

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>3</b>
3.1	Solarzellen . . . . .	3
3.2	Dotierstoffe . . . . .	3
<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 . . . . .	5
4.2	Solarzelle . . . . .	5
4.2.1	Unsicherheiten . . . . .	5
4.2.2	Beobachtung und Datenanalyse . . . . .	5
4.2.3	Diskussion . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>8</b>
6.1	Solarzelle . . . . .	8

# 1 Kurzfassung

## 2 Theorie

### 2.1 Halbleiter

### 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 Vierletermessung 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 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 hätte auch der Lastwiderstand variiert werden können, um die I-U-Kennlinie aufzunehmen. Dies hätte jedoch das Messen negativer Spannungen unmöglich gemacht, die so in die Fit-Funktion mit einbezogen werden konnten.

### 3.2 Dotierstoffe

Es wird ein Gerät verwendet, das die Vierspitzenmethode verwendet, um den Widerstand der untersuchten Halbleiter zu bestimmen.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Dotierstoffe

#### 4.1.1 Unsicherheiten

#### 4.1.2 Beobachtung und Datenanalyse

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	$0,001\,92 \pm 0,000\,04$	$1,999 \pm 0,005$	$0,001\,46 \pm 0,000\,03$
6	Si	n	$0,084 \pm 0,007$	$0,6826 \pm 0,0009$	$0,0260 \pm 0,0022$
5	Ge	i	$25 \pm 5$	$2,1070 \pm 0,0013$	$19,92 \pm 3,32$

Die Ladungsträgerkonzentrationen lassen sich mittels

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

bestimmen. Für kristallines Silizium bei Raumtemperatur gilt  $c = n \cdot p = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-6}$  und die Beweglichkeiten sind nach Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 2: Beweglichkeitsdaten für Silizium bei Raumtemperatur.

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

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.

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

Aus der sind typische Größenordnungen für n/p-Dotierungskonzentrationen gegeben, woraus folgt, dass für n dotierte das Vorzeichen der Wurzel positiv und für p dotierte negative ist.

Tabelle 3: Dotierungskonzentrationen

Nr.	n in cm <sup>-3</sup>	p in cm <sup>-3</sup>	DIN in cm <sup>-3</sup>
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	$2,36 \pm 0,05$	$(8,90 \pm 0,20) \cdot 10^{18}$	$p = 7,68 \cdot 10^{19}$
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.

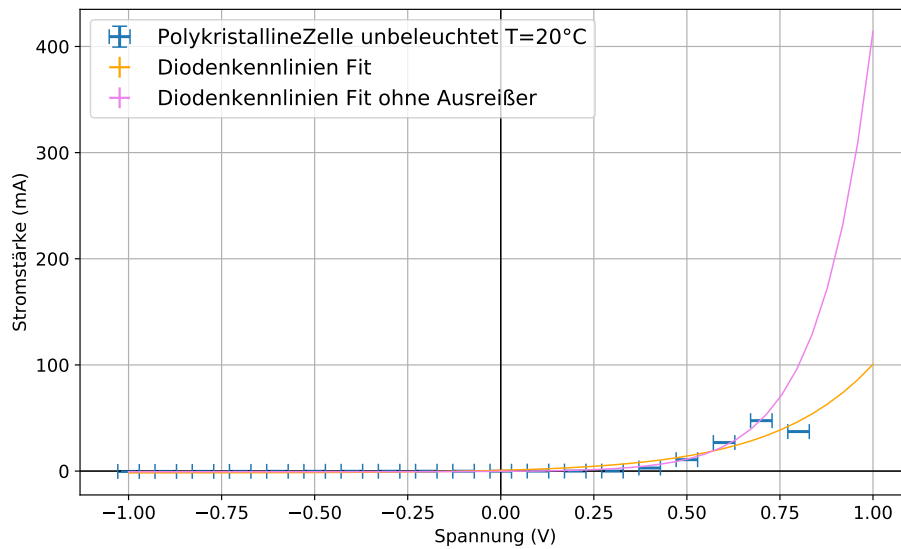


Abbildung 1: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei Raumtemperatur.

