

# Protokoll: I-U-Kennlinien an Halbleitern und Solarzellen

Praktikum für Fortgeschrittene

Ferdinand Ziese  
Stephan Hagel

19. Februar 2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Auswertung</b>	<b>2</b>
2.1	Diodenkennlinie . . . . .	2
2.2	Bipolartransistor . . . . .	4
2.3	Feldeffekttransistor . . . . .	5
2.4	Solarzelle . . . . .	5
2.4.1	Monokristalline Solarzelle . . . . .	7
2.4.2	Amorphe Solarzelle . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Fazit und Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>11</b>
3.1	Diode . . . . .	11
3.2	Bipolartransistor . . . . .	11
3.3	Solarzellen . . . . .	12

# 1 Einführung

Ziel des Versuchs ist es, typische Kennlinien einer Diode, eines Bipolartransistors und eines Feldeffekttransistors aufzunehmen. Weiterhin sollen die Kenngrößen zweier Solarzellen durch die Aufnahmen von Hell- und Dunkelkennlinien bestimmt werden.

## 2 Auswertung

### 2.1 Diodenkennlinie

Zunächst wurde die Kennlinie einer Halbleiterdiode in Sperr- und Durchlassrichtung bestimmt. Der Verlauf der Kennlinie lässt sich modellhaft durch die *Shockley*-Gleichung

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

beschreiben, wobei  $I_S(T)$  der Sättigungssperrstrom und  $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$  die Temperaturspannung ist. Bei Raumtemperatur beträgt die Temperaturspannung  $U_T \approx 25 \text{ mV}$ .  $n$  ist der Idealitätsfaktor, der in diesem Versuchsteil zu bestimmen ist. Mit der Näherung  $U_T \approx 25 \text{ mV}$  lässt sich die Diodengleichung umschreiben zu

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{U}{n \cdot 25 \text{ mV}}} - 1 \right). \quad (2)$$

Die Messwerte für die Messung in Durchlassrichtung wurden mittels des Parameters  $1/nU_T$  an das Modell angepasst. Das Ergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Wir erhalten den Wert

$$10.793 \text{ V}^{-1} \approx \frac{1}{n \cdot 25 \text{ mV}} \implies n = \frac{1}{10.793 \cdot 25 \cdot 10^{-3}} \approx 3.706 \quad (3)$$

Zur Berechnung des Fehlers von  $n$  benötigen wir die Fehler des Parameter, der bei der Anpassungen an die Diodengleichung zustande gekommen ist. Dieser Fehler beträgt  $\Delta \frac{1}{nU_T} = \pm 0.08539558$ . Mithilfe der Gesetze der Fehlerfortpflanzung erhalten wir einen Gesamtfehler von

$$\Delta n = \left| \frac{\partial n}{\partial \frac{1}{nU_T}} \right| = \left| \frac{(nU_T)^2}{25 \text{ mV}} \right| \Delta \frac{1}{nU_T} \approx \pm 0.029 \quad (4)$$

Somit erhalten ein Gesamtergebnis für den Idealitätsfaktor von

$$n = (3.706 \pm 0.029). \quad (5)$$

Weiterhin ist die Durchbruchsspannung der Diode zu bestimmen. Dazu werden die Messwert der U-I-Kennlinie in Sperrrichtung betrachtet. Am lawinenartigen Anstieg des Sperrstroms werden die Messwerte für  $I(U)$  an einen linearen Ansatz

