

## Solarzelle (SZ)

Klaus Steiniger, Alexander Wagner, Gruppe 850

klaus.steiniger@physik.tu-dresden.de, alexander.wagner@physik.tu-dresden.de

Betreuer: Hannah Ziehlke

Protokoll vom 14. Juni 2009

---

### Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                              | <b>2</b>  |
| 1.1      | Aufbau einer Solarzelle . . . . .              | 2         |
| 1.2      | Funktionsweise . . . . .                       | 2         |
| 1.3      | Ersatzschaltbild . . . . .                     | 4         |
| <b>2</b> | <b>Durchführung</b>                            | <b>5</b>  |
| 2.1      | Aufgabenstellung . . . . .                     | 5         |
| 2.2      | Das Diodenverhalten einer Solarzelle . . . . . | 5         |
| 2.3      | Versuche mit dem Solarmodul . . . . .          | 5         |
| 2.4      | Einfluss der Temperatur . . . . .              | 5         |
| <b>3</b> | <b>Auswertung</b>                              | <b>6</b>  |
| 3.1      | Diodenverhalten . . . . .                      | 6         |
| 3.2      | Versuche mit dem Solarmodul . . . . .          | 6         |
| 3.3      | Einfluss der Temperatur . . . . .              | 8         |
| 3.4      | Fehlerbetrachtung . . . . .                    | 9         |
| <b>4</b> | <b>Zusammenfassung</b>                         | <b>10</b> |

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufbau einer Solarzelle

Solarzellen sind Halbleiterdioden, in denen durch Photonbestrahlung eine Polarisierung erzeugt werden kann.

Bringt man einen n- und einen p-leitenden Halbleiter zusammen, so entsteht im Verbindungsgebiet eine Raumladungszone durch Rekombination der Löcher im p-leitenden und Elektronen im n-leitenden Gebiet. In der Raumladungszone bleiben nur die geladenen Ionen übrig. Daraus resultiert eine Spannung  $U_G$  die über der Raumladungszone abfällt. Sie ist konstant und hängt von der Ionendichte in den verwendeten Materialien ab.

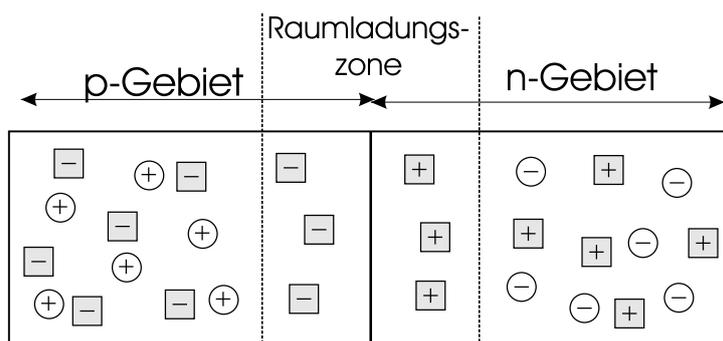


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Solarzelle

Wird nun durch Photonbestrahlung ein Elektron-Loch-Paar erzeugt und gelangt in die Raumladungszone, so wird es durch die Spannung  $U_G$  getrennt und die Ladungsträger sammeln sich an den Enden der Schichten. Daraus resultiert eine Spannung  $U_{OC}$  die über der gesamten Solarzelle abfällt. Sie ist abhängig von der Beleuchtungsintensität und von der Frequenz, denn die Ladungsträgerpaare werden durch den Photoeffekt erzeugt. Sie kann durch anschließen eines Verbrauchers nutzbar gemacht werden.

Dem entgegen wirkt ein Diffusionsstrom der durch das Ladungsdichtegefälle im Material hervorgerufen wird und mit steigender Temperatur an Intensität zunimmt.

## 1.2 Funktionsweise

Eine unbeleuchtete Solarzelle verhält sich wie eine Diode. Sie ist ausgezeichnet durch ihr Verhalten bei anlegen einer Spannung. Dioden können in einer Sperrichtung (negativer Pol an p-leitende Schicht) und in einer Durchlassrichtung (positiver Pol an p-leitende Schicht) betrieben werden. Die Sperrichtung ist dadurch Charakterisiert, dass sie in der Diode eine Polarisation hervorruft und so kein Stromfluss zustande kommen kann. Die  $U_D$ - $I_D$ -Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung wird beschrieben durch die Shockley-Gleichung

$$I_D(U) = I_S \left( e^{\frac{e(U_D - I_D \cdot R_S)}{nk_B T}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

mit  $I_S$  - Sättigungsstrom,  $e$  - Elementarladung,  $n$  - Diodenidealitätsfaktor,  $R_S$  - Serienwiderstand,  $k_B$  - Boltzmannkonstante,  $T$  - Temperatur.

Der typische Verlauf der  $U$ - $I$ -Kennlinie nach Gleichung (1.1) ist in Abbildung 2 dargestellt.

Bei konstanter Beleuchtung fällt über der Solarzelle die Photospannung  $U_{OC}$  ab, die einer angelegten Spannung  $U_D$  in Durchlassrichtung entgegen gerichtet ist. In Diagramm 3 ist dies

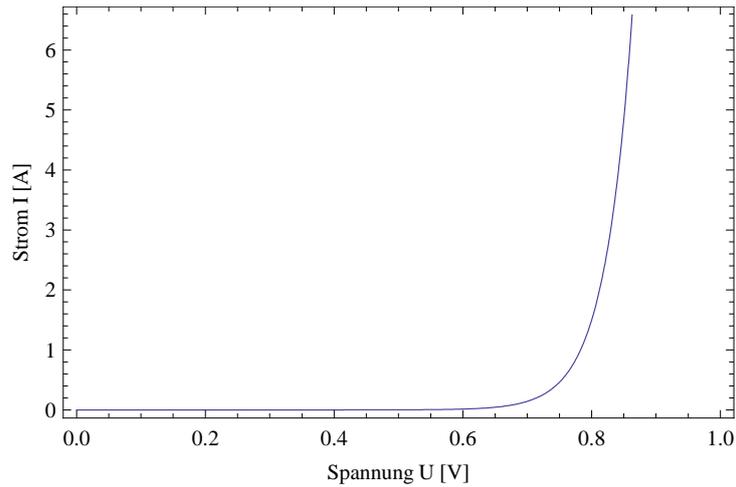


Abbildung 2: Kennlinie einer Diode, bzw einer unbeleuchteten Solarzelle.  $U_D$  entspricht der angelegten Spannung in Durchlassrichtung.  $I_D$  ist der dadurch erzeugte Strom in einem Stromkreis mit einem Widerstand  $R_S$ .

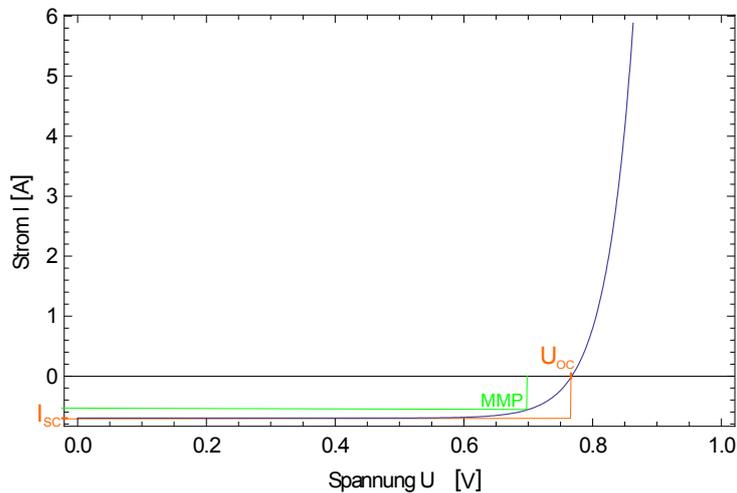


Abbildung 3: Kennlinie einer beleuchteten Diode. Der Offset entspricht dem durch die Photospannung  $U_{OC}$  erzeugten Strom  $I_{SC}$ . Außerdem ist der Maximum Power Point eingezeichnet.

gut an der Verschiebung der Kennlinie in den negativen Bereich zu erkennen. Am Maximum Power Point (MMP) ist die erbrachte Leistung der Solarzelle am größten. Ein Maß für die Güte einer Zelle ist der Füllfaktor

$$FF = \frac{P_{MMP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (1.2)$$

Er ist das Verhältnis von maximal erbrachter Leistung zu maximal möglicher Leistung (die ideale Solarzelle ist eine konstant Stromquelle). Der Wirkungsgrad  $\eta$  einer Solarzelle ist der Quotient aus erbrachter Leistung und eingestrahelter Leistung.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.3)$$

Im Bändermodell des Halbleiters, gleichen sich die Ferminiveaus der n- und p-leitenden Schicht an bei Kontakt. Das Ausbilden der Raumladungszone hat eine Krümmung der Bänder zur Fol-

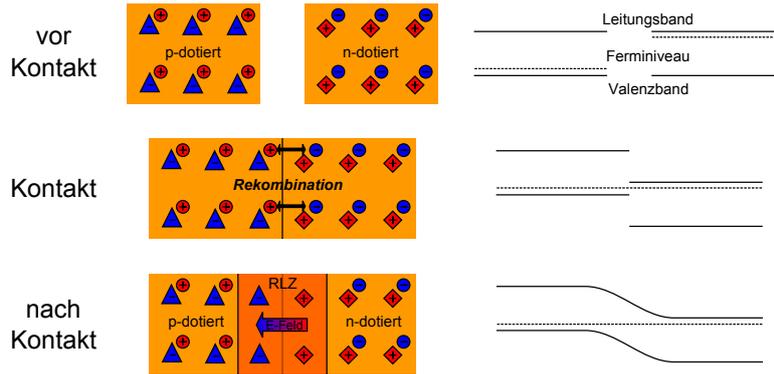


Abbildung 4: Entstehung der Raumladungszone und Veranschaulichung im Bändermodell.  
 Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/P-n-%C3%9Cbergang>

ge. Die Differenz der Stufe entspricht gerade  $e \cdot U_D$ . Ist also proportional zur Potentialdifferenz der Raumladungszone (s. Abbildung 4). Durch Lichteinfall kann die Stufe geglättet werden. Dies geschieht durch die Spannung  $U_{OC}$ , ausgelöst durch die Ladungstrennung, die der Potentialdifferenz entgegengerichtet ist. Ganz verschwinden wird die Stufe jedoch nicht, weil immer ein Diffusionsstrom der Ladungstrennung entgegen wirkt.

### 1.3 Ersatzschaltbild

Elektrotechnisch gesehen ist die Solarzelle eine ideale Stromquelle mit dem Verhalten einer Diode. Das Ersatzschaltbild einer belasteten Solarzelle ist in 5 dargestellt. Der Innenwiderstand

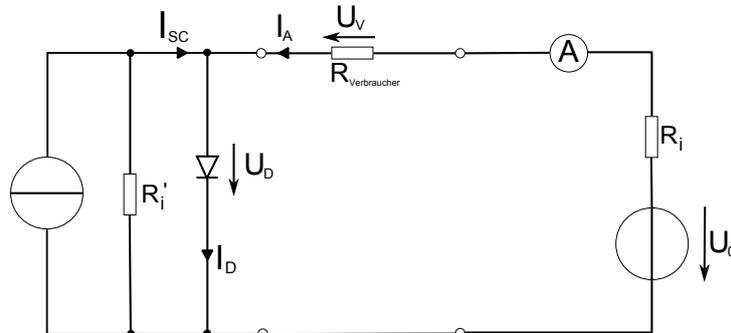


Abbildung 5: Dargestellt ist das Ersatzschaltbild einer Solarzelle mit dem Innenwiderstand  $R_i$ . Sie ist an eine Messeinrichtung mit der integrierten Spannungsquelle  $U_0$  und dem Innenwiderstand  $R_i$  angeschlossen.

der Stromquelle (Spannungsquelle) ist idealerweise Unendlich (Null). Aus den Kirchhoff'schen Gesetzen ergeben sich die Gleichungen.

$$I_D = I_A + I_{SC} \quad (1.4)$$

$$U_D = U_0 - R_V I_A \quad (1.5)$$

Für  $I_D$  gilt die Shockley Gleichung (1.1). Damit ergibt sich für den ausgehenden Strom

$$I_A = \begin{cases} -I + I_S \left( e^{\frac{e(U_0 - I_A \cdot R_V)}{nk_B T}} - 1 \right) & \text{für } U_0 - I_A \cdot R_V > 0 \\ -I & \text{sonst (entspricht } I_D = 0) \end{cases} \quad (1.6)$$

Die obere Gleichung können wir umformen um die Kennlinie für den Bereich  $U_0 < 0$  abzuschätzen. Durch bilden des Logarithmus finden wir

$$\ln(I_A + I_{SC} + I_S) = \ln(I_S) + \frac{e}{nk_B T} (U_0 - I_A \cdot R_V)$$

Im uns interessierenden Bereich ist  $I_A$  ungefähr  $-I_{SC}/2$ .  $I_S$  ist vernachlässigbar im ln. Das gesamte Argument ist also in der Größenordnung von  $\leq I_{SC}/2$ , wir können also  $\ln(I_A + I_{SC} + I_S) \approx -1$  annehmen. Für  $I_S \ll 1$  wird der ln sehr groß und ist konstant. Wir verrechnen alle weiteren Konstanten zu  $K$  und es ergibt sich für die Abhängigkeit des ausgehenden Stromes

$$I_A = \frac{U_0}{R_V} - \frac{K}{R_V} \quad (1.7)$$

Das lineare Verhältnis wollen wir im Versuch nachweisen.

## 2 Durchführung

### 2.1 Aufgabenstellung

1. Messen sie die Dunkelkennlinie einer Solarzelle und bestimmen sie mittels Fit den Sättigungsstrom  $I_S$ , den Diodenidealitätsfaktor  $n$  und den Serienwiderstand  $R_S$
2. Nehmen sie fünf Hellkennlinien bei verschiedenen Lichtintensitäten ohne Last und eine mit einer seriell angeschlossenen Last auf. Bestimmen sie für alle Kennlinien  $I_{SC}$ ,  $U_{OC}$ ,  $MPP$ ,  $FF$  und  $\eta$  an. Wie hängen diese Parameter von der Lichtintensität ab? Wie verändert sich die Kennlinie unter Last? Welchen Anteil der Solarzellenleistung nutzt der Ventilator?
3. Messen sie die Temperaturabhängigkeit von  $U_{OC}$  und erklären sie den Verlauf.

### 2.2 Das Diodenverhalten einer Solarzelle

Die Messung wurde Computergestützt durchgeführt, d.h. die Messprozedur und die Aufnahme der Kennlinien wurden von einem Rechner gesteuert. Um die Dunkelkennlinie aufzunehmen haben wir die geeichte Solarzelle in der Metallbox vollständig abgedeckt.

### 2.3 Versuche mit dem Solarmodul

Nachdem wir das Solarmodul unter dem Lampenhimmel in Position gebracht haben, wurde mit Hilfe des Spannungsabfalls einer geeichten Solarzelle auf eine gleichmäßige Ausleuchtung des Moduls kontrolliert. Für die erste Kennlinie haben wir die Lampen so eingestellt dass der Spannungsabfall 32.2 mV betrug. Dies entspricht einer Intensität von 100 mW/cm<sup>2</sup>. Bei dieser Leistung haben wir auch die Kennlinie mit Ventilator aufgenommen. Die nächsten Stufen waren 78.1, 46.5, 19.2 und 124.1 mW/cm<sup>2</sup>.

### 2.4 Einfluss der Temperatur

Für diesen Versuchsteil haben wir die beheizbare Solarzelle unter der Beleuchtung montiert und dann zunächst mit der Beleuchtung bis ungefähr 80°C geheizt. An diesem Punkt haben wir die erste Kennlinie aufgenommen. Die Heizung erwärmte die Zelle dann bis auf ungefähr 97°C. An dieser Stelle haben wir wieder eine Kennlinie aufgenommen.

### 3 Auswertung

#### 3.1 Diodenverhalten

Anhand der Messdaten haben wir mit *Mathematica* den besten Fit für die Umkehrfunktion der Shockley-Gleichung (1.1) ermittelt und die freien Parameter Diodenidealtitätsfaktor  $n$ , Serienwiderstand  $R_S$  sowie den Sättigungsstrom  $I_S$  bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6 dargestellt. Wie der Vergleich mit üblichen Werten aus Tabelle 1 zeigt, liegen sie in den typischen

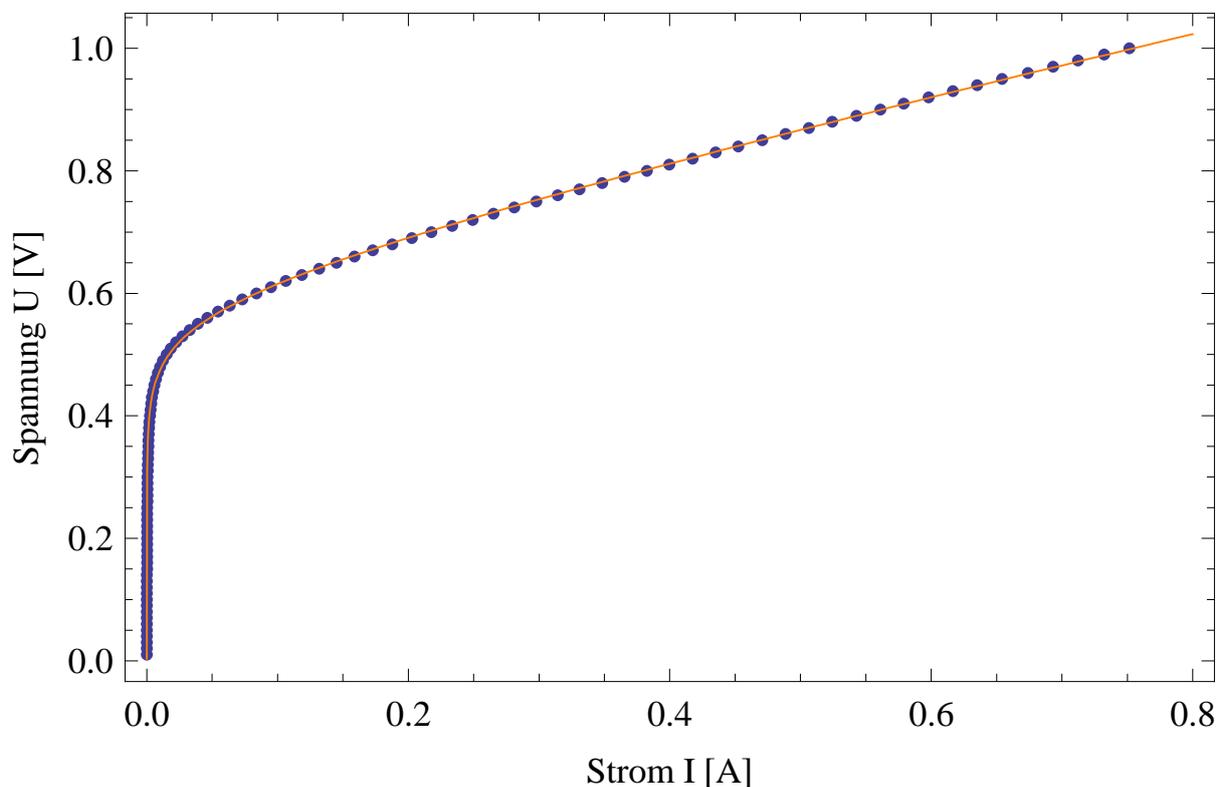


Abbildung 6: Fit für den Exponentiellen Bereich der  $I - U$  Kennlinie unserer Solarzelle. Er wurde nur für den exponentiellen Bereich (Werte  $> U = 0.38$  V) durchgeführt.

Größenordnungen und sind somit sehr realistisch.

| Parameter | ermittelter Wert           | üblicher Wert              |
|-----------|----------------------------|----------------------------|
| $n$       | 1.27242                    | 1...2                      |
| $R_S$     | 0.454011 $\Omega$          |                            |
| $I_S$     | $2.01416 \times 10^{-7}$ A | $10^{-12}$ ... $10^{-6}$ A |

Tabelle 1: Aus dem Fit ermittelte Parameter der Shockley Gleichung (1.1). Die üblichen Werte sind <http://de.wikipedia.org/wiki/Diode> entnommen

#### 3.2 Versuche mit dem Solarmodul

Der Kurvenverlauf der unbelasteten Kennlinien bei verschiedenen Beleuchtungsstärken sehen alle Abbildung 7 ähnlich. Sie unterscheiden sich nur um die Werte der Nullstellen. Die Werte für  $I_{SC}$ ,  $U_{OC}$ ,  $MPP$ ,  $FF$  und  $\eta$  sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Man erkennt deutlich das der Kurzschlussstrom mit steigender Intensität ebenfalls steigt, ebenso die maximal abgreifbare Leistung. Dies geschieht aufgrund der Mehrererzeugung von Ladungsträgerpaaren bei steigender Intensität. Dies ist Begründet durch die höherer Photonenzahl bei steigender Intensität. Weil

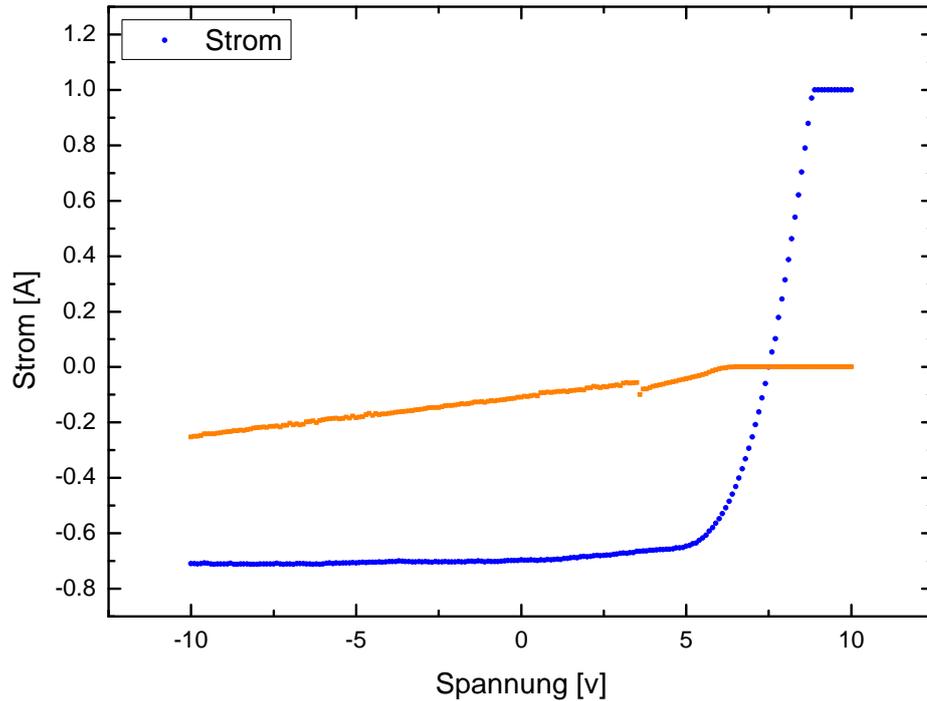


Abbildung 7: (Blaue Punkte) Kennlinie der Solarzelle bei  $100 \text{ mW/cm}^2$  Beleuchtungsintensität. (Orange Vierecke) Kennlinie der Solarzelle mit angeschlossenen Ventilator. Das abrupte Ende für positive Ströme ist dem sich nur in eine Richtung drehenden Ventilator geschuldet. Das lineare Verhalten für negative Ströme entspricht Abschätzung (1.7).

| Beleuchtungsintensität [ $\text{mW/cm}^2$ ] | $I_{\text{SC}}$ [A] | $U_{\text{OC}}$ [V] | $MPP$ [W] | $FF$ | $\eta$ [%] |
|---|---------------------|---------------------|-----------|------|------------|
| 100.0                                       | -0.7                | 7.5                 | -3.4      | 0.65 | 10.4       |
| 78.1  | -0.5                | 7.6                 | -2.8      | 0.66 | 10.9       |
| 46.5  | -0.3                | 7.7                 | -1.7      | 0.68 | 11.0       |
| 19.2  | -0.1                | 7.5                 | -0.6      | 0.67 | 10.3       |
| 124.1                                       | -0.9                | 8                   | -4.7      | 0.65 | 11.6       |

Tabelle 2: Berechneten Werte aus den Kennlinien bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Ladungsträgerpaare mittels Ionisation der Atome durch den Photoeffekt erzeugt werden, existieren mehr Ladungsträger.

Dagegen scheinen sich die Leerlaufspannung und der Wirkungsgrad nicht mit der Intensität zu verändern.

Unter Last verändert sich die Kennlinie gänzlich wie in Abbildung 7 zu erkennen ist. Der lineare Verlauf der Kennlinie kann mit Abschätzung (1.7) in Einklang gebracht werden. Wir haben die Leistung des Ventilators bei  $100 \text{ W/cm}^2$  Intensität mit einem Multimeter zu

$$P_{\text{Ventilator}} = 1.075 \text{ W} \quad (3.1)$$

bestimmt. Dies entspricht ungefähr einem Drittel der abgreifbaren Leistung.

### 3.3 Einfluss der Temperatur

Die Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung ist in Diagramm 8 dargestellt. Der linear

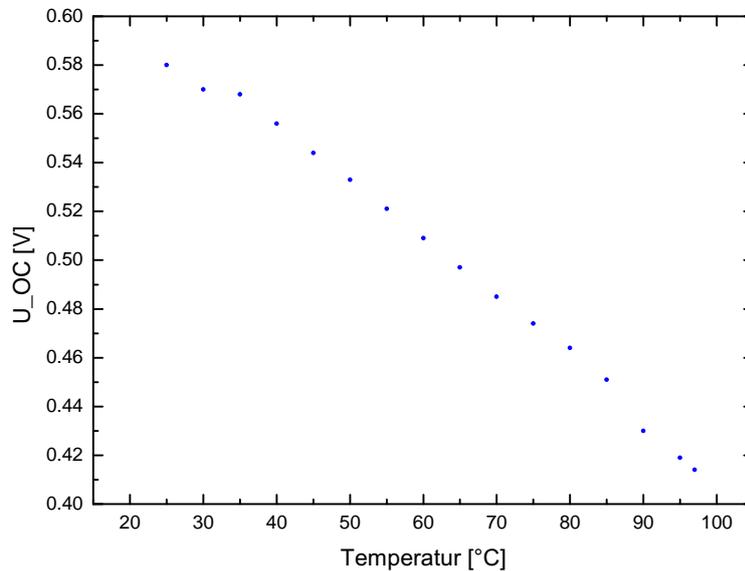


Abbildung 8: Temperaturverlauf der Leerlaufspannung

absteigende Verlauf deutet auf einen linear mit der Temperatur ansteigenden Temperaturstrom hin, der der Ladungstrennung in der Solarzelle bei Beleuchtung entgegenwirkt. Dieser wird verursacht durch die höhere Beweglichkeit der Ladungsträger bei höheren Temperaturen. Die Potentialdifferenz in der Raumladungszone gibt der thermischen Bewegung der Ladungsträger die sich in der Nähe dieser befinden eine Vorzugsrichtung und es kommt zur Annihilation. Durch Nachrücken von äußeren Bereichen in die freien Plätze entsteht ein Diffusionsstrom.

Dieser Effekt ist auch für die Veränderung der Kennlinie verantwortlich. Man kann das in Abbildung 9 erkennen. Die erbrachte Leistung ändert sich um 19 % von 0.074 (kalt) auf 0.060 W (warm).

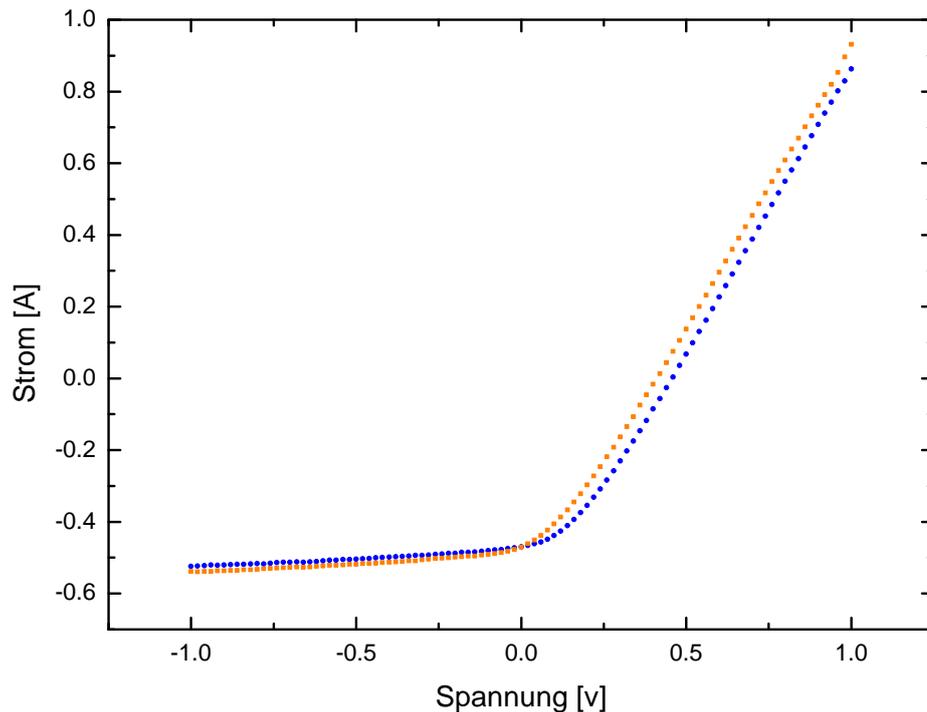


Abbildung 9: Kennlinien der Solarzelle: (Blaue Punkte) vor dem Heizen bei 80 °C und (Orange Vierecke) danach bei 97.4 °C

### 3.4 Fehlerbetrachtung

An dieser Stelle soll exemplarisch eine Fