Versuch 1.8: I-U-Kennlinien an Halbleitern und Solarzellen

Dimitri Kana, Violetta Winkler 10 November 2015

1 Aufgabenstellung

Aufnahme von typischen Bauelementkennlinien einer Diode, eines Bipolartransistors sowie eines Feldeffekttransistors. Ermittlung des Bauteiltyps sowie der für die Elektronik wichtigen Bauteileigenschaften. Bestimmung der üblichen Kenngrößen verschiedener Solarzellen durch die Aufnahme von Dunkel- und Hellkennlinien.

2 Versuchsaufbau/Versuchsdurchführung

1. Zuerst wurde eine Diode auf einem Steckbrett mit einer Spannung verbunden. Durch manuelles Ausprobieren erfuhr man die Sperr- und Durchlassrichtung der Diode. Anschließend wurde die Diodenkennlinie aufgenommen und die Messdaten gespeichert.

2. Als nächstes wurde ein Bipolartransistor am Steckbrett geschaltet, mit einer Stromquelle verbunden (Basisstrom) und für verschiedene Basisströme wurden Kennlinien aufgenommen und gespeichert.

3. Weiter wurde ein Feldeffekttransistor an eine Gate-Source-Spannung angeschlossen. Für Variationen dieser Spannungen wurden Kennlinien aufgenommen.

4. Schließlich wurden noch Dunkel- und Hellkennlinien von Solarzellen (Monokristallin, Amorph), -ahnlich wie bei Dioden im ersten Punkt, aufgenommen. Dazu wurden der Abstand der Lichtquelle (100Watt) und die Fläche der Solarzellen notiert, um die bestrahlte Leistung zu ermitteln.

3 Messergebnisse/Auswertung

3.1 Diode

Die Diode wird in Durchlassrichtung durch die Diodengleichung beschrieben:

$$I_D = I_S(T)(exp(eU_F/nk_BT) - 1) \tag{1}$$

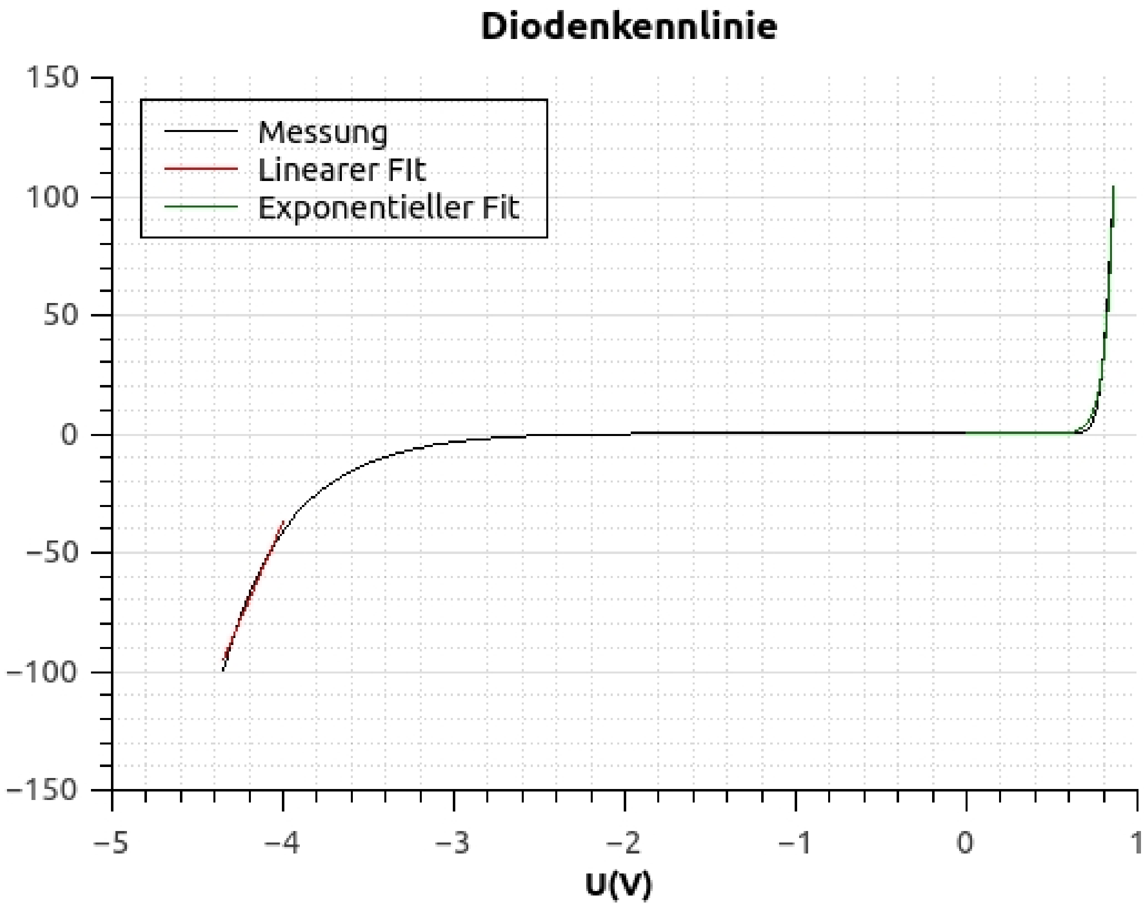
Darin sind:

