

Praktikumsbericht

I-U-Kennlinien an Halbleitern und Solarzellen

Jannik Bach, Cornelius Riesen

1. Dezember 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	4
2 Diode	4
2.1 Messdaten und Berechnungen	4
2.2 Fehlerrechnung	6
2.3 Auswertung	7
3 Bipolartransistor	8
3.1 Messdaten und Berechnungen	8
3.1.1 Berechnung des Parameters h_{11}	8
3.1.2 Berechnung des Parameters h_{22}	9
3.1.3 Berechnung des Parameters h_{12}	11
3.1.4 Berechnung des Parameters h_{21}	12
3.2 Fehlerrechnung	13
3.2.1 Fehler von h_{11}	13
3.3 Auswertung	13
3.3.1 Auswertung von h_{11}	13
3.3.2 Auswertung von h_{12}	13
4 Feldeffekttransistor	14
4.1 Messdaten und Auswertung	14
5 Solarzelle	16
5.1 Die Solarzelle	16
5.2 Auswertung der Dunkelkennlinien	17
5.3 Auswertung der Hellkennlinien	17
5.3.1 Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung	17
5.3.2 Leistungskurven	18
5.3.3 Strahlungsleistung	18
5.4 Tabelle	19
5.5 Plots, Fits, grafische Auswertung	20
5.6 Fehlerrechnung	23
5.6.1 Fehler von I_S	23
5.6.2 Fehler von n	23
5.6.3 Fehler von U_{OC}	23
5.6.4 Fehler von I_{SC}	23

5.6.5	Fehler von P_{MPP}	24
5.6.6	Fehler von FF	24
5.6.7	Fehler von η	24
6	Literatur	25

1 Einführung

In diesem Versuch wurden die Kennlinien einer Diode und zweier unterschiedlicher Transistoren aufgenommen. Mit den Ergebnissen soll u.A. bestimmt werden, um welchen Bauteiltyp es sich handelt, also welcher Diodentyp vorliegt, bzw. beim FET, ob es ein selbstleitender oder -sperrender Transistor ist. Des Weiteren wurden die Dunkel- und Hellkennlinien verschiedener Solarzellen aufgenommen, aus denen übliche Kenngrößen wie z.B. Füllfaktor, relative Effizienz und weitere angegeben werden sollen.

Der Versuchsaufbau bestand aus einem Steckbrett, auf das die Bauteile montiert und mit der Strom- bzw. Spannungsquelle verbunden werden konnten. Außerdem stand uns ein PC mit dem LabVIEW-Programm zur Verfügung, mittels dessen die Kennlinien aufgenommen und abgespeichert werden konnten.

2 Diode

2.1 Messdaten und Berechnungen

Im Durchlassbereich wird die Kennlinie einer Diode durch die Diodengleichung beschrieben. Sie lautet:

$$I_D = I_S \left(\exp \frac{U_D}{nU_T} - 1 \right) \quad (1)$$

Dabei ist U_D die angelegte Spannung, n der Idealitätsfaktor, welcher im idealen Fall Werte zwischen Eins und Zwei annimmt, in der Realität aber auch größer werden kann. Die Größe $U_T = \frac{k_B T}{q}$ bezeichnet die Temperaturspannung, die bei Raumtemperatur etwa 25mV beträgt. I_S ist der Sperrstrom, d.h. der Strom, der trotz in Sperrrichtung angelegter Spannung fließt. Dieser Strom ist sehr klein und liegt zwischen 10^{-12} und 10^{-6} Ampere.

Zum Berechnen des Idealitätsfaktors n wird die Diodengleichung umgestellt:

$$I_D = I_S \left(\exp \frac{U_D}{nU_T} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) = \frac{U_D}{nU_T} \quad (3)$$

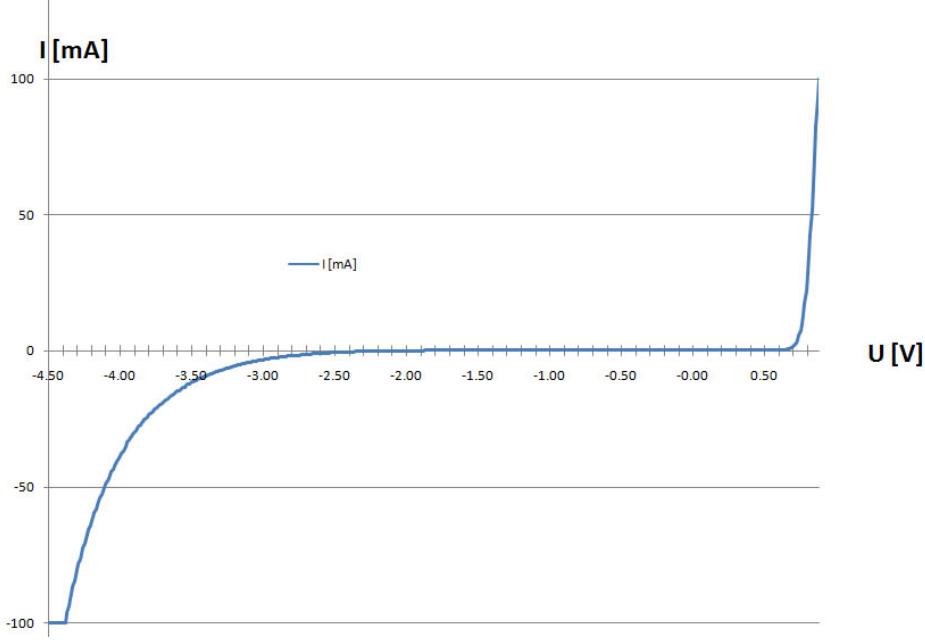


Abbildung 1: Die im Versuch gemessene Diodenkennlinie

Wie oben schon erwähnt, ist der Sperrstrom I_S sehr klein. Somit ist $\frac{I_D}{I_S} \gg 1$. Gleichung (3) vereinfacht sich daher zu

$$\ln \frac{I_D}{I_S} = \frac{U_D}{nU_T} \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow \ln I_D = \frac{U_D}{nU_T} + \ln I_S \quad (5)$$

Um n nun zu bestimmen, wird der Strom logarithmisch gegen die Spannung aufgetragen und n aus der Steigung ermittelt. In der Abbildung 2 ist der natürliche Logarithmus des Durchlassstroms gegen die angelegte Spannung U aufgetragen (durch die blaue Linie dargestellt). Die rote Linie ist der lineare Fit im annähernd linearen Bereich der Kennlinienkurve, aus der der Idealitätsfaktor wie folgt berechnet wird:

$$S := \frac{\Delta \ln I_D}{\Delta U} = \frac{8}{(0,84 - 0,51)V} = 24,24 \frac{1}{V} = \frac{1}{nU_T} \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow n = \frac{1}{SU_T} = \frac{1}{\frac{8}{(0,84 - 0,51)V} 0,025V} = 1,65 \quad (7)$$

