



Inhaltsverzeichnis

1	Diode	3
1.1	Fehlerrechnung Diode	4
1.1.1	Durchbruchsspannung	4
1.1.2	Sättigungsstrom und Idealitätsfaktor	5
2	Bipolartransistor	5
3	Feldeffekttransistor	7
4	Solarzelle	8
4.1	Monokristalline Solarzelle	9
4.2	Amorphe Solarzelle	10
4.3	Fehlerrechnung Solarzelle	14
4.3.1	Sättigungsstrom und Idealitätsfaktor	14
4.3.2	Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom, Füllfaktor und Wirkungsgrad	14

In diesem Versuch wurden Kennlinien von einer Diode, einem Bipolartransistor, einem Feldeffekttransistor und von zwei Solarzellen aufgenommen. Auf ausführliche theoretische Erklärungen zu den Bauteilen wird hier verzichtet.

1 Diode

Zunächst haben wir auf dem Steckbrett die Diode mit dem PC verbunden. Durch vertauschen der Polrichtungen haben wir festgestellt, welche die Durchlass- und welche die Sperrrichtung ist. In Durchlassrichtung haben wir anschließend die Messung der Diodenkennlinie durchgeführt, welche in Abb. 1 zu sehen ist.

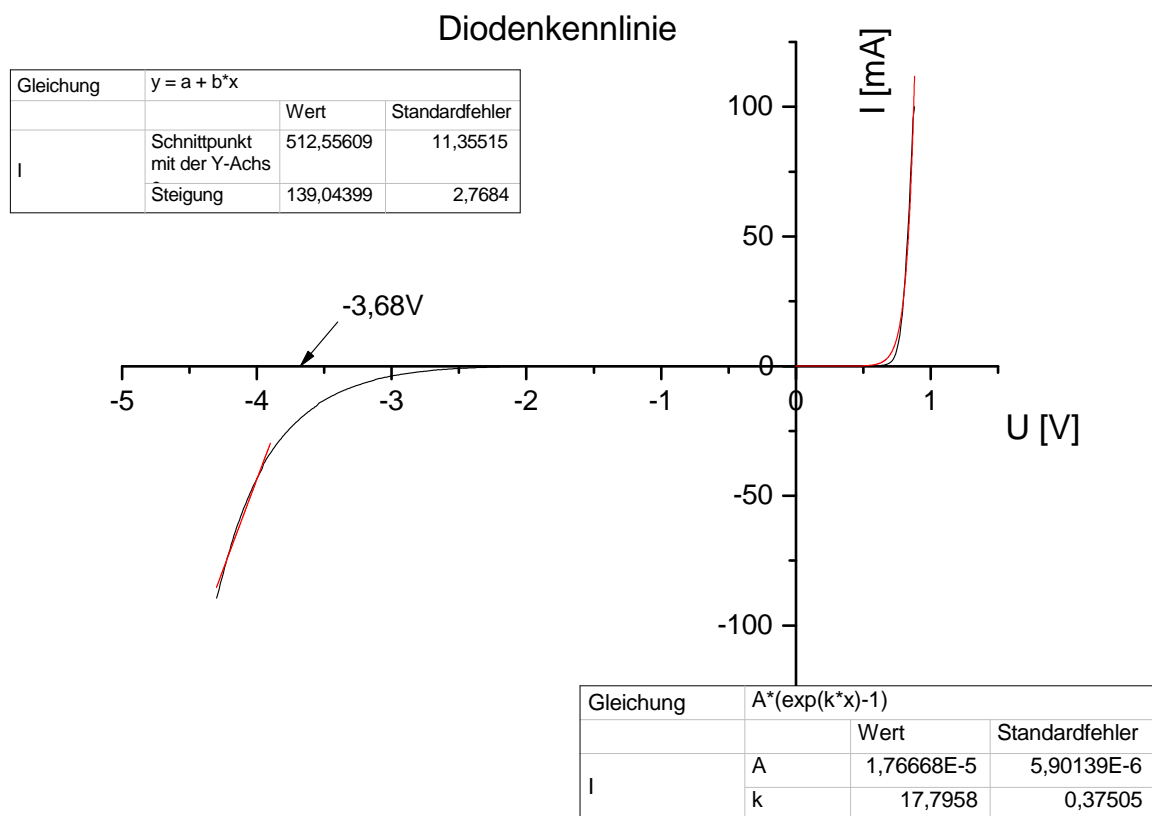


Abbildung 1: Diodenkennlinie

Aus der Diodenkennlinie waren drei verschiedene Größen zu bestimmen. Es sollte die Durchbruchspannung, der Sättigungsstrom und der Idealitätsfaktor bestimmt werden.

Wenn eine Diode in Sperrrichtung betrieben wird, fließt unterhalb der Durchbruchspannung U_{BR} zunächst der geringe Sättigungsstrom. Ist die Spannung größer als U_{BR} , kommt es zum Durchbruch. Dabei steigt der Strom in Sperrrichtung bei geringer Erhöhung der Spannung schlagartig an. Es gibt verschiedene Effekte, die für den Durchbruch verantwortlich sind, wie der Lawinendurchbruch, der Zenerdurchbruch oder der thermische Durchbruch. Die meisten Dioden werden durch einen Durch-



bruch zerstört. Die Durchbruchspannung ist je nach Bauart sehr unterschiedlich, sie kann bei Gleichrichterdiolen zwischen 50 und 1000 V liegen.