- U_F Die Spannung zwischen Anode und Kathode
- I_D Der Strom durch die Diode
- $I_S(T)$ Der Sättigungsstrom
- $n = 1.....2$ Der Idealittsfaktor
- k_BT/e Die Temperaturspannung

Bei Raumtemperatur von 22C erhält man:

$$e/k_BT = 39,33V^{-1} \tag{2}$$

Gemessen wurde die folgende Kennlinie:



Darin sind zwei Funktionen angefittet. Ein linearer Fit und ein exponentieller Fit. Die so erhaltenen Funktionen sind von der Form:

$$\begin{aligned} f(x) &= a_0 + a_1 x \\ g(x) &= A(exp(x/t) - 1) \end{aligned} \tag{3}$$

Mit $a_0 = 623,477$, $a_1 = 165.16$, $A = 3,145 * 10^{-6}$ und $t = 0.04965$

Aus den Fitts erhält man den Sättigungsstrom. Es gilt:

$$I_S = A = 3,145 * 10^{-6} mA \tag{4}$$

Den Idealitätsfaktor erhält man durch:

$$t = n k_B T/e \tag{5}$$

es folgt:

$$n = et/k_B T = 39,33 * 0,04965 = 1,95 \tag{6}$$

Aus dem linearen Fit erhält man die Durchbruchsspannung in dem man den Schnittpunkt der Gerade mit der U(V) Achse bestimmt. Die Durchbruchsspannung ist somit:

$$U(V) = -a_0/a_1 = 623,477/165,16 = -3,77V \tag{7}$$

Der niedrige Wert für die Durchbruchsspannung lässt auf eine Zenerdiode schließen. Die Durchbruchsspannung einer Zenerdiode liegt im Bereich 2,4 bis 200 V. Die Zenerdiode kann dauerhaft bei Durchbruchsspannung betrieben werden ohne kaputt zu gehen. Bei niedrigen Z-Spannungen (unterhalb von 3V) ist für den vergleichsweise schwachen Durchbruch der Zenereffekt verantwortlich. Bei höheren Spannungen dominiert der Lawinendurchbruch-Effekt.

3.2 Bipolartransistor

Ein elektrisches Bauelement mit 4 Anschlüssen, bei dem 2 Anschlüsse zu einem Tor zusammengefasst sind, nennt man Vierpol. Die Torbedingung ist dann erfüllt, wenn die beiden Ströme dieser Anschlüsse gegengleich sind.

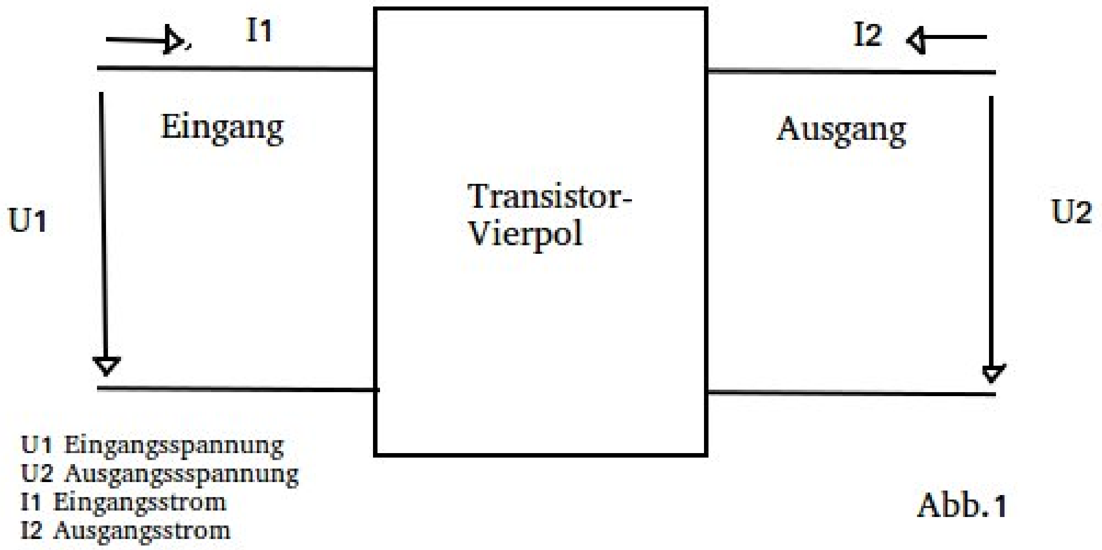


Abb.1

Der Transistor kann als Vierpol angesehen werden. Er wird beschrieben durch die Gleichung:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \tag{8}$$

mit:

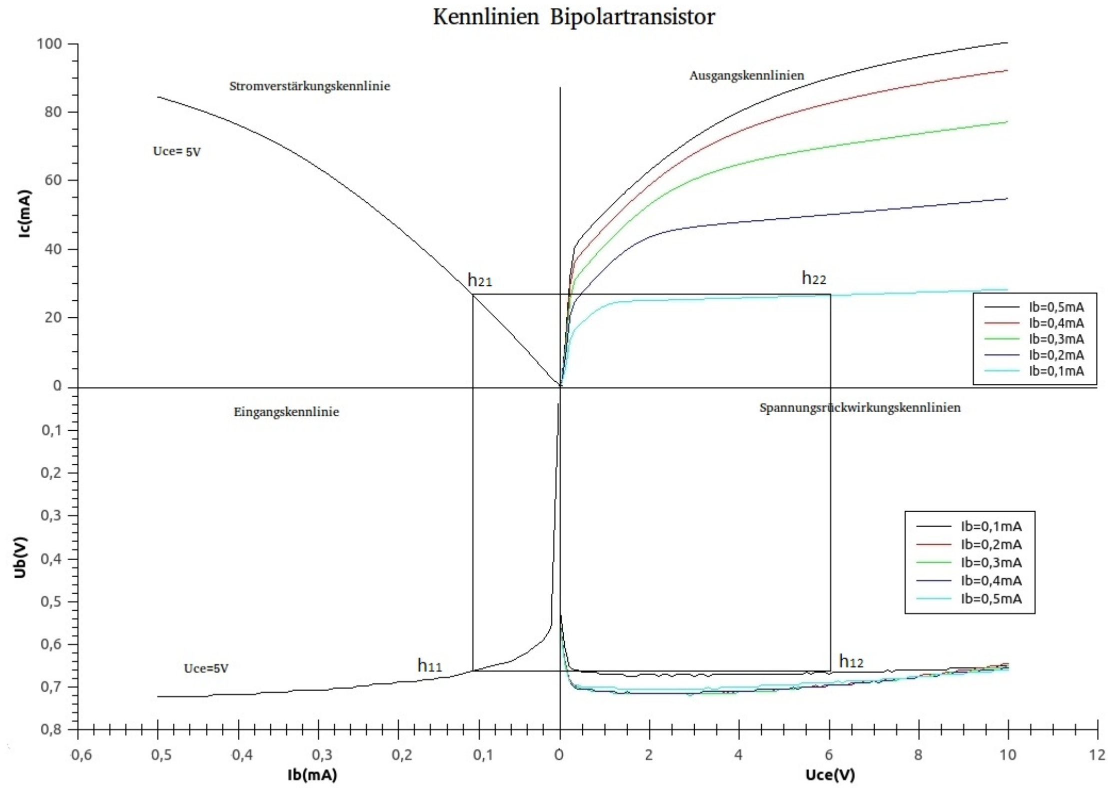
$$h_{11} = U_1/\ I_1 \tag{9}$$

$$h_{12} = U_1/U_2 \tag{10}$$

$$h_{21} = I_2/I_1 \tag{11}$$

$$h_{22} = I_2/U_2 \tag{12}$$

Allerdings gilt das für lineare elektrische Bauteile. Da der Bipolartransistor nicht linear ist, legt man einen Arbeitspunkt fest und betrachtet die Steigungen an dessen Stellen. Folgende Kennlinien wurden für den Bipolartransistor gemessen:



Vierquadreantenkennlinienfeld zur Bestimmung der Vierpolparameter h_{11}, h_{21}, h_{12} und h_{22} mit U_{CE}=6V und I_B=0,10mA als Arbeitspunkt.
An den Punkten h_{11}, h_{21}, h_{12} und h_{22} wurden Geraden von der Form $y_{ij}(x)=A_{ij}*x+B$ angefittet. Die Steigungen A_{ij} entsprechen den Vierpolparametern. So ergeben sich die Parameter:

$$h_{11} = \Delta U_b/\Delta I_b = 0,48909V/mA = 489,09\Omega \tag{13}$$

$$h_{12} = \Delta U_b/\Delta U_{ce} = 2,22 * 10^{-3} \tag{14}$$

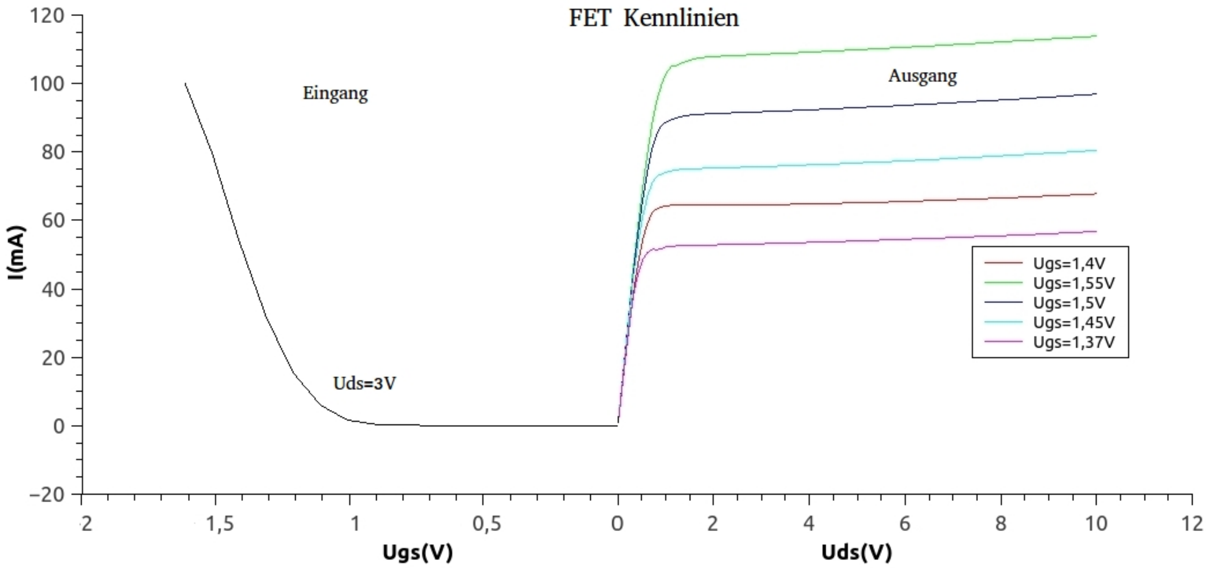
$$h_{21} = \Delta I_c/\Delta I_b = 231,79 \tag{15}$$