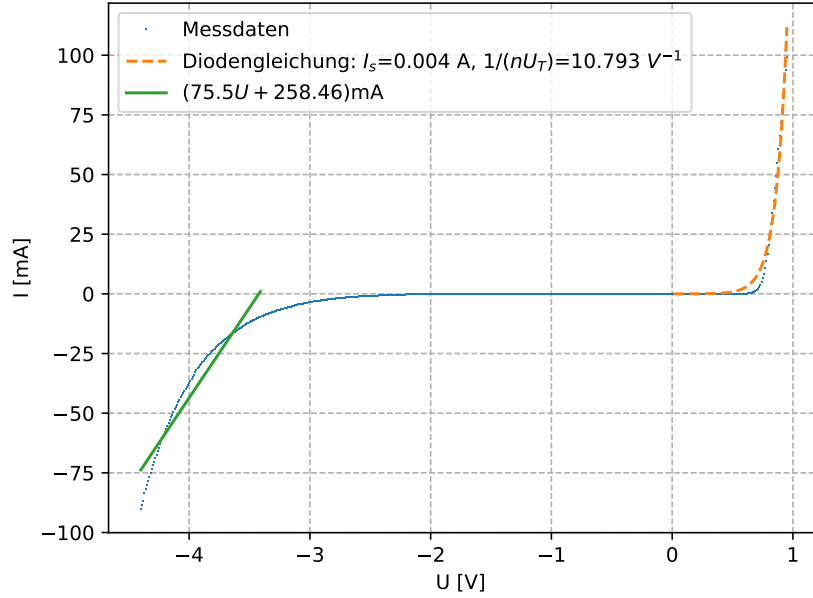


Abbildung 1: Diodenkennlinie

$$I(U) = m \cdot U + b \quad (6)$$

angepasst. Die gesuchte Durchbruchsspannung ist der Punkt, an dem diese Gerade die  $I = 0$ -Achse schneidet. D.h. wir suchen nach der Spannung, die die Bedingung

$$I = m \cdot U_D + b \stackrel{!}{=} 0 \quad (7)$$

erfüllt. Umstellen dieser Gleichung liefert  $U_D = -b/m$ . Aus den Messwerten ergeben sich (Abbildung 1) die Werte  $b = 258,46 \text{ mA}$  und  $m = 75,5 \Omega^{-1}$ . Einsetzen dieser Werte in Gleichung (7) liefert als Ergebnis für die Durchschlags-spannung

$$U_D = \frac{-b}{m} \approx -3.423 \text{ V} \quad (8)$$

Für die Fehlerberechnung der Durchbruchspannung werden die Fehler der Parameter der Anpassung an den linearen Ansatz benötigt. Diese betragen  $\Delta m = \pm 2.141$  und  $\Delta b = \pm 8.384$ . Der Gesamtfehler errechnet sich erneut durch Fehlerfortpflanzung und beträgt

$$\Delta U = \left| \frac{\partial U_D}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial U_D}{\partial b} \right| \Delta b = \left| \frac{b \Delta m}{m^2} \right| + \left| \frac{\Delta b}{m} \right| \approx \pm 0.208 \text{ V} \quad (9)$$

Somit erhalten ein Gesamtergebnis für die Durchschlagsspannung von

$$U_D = (-3.423 \pm 0.208)\text{V}. \quad (10)$$

Eine Diskussion der Ergebnisse ist in Abschnitt 3 zu finden.

## 2.2 Bipolartransistor

Im nächsten Versuchsteil wurden die vier Bereiche des Kennlinienfeldes eines Bipolartransistors aufgenommen. Eine graphische Darstellung des Kennlinienfeldes ist Abbildung 2 zu entnehmen. Aus dem Kennlinienfeld lassen sich die Vierpolparameter bestimmen. Die Vierpolparameter sind definiert als Matrixelemente einer Matrix, die  $U_{1,2}$  mit  $I_{1,2}$  verknüpft. Diese Matrix definiert das lineare Gleichungssystem

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

Man bezeichnet  $h_{11}$  als die Kurzschluss-Eingangsimpedanz,  $h_{12}$  ist die Leerlauf-Spannungsrückwirkung,  $h_{21}$  die negative Kurzschluss-Stromübersetzung und  $h_{22}$  die Leerlauf-Ausgangsadmittanz. Nach der Wahl eines festen Arbeitspunkts (hier  $U_{CE} = 2\text{V}$  und  $I_B = 0,2\text{mA}$ ) können die Parameter über die partiellen Ableitungen

$$h_{11} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \quad (12)$$

$$h_{12} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial U_{CE}} \quad (13)$$

$$h_{21} = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \quad (14)$$

$$h_{22} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}}. \quad (15)$$

bestimmt werden. Da es sich um ein lineares Gleichungssystem handelt, werden die vier einzelnen Sektoren des Kennlinienfeldes durch eine lineare Funktion angenähert. Dabei ergeben sich die Ergebnisse

$$h_{11} = (89 \pm 20) \Omega \quad (16)$$

$$h_{12} = (0,00043 \pm 0,00045) \quad (17)$$

$$h_{21} = (108,477 \pm 13,471) \quad (18)$$

$$h_{22} = (1733 \pm 17) \frac{1}{\text{M}\Omega}. \quad (19)$$

Die Fehler sind wiederum die Fehler, die bei der Näherung durch lineare Zusammenhänge entstanden sind.