Um die Durchbruchsspannung zu ermitteln, haben wir das Verhalten der Diode in Sperrrichtung untersucht. Durch den stark abfallenden Teil der Kennlinie haben wir einen linearen Fit gelegt, aus dem die Durchbruchsspannung U_{BR} als Schnittpunkt mit der X-Achse berechnet wurde. Die Durchbruchsspannung beträgt

$$\begin{aligned} U_{BR} &= \frac{-a}{b} \\ U_{BR} &= -3,68V \end{aligned} \quad (1)$$

Dieser niedrige Wert der Durchbruchsspannung lässt auf eine Zener-Diode schließen, die speziell für niedrige Durchbruchsspannungen ausgelegt sind. Zener-Dioden werden durch einen Durchbruch nicht zerstört, sondern können dauerhaft bei Durchbruchspannung betrieben werden. Typische Werte für die Durchbruchspannung liegen bei 2,4 bis 200 V. Bei niedrigen Spannungen (unterhalb 3 V) ist beim Durchbruch der Zener-Effekt dominant. Bei höheren Spannungen (oberhalb 50 V) ist der Lawinendurchbruch dominant. Zener-Dioden werden häufig zur Spannungsstabilisierung und zur Spannungsbegrenzung verwendet.

In Durchlassrichtung kann die Diode mit der Diodengleichung beschrieben werden:

$$I_D = I_S \cdot (e^{\frac{eU_D}{nk_BT}} - 1) \quad (2)$$

I_S ist der bereits erwähnte Sättigungsstrom. Er fließt, wenn an die Diode eine Spannung in Sperrrichtung angelegt wird. U_D ist die angelegte Spannung in Durchlassrichtung. n ist der Idealitätsfaktor. Bei einer idealen Diode ist $n = 1$, in der Regel liegt er aber zwischen 1 und 2.

Bei Raumtemperatur ist $\frac{e}{k_BT} \approx 39,31V^{-1}$. Aus dem Fit der Diodengleichung erhält man den Sättigungsstrom, $I_S = A$ und den Idealitätsfaktor $n = \frac{e}{k_BTk}$.

$$\begin{aligned} I_S &= 17,667 \text{ nA} \\ n &= 2,2089 \end{aligned} \quad (3)$$

Der Sättigungsstrom einer Diode sollte im Bereich von 10^{-12} bis 10^{-6} A liegen. Da wir einen Idealitätsfaktor von $n = 2,208$ haben, lässt dieser auf eine nicht ideale Diode schließen.

1.1 Fehlerrechnung Diode

1.1.1 Durchbruchsspannung

Der Fehler der Durchbruchsspannung wird aus den Fehlern des linearen Fits berechnet.

$$\begin{aligned} \Delta U_{BR} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{-a}{b}}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{-a}{b}}{\partial b} \Delta b\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a \Delta b}{b^2}\right)^2} = 0,1098 \text{ V} \\ \Rightarrow U_{BR} &= (-3,68 \pm 0,12) \text{ V} \end{aligned} \quad (4)$$

1.1.2 Sättigungsstrom und Idealitätsfaktor

Der Fehler des Sättigungsstroms ist der Fehler des Fits der Diodengleichung

$$\begin{aligned}\Delta I_S &= 5,901 \text{ nA} \\ I_S &= (17,7 \pm 5,9) \text{ nA}\end{aligned}\quad (5)$$

Aus dem Fehler des Faktors k im Fit der Diodengleichung lässt sich der Fehler des Idealitätsfaktors berechnen.

$$\begin{aligned}\Delta n &= \left| \frac{\partial \frac{e}{k_B T k}}{\partial k} \Delta k \right| = \left| \frac{-e}{k_B T k^2} \Delta k \right| = 0,0465 \\ n &= 2,209 \pm 0,047\end{aligned}\quad (6)$$

2 Bipolartransistor

In diesem Versuchsteil wurden die Kennlinien eines npn-Bipolartransistors des Typs BC550 bestimmt. Dazu wurde in der Emitterschaltung (s. Abbildung 2) der Kollektor-Emitter-Strom I_C und die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} in Abhängigkeit vom Basis-Emitter-Strom I_B und in Abhängigkeit der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} gemessen. Das resultierende Vierquadrantenkennlinienfeld sieht man in Abbildung 4.

Die Vierpoltheorie ist ein Modell zur Beschreibung eines elektrischen Bauelement oder eines elektrischen Netzwerks mit vier Anschlüssen, davon zwei Eingänge und zwei Ausgänge (s. Abbildung 3). Ist die Stromstärke am Ein- und Ausgang jeweils gegengleich (Torbedingung) und besteht der Vierpol nur aus linearen Bauteilen, kann der Vierpol durch vier Parameter beschrieben werden. Die Vierpolparameter bilden die 2x2-Matrix eines linearen Gleichungssystem. So können aus zwei der Größen U_1 , U_2 ,

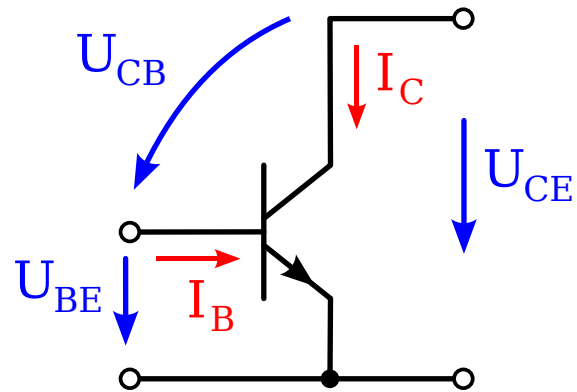


Abbildung 2: schematische Darstellung der Emitterschaltung eines npn-Transistors

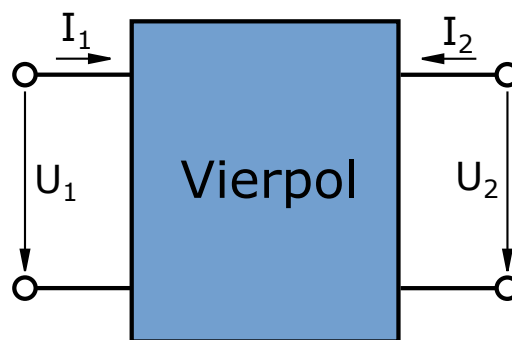


Abbildung 3: allgemeiner Vierpol

I_1 und I_2 die anderen zwei berechnet werden. Es lassen sich verschieden Matrizen angeben. Interessant