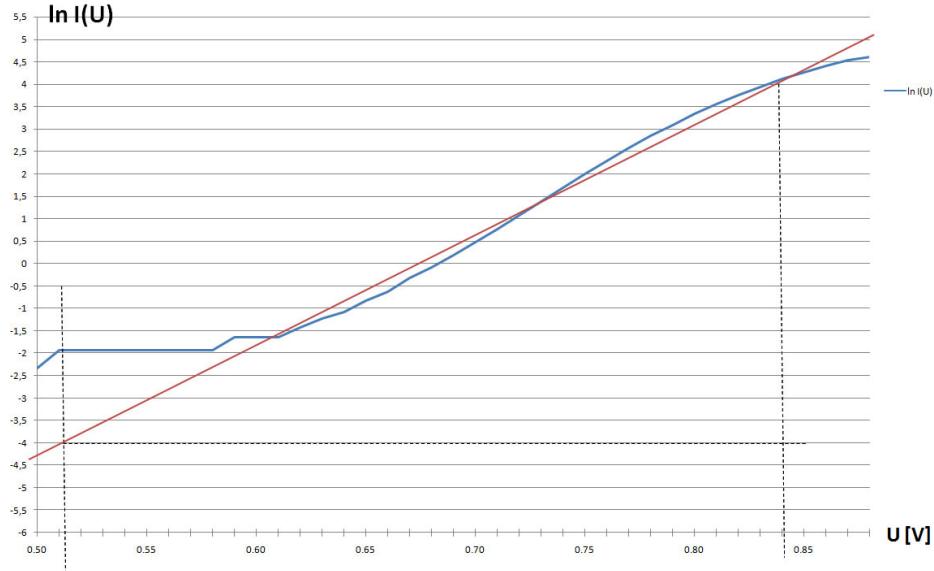


Abbildung 2: Zur Berechnung von n und I_S

Auch zur Berechnung des Sättigungsstroms wird dasselbe Diagramm verwendet. Dabei wird der Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinaten bei $U = 0V$ abgelesen. Der Übersichtlichkeit halber beginnt der Wertebereich des oben abgebildeten gezeigten Diagramms bei $U = 0,5V$. Hier wird die $\ln I$ -Achse bei etwa $-4,3$ geschnitten. Um den Schnittpunkt bei $U = 0V$ zu ermitteln, kann entweder der Bereich des Diagramms erweitert werden, oder man berechnet dies mithilfe der Steigung:

$$S_0 = -4,3 - 0,5S = -16,42 \quad (8)$$

$$\Rightarrow I_S = \exp(-16,42) = 7,39 \times 10^{-8} A \quad (9)$$

2.2 Fehlerrechnung

Da der Idealitätsfaktor n und der Sättigungsstrom I_S grafisch ermittelt wurden, wird der Fehler für diese Größen aus der Unsicherheit der Steigung und des Achsenabschnitts ermittelt.

Den Fehler der Steigung S einer Geraden berechnet man im Allgemeinen wie folgt:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta y}{y_2 - y_1} \quad (10)$$

Anstatt y kann man auch x verwenden. Für n erhalten wir so einen relativen Fehler von etwa

$$\frac{2 \times 0,3}{4 - (-4)} = 0,075 \hat{=} 7,5\% \quad (11)$$

$$\Rightarrow n = 1,65 \pm 0,12 \quad (12)$$

Der Fehler für den Ordinatenabschnitt wird angegeben mit

$$\Delta A_y = \left(\frac{x_1 + x_2}{2} \right) \Delta S = \frac{0,51 + 0,84}{2} 1,82 = 1,32. \quad (13)$$

Das bedeutet, der Wert von I_S liegt zwischen

$$\exp -(16,42 + 1,32) \leq I_S \leq \exp -(16,42 - 1,32) \quad (14)$$

$$\Rightarrow I_S = (14,8 \pm 12,9) \times 10^{-8} A. \quad (15)$$

2.3 Auswertung

Der Wert für n scheint ziemlich genau ermittelt worden zu sein und hat einen recht kleinen Fehler.

Dagegen liegt zwar der Wert für den Sättigungsstrom auch im Bereich der üblichen Werte, hat jedoch einen verhältnismäßig großen Fehler. Dies kann an dem ohnehin nur sehr kleinem Strom I_S liegen. Die Gerade ist nur mit dem Bereich der Kurve gefittet worden, der in der logarithmischen Darstellung seinerseits auch einen verhältnismäßig geraden Verlauf hat. Wäre der Bereich vor $0,5V$ auch noch berücksichtigt worden, so wäre der Fehler noch größer ausgefallen. Der mittlere Wert für den Sättigungsstrom in der Fehlerrechnung weicht deshalb von dem Wert in der Berechnung ab, da die Ordinate logarithmisch aufgetragen ist, und der Wert $\pm 1,32$ für unterschiedliche Bereiche auf der Achse somit unterschiedlich große Auswirkung hat. In der Fehlerberechnung ist daher der Wert, der genau zwischen Minimal- und Maximalwert liegt, angegeben.

Auffallend bei dieser Diode ist die relativ geringe Durchbruchspannung von betragsmäßig etwas mehr als als $4V$ (der Wert ist nicht ganz genau bestimmbar). Die typischen Durchbruchspannungen befinden sich im Bereich von $-50V$ bis hin zu $-1000V$. Daher handelt es sich hier sehr wahrscheinlich um eine Zener-Diode.