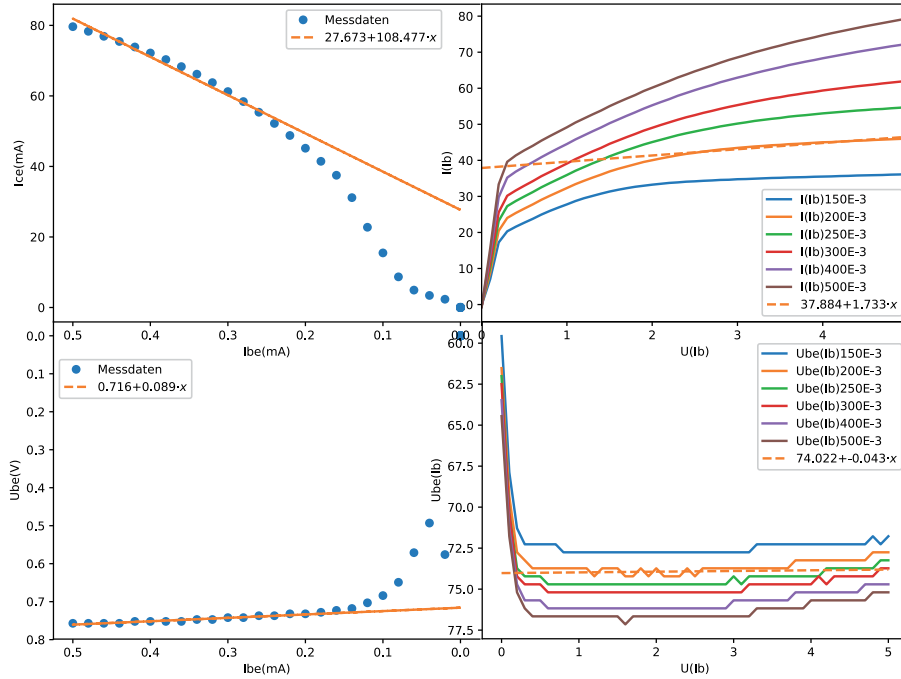


Abbildung 2: Kennlinienfeld des Bipolartransistors

### 2.3 Feldeffekttransistor

Im nächsten Versuchsteil wurden die Kennlinien für einen Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (FET) 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 sechs Messungen für jeweils verschiedene  $U_{GS}$  durchgeführt. Die Spannung  $U_{GS}$  wurde dabei von  $1,3\text{ V}$  bis  $1,6\text{ V}$  variiert, wobei  $I$  gemessen wurde. In Abbildung 3 sind die Kennlinien dargestellt.

### 2.4 Solarzelle

Im letzten Versuchsteil wurden typische Kenngrößen einer Solarzelle bestimmt. Dazu wurden zunächst die Hell- und Dunkelkennlinien von zwei verschiedenen Typen – eine monokristalline und eine amorphe Solarzelle – aufgenommen. Dabei haben wir analog zur Diode durch Umpolung die Durchlass- und Sperrrichtung der Solarzellen bestimmt. Das Verhältnis von Strom und Spannung lässt sich wiederum modellhaft durch die Gleichung

$$I(U) = I_S \left( e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right) - I_P \quad (20)$$

beschreiben, wobei  $I_P$  der Photostrom ist. Alle anderen Größen entsprechen denen der Diode. Eine zu bestimmende Größe ist die Leerlaufspannung. Sie ist definiert als die Spannung, bei der kein Strom durch die Diode fließt, d.h.