ist hier die Hybridmatrix H , die wie folgt definiert ist:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0} & H_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0} \\ H_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0} & H_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Ein Transistor ist kein lineares Bauelement, daher sind die Vierpolparameter Ableitungen, die am Arbeitspunkt angegeben werden:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} & , & & h_{12} &= \frac{\partial U_{BE}}{\partial U_{CE}}, \\ h_{21} &= \frac{\partial I_C}{\partial I_B} & , & & h_{22} &= \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} \end{aligned} \quad (8)$$

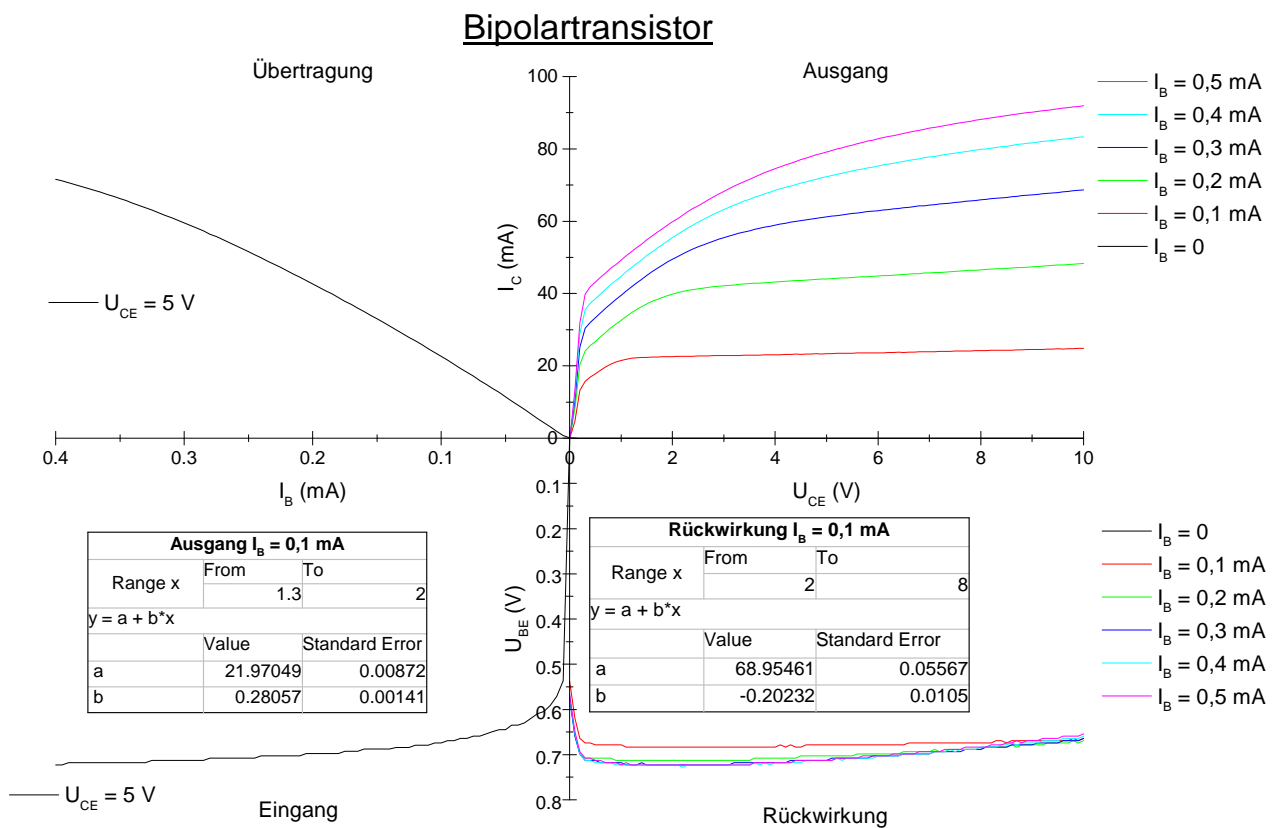


Abbildung 4: gemessenes Vierquadrantenkennlinienfeld des Bipolartransistors; Für die Stromsteuer- und Eingangskennlinie wurde als Arbeitspunkt $U_{CE} = 5 \text{ V}$ gewählt.

Für die hier aufgenommene Kennlinie wurde $U_{CE} = 5 \text{ V}$ und $I_B = 0,1 \text{ mA}$ als Arbeitspunkt gewählt. Für die Übertragungs- und Eingangskennlinie wurden die Werte am Arbeitspunkt abgelesen (s. Tabelle 1 und 2). Daraus ergeben sich mit den Steigungen die Vierpolparameter:

$$\begin{aligned} h_{21} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{23,682 - 22,656}{0,105 - 0,1} = 205,2 \\ h_{11} &= \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{0,679 - 0,674}{0,11 - 0,1} \frac{\text{V}}{\text{mA}} = 500 \, \Omega \end{aligned} \quad (9)$$

Durch das direkte Ablesen der Werte lässt sich hier schwer ein Fehler angeben.

I_B [mA]	I_C [mA]
0,1	22,656
0,105	23,682

Tabelle 1: am Arbeitspunkt abgelesene Werte für die Übertragungskennlinie

I_B [mA]	U_E [V]
0,1	0,674
0,11	0,679

Tabelle 2: am Arbeitspunkt abgelesene Werte für die Eingangskennlinie

Die Ausgangs- und Rückwirkungskennlinie sind am Arbeitspunkt sehr flach, daher wurde über einen breiteren Bereich ein linearer Fit gemacht (s. Abbildung 4). Aus den Steigungen ergeben sich die Vierpolparameter:

$$\begin{aligned}
 h_{22} &= (0,28057 \pm 0,00141) \frac{\text{mA}}{\text{V}} \approx (280,6 \pm 1,4) \frac{1}{\text{M}\Omega} \\
 h_{12} &= -0,20232 \pm 0,0105 \approx -0,2023 \pm 0,0105
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Vermutlich ist der tatsächliche Fehler jedoch deutlich größer.

3 Feldeffekttransistor

Es wurden die Kennlinien für einen Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET) aufgenommen. Für die Eingangskennlinie wurde bei einer Drain-Source-Spannung $U_{DS} = 3 \text{ V}$ die Drain-Source-Stromstärke I unter Variation der Gate-Source-Spannung U_{GS} gemessen. Für die Ausgangskennlinien wurden fünf Messungen für jeweils verschiedene U_{GS} gemacht. Dabei wurde I unter Variation von U_{DS} gemessen. In Abbildung 5 sind die Kennlinien zu sehen.

Anhand der Eingangskennlinie erkennt man, dass bei $U_{GS} = 0$ kein Strom fließt. Der MOSFET war also vom Anreicherungstyp, d.h. er war selbstsperrend. Außerdem ist $U_{GS} > 0$, wenn ein Strom I fließt, d.h. für die Potentiale gilt $\Phi_{\text{Gate}} > \Phi_{\text{Source}}$. Der technische Strom I ist dann positiv, d.h. er fließt vom Drain zur Source. Daran erkennt man, dass die Elektronen die Majoritätsladungsträger sind, es handelt sich also um einen selbstsperrenden n-Kanal-MOSFET.

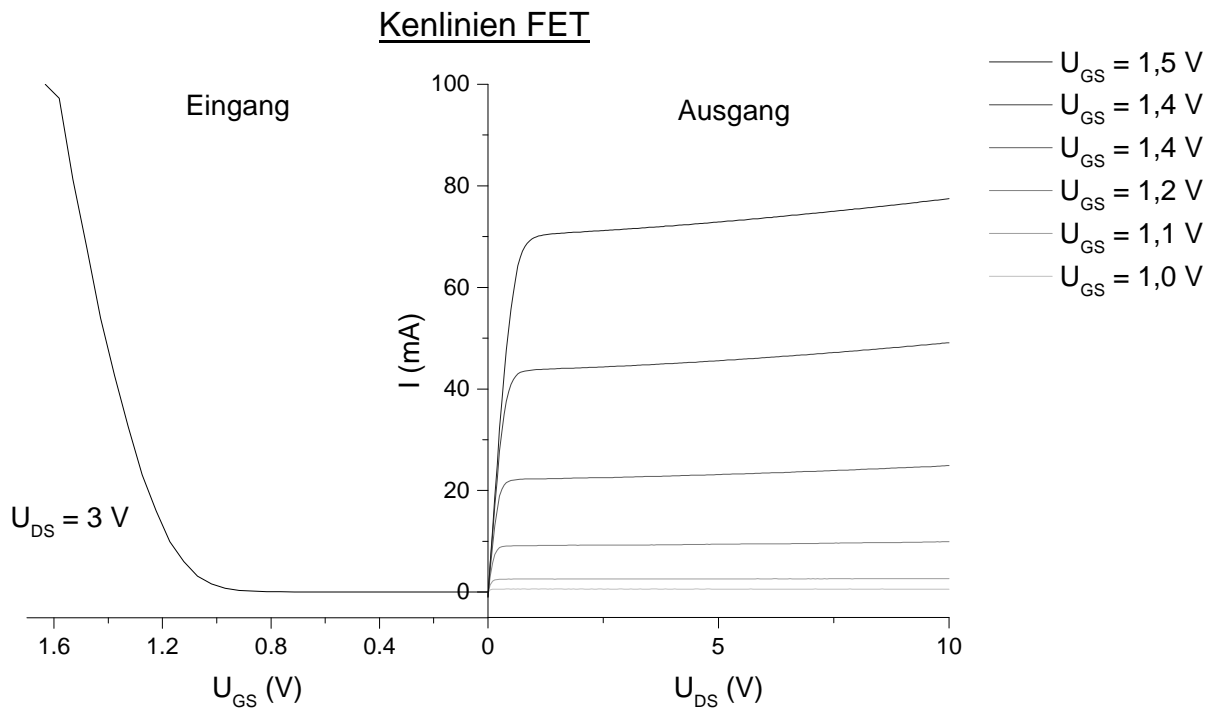


Abbildung 5: Bei der Eingangskennlinie des untersuchten MOSFETs ist die Drain-Source-Stromstärke I bei einer Drain-Source-Spannung $U_{DS} = 3$ V gegen die Gate-Source-Spannung U_{GS} aufgetragen. Bei der Ausgangskennlinie ist I bei jeweils verschiedenen U_{GS} gegen U_{DS} aufgetragen.

4 Solarzelle

In dem Versuch haben wir die Dunkel- und Hellkennlinien einer Monokristalline und einer amorphen Solarzelle gemessen. Zunächst haben wir analog zur Diode durch Umpolung die Durchlass- und Sperrrichtung der Solarzellen bestimmt.

Ähnlich zur Diode kann die Solarzelle mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$I = I_S \cdot (e^{\frac{eU}{nk_B T}} - 1) - I_L \quad (11)$$

Dabei ist I_S wieder der Sättigungsstrom, n wieder der Idealitätsfaktor und I_L ist der durch die Lichteinstrahlung erzeugte Strom. Die Leerlaufspannung U_{OC} ist die Spannung, die an der Diode anliegt, wenn kein Strom durch die Diode fließt:

$$I = 0 \implies U_{OC} \approx \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \frac{I_L}{I_S} \quad (12)$$

Typische Leerlaufspannungen liegen im Bereich von 0,5 V. Der Kurzschlussstrom I_{SC} ist der Strom, der bei $U = 0$ fließt:

$$U = 0 \implies I_{SC} = I_L \quad (13)$$

Der Maximum-Power-Point (MPP) ist der Punkt im Strom-Spannungs-Diagramm, an dem der Solarzelle die maximale Leistung entnommen werden kann. Er wird durch den Strom I_{MP} und die Spannung



U_{MP} charakterisiert. Die maximale Leistung ist dann:

$$P_{MPP} = I_{MP} \cdot U_{MP} \quad (14)$$

Der Füllfaktor FF ist definiert durch:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC}U_{OC}} = \frac{I_{MP}U_{MP}}{I_{SC}U_{OC}} \quad (15)$$

Damit ist der Füllfaktor ein Maß für die Güte einer Solarzelle. Bei einer idealen Zelle ist der Füllfaktor gleich 1. Bei kristallinen Solarzellen werden Werte von 0,75 bis 0,8 erreicht und bei amorphen Zellen Werte im Bereich von 0,5 bis 0,7. Das Verhältnis von P_{MPP} zur Eingangsleistung des Lichts P_{Ein} ist der Wirkungsgrad η :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}} \quad (16)$$

Bei Monokristallinen Solarzellen liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 16-22 % und bei amorphen Solarzellen im Bereich von 15-20 %.

4.1 Monokristalline Solarzelle

Dunkelkennlinie Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle ist näherungsweise die Kennlinie einer Diode. Aus dieser lassen sich wie in dem Abschnitt der Diodenkennlinie, der Sättigungsstrom und der Idealitätsfaktor bestimmen. Die Dunkelkennlinie ist in Abb. 6 zu sehen. Der Sättigungsstrom I_S und der Idealitätsfaktor n sind:

$$\begin{aligned} I_S &= 1,83 \mu A \\ n &= 2,091 \end{aligned} \quad (17)$$

Hellkennlinie Aus der Hellkennlinie der Solarzelle lässt sich der Kurzschlussstrom I_{SC} , die Leerlaufspannung U_{OC} , der Füllfaktor FF und der Wirkungsgrad η bestimmen. Die Hellkennlinie ist in Abb. 7 zu sehen. Der Kurzschlussstrom I_{SC} und die Leerlaufspannung U_{OC} entsprechen den Schnittpunkten der Kennlinie mit der X- bzw Y-Achse:

$$\begin{aligned} I_{SC} &= 43,896 \text{ mA} \\ U_{OC} &= 0,523 \text{ V} \end{aligned} \quad (18)$$

Um die beiden Solarzellen zu vergleichen wird noch der Kurzschlussstrom pro Fläche bestimmt. Die monokristalline Solarzelle hat eine Fläche von $A = 5 \text{ cm} \cdot 5 \text{ cm} = 25 \text{ cm}^2$.

$$\frac{I_{SC}}{A} = 1,7558 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \quad (19)$$

Um den Füllfaktor und den Wirkungsgrad der Solarzelle zu bestimmen haben wir den Punkt maximaler Leistung (MPP) gesucht und von diesem den X- bzw Y-Wert bestimmt. Der von uns bestimmte MPP hat die Koordinaten (0,42 V | 37,207 mA). Daraus folgt für den Füllfaktor:

$$FF = \frac{I_{MP}U_{MP}}{I_{SC}U_{OC}} = \frac{0,42 \text{ V} \cdot 37,207 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{0,523 \text{ V} \cdot 43,896 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 0,681 \quad (20)$$

Der Füllfaktor liegt niedriger als bei den Durchschnittswerten von monokristallinen Solarzellen. Dies lässt auf eine Zelle von geringerer Güte schließen und es wird auch ein niedriger Wirkungsgrad erwartet.

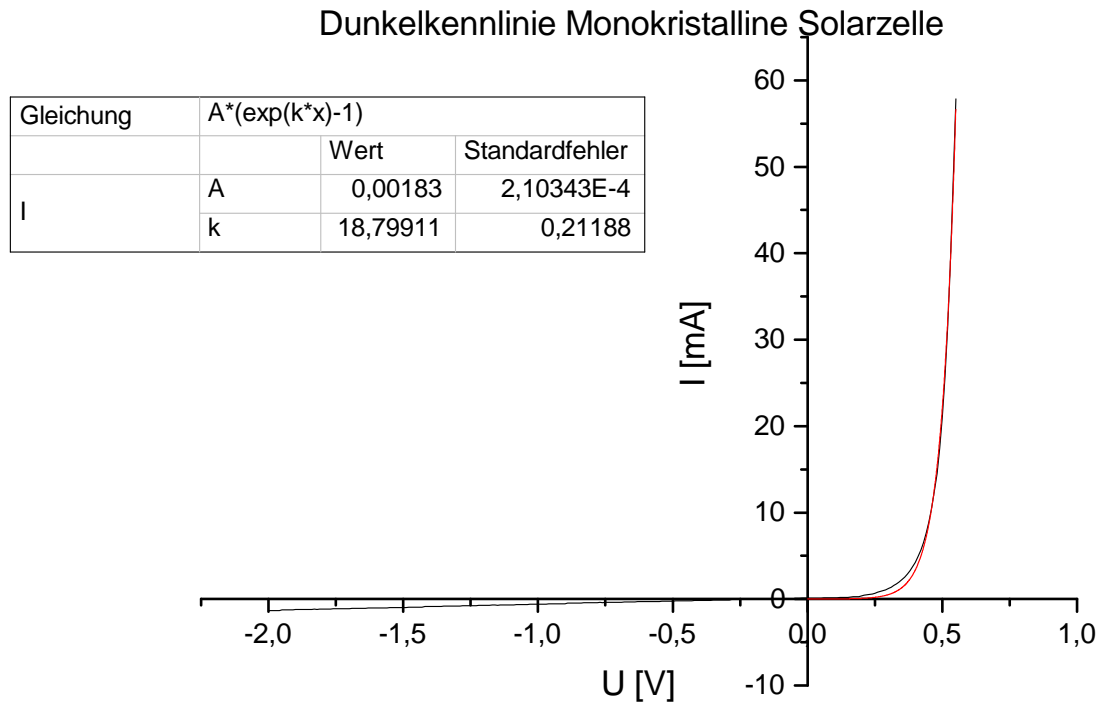


Abbildung 6: Dunkelkennlinie der monokristallinen Solarzelle

Für den Wirkungsgrad mussten wir noch die Eingangsleistung P_{Ein} bestimmen, die auf die Solarzelle trifft. Die verwendete Lampe hatte eine Leistung von $P_{\text{Lampe}} = 100 \text{ W}$. Die monokristalline Solarzelle hat eine Fläche von $A = 25 \text{ cm}^2$ und war in einem Abstand von $r = 43 \text{ cm}$ von der Lampe entfernt angebracht. Mit der Annahme, dass sich das Licht der Lampe Halbkugelförmig ausbreitet, lässt sich die Eingangsleistung berechnen. Diese Eingangsleistung wird zur Berechnung des Wirkungsgrades verwendet.

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

$$P_{\text{Ein}} = \frac{P_{\text{Lampe}}}{2\pi r^2} \cdot A = 0,215 \text{ W} \quad (21)$$

$$\eta = \frac{I_{\text{MP}} U_{\text{MP}}}{0,215 \text{ W}} = \frac{0,42 \text{ V} \cdot 37,207 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{0,215 \text{ W}} = 7,26 \%$$

Der Wirkungsgrad ist sehr gering, was einerseits durch niedrigen Füllfaktor bedingt ist, aber auch daher kommen kann, dass das Licht der Lampe nicht die für die Solarzelle optimalen Wellenlängen und damit nicht die optimalen Energien hat.

4.2 Amorphe Solarzelle

Dunkelkennlinie Analog zur Monokristallinen Solarzelle wurden die Berechnungen für die amorphe Solarzelle durchgeführt. Die Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle ist in Abb. 8 zu sehen.

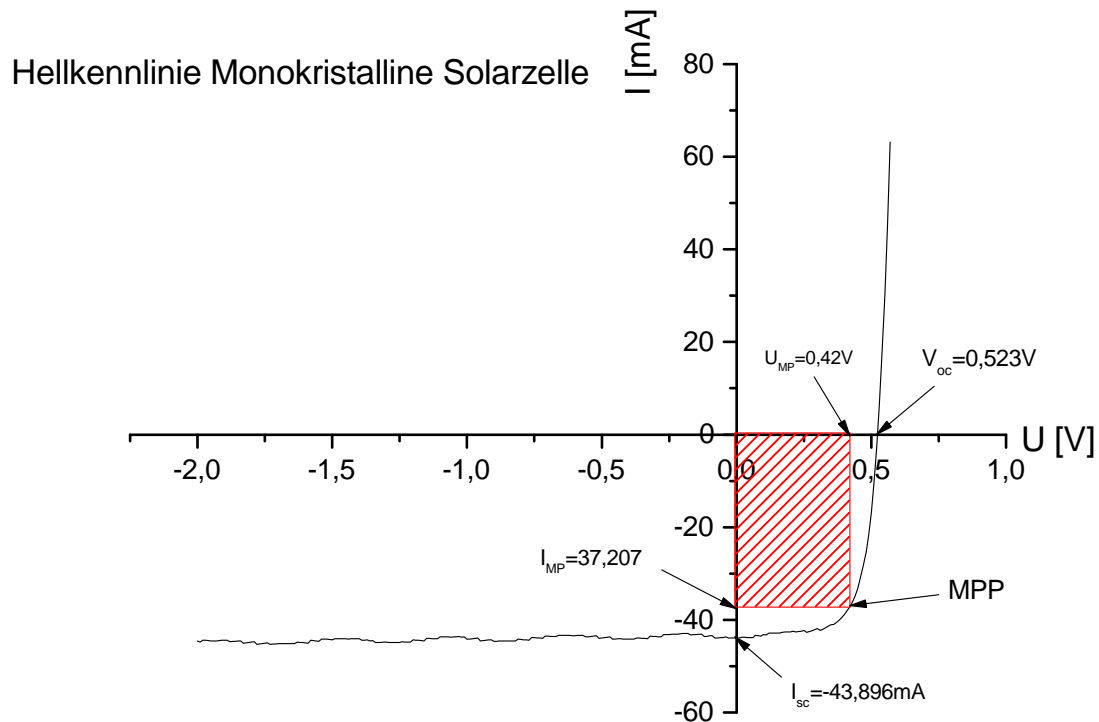


Abbildung 7: Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle

Sättigungsstrom und Idealfaktor ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} I_S &= 145,53 \mu\text{A} \\ n &= 59,476 \end{aligned} \quad (22)$$