3 Bipolartransistor

3.1 Messdaten und Berechnungen

3.1.1 Berechnung des Parameters h_{11}

Der Vierpolparameter h_{11} ist wie folgt definiert:

$$h_{11} = r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}. \quad (16)$$

Hier ist r_{BE} der differentielle Eingangswiderstand. Sein Wert wird durch die

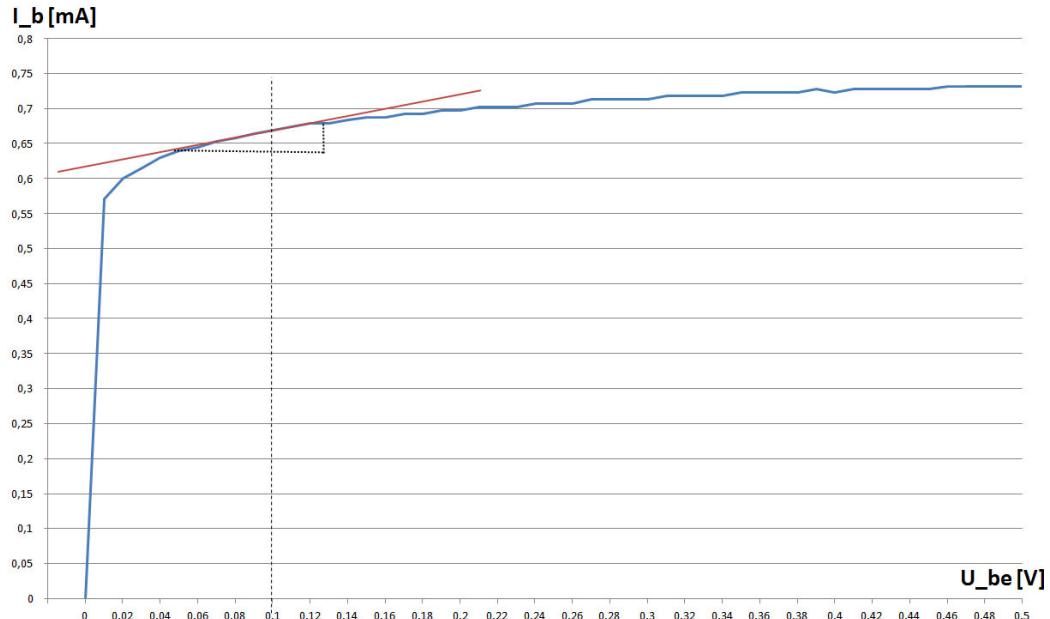


Abbildung 3: Diagramm zur Berechnung von h_{11}

Steigung (bzw. bei dieser Abbildung durch den Kehrwert der Steigung) der Kennlinie an einem ausgewählten Punkt bestimmt. Hier wurde der Punkt $U = 0,1V$ dazu ausgewählt.

In Abbildung 4 sieht man einen Ausschnitt der Kennlinie mit eingezeichneten Hilfslinien. Hieraus können die benötigten Werte abgelesen werden:

$$h_{11} = r_{BE} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{(0,12 - 0,08)V}{(0,68 - 0,655)mA} = 1600\Omega \quad (17)$$

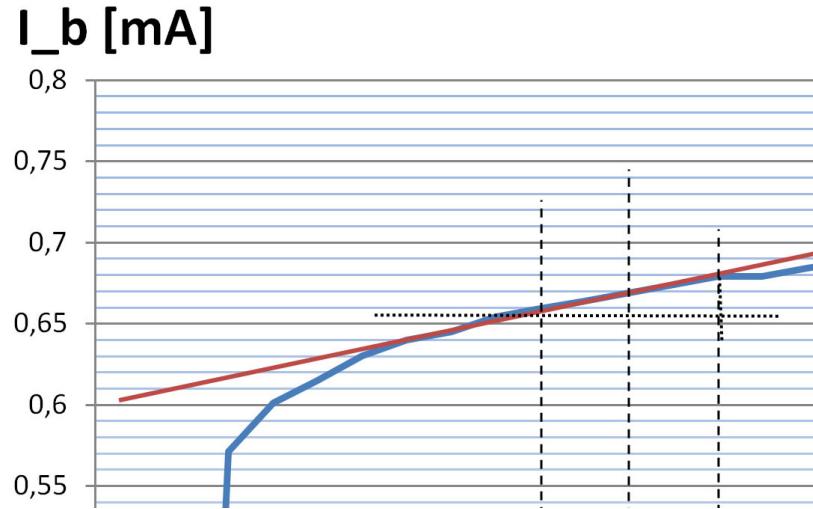


Abbildung 4: Ausschnitt der Kennlinienaufnahme

3.1.2 Berechnung des Parameters h_{22}

Um den Parameter h_{22} zu berechnen, wird der Kollektorstrom I_C gegen die Spannung U_{CE} aufgetragen. Dies geschieht mehrfach für verschiedene aber konstante Basisströme I_B . Die Steigung der $I_C - U_{CE}$ -Kennlinie gibt den differentiellen Ausgangswiderstand r_{CE} an. Aus dessen Kehrwert erhält man den Vierpolparameter h_{22} :

$$h_{22} = \frac{1}{r_{CE}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \quad (18)$$

Hier ist der Arbeitspunkt bei $U_{CE} = 0,5V$ gewählt. Der Wert h_{22} wurde jeweils für die unterschiedlichen Basisströme gemessen und in die Tabelle eingetragen.

