

VERSUCHSBERICHT ZU

MP1 - EIGENSCHAFTEN DER  
SOLARZELLE

Gruppe BA-C-04

Alexander Neuwirth (E-Mail: a\_neuw01@wwu.de)  
Leonhard Segger (E-Mail: l\_segg03@uni-muenster.de)

durchgeführt am 21.01.2019  
betreut von  
Finn Kutschmann

10. Februar 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Halbleiter . . . . .	3
2.2	Solarzelle . . . . .	3
2.2.1	Vierspitzenmethode . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Methoden</b>	<b>4</b>
3.1	Solarzellen . . . . .	4
3.2	Dotierstoffe . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>4</b>
4.1	Dotierstoffe . . . . .	4
4.1.1	Unsicherheiten . . . . .	4
4.1.2	Beobachtung und Datenanalyse . . . . .	4
4.1.3	Diskussion . . . . .	6
4.2	Solarzelle . . . . .	6
4.2.1	Unsicherheiten . . . . .	6
4.2.2	Beobachtung und Datenanalyse . . . . .	6
4.2.3	Diskussion . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>9</b>
6.1	Solarzelle . . . . .	9

# 1 Kurzfassung

Es wird erwartet, dass die Angaben auf dem den Proben beiliegenden Zettel bezüglich des Vorhandenseins einer Dotierung bestätigt werden können. Nicht möglich war es die Art der Dotierung zu bestimmen, da diese Funktion des Vierspitzenmessgeräts nicht mehr funktionierte.

## 2 Theorie

### 2.1 Halbleiter

Um die Solarzelle verstehen zu können, muss man zunächst dotierte Halbleiter und die Diode verstehen. Halbleiter zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu Leitern eine Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband besitzen, welche gleichzeitig im Vergleich zu Isolatoren sehr gering ist. Im folgenden werden elementare Halbleiter der vierten Hauptgruppe betrachtet, aber die Erklärungen lassen sich auch auf andere Halbleiter ausweiten. Andere Halbleiter sind beispielsweise aus Elementen der dritten und fünften Hauptgruppe zusammengesetzt. Das prominenteste Beispiel hierfür ist Galliumarsenid.

Bei Raumtemperatur befinden sich in Halbleitern nur wenige Ladungsträger im Leitungsband, weshalb der spezifische Widerstand groß ist. Wenn nun Elemente aus der fünften Hauptgruppe in das Gitter eingebracht werden, nennt man das n-Dotierung, da die eingebrachten Elemente ein Elektron zu viel in der äußeren Schale haben, um sich optimal in das Gitter einfügen zu können. Das führt dazu, dass dieses Elektron nicht fest am Atomrumpf sitzt, sondern durch thermische Anregung leicht ins Leitungsband befördert werden kann und somit der spezifische Widerstand sinkt.

### 2.2 Solarzelle

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{eU}{nk_B T} \right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (1)$$

#### 2.2.1 Vierspitzenmethode

Die Vierspitzenmethode ermöglicht die Messung des Flächenwiderstands in einer dünnen Probe. Dazu werden vier Spitzen, die sich unter gleichem Abstand in einer Linie befinden, auf die Probenoberfläche gedrückt. Über die äußeren beiden lässt das Gerät dann einen bekannten Strom fließen und misst die Potenzialdifferenz zwischen den mittleren beiden. Die Vierspitzenmethode basiert auf dem Prinzip der Vierleitermessung nach Thomson und Kelvin, die es erlaubt den untersuchten Widerstand unabhängig vom Anschlusswiderstand (hier dem Übergangswiderstand Spitze zu Probe) zu bestimmen.

## 3 Methoden

### 3.1 Solarzellen

Da der vorliegende Versuchsaufbau fehlerhaft war und es nicht möglich war die Messungen zur Solarzelle durchzuführen, wird hier nur das grundsätzliche Vorgehen beschrieben.

Es sollen für eine Tandemsolarzelle und eine Solarzelle aus polykristallinem Silizium I-U-Kennlinien aufgenommen werden. Dies wird ohne Beleuchtung der Solarzellen, bei vollständigem Sonnenspektrum und bei einem AM-gefilterten Sonnenspektrum bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Dazu wird an die Zellen eine Spannung angelegt, die schrittweise erhöht wird. Bei Beleuchtung könnte auch der Lastwiderstand variiert werden, um die I-U-Kennlinie aufzunehmen. Dies würde jedoch das Messen negativer Spannungen unmöglich machen, die so in die Fit-Funktion mit einbezogen werden können.

### 3.2 Dotierstoffe

Es wird ein Gerät verwendet, dass die Vierspitzenmethode verwendet, um den spezifischen Widerstand der zu untersuchenden Halbleiter zu bestimmen. Dazu werden jeweils zehn Messungen des Oberflächenwiderstands durchgeführt und dann fünf mal mit einem digitalen Mikrometer die Dicke der Probe gemessen, um wissen zu können, ob ein Korrekturfaktor bei der Bestimmung des Widerstands nötig ist. Untersucht werden unterschiedlich dotierte Silizium- und Germaniumproben. Den Proben liegt ein Zettel bei, der angibt, ob sie p- oder n-dotiert oder intrinsisch sind.

Zusätzlich wird eine Silizium-Scheibe untersucht, die vollständig mit Phosphor dotiert und dann von beiden Seiten mit Gallium dotiert wurde. Dadurch ergibt sich eine tiefenabhängige Dotierung, die untersucht werden soll, indem schrittweise Schichten abgetragen werden und jeweils wie oben die Dicke und der Flächenwiderstand gemessen.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Dotierstoffe

#### 4.1.1 Unsicherheiten

#### 4.1.2 Beobachtung und Datenanalyse

##### Dotierungskonzentrationen

Mit der Vierspitzenmethode wurde der Widerstand  $R = U/I$  gemessen. Daraus lässt sich dann mittels der Scheibendicke  $d$  für dünne Scheiben ( $d/s < 0.5$ ,  $s = 1,59$  mm Messspitzenabstand):

$$\rho = \frac{Rd\pi}{\ln 2} \cdot F(d/s) \quad (2)$$

$$u(\rho) = \rho \cdot \sqrt{(u(R)/R)^2 + (u(d)/d)^2} \quad (3)$$

Für die dickere Scheiben erhält man einen Korrekturfaktor  $F(d/s)$  ungleich 1 gemäß der DIN-NORM. Dieser beträgt für Probe 4  $F = 0.84$  und für Probe 5  $F = 0.83$ .

In Tabelle 1 befinden sich die gemittelten Messergebnisse.

Tabelle 1

Nr.	Mat.	dot.	Widerstand $R$ in $\Omega$	Scheibendicke $d$ in mm	spez. Widerstand $\rho$ in $\Omega\text{cm}$
1	Si	p	$50 \pm 4$	$0,4486 \pm 0,0009$	$10,1 \pm 0,7$
2	Si	n	$8,52 \pm 0,21$	$0,4532 \pm 0,0009$	$1,75 \pm 0,04$
3	Si	n	$0,0713 \pm 0,0018$	$0,0677 \pm 0,0010$	$0,0219 \pm 0,0005$
4	Si	p	$0,001\,92 \pm 0,000\,04$	$1,999 \pm 0,005$	$0,001\,46 \pm 0,000\,03$
5	Ge	i	$25 \pm 5$	$2,1070 \pm 0,0013$	$19,92 \pm 3,32$
6	Si	n	$0,084 \pm 0,007$	$0,6826 \pm 0,0009$	$0,0260 \pm 0,0022$

Die Ladungsträgerkonzentrationen lassen sich mittels

$$\frac{1}{\rho} = en\mu_n + ep\mu_p \quad (4)$$

bestimmen. Für kristallines Silizium bei  $T = 300\text{ K}$  gilt  $c = n \cdot p = 2,1 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-6}$  und die Beweglichkeiten sind nach Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Beweglichkeitsdaten für Silizium und Germanium bei  $T = 300\text{ K}$ .

	$\mu_n$ in $\text{cm}^2/\text{V/s}$	$\mu_p$ in $\text{cm}^2/\text{V/s}$
Si	1350	480
Ge	3900	1900

Es ergibt sich:

$$n = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2e\mu_n\rho}\right)^2 - c\mu_p/\mu_n} + \frac{1}{2e\mu_n\rho} \quad (5)$$

bzw.

$$p = \frac{c}{n} = \mp \sqrt{\left(\frac{1}{2e\mu_p\rho}\right)^2 - c\mu_n/\mu_p} + \frac{1}{2e\mu_p\rho} \quad (6)$$

Aus der Anleitung sind typische Größenordnungen für n/p-Dotierungskonzentrationen gegeben, woraus folgt, dass für n-dotierte das Vorzeichen vor der Wurzel in Gleichung (5) positiv und für p-dotierte negative ist.

Für die intrinsische Ge-Probe gilt  $n_i = n = p$ . Also:

$$n_i = \frac{1}{\rho e(\mu_n + \mu_p)} \quad (7)$$

Tabelle 3: Dotierungskonzentrationen

Nr.	n in $\text{cm}^{-3}$	p in $\text{cm}^{-3}$	DIN in $\text{cm}^{-3}$
1	$(1,63 \pm 0,12) \cdot 10^4$	$(1,29 \pm 0,09) \cdot 10^{15}$	$p = 1,33 \cdot 10^{14}$
2	$(2,64 \pm 0,07) \cdot 10^{15}$	$(7,95 \pm 0,20) \cdot 10^3$	$n = 2,77 \cdot 10^{15}$
3	$(2,11 \pm 0,05) \cdot 10^{17}$	$99,3 \pm 2,5$	$n = 1,09 \cdot 10^{18}$
4	$2,36 \pm 0,05$	$(8,90 \pm 0,20) \cdot 10^{18}$	$p = 7,68 \cdot 10^{19}$
5	$(5,5 \pm 1,0) \cdot 10^{13}$	$(5,5 \pm 1,0) \cdot 10^{13}$	
6	$(1,78 \pm 0,15) \cdot 10^{17}$	$118 \pm 10$	$n = 7,94 \cdot 10^{17}$

### 4.1.3 Diskussion

## 4.2 Solarzelle

### 4.2.1 Unsicherheiten

### 4.2.2 Beobachtung und Datenanalyse

Da keine eigenen Messungen zu den Solarzellen durchgeführt werden konnten, werden im folgenden alte Messdaten, die uns freundlicherweise von Finn Kutschmann ausgehändigt wurden, ausgewertet.

In Abb. 1 und Abb. 2 sind die aufgenommenen I-U-Kennlinien der polykristallinen Silizium Solarzelle und der Tandemzelle abgebildet.

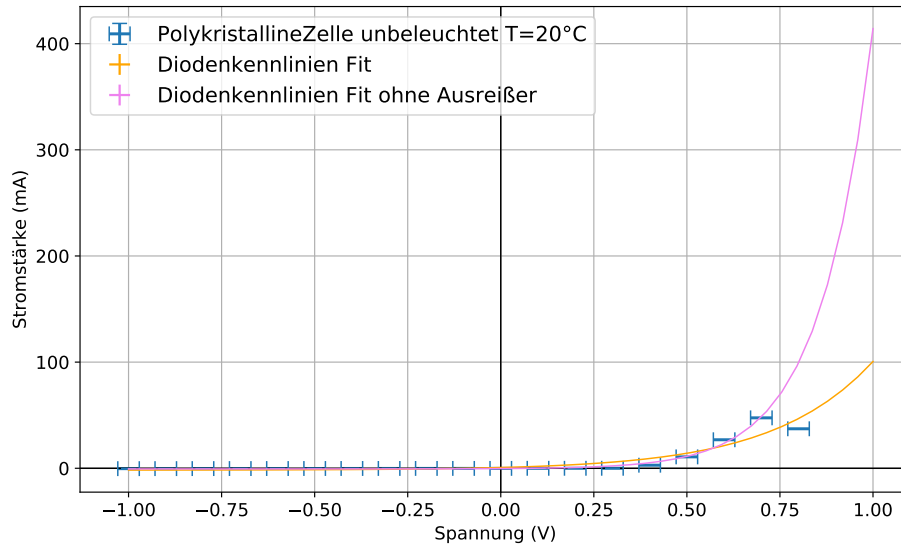


Abbildung 1: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei Raumtemperatur. Der Diodenkennlinien Fit ist deutlich schöner unter Vernachlässigung des Messwerts bei  $U = 0,8 \text{ V}$ .

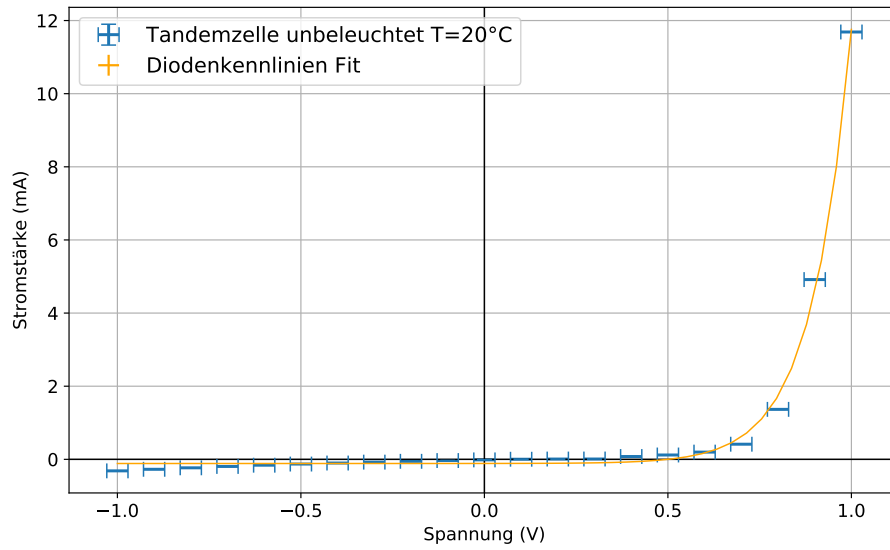


Abbildung 2: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei Raumtemperatur.

Die Fitfunktion ist die ideale Diodenkennlinie unter Einstrahlung von Licht Gleichung (1).

Abb. 3 stellt exemplarisch die I-U-Kennlinie der Solarzellen dar, wenn sie mit Licht bestrahlt werden (weitere befinden sich im Anhang). Das rote (grüne) Rechteck gibt die im 4. Quadranten durch  $U_{MPP}$  und  $I_{MPP}$  ( $U_{oc}$  und  $I_{sc}$ ) begrenzte Fläche an. Die rote Fläche entspricht der Maximalen Leistung  $P_{max} = U_{MPP}I_{MPP}$ . Der Füllfaktor  $FF$  ergibt sich als das Verhältnis der Flächen, also

$$FF = \frac{U_{mpp}I_{mpp}}{U_{oc}I_{sc}}. \quad (8)$$

Dabei konnten  $U_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$  und  $I_{sc}$  direkt aus den Messpunkten extrahiert werden.  $U_{oc}$  musste mittels des Fits interpoliert werden.

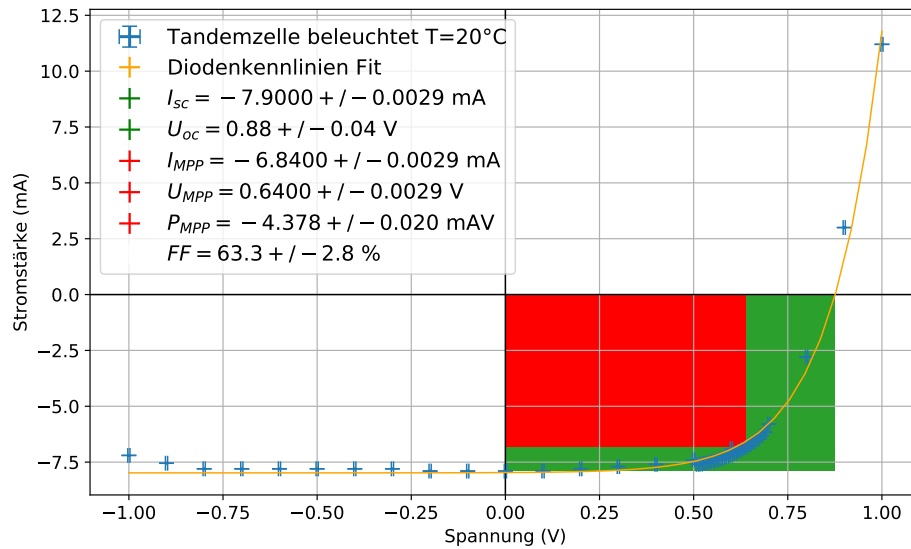


Abbildung 3: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die wichtigsten Parameter der Solarzellen die unter Variation der Temperatur bestimmt wurden aufgeführt.

Tabelle 4: Polykristalline Zelle.

	$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
$I_{sc}$ in mA	$151,0 \pm 0,3$	$149,0 \pm 0,3$	$147,0 \pm 0,3$
$U_{oc}$ in V	$0,63 \pm 0,04$	$0,61 \pm 0,04$	$0,61 \pm 0,05$
$I_{MPP}$ in mA	$108,0 \pm 0,3$	$99,0 \pm 0,3$	$96,0 \pm 0,3$
$U_{MPP}$ in V	$0,310 \pm 0,003$	$0,320 \pm 0,003$	$0,310 \pm 0,003$
$P_{MPP}$ in mW	$33,48 \pm 0,32$	$31,68 \pm 0,30$	$29,76 \pm 0,30$
$FF$ in %	$35,05 \pm 2,50$	$34,8 \pm 2,5$	$33,0 \pm 2,7$

Tabelle 5: Tandemzelle.

	$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	AM-Filter $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
$I_{sc}$ in mA	$7,90 \pm 0,03$	$5,420 \pm 0,003$	$0,940 \pm 0,003$
$U_{oc}$ in V	$0,88 \pm 0,04$	$0,776 \pm 0,032$	$0,705 \pm 0,024$
$I_{MPP}$ in mA	$6,84 \pm 0,03$	$4,240 \pm 0,003$	$0,700 \pm 0,003$
$U_{MPP}$ in V	$0,640 \pm 0,003$	$0,600 \pm 0,003$	$0,540 \pm 0,003$
$P_{MPP}$ in mW	$4,378 \pm 0,022$	$2,544 \pm 0,012$	$0,378 \pm 0,003$
$FF$ in %	$63,3 \pm 2,8$	$60,5 \pm 2,5$	$57,0 \pm 2,0$



### 4.2.3 Diskussion

Da in Gleichung (1)  $I_{ph}$  der vertikalen Verschiebung an der Ordinate entspricht, wird erwartet, dass dieser nahe Null ist, wenn die Solarzelle nicht beleuchtet wird, also in Abb. 1 und Abb. 2.

## 5 Schlussfolgerung

## 6 Anhang

### 6.1 Solarzelle

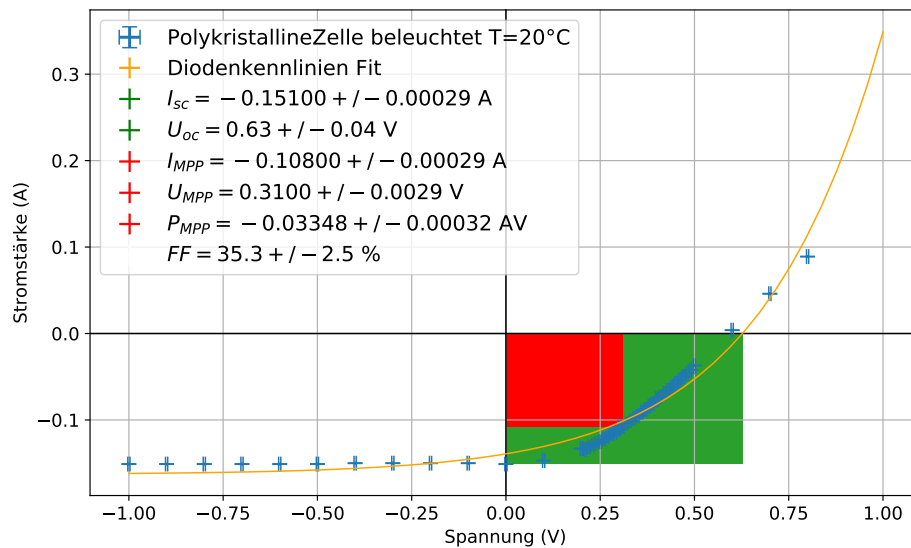


Abbildung 4: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei Raumtemperatur unter Beleuchtung.

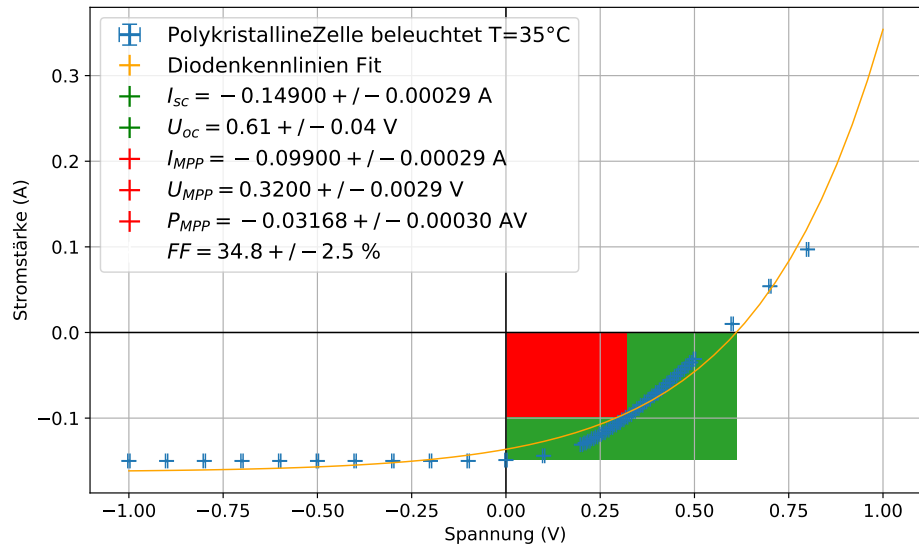


Abbildung 5: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei  $T = 35^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