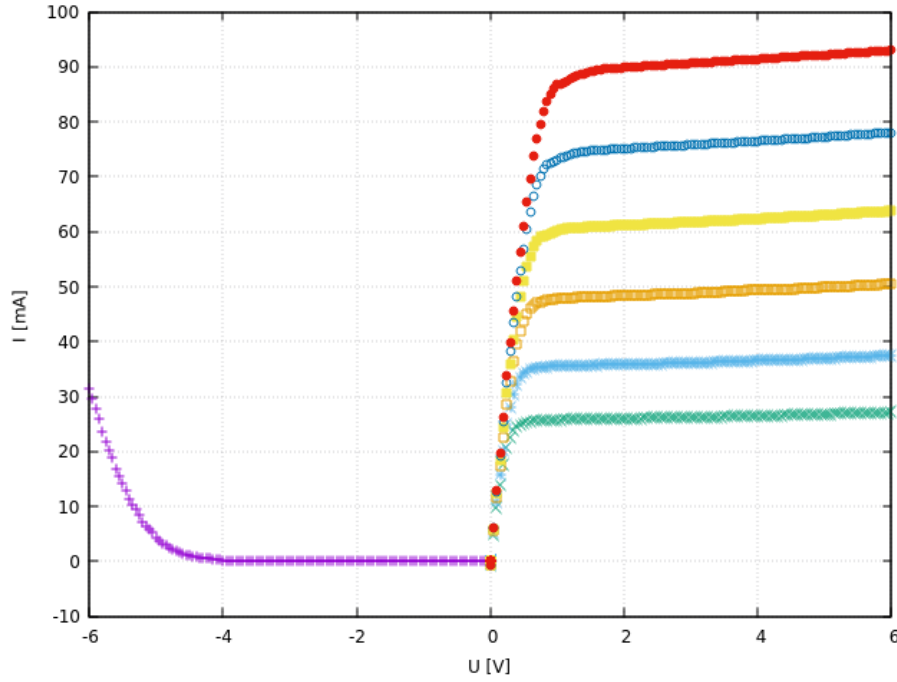


Abbildung 3: Kennlinienfeld des Feldeffekttransistors. Auf der linken Seite ist das Eingangsfeld, auf der rechten Seite ist das Ausgangsfeld zu sehen. Beim Eingangsfeld ist auf der Abszisse die Gate-Source-Spannung  $U_{GS}$  aufgetragen, beim Ausgangsfeld ist auf der Abszisse die Drain-Source Spannung  $U_{DS}$  aufgetragen.

$$I(U_{OC}) \stackrel{!}{=} 0. \quad (21)$$

Verbindet man diese Bedingung mit Gleichung (20), erhält man für die Leerlaufspannung näherungsweise

$$U_{OC} = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_P}{I_S}. \quad (22)$$

Weiterhin ist der Kurzschlussstrom von Interesse. Er ist definiert als der Strom, der fließt, wenn keine Spannung anliegt

$$I_{SC} = I(U = 0) = -I_P. \quad (23)$$

Wir sehen, dass der Kurzschlussstrom einer Solarzelle betraglich dem Photostrom  $I_P$  entspricht. Die nächste Kenngröße ist der Maximum-Power-Point (MPP). Er ist der Punkt im Strom-Spannungs-Diagramm, an dem der Solarzelle die maximale Leistung entnommen werden kann und wird durch den Strom  $I_{MP}$  und die Spannung  $U_{MP}$  charakterisiert. Die maximale Leistung der Solarzelle ergibt sich dann aus dem Produkt der beiden Größen

$$P_{MPP} = I_{MP} \cdot U_{MP}. \quad (24)$$

Als Maß für die Güte einer Solarzelle dient der Füllfaktor. Bei einer idealen Solarzelle ist der Füllfaktor gleich 1. Er lässt sich über die bereits bekannten Kenngrößen durch die Gleichung

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (25)$$

bestimmen. Zuletzt ist noch der Wirkungsgrad der Solarzelle zu bestimmen. Er beschreibt das Verhältnis zwischen der maximalen Leistung der Solarzelle und der eingestrahlten Leistung

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}}. \quad (26)$$

#### 2.4.1 Monokristalline Solarzelle

**Dunkelkennlinie:** Vergleicht man Gleichungen (1) und (20), so erkennt man, dass die Dunkelkennlinie einer Solarzelle der Kennlinie einer gewöhnlichen Diode entspricht. Da die Rechnung analog der zur Solarzelle ist, führen wir hier nur die Ergebnisse für den Sättigungsstrom und den Idealitätsfaktor auf:

$$I_S = (2,2631 \pm 0,1995) \mu\text{A} \quad (27)$$

$$n = (2,14 \pm 0,019) \quad (28)$$

Die Kennlinie ist in Abbildung 4 zu sehen.

**Hellkennlinie:** Aus der Hellkennlinie der Solarzelle (Abbildung 5) lassen sich die übrigen Kenngrößen der Solarzelle bestimmen. Der Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung entsprechen den Schnittpunkten der Kennlinie mit den Koordinatenachsen

$$I_{SC} = (29,252 \pm 0,2027) \text{ mA} \quad (29)$$

$$U_{OC} = (409 \pm 2,4) \text{ mV} \quad (30)$$

Um die beiden Solarzellen sinnvoll miteinander vergleichen zu können, muss der Kurzschlussstrom noch auf die Fläche der Solarzelle normiert werden. Die monokristalline Zelle hat eine quadratische Fläche mit einer Seitenlänge von 5 cm. Somit ergibt sich ein normierter Kurzschlussstrom pro Fläche von

$$\frac{I_{SC}}{A} = 1,17 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}. \quad (31)$$

Um den MPP zu bestimmen, muss das Tupel  $(U_{MP}, I_{MP})$  gefunden werden, für das das Produkt  $P = I \cdot U$  maximal wird. Mathematisch bedeutet das

$$\left. \frac{\partial P}{\partial U} \right|_{U_{MP}} = I_{MP} + U \left. \frac{\partial I}{\partial U} \right|_{U_{MP}} \stackrel{!}{=} 0. \quad (32)$$

Mit den Ergebnissen für  $I_S$ ,  $I_P$  und  $n$  erhalten wir für den MPP

$$U_{MP} = 0,392 \text{ V} \quad (33)$$

$$|I_{MP}| = 25,749 \text{ mA} \quad (34)$$

und den Füllfaktor

$$FF = \frac{I_{MP} U_{MP}}{I_{SC} U_{OC}} = 0,844. \quad (35)$$

Zuletzt ist noch der Wirkungsgrad der Solarzelle zu bestimmen. Dabei ist die auf die Zelle einfallende Strahlleistung relevant. Da in der Versuchsanordnung der Abstand der Solarzelle zur Lampe wesentlich größer als die Seitenlänge der Zelle ist, lässt sich die einfallende Leistung aus der Gesamtleistung der Lampe gemäß

$$P_{Eff} = \frac{A}{2\pi d^2} P_{Ges} \quad (36)$$

berechnen, wobei  $d$  der Abstand zur Lampe,  $A$  die Fläche der Zelle und  $P_{Ges}$  die gesamte abgestrahlte Leistung der Lampe ist. Der Wert für  $A$  sind weiterhin  $25 \text{ cm}^2$ ,  $P_{Ges}$  wurde mit  $150 \text{ W}$  angegeben, für den Abstand haben wir  $d = 43,5 \text{ cm}$  gemessen. Wenn wir all diese Werte verrechnen, erhalten wir einen Wirkungsgrad von

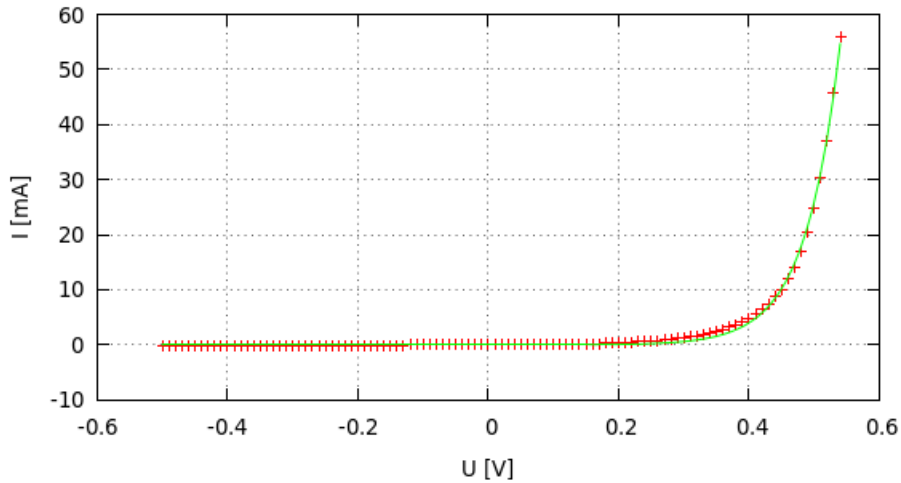


Abbildung 4: Dunkelkennlinie der monokristallinen Solarzelle



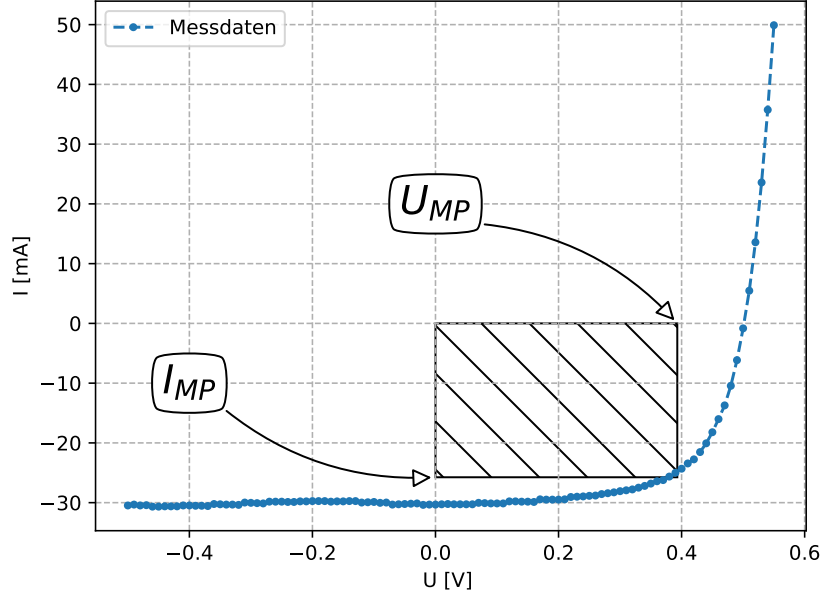


Abbildung 5: Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle.

$$\eta = 2\pi d^2 \cdot \frac{I_{MP}U_{MP}}{P_{Ges}A} = 3,2\%. \quad (37)$$

Die Kennlinie ist in Abbildung 5 zu sehen.

#### 2.4.2 Amorphe Solarzelle

**Dunkelkennlinie:** Die Auswertung der Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle (Abbildung 6) erfolgte komplett analog zu der der monokristallinen Solarzelle. Als Ergebnisse erhalten wir

$$I_S = (73,4219 \pm 0,8211) \mu A \quad (38)$$

$$n = (54,8325 \pm 0,1005). \quad (39)$$

**Hellkennlinie:** Auch die Auswertung der Hellkennlinie erfolgt analog zur monokristallinen Solarzelle. Der Abstand der amorphen Solarzelle zur Lampe betrug 42 cm und die Abmaße der Solarzelle sind  $2,2\text{cm} \times 3\text{cm}$ . Da es sich jedoch um eine Solarzelle handelt, die aus fünf kleinen Solarzellen aufgebaut ist, beträgt die effektive Fläche  $1,32\text{cm}^2$ . Für den Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung erhalten wir

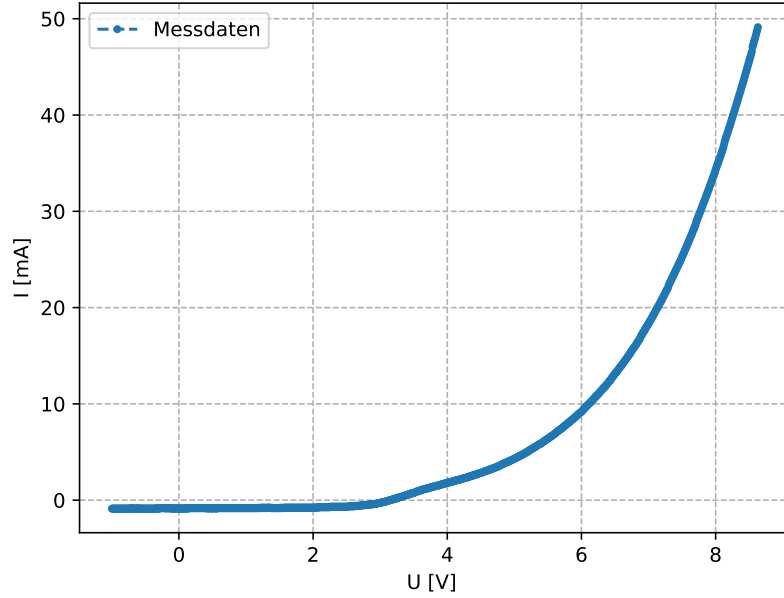


Abbildung 6: Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle.

$$I_{SC} = (1,2298 \pm 0,0152) \text{ mA} \quad (40)$$

$$\frac{I_{SC}}{A} = 0,932 \text{ mA cm}^{-2} \quad (41)$$

$$U_{OC} = 2,7 \text{ V.} \quad (42)$$

Der MPP der amorphen Solarzelle liegt bei

$$U_{MP} = 2,5148 \text{ V} \quad (43)$$

$$I_{MP} = -0,8435 \text{ mA,} \quad (44)$$

dies entspricht einem Füllfaktor von

$$FF = 0,64. \quad (45)$$

Schließlich erhalten wir einen Wirkungsgrad bei der amorphen Solarzelle von

$$\eta = 11,87\%. \quad (46)$$

Die Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle ist in Abbildung 6 dargestellt, in Abbildung 7 ist die Hellkennlinie zu sehen.

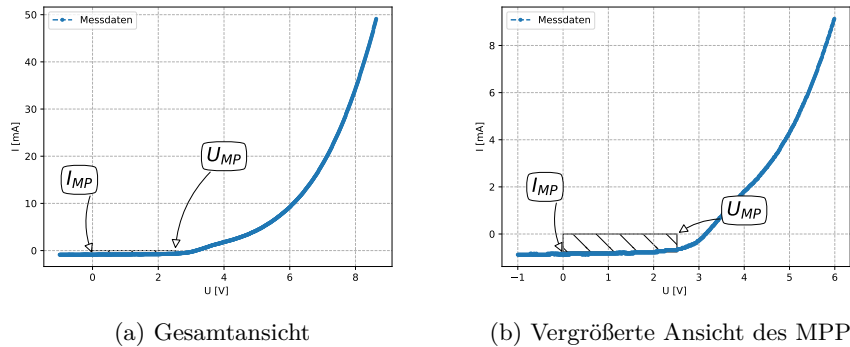


Abbildung 7: Darstellung der Hellkennlinie der amorphen Solarzelle.

### 3 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

#### 3.1 Diode

Für den Idealitätsfaktor der Diode haben wir einen Wert von  $n \approx 3,7$  erhalten. Der Idealitätsfaktor einer idealen Diode liegt zwischen 1 und 2, wodurch sich darauf schließen lässt, dass die verwendete Diode nicht ideal ist.

Die gemessene Durchbruchsspannung beträgt ca.  $3,4\text{ V}$ . Dies ist eine vergleichsweise sehr geringe Durchbruchsspannung. Dadurch lässt sich vermuten, dass es sich um eine Zener-Diode handelt. Bei diesem Diodentyp ist die Durchbruchsspannung sehr gering, da die Diode beim Durchbruch nicht zerstört wird. Deswegen finden sie des Öfteren als Spannungsstabilisator und Spannungsbegrenzer Verwendung.

#### 3.2 Bipolartransistor

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

### 3.3 Solarzellen

Besonders bei der monokristallinen Solarzelle haben wir einen geringen Wirkungsgrad erhalten. Dies liegt vor allem daran, dass die Lampe weißes Licht abgestrahlt hat, während die Solarzellen jeweils für eine bestimmte Wellenlänge optimiert sind.

Weiterhin haben wir für die amorphe Solarzelle einen sehr hohen Idealitätsfaktor erhalten. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Solarzelle deutlich von einer idealen Diode abweicht. Amorphe Solarzellen haben im Gegensatz zu idealen Zellen eine stark asymmetrische Raumladungszone, die diesen hohen Idealitätsfaktor erklärt. Außerdem hat das Material Verunreinigungen, die diese Abweichung weiter verstärken. Beide Füllfaktoren liegen mit 0,64 und 0,84 in einem für Solarzellen typischen Bereich.