Der sehr große Idealfaktor zeigt, dass eine Solarzelle vorliegt, die sehr stark von einer idealen Diode abweicht. Amorphe Solarzellen haben im Gegensatz zu idealen Zellen eine stark asymmetrische Raumladungszone, die diesen hohen Idealfaktor erklärt. Außerdem hat das Material parasitäre Verunreinigungen, die diese Abweichung bewirkt.

Hellkennlinie In Abb. 9 ist die Hellkennlinie der amorphen Solarzelle zu sehen.

Die Berechnungen wurden erneut Analog zur monokristallinen Solarzelle durchgeführt. Die amorphe Solarzelle hat eine Fläche von $A = 2,2 \text{ cm} \cdot 3 \text{ cm} = 6,6 \text{ cm}^2$. Kurzschlussstrom I_{SC} und Leerlaufspannung U_{OC} ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} I_{SC} &= 1,27 \text{ mA} \\ \frac{I_{SC}}{A} &= 0,192 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \\ U_{OC} &= 3,25 \text{ V} \end{aligned} \quad (23)$$

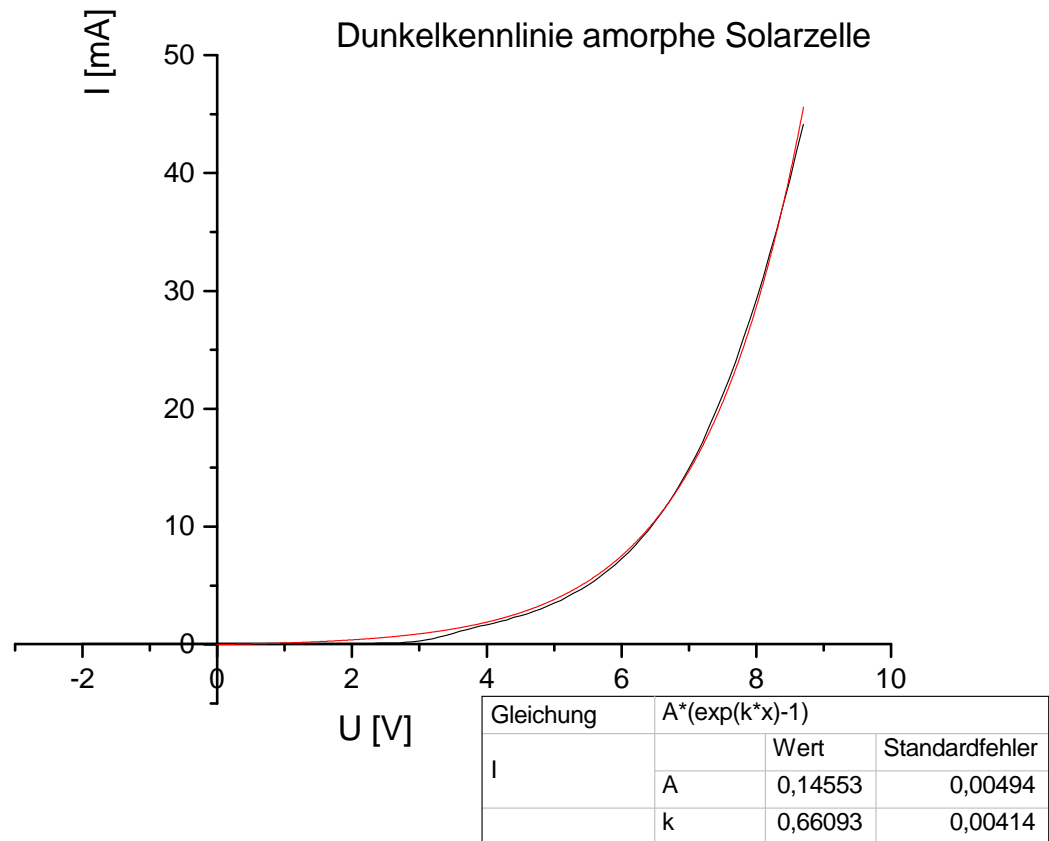


Abbildung 8: Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle

Als MPP haben wir für die amorphe Solarzelle den Punkt (2,5 V | 1,025 mA) bestimmt.

$$FF = \frac{I_{MP} U_{MP}}{I_{SC} U_{OC}} = \frac{1,025 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 2,5 \text{ V}}{1,27 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 3,29 \text{ V}} = 0,613 \quad (24)$$

Der Füllfaktor liegt sehr gut in dem Bereich, der von amorphen Solarzellen erwartet werden kann. Der Wirkungsgrad wird analog zur monokristallinen Solarzelle berechnet. Der Unterschied in der Eingangsleistung besteht darin, dass die amorphe Solarzelle eine Größe von $A = 6,6 \text{ cm}^2$ hat. Daraus folgt für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}} \quad (25)$$

$$P_{Ein} = 0,0568 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{1,025 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 2,5 \text{ V}}{0,0568 \text{ W}} = 4,511 \%$$

Der Wirkungsgrad ist wie bei der monokristallinen Solarzelle sehr gering, was vermutlich wieder daher kommt, dass die Lampe nicht die optimalen Wellenlängen und Energien emittiert.

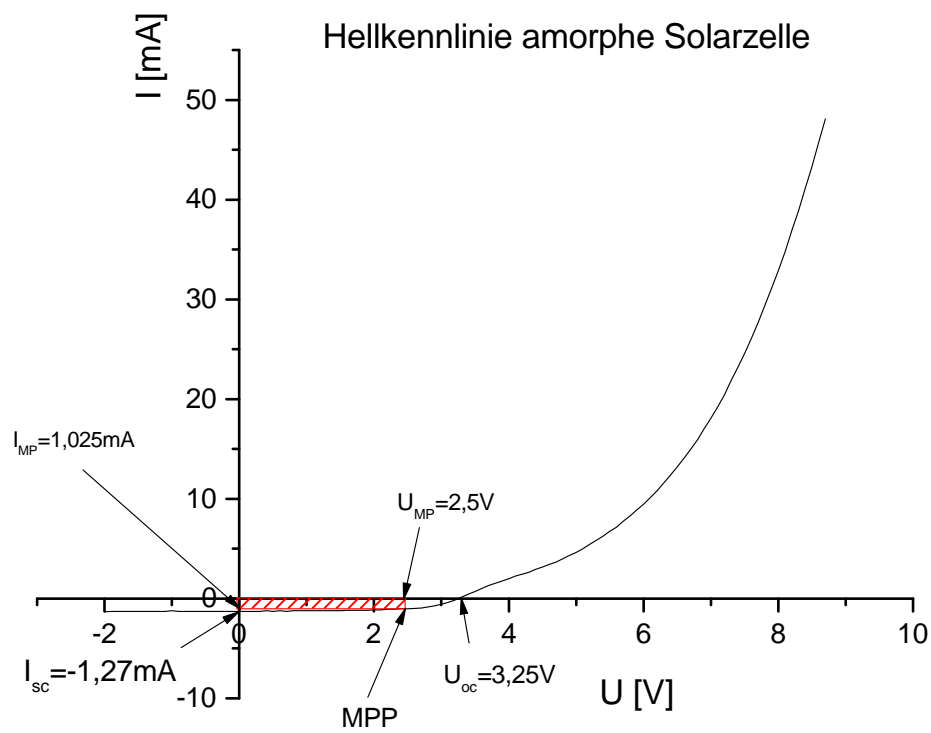


Abbildung 9: Hellkennlinie der amorphen Solarzelle



4.3 Fehlerrechnung Solarzelle

4.3.1 Sättigungsstrom und Idealitätsfaktor

Für den Fehler des Sättigungsstroms und des Idealitätsfaktors wird die gleiche Rechnung wie für die Diodenkennlinie verwendet.

$$\begin{aligned}
 \Delta I_{S,\text{mono}} &= 0,21 \mu\text{A} \\
 I_{S,\text{mono}} &= 1,83 \pm 0,21 \mu\text{A} \\
 \Delta n_{\text{mono}} &= 0,0235 \\
 n_{\text{mono}} &= 2,091 \pm 0,024 \\
 \Delta I_{S,\text{amorph}} &= 4,94 \mu\text{A} \\
 I_{S,\text{amorph}} &= 145,5 \pm 4,9 \mu\text{A} \\
 \Delta n_{\text{amorph}} &= 0,372 \\
 n_{\text{amorph}} &= 59,48 \pm 0,37
 \end{aligned} \tag{26}$$

4.3.2 Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom, Füllfaktor und Wirkungsgrad

Da die Leerlaufspannung, der Kurzschlussstrom und der Füllfaktor sich direkt aus dem Diagramm ergeben, haben wir für diese keine Fehlerrechnung durchgeführt. Der Fehler für den Wirkungsgrad haben wir durch Fehlerfortpflanzung berechnet. Da alle Größen, bis auf den Abstand zur Solarzelle vorgegeben waren, ist der einzige Fehler $\Delta r = 0,5 \text{ cm}$. Daraus folgt für den Fehler des Wirkungsgrades:

$$\begin{aligned}
 \Delta \eta &= \left| \frac{\partial \frac{P_{\text{MPP}} \cdot 2\pi \cdot r^2}{P_{\text{Lampe}} \cdot A}}{\partial r} \Delta r \right| = \left| \frac{4P_{\text{MPP}}\pi r}{P_{\text{Lampe}}A} \Delta r \right| \\
 \Delta \eta_{\text{mono}} &= 0,169\% \\
 \Delta \eta_{\text{amorph}} &= 0,105\% \\
 \eta_{\text{mono}} &= (7,26 \pm 0,17)\% \\
 \eta_{\text{amorph}} &= (4,51 \pm 0,11)\%
 \end{aligned} \tag{27}$$

Die tatsächlichen Fehler der Wirkungsgrade ist aber vermutlich deutlich größer.

Die monokristalline Solarzelle hat einen höheren Kurzschlussstrom pro Fläche, sie liefert also eine höhere Stromstärke pro Fläche. Die amorphe Solarzelle liefert jedoch eine höhere Spannung. Insgesamt hat die monokristalline Solarzelle aber einen leicht höheren Füllfaktor und insbesondere einen höheren Wirkungsgrad. Die monokristalline Solarzelle arbeitet also effizienter.