$$h_{22} = \Delta I_c/\Delta U_{ce} = 0,38mA/V = 3,8 * 10^{-4}/\Omega \tag{16}$$

Damit ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} U_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 489,09\Omega & 2,22 * 10^{-3} \\ 231,79 & 3,8 * 10^{-4}/\Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_b \\ U_{ce} \end{pmatrix} \tag{17}$$

3.3 Feldeffekttransistor



Bei der Eingangskennlinie des untersuchten Transistors ist die Drain-Source-Stromstärke I bei einer Drain-Source-Spannung U_{DS}=3V gegen die Gate-Source-Spannung U_{gs} aufgetragen. Bei der Ausgangskennlinie ist die Drain-Source-Stromstärke I bei unterschiedlichen Gate-Source-Spannungen U_{gs} gegen die Drain-Source-Spannung U_{ds} aufgetragen.

Es handelt sich bei der Messung um einen MOSFET (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor). Dies erkennt man daran, dass bei der Gatespannung U_{gs}=0 kein Strom fließt.

3.4 Solarzellen

Die Kennlinie einer idealen Solarzelle wird beschrieben durch:

$$I = I_S(exp(eU/nk_BT) - 1) - I_K \tag{18}$$

Mit:

- U Die Spannung zwischen Anode und Kathode
- I_D Der Strom durch die Diode
- I_S Sättigungsstrom
- $n = 1.....2$ Idealitätsfaktor
- I_K Erzeugter Strom durch Lichteinstrahung

Der Kurzschlussstrom I_{SC} der Solarzelle ist der Strom, der fließt, wenn keine Spannung anliegt, also $U = 0$. Daraus folgt:

$$I_{SC} = -I_K \tag{19}$$

Die Leerlaufspannung V_{OC} ist die Spannung, wenn $I = 0$ ist. Es ergibt sich für V_{OC}:

$$V_{OC} = (nk_BT/e)ln(I_K/T_S + 1) \approx (k_BT/e)ln(I_K/I_S) \tag{20}$$

Der Füllfaktor FF ist ein Maßfür die Güte einer Solarzelle. Es gilt:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC}U_{OC}} = \frac{I_{MPP}U_{MPP}}{I_{SC}U_{OC}} \tag{21}$$

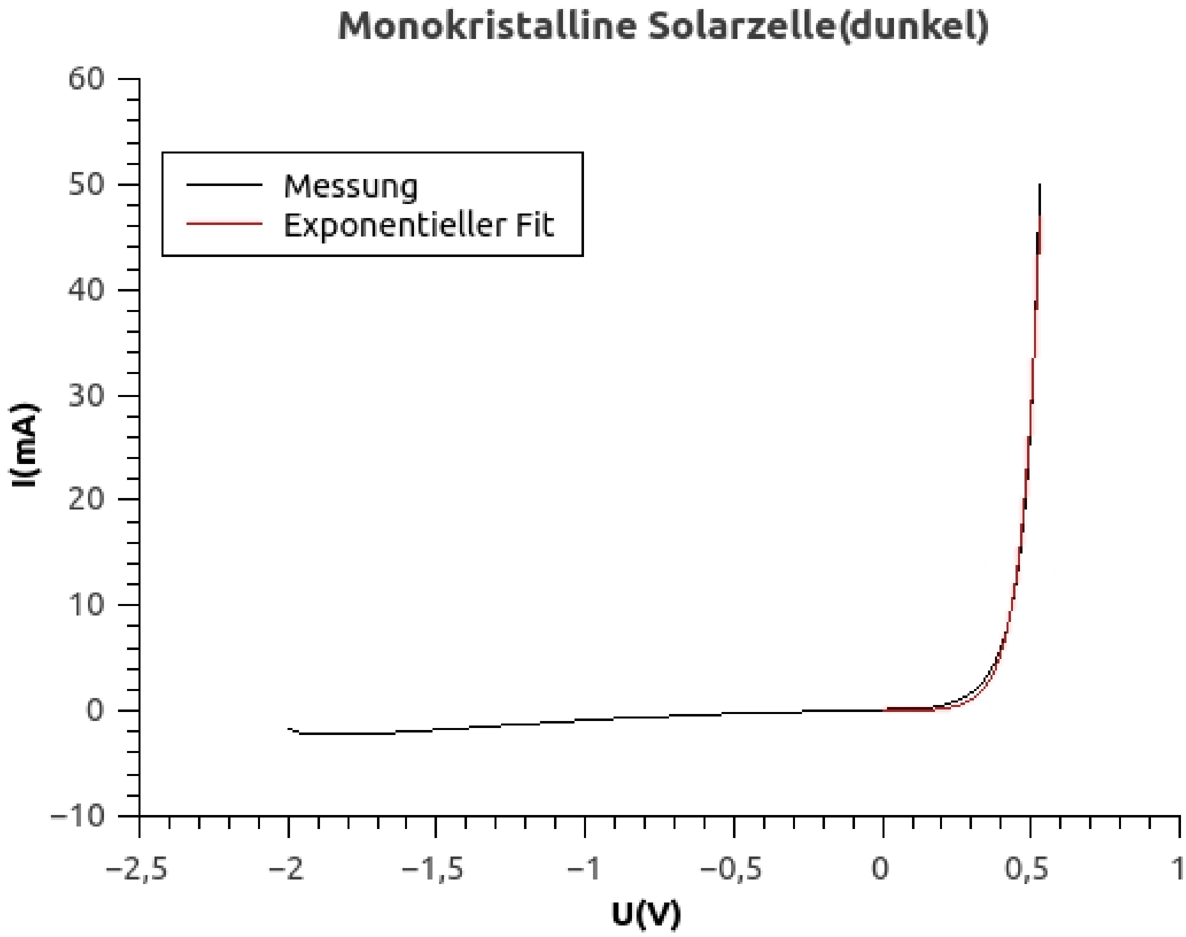
Der Wirkungsgrad η ist definiert durch das Verhältnis von P_{MPP} und der Eingangsleistung des Lichtes P_{Ein}:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}} \tag{22}$$

3.4.1 Dunkelkennlinie

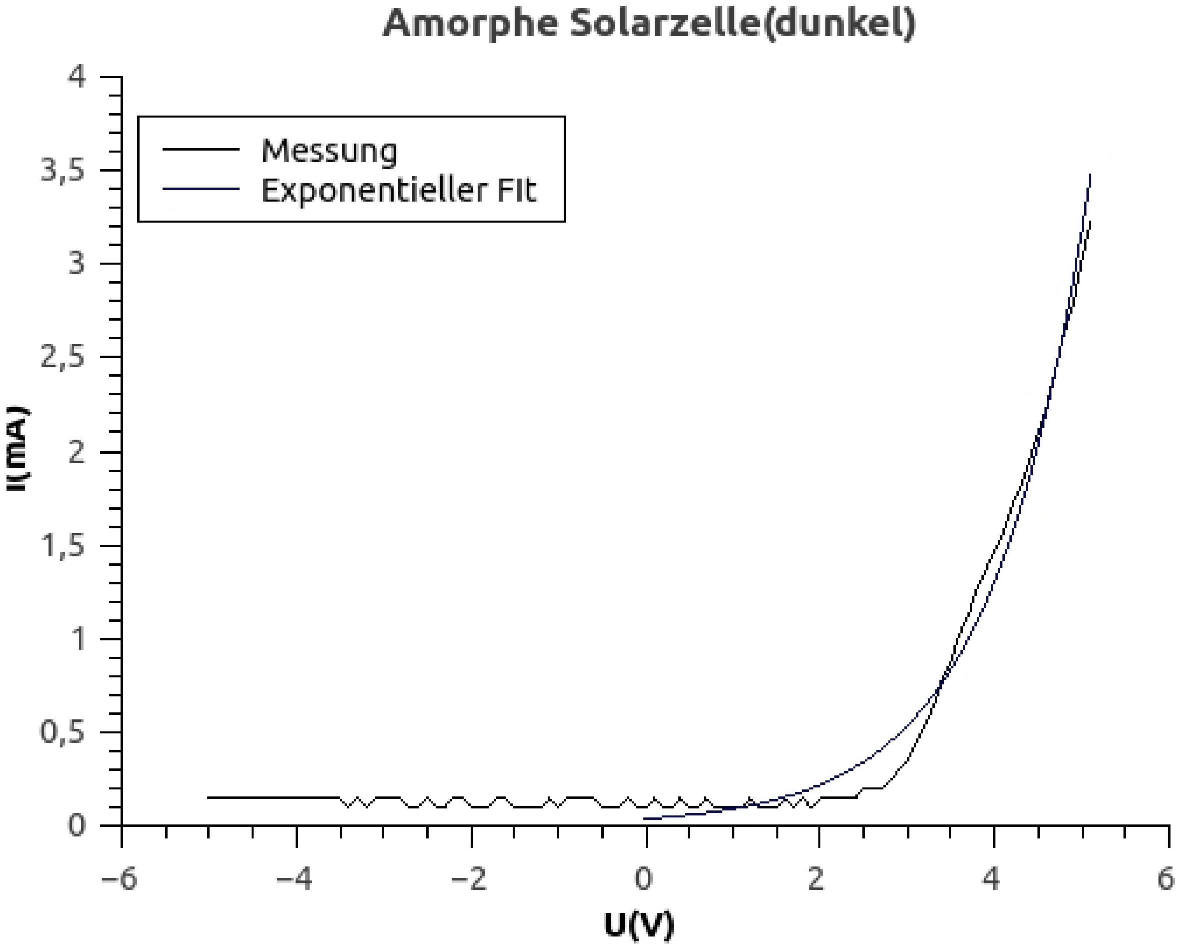
Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle entspricht näherungsweise einer Diodenkennlinie. Aus dieser lassen sich, wie bereits bei der Diode, der Sättigungsstrom und der Idealitätsfaktor bestimmen.

Monokristalline Solarzelle



Wertet man die Messungen aus, kommt man auf einen Sättigungsstrom von I_S=7,98mikro A und auf einen Idealitätsfaktor von n=2,40.

Amorphe Solarzelle



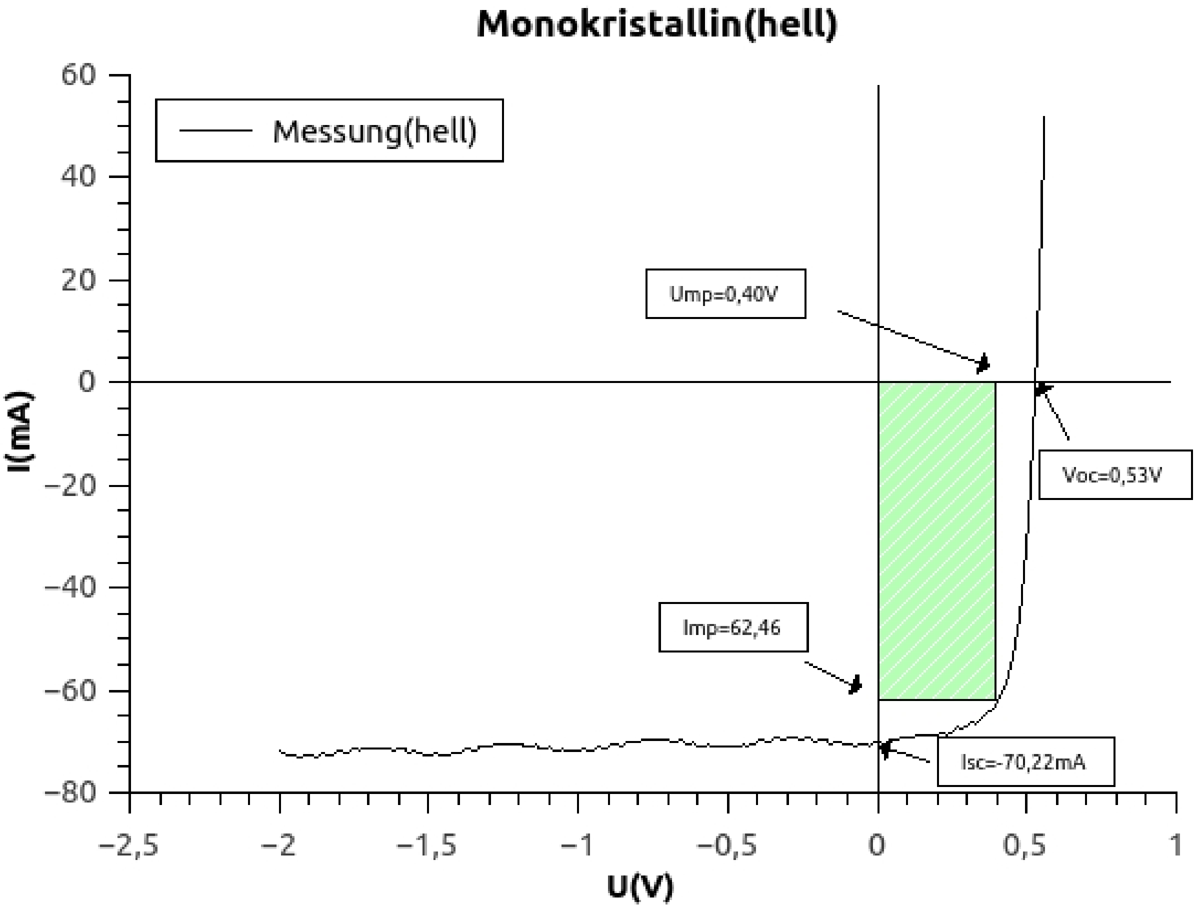
Man kommt auf einen Sättigungsstrom von 36,71 mikroA und einen Idealtiätsfaktor von n=44,07.

Der Idealitätsfaktor einer monokristallinen Solarzelle ist im Vergleich zu einer amorphen Solarzelle viel kleiner. Amorphe Zellen haben im Gegensatz zu idealen Zellen eine stark assymetrische Raumladungszone und parisitäre Verunreinigungen, die diesen hohen Idealitätsfaktor erklären.

3.4.2 Hellkennlinie

Anhand der Hellkennlinie lassen sich der Kurzschlussstrom I_{SC}, die Leerlaufspannung U_{OC}, der Maximum Power Point und daraus der Füllfaktor FF und der Wirkungsgrad η bestimmen. Der Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung entsprechen den Schnittpunkten mit der X- und Y-Achse. Der Maximum Power Point, abgekürzt MPP, ist der Punkt einer Solarzelle, an dem diese die maximale Leistung bringt.

Monokristalline Solarzelle



Man kann eine Leerlaufspannung von $U_{OC} = 0,53V$ und einen Kurzschlussstrom von $I_{SC} = 70,22mA$ ablesen.
Um die beiden Solarzellen zu vergleichen wird außerdem der Kurzschlussstrom pro Fläche bestimmt.

$$\frac{I_{SC}}{A} = \frac{70,22mA}{1/4 * (5,3cm)^2 * \pi} = 31,83A/m \tag{23}$$

Der Maximum Power Point ist erreicht, wenn I_{mp}=62,46mA und $U_{mp} = 0,40V$.
Setzt man dies nun in die ermittelten Werte in die Formel 17 für den Füllfaktor FF ein, kommt man auf:

$$FF = \frac{62,46mA * 0,40V}{70,22mA * 0,53V} = 0,67 \tag{24}$$

Der errechnete Füllfaktor liegt etwas niedriger als die üblichen Füllfaktoren monokristalliner Solarzellen (0,75V - 0,85V).
Um den Wirkungsgrad η zu berechnen benötigt man die Leistung des einfallenden Lichtes.

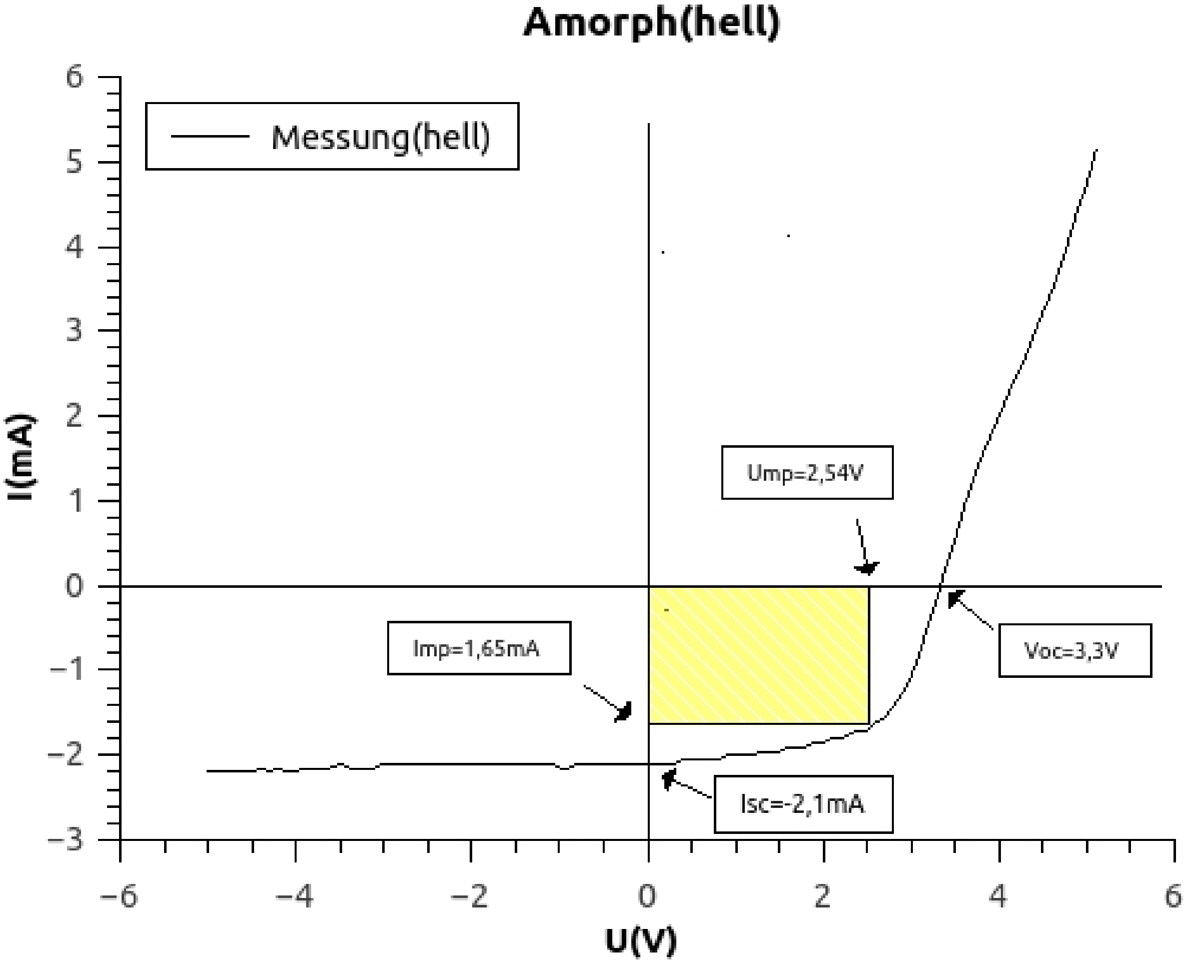
$$P_{Ein} = \frac{P_{Lampe}}{2\pi r^2} * A = \frac{100W}{\pi * (29,5cm)^2 * 2} * 1/4 * \pi * (5,3cm)^2 = 0,40W \tag{25}$$

Damit kommt man nun auf einen Wirkungsgrad von:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}} = 6,25Prozent \tag{26}$$

Der Wirkungsgrad ist viel geringer als es normalerweise bei einer monokristallinen Solarzelle üblich ist (16-22Prozent). Dies kann zum einen an dem bereits zu niedrigen Füllfaktor liegen und zum anderen daran, dass das Licht der Lampe nicht die für die Solarzelle optimale Wellenlänge und somit Energie hat.

Amorphe Solarzelle



Diesmal kann man einen Kurzschlussstrom von I_{SC}=2,1mA und eine Leerlaufspannung von $V_{OC} = 3,3V$ ablesen. Der Kurzschlussstrom pro Fläche entspricht:

$$\frac{I_{SC}}{A} = \frac{2,1mA}{2,3cm * 3,3cm} = 2,77A/m \tag{27}$$

Dieser ist im Vergleich zum monokristallinen Kurzschlussstrom pro Fläche um den Faktor 10 kleiner. Der Maximum Power Point ist erreicht bei: $I_{mp} = 1,65mA$ und $U_{mp} = 2,54V$.
Dies ergibt einen Füllfaktor von:

$$FF = \frac{1,65mA * 2,54V}{2,1mA * 3,3V} = 0,60 \tag{28}$$

Das Ergebnis liegt in dem Bereich, den man bei amorphen Zellen erwartet (0,5 bis 0,7).

Die bei der amorphen Solarzelle einfallende Lichtleistung entspricht:

$$P_{Ein} = \frac{P_{Lampe}}{2\pi r^2} * A = \frac{100W}{\pi * 2 * (29,5cm)^2} * 2,3cm * 3,3cm = 0,14W \tag{29}$$

Dadurch kommt man auf einen Wirkungsgrad von:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Ein}} = 2,99\% \tag{30}$$

Auch hier ist der Wirkungsgrad deutlich kleiner als es zu erwarten war. Dies ist vermutlich wieder darauf zurück zu führen, dass die Lampe nicht die optimalen Energien emittiert.

4 Fehlerrechnung

4.1 Diode

4.1.1 Durchbruchsspannung

Der Fehler der Durchbruchsspannung wird aus den Fehlern der linearen Fits berechnet. Mit Δa_0=15,055 und Δa_1=3,73669

$$\begin{aligned}\Delta U(V) &= \sqrt{(\frac{\partial U(V)}{\partial a_1} * \Delta a_1)^2 + (\frac{\partial U(V)}{\partial a_0} * \Delta a_0)^2} = 0,085V \\ U(V) &= (-3,77 \pm 0,09)V\end{aligned} \tag{31}$$

4.1.2 Sättigungsstrom und Idealitätsfaktor

Der Fehler des Sättigungsstroms ist der Fehler der Fits der Diodengleichung

$$\begin{aligned}\Delta I_S &= \Delta A = 1,379 * 10^{-6} mA \\ I_S &= (3,145 \pm 1,379) * 10^{-6} mA\end{aligned} \tag{32}$$

Aus dem Fehler des Faktors t (Δt=1,28*10^{-3}) im Fit der Diodengleichung lässt sich der Fehler des Idealitätsfaktors berechnen.

$$\begin{aligned}\Delta n &= \frac{e}{k_b T} \Delta t = 0,05 \\ n &= 1,95 \pm 0,05\end{aligned} \tag{33}$$

4.2 Bipolartransistor

Der Fehler der Vierpolparameter entspricht dem Fehler der Steigung aus den Fitts A_{ij}:

$$\begin{aligned}\Delta h_{11} &= 19,39\Omega \\ h_{11} &= (489,09 \pm 19,39)\Omega \\ \Delta h_{12} &= 1,28 * 10^{-3} \\ h_{12} &= (2,22 \pm 1,28) * 10^{-3} \\ \Delta h_{21} &= 2,17 \\ h_{21} &= 231,79 \pm 2,17 \\ \Delta h_{22} &= 6,86 * 10^{-3}/\Omega \\ h_{22} &= (0,38 \pm 6,86 * 10^{-3})/\Omega\end{aligned} \tag{34}$$

4.3 Feldeffekttransistor

Keine Fehlerrechnung notwendig!

4.4 Solarzellen

4.4.1 Sättigungsstrom und Idealitätsfaktor

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

$$\begin{aligned}\Delta I_{S_{mono}} &= 1,31\mu A \\ I_{S_{mono}} &= (7,98 \pm 1,31)\mu A \\ \Delta n_{mono} &= 0,05 \\ n_{mono} &= 2,40 \pm 0,05 \\ \Delta I_{S_{amph}} &= 8,21\mu A \\ I_{S_{amph}} &= (36,71 \pm 8,21)\mu A \\ \Delta n_{amph} &= 2,13 \\ n_{amph} &= 44,07 \pm 2,13\end{aligned} \tag{35}$$

4.4.2 Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom, Füllfaktor und Wirkungsgrad

Da die Leerlaufspannung, der Kurzschlussstrom und der Füllfaktor sich direkt aus den Diagrammen ergeben haben wir für sie keine Fehlerrechnung durchgeführt.
Der Fehler für den Wirkungsgrad kann durch Fehlerfortpflanzung berechnet werden. Die einzigen Größen, die nicht vorgegeben waren sind die Flächen der Solarzellen und der Abstand der Lichtquelle zur Solarzelle.

$$\Delta\eta = \frac{\partial\eta}{\partial r} * \Delta r + \frac{\partial\eta}{\partial A} * \Delta A \tag{36}$$

mit: Δr=0,5cm, ΔA_{amorph}=2,3cm *0,05cm + 3,3cm*0,05cm=0,28cm^2 und ΔA_{mono}=1/2*π*5,3cm*0,05cm=0,42cm^2.
Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned}
\Delta\eta_{mono} &= \frac{P_{MPP} * 4\pi r}{P_{Lampe} A}\Delta r + \frac{P_{MPP} * 2\pi r^2}{P_{Lampe} A^2}\Delta A = 0,327\% \\
\eta_{mono} &= 6,25\% \pm 0,327\% \\
\Delta\eta_{amorph} &= \frac{P_{MPP} * 4\pi r}{P_{Lampe} A}\Delta r + \frac{P_{MPP} * 2\pi r^2}{P_{Lampe} A^2}\Delta A = 0,214\% \\
\eta_{amorph} &= 2,99\% \pm 0,214\%
\end{aligned} \tag{37}$$