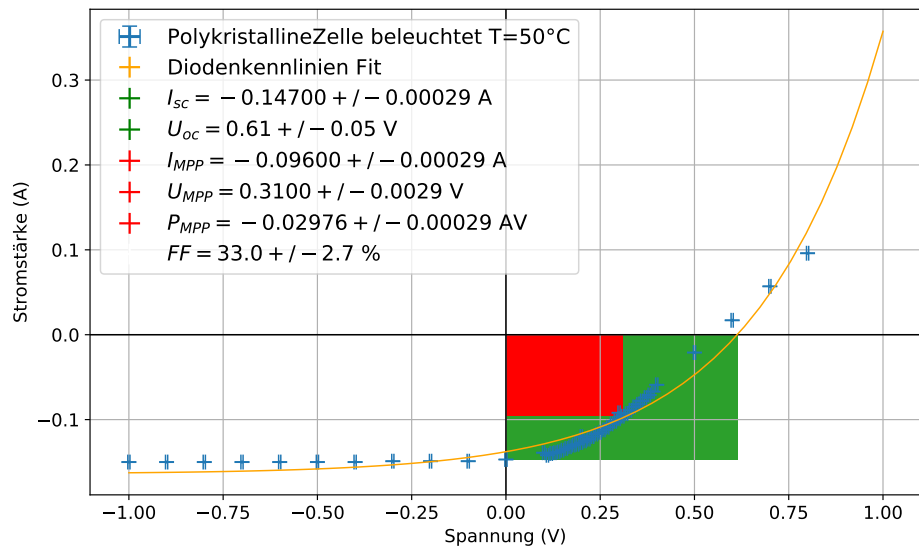


Abbildung 6: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei  $T = 50^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

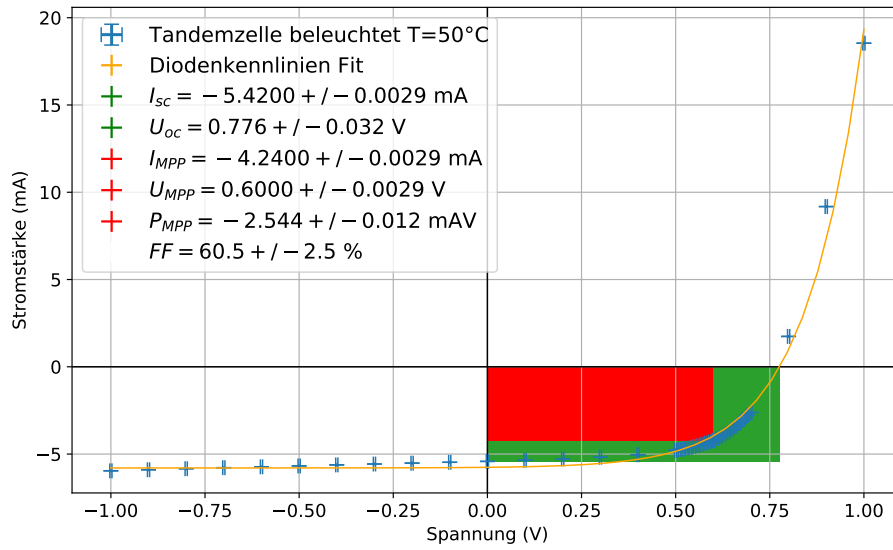


Abbildung 7: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei  $T = 50^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

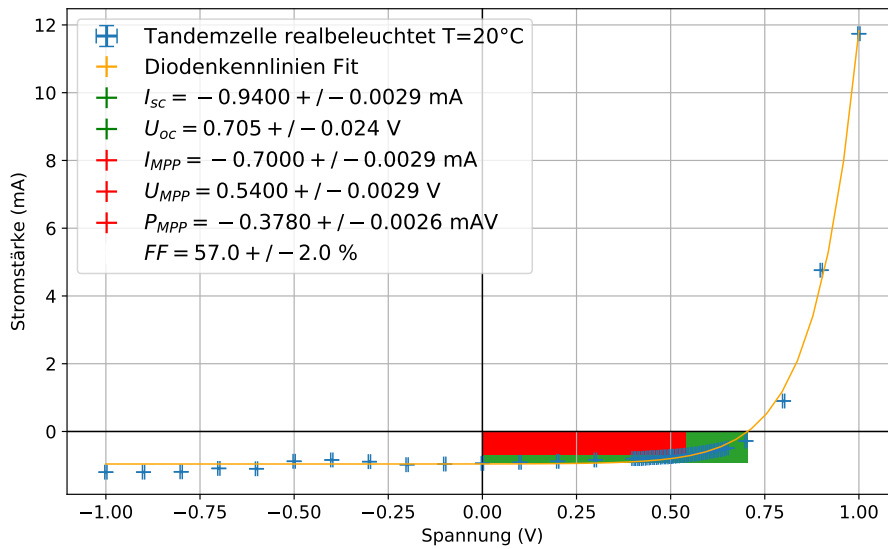


Abbildung 8: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei Raumtemperatur unter Beleuchtung durch einen AM-Filter.