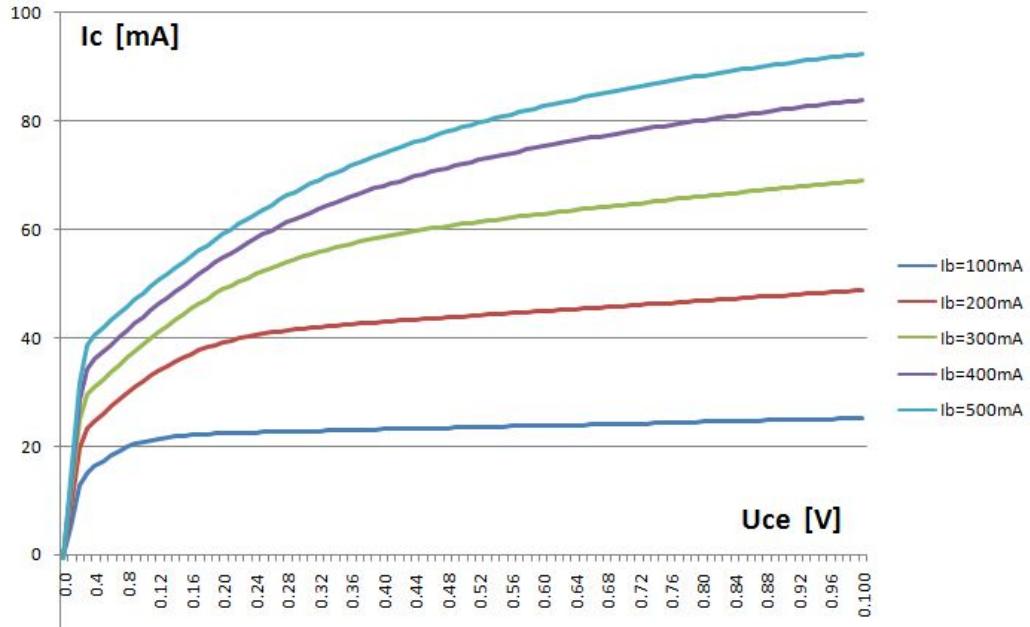


Abbildung 5: Ausgangskennlinien bei unterschiedlichen Basisströmen

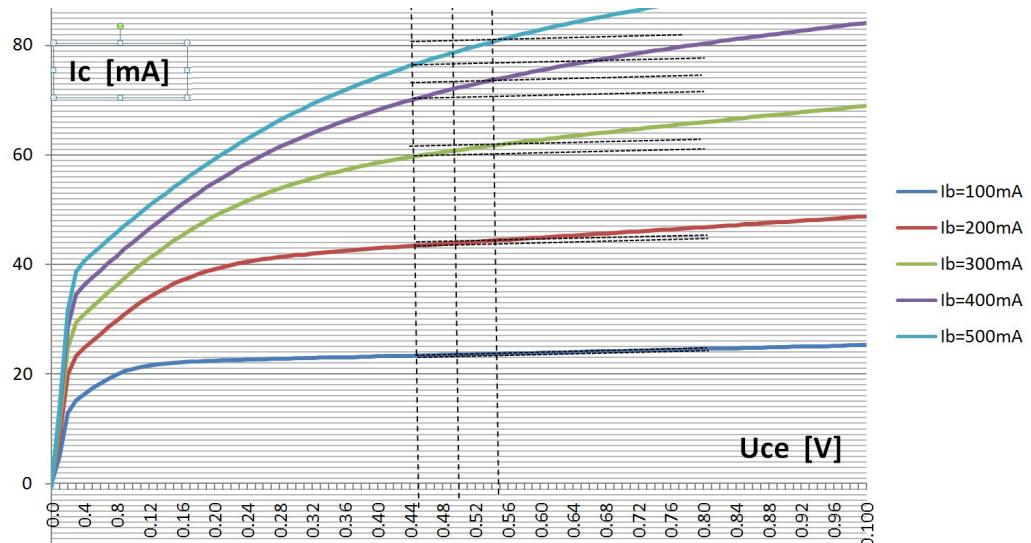
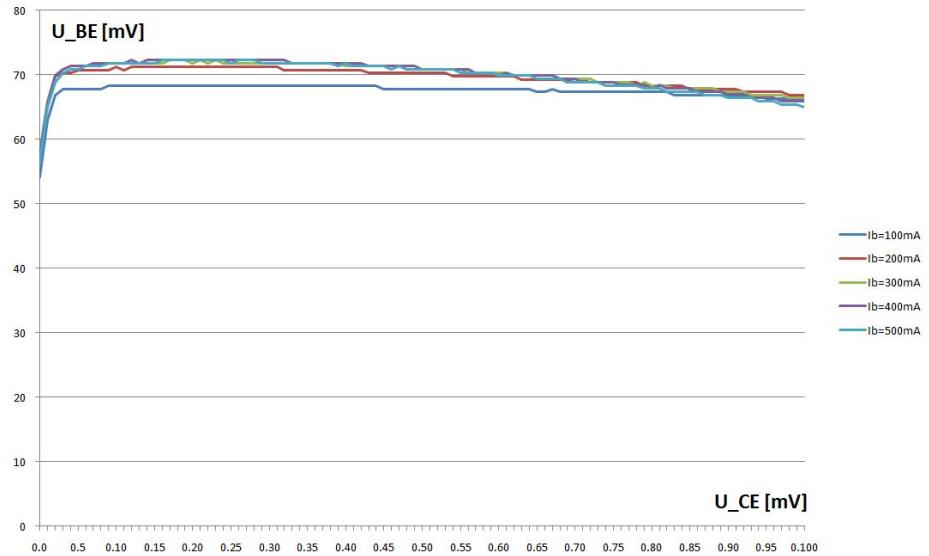


Abbildung 6: Zum Ermitteln der Steigungen

$I_B [mA]$	$\frac{\Delta U}{\Delta I} [\Omega]$	$h_{22} \left[\frac{1}{\Omega} \right]$
100	$\frac{0,1V}{0,5mA} = 200$	5×10^{-3}
200	$\frac{0,1V}{0,8mA} = 125$	8×10^{-3}
300	$\frac{0,1V}{1,9mA} = 52,6$	19×10^{-3}
400	$\frac{0,1V}{2,9mA} = 34,5$	29×10^{-3}
500	$\frac{0,1V}{4,5mA} = 22,2$	45×10^{-3}

Tabelle 1: Ermitteln der jeweiligen h_{22} -Werte

3.1.3 Berechnung des Parameters h_{12}

Abbildung 7: Rückwirkungskennlinien für unterschiedlich große I_B

Der Parameter h_{12} beschreibt die Rückwirkung der Ausgangsspannung U_{CE} auf die Eingangsspannung U_{BE} . Diese Rückwirkung ist sehr unerwünscht, daher sollte die Kurve im Rückwirkungskennlinienfeld möglichst flach verlaufen. Zum Berechnen von h_{12} wurde die Kennlinie mit dem Basisstrom $I_B = 100mA$ verwendet. Aus deren Steigung ergibt sich

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{1mV}{0,6V} = 1,67 \times 10^{-3} \quad (19)$$

