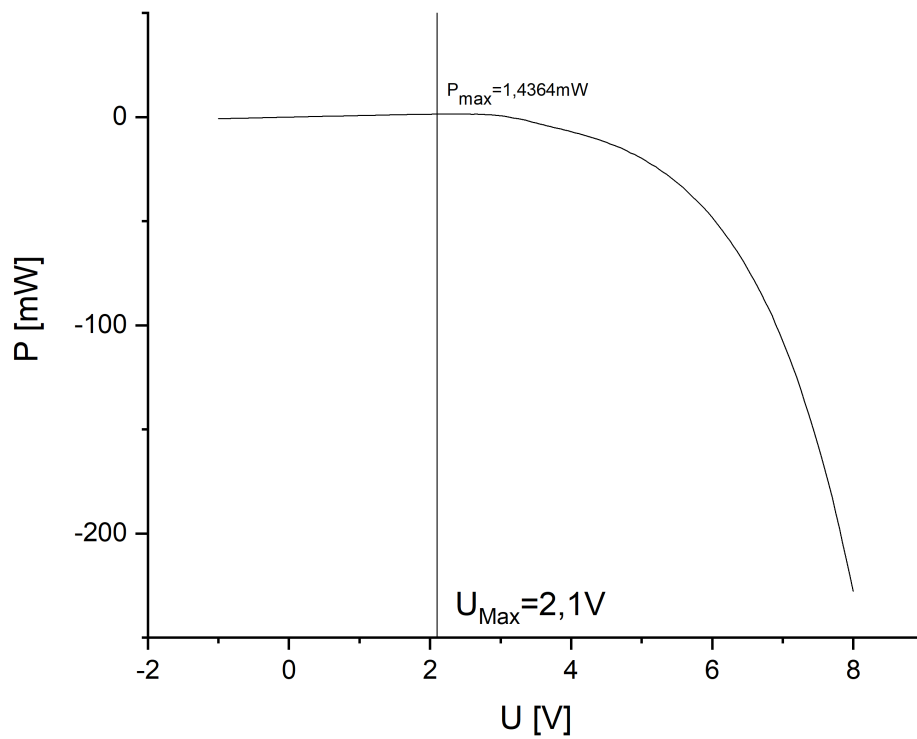


Abbildung A.2.: MPPbestimmung der Hellkennlinie der amorphen Solarzelle

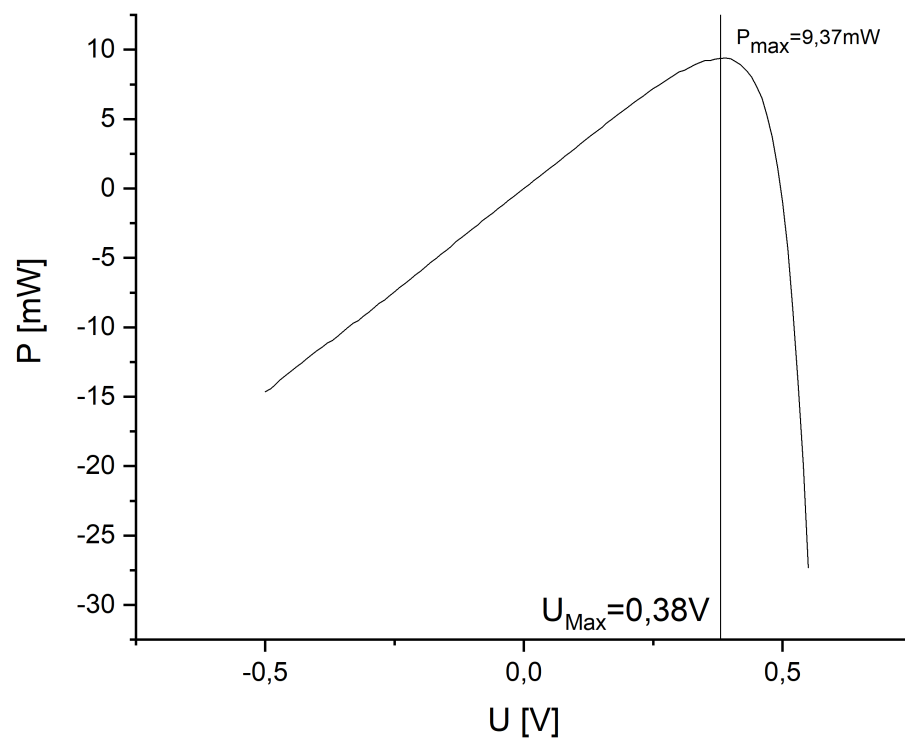


Abbildung A.3.: MPPbestimmung der Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle

Literaturverzeichnis

- [1] Peter Würfel: Physik der Solarzellen. *Experimentalphysik 4 - Kern-, Teilchen- Und Astrophysik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2000.
- [2] <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/sonnenenergie/solaranlage-solartechnik/solargenerator.html>.
- [3] Guillermo Diaz-Santanilla. *Technik der Solarzelle – physikalische Grundlagen, Eigenschaften und Applikationen*. Franzis, München, 1984.
- [4] Sebastian Voswinckel Viktor Wesselak. *Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird. Daten, Fakten, Hintergründe*. Springer Vieweg, Berlin, 2012.