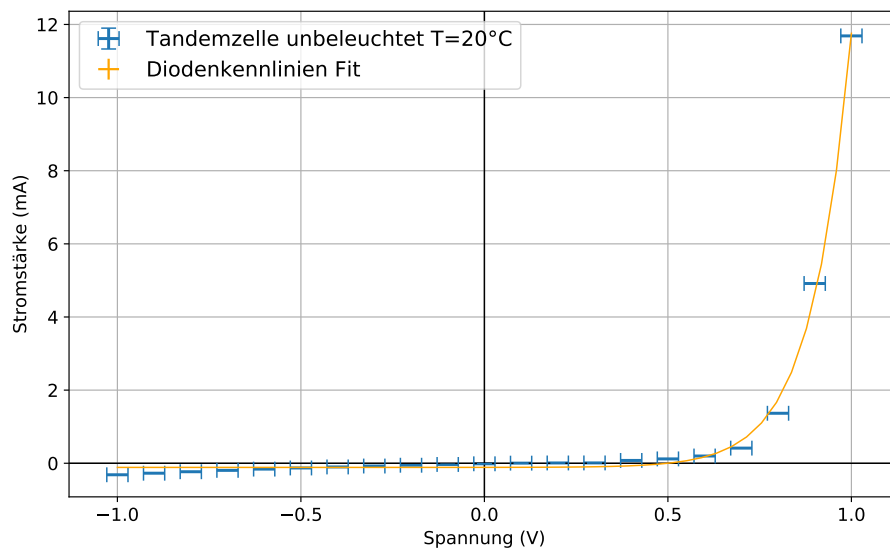


Abbildung 2: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei Raumtemperatur.

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

$$FF = \frac{U_{mpp}I_{mpp}}{U_{oc}I_{sc}}. \quad (7)$$

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

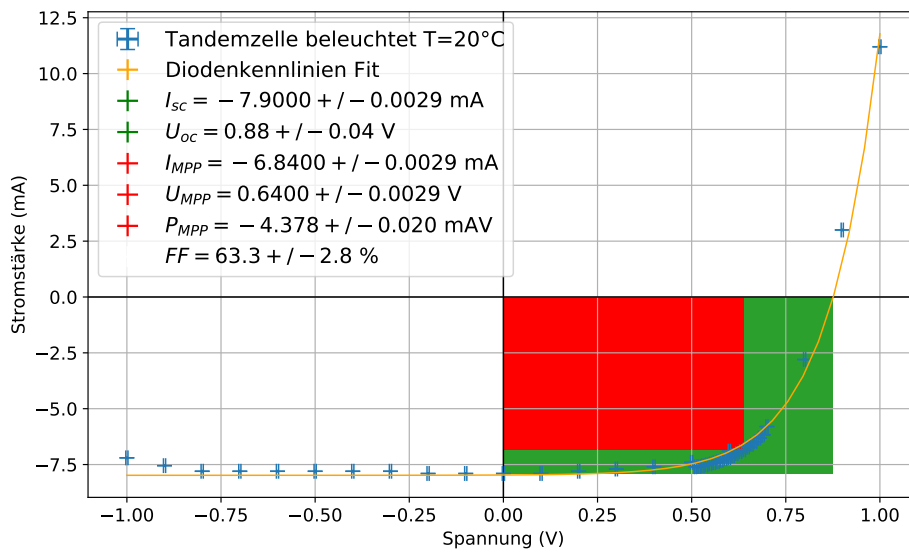


Abbildung 3: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

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 vertikale 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

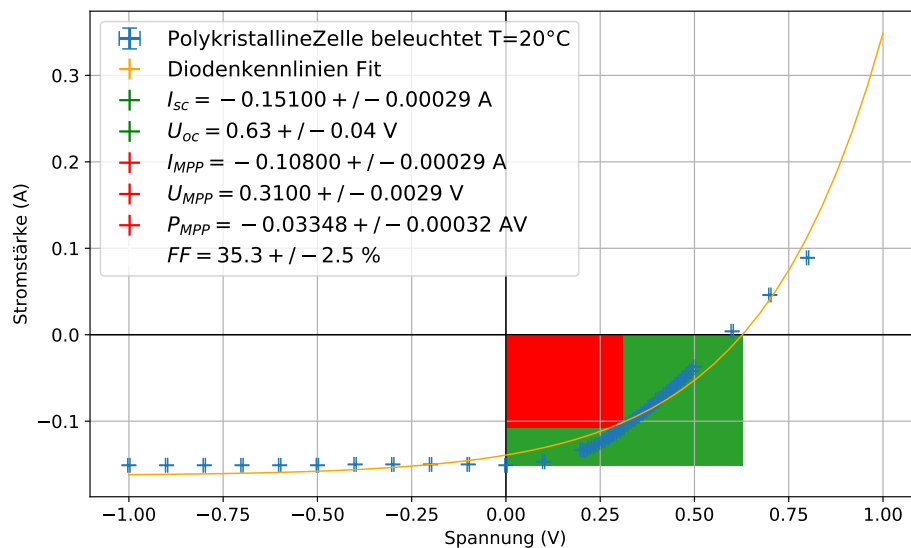


Abbildung 4: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei Raumtemperatur unter Beleuchtung.



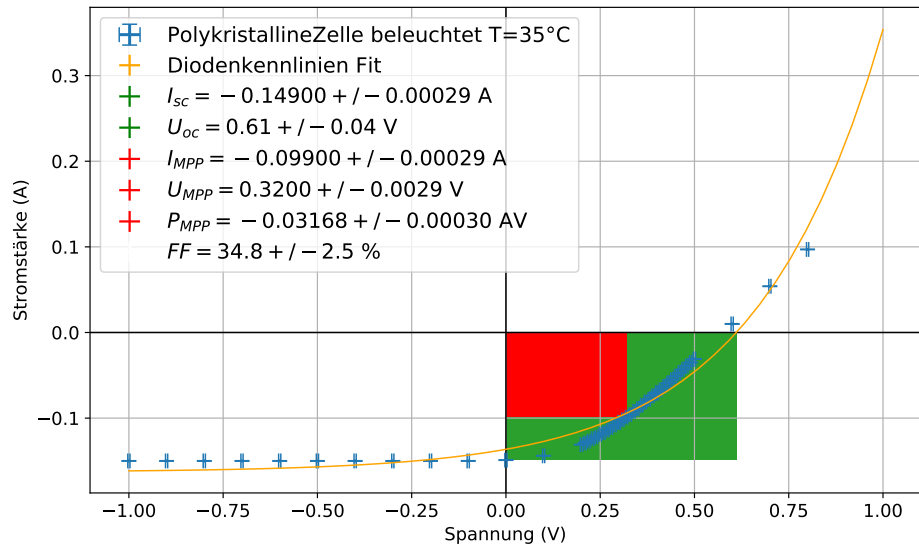


Abbildung 5: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei  $T = 35^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

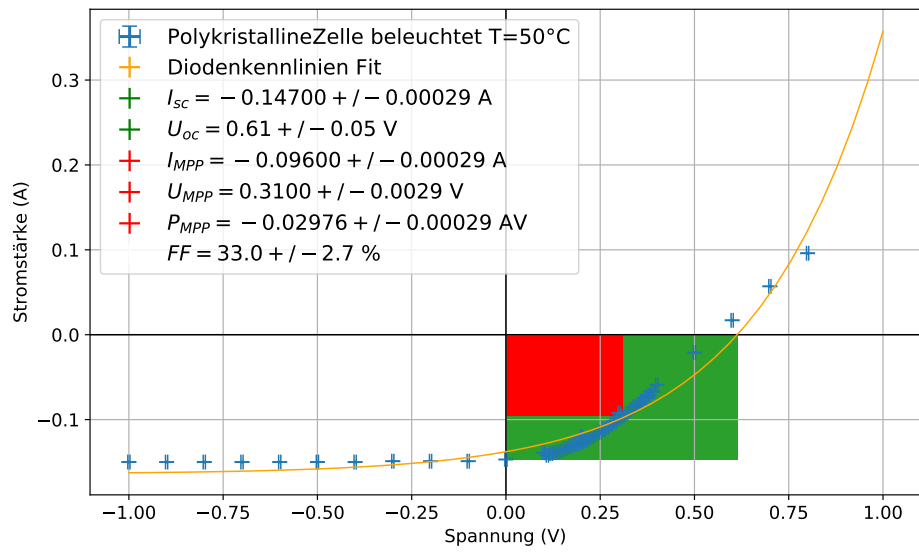


Abbildung 6: I-U-Kennlinie einer polykristallinen Silizium Solarzelle bei  $T = 50^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

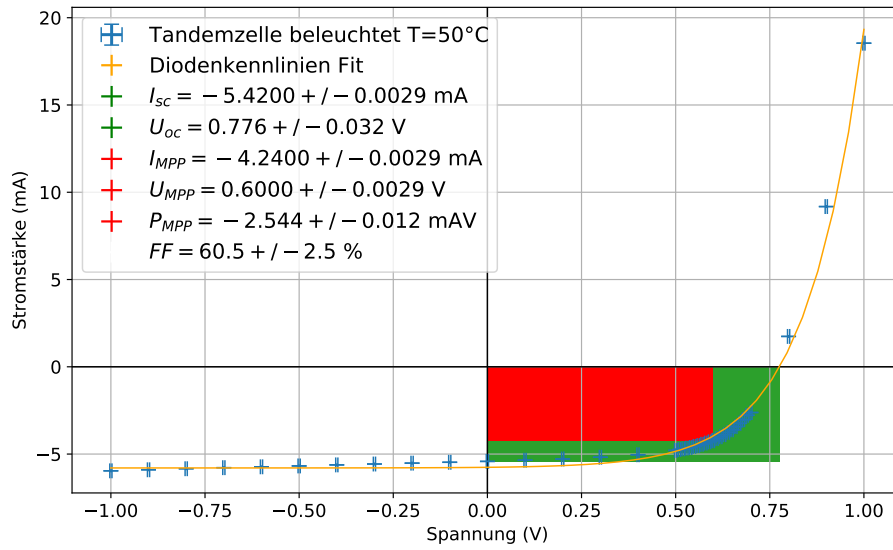


Abbildung 7: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei  $T = 50^{\circ}\text{C}$  unter Beleuchtung.

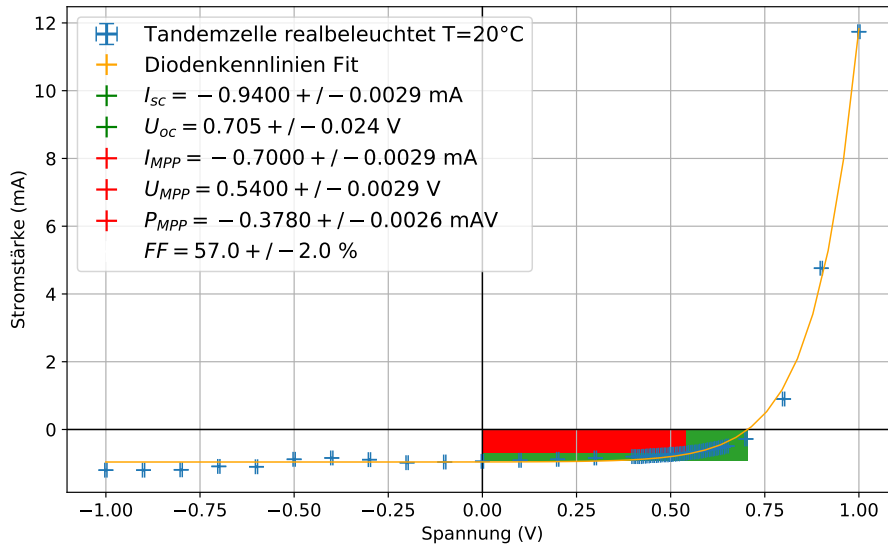


Abbildung 8: I-U-Kennlinie einer Tandemzelle bei Raumtemperatur unter Beleuchtung durch einen AM-Filter.