3.1.4 Berechnung des Parameters h_{21}

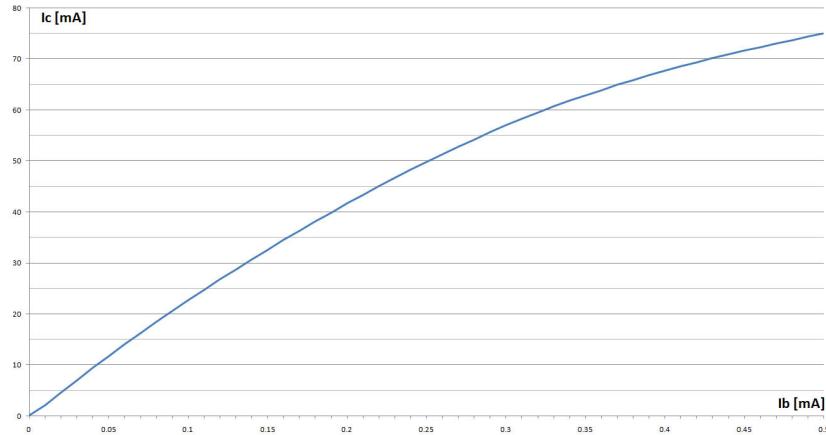


Abbildung 8: Verhältnis von Kollektor- zu Basisstrom

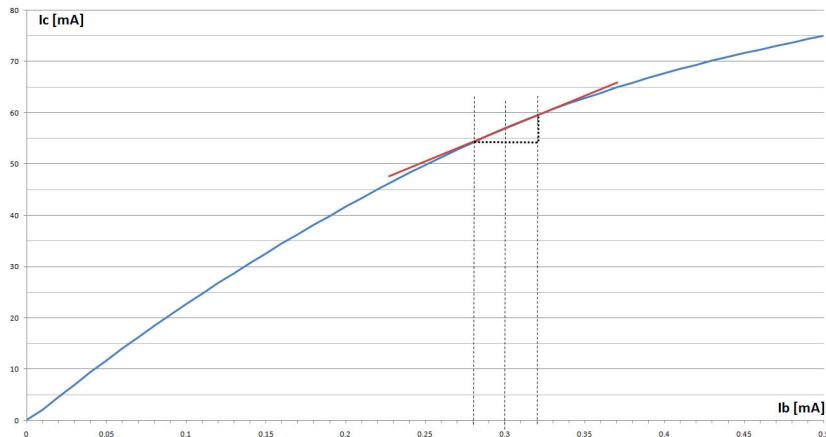


Abbildung 9: Kennlinie mit Hilfslinien zum Ermitteln der Steigung

Der Vierpolparameter h_{21} gibt den Stromverstärkungsfaktor β an. Er ist das Verhältnis aus Kollektor- und Basisstrom:

$$h_{21} = \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (20)$$

Hierfür wurde der Arbeitspunkt bei $I_B = 0,3V$ festgelegt. Für β ergibt sich

hier

$$h_{21} = \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{5mA}{0,04mA} = 125 \quad (21)$$

3.2 Fehlerrechnung

3.2.1 Fehler von h_{11}

Auch hier berechnet sich der relative Fehler der Steigung wie bei der Diode:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta y}{y_2 - y_1} = \frac{0,008}{0,025} = 0,32 \hat{=} 32\% \quad (22)$$

$$\Rightarrow h_{11} = r_{BE} = (1600 \pm 512)\Omega \quad (23)$$

3.3 Auswertung

3.3.1 Auswertung von h_{11}

Der relative Fehler von 32% ist recht groß. Würde man das Steigungsdreieck größer wählen, so würde sich dieser Wert zwar verkleinern, andererseits wäre der Wert r_{BE} für genau den ausgewählten Punkt bei $U = 0,1V$ mit größerer Unsicherheit verbunden. Es gilt daher, einen guten Kompromiss zwischen beiden Möglichkeiten zu finden.

3.3.2 Auswertung von h_{12}

Zur Bestimmung der Steigung der Rückwirkungskennlinie wurde der Bereich zwischen $U_{CE} = 0,1V$ und $U_{CE} = 0,7V$ gewählt. Der Verlauf der Kennlinie des Basisstroms $I_B = 100mA$ ließ sich am besten ermitteln, daher wurde diese zur Berechnung von h_{12} gewählt. Die Kennlinien der höheren Basisströme zeigen eine etwas stärkere Steigung, was darauf schließen lässt, dass deren h_{12} -Werte etwas größer sein dürften. Die Linien verlaufen leicht zickzackförmig. Eventuell hätte ein Kondensator zur Glättung dazwischengeschaltet werden sollen. Ansonsten ließ sich die Steigung aber gut ermitteln.

4 Feldeffekttransistor

4.1 Messdaten und Auswertung

Gemessen wurden die Kennlinien eines MOSFET. In Abb. 10 sieht man die Abhängigkeit des durchgelassenen Stroms I_D von der Gate-Source-Spannung U_{GS} , die sogenannten Ausgangskennlinien. Anhand der Eingangskennlinie in Abb. 11 ist zu erkennen, dass es sich hier um einen selbstsperrenden FET handelt, da der Strom I_D bei betragsmäßig kleiner werdender Spannung auch kleiner wird und bei $0V$ gar nicht mehr fließt. Wäre es ein selbstleitender FET, dann wäre der Strom I_D bei $U_{GS} = 0V$ sehr groß und würde mit zunehmender negativer Spannung abnehmen.

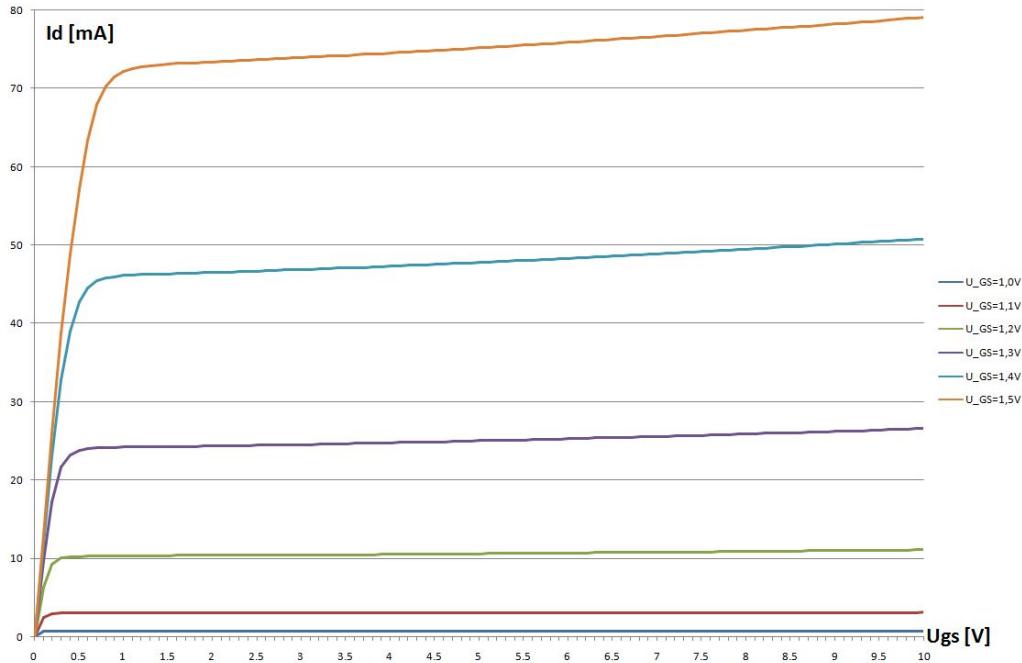


Abbildung 10: Ausgangskennlinien des FET

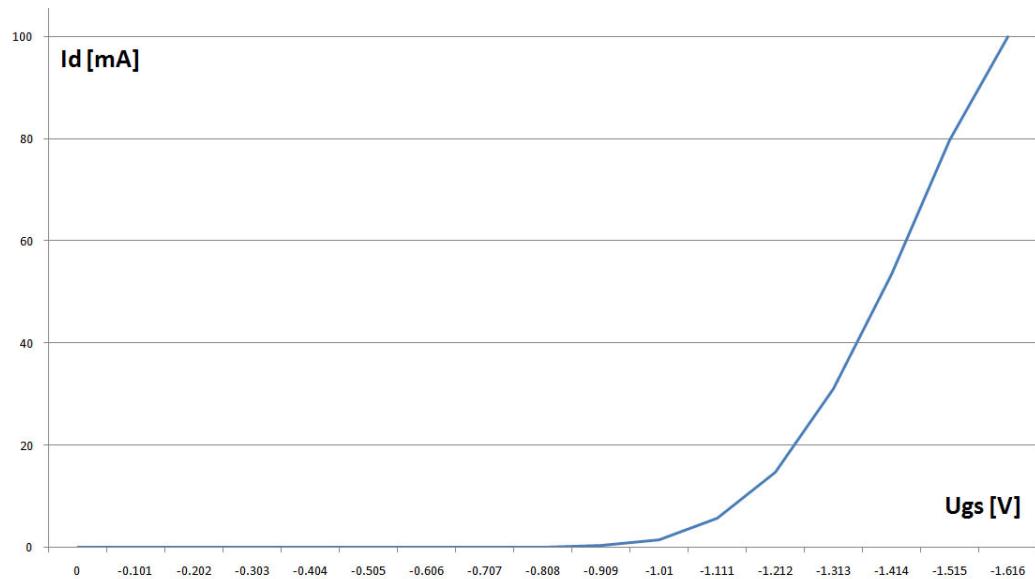


Abbildung 11: Eingangskennlinie des FET

5 Solarzelle

5.1 Die Solarzelle

Um die typischen Kenngrößen einer Solarzelle zu bestimmen wurden Hell- und Dunkelkennlinien zweier Solarzellen gemessen. Es handelte sich um eine monokristalline und um eine amorphe Si-Solarzelle. Die typischen Kenngrößen sind: Die Leerlaufspannung (Open-Circuit-Voltage) U_{OC} , der Kurzschlussstrom (Short-Circuit-Current) I_{SC} , der Füllfaktor FF , der Idealitätsfaktor n , der Sättigungsstrom I_S und der Wirkungsgrad η . Für den Füllfaktor wird die Leistung am bestmöglichen Betriebspunkt benötigt (Maximum-Power-Point). Zur Berechnung der typischen Kenngrößen betrachtet man die Solarzelle als eine Parallelschaltung einer Stromquelle (Photostrom) und einer idealen Diode.

Es sei darauf hingewiesen, dass am Ende des Kapitels als Zusammenfassung eine Tabelle aller Kenngrößen beigelegt ist.

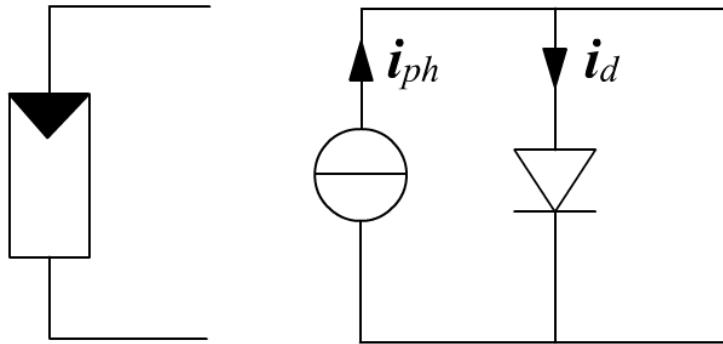


Abbildung 12: Ersatzschaltbild einer Solarzelle

Für den Solarzellenstrom ergibt sich also mit der Ersatzschaltung:

$$I(U) = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1)$$

Gemessen wurde ebendieses $I(U)$. Die weitere Auswertung wurde in zwei Schritte aufgeteilt, nämlich die Auswertung der Dunkelkennlinien und die Auswertung der Hellkennlinien.

5.2 Auswertung der Dunkelkennlinien

Nun kann man aus den Dunkelkennlinien I_s und n bestimmen. Dafür werden die Messwerte mit der Diodengleichung gefittet:

$$I = A(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1)$$

Aus dem Fit (Abb. 13: Dunkelkennlinie der monokristallinen Solarzelle) ergibt sich für die monokristalline Solarzelle:

$$A = I_s = 0.00298mA$$

$$b = nU_T = 0,05474V \Leftrightarrow n = 2.1896$$

Aus diesem Fit (Abb. 14: Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle) ergibt sich für die amorphe Solarzelle:

$$A = I_s = 0.03015mA$$

$$b = nU_T = 1.09418V \Leftrightarrow n = 43.7672$$

Vergleicht man die Idealitätsfaktoren so sieht man, dass sich die monokristalline Solarzelle recht gut als Diode interpretieren lässt, wenn es keine Lichteinstrahlung gibt. Die amorphe Solarzelle ist sehr „unideal“, das lässt sich dadurch erklären, dass amorphe Festkörper einen stark asymmetrischen Aufbau haben. Das führt zu einer asymmetrischen Raumladungszone. Diese Asymmetrie sorgt außerdem für parasitäre Widerstände, die durch die Struktur entstehen.

5.3 Auswertung der Hellkennlinien

5.3.1 Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung

Aus den Hellkennlinien (Abb. 15 und Abb. 16) lassen sich direkt U_{OC} und I_{SC} als Achsenabschnitte ablesen. Für die monokristalline Solarzelle (Abb. 15: Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle) ergibt das:

$$U_{OC} = 0.545V \text{ und } I_{SC} = 67mA$$

Und für die amorphe Solarzelle (Abb. 16: Hellkennlinie der amorphen Solarzelle):

$$U_{OC} = 3.35V \text{ und } I_{SC} = 2mA$$

Um die beiden Solarzellen zu vergleichen betrachtet man die Größe 'Sperrstrom pro Fläche'. Außerdem ist zu beachten, dass die amorphe Solarzelle aus fünf, in Reihe geschalteten, Zellen besteht, also muss der Strom mit 5 multipliziert und die Spannung durch 5 dividiert werden.

Monokristallin:

$$\frac{I_{SC}}{A} = \frac{67mA}{\left(\frac{5.3cm}{2}\right)^2\pi} = 30.3692 \frac{A}{m^2}$$

Amorph:

$$\frac{I_{SC}}{A} = \frac{2mA \cdot 5}{3.2 \cdot 2cm^2} = 15.625 \frac{A}{m^2} \wedge U'_{oc} = \frac{U_{oc}}{5} = 0.67V$$

5.3.2 Leistungskurven

Für den Füllfaktor und den Wirkungsgrad benötigen wir jeweils die Leistung am Maximum-Power-Point. Der optimale Betriebspunkt ist an der Stelle, an der die elektrische Leistung $P = U \cdot I$ minimal wird. Dazu wurde die Leistung gegen die Spannung aufgetragen und das Minimum wurde abgelesen. Auch hier wird die Leistung wieder durch die Fläche geteilt um besser vergleichen zu können.

Monokristallin (Abb.17: Leistungskurve der monokristallinen Solarzelle):

$$P_{MPP} = 24mW \Leftrightarrow 10.878 \frac{W}{m^2} = \frac{P_{MPP}}{A}$$

Amorph (Abb. 18: Leistungskurve der amorphen Solarzelle):

$$P_{MPP} = 4.1mW \Leftrightarrow 6.4063 \frac{W}{m^2} = \frac{P_{MPP}}{A}$$

5.3.3 Strahlungsleistung

Für den Wirkungsgrad wird noch die auftreffende Strahlungsleistung benötigt.

$$P_{Ein} = P_0 \frac{A_{Zelle}}{A_{Halbkugel}}$$

Die Leistung der Lampe ist $P_0 = 100W$. Der Anteil der Strahlungsleistung der Lampe, der auf die Solarzelle fällt ist gegeben durch das Verhältnis der Fläche der Solarzelle zu der Fläche der Halbkugel mit dem Radius R , wobei

R gleich dem Abstand zwischen Strahlungsquelle und Solarzelle ist.

Monokristallin:

$$P_{Ein} = 100W \frac{(\frac{5.3cm}{2})^2\pi}{2\pi(34cm)^2} = 0.3037W$$

Amorph:

$$P_{Ein} = 100W \frac{3.2 \cdot 2cm^2}{2\pi(34cm)^2} = 0.0881W$$

5.4 Tabelle

Es ist bekannt, dass $FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC}U_{OC}}$ und dass $\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}}$. Damit kann man alle Kenngrößen der Solarzelle angeben:

Kenngröße	monokristalline Solarzelle	amorphe Solarzelle
$I_s [\mu A]$	2.98	30.15
n	2.1896	43.7672
$U_{OC} [V]$	0.545	0.67
$\frac{I_{SC}}{A} [\frac{A}{m^2}]$	30.3692	15.625
FF	0.6955	0.6119
η	7.9025%	4.6538%

Tabelle 2: Kenngrößen

Im direkten Vergleich sieht man, dass die monokristalline Solarzelle in jedem Punkt effizienter ist. Das sieht man einerseits daran, dass der Wirkungsgrad höher ist; d.h. dass mehr von der eingestrahlten Leistung in elektrische Leistung umgewandelt wird (zumindest am MPP). Andererseits sieht man es an der an der signifikant höheren Kurzschlussspannung. Je höher diese, desto leichter können sich Elektronen durch den Festkörper bewegen und desto weniger elektrische Energie geht verloren.

Vergleicht man die Wirkungsgrade mit den üblichen Wirkungsgraden von amorphen und monokristallinen Solarzellen, so stellt man fest, dass der Wirkungsgrad der amorphen Solarzelle knapp unter und der Wirkungsgrad der monokristallinen Solarzelle signifikant unter den üblichen Wirkungsgraden liegen. Das kann z.B. davon kommen, dass die monokristalline Solarzelle stark verunreinigt ist.

5.5 Plots, Fits, grafische Auswertung

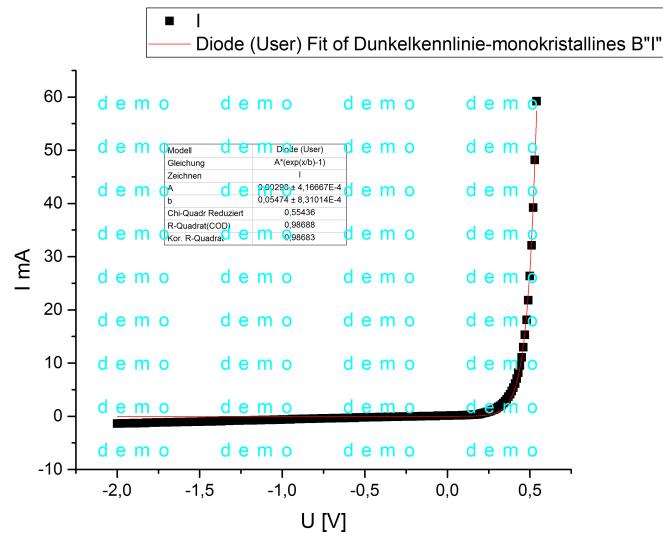


Abbildung 13: Dunkelkennlinie der monokristallinen Solarzelle

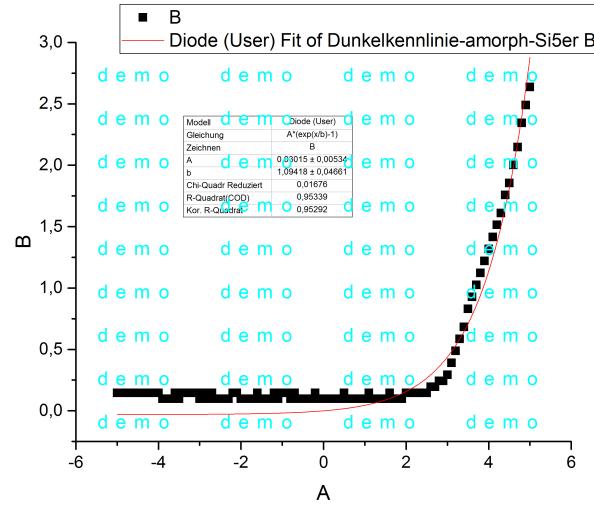


Abbildung 14: Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle

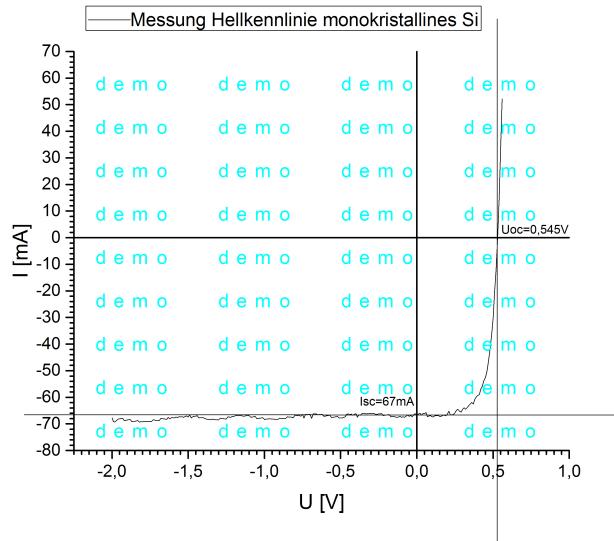


Abbildung 15: Hellkennlinie der monokristallinen Solarzelle

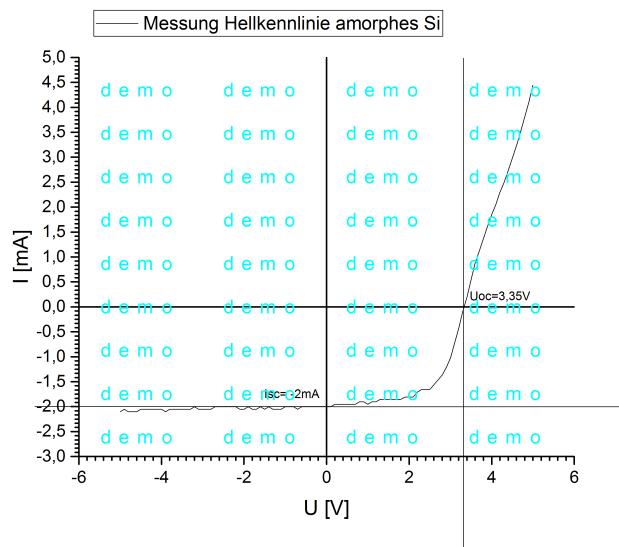


Abbildung 16: Hellkennlinie der amorphen Solarzelle

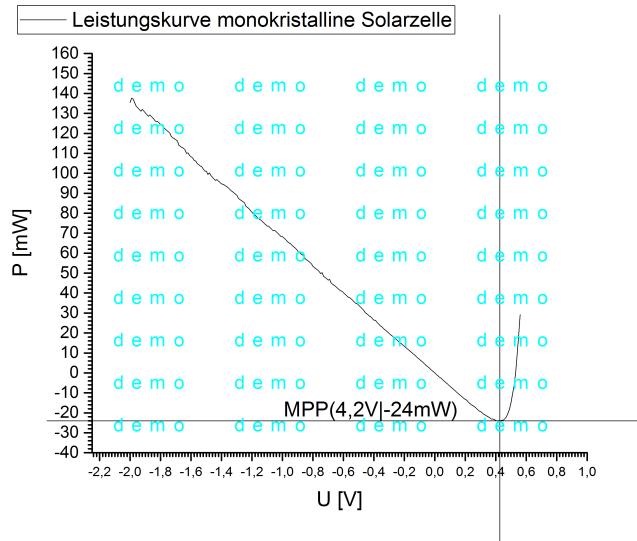


Abbildung 17: Leistungskurve der monokristallinen Solarzelle

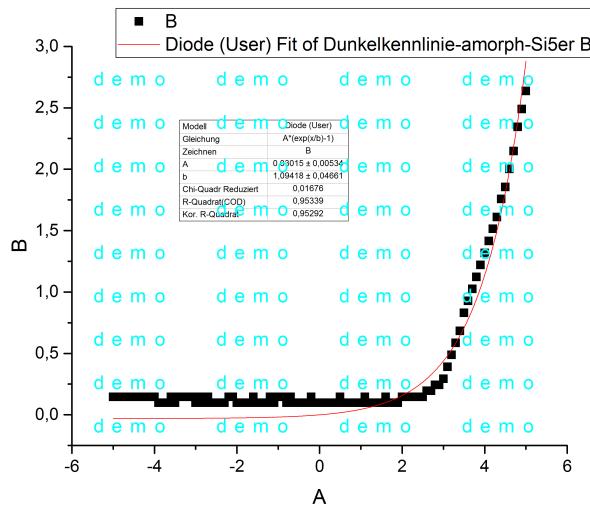


Abbildung 18: Dunkelkennlinie der amorphen Solarzelle

5.6 Fehlerrechnung

5.6.1 Fehler von I_s

Der Fehler von I_s lässt sich direkt aus dem Fit entnehmen:
monokristallin:

$$\Delta A = \Delta I_s = 0.42\mu A$$

amorph:

$$\Delta I_s = 5.34\mu A$$

5.6.2 Fehler von n

Gleiches gilt für n :

$$\Delta b = \Delta n U_T \Leftrightarrow \Delta n = \frac{\Delta b}{U_T}$$

monokristallin:

$$\Delta n = 0.0332$$

amorph:

$$\Delta n = 1.8644$$

5.6.3 Fehler von U_{OC}

Da U_{OC} direkt aus dem Diagramm gelesen wurde, ist der Fehler der Ablesefehler:

monokristallin:

$$\Delta U_{OC} = 0.05V$$

amorph:

$$\Delta U_{OC} = 0.2V$$

5.6.4 Fehler von I_{SC}

Selbiges gilt für I_{SC} :

monokristallin:

$$\Delta I_{SC} = 2mA$$

amorph:

$$\Delta I_{SC} = 0.1mA$$

5.6.5 Fehler von P_{MPP}

Auch hier wurde der Wert von P_{MPP} abgelesen:
monokristallin:

$$\Delta P_{MPP} = 2mW$$

amorph:

$$\Delta P_{MPP} = 0.2mW$$

5.6.6 Fehler von FF

Gemäß Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta FF = \sqrt{\left(\frac{\partial FF}{\partial P_{MPP}} \Delta P_{MPP}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial I_{SC}} \Delta I_{SC}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial U_{OC}} \Delta U_{OC}\right)^2}$$

monokristallin:

$$\Delta FF = 0.0838$$

amorph:

$$\Delta FF = 0.0562$$

5.6.7 Fehler von η

$$\begin{aligned} \Delta \eta &= \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{MPP}} \Delta P_{MPP}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{Ein}} \Delta I_{SC}\right)^2} \\ \Delta P_{ein} &= \left| \frac{\partial P_{Ein}}{A_{Halbkugel}} \Delta A_{Halbkugel} \right| \\ \left| \frac{\partial A_{Halbkugel}}{\partial r} \Delta r \right| &= |4\pi r \Delta r| \end{aligned}$$

r wurde mit dem Zollstock gemessen und hat daher einen Fehler von $\Delta r = 1cm$.

monokristallin:

$$\Delta \eta = 0.7401\%$$

amorph:

$$\Delta \eta = 0.3018\%$$

6 Literatur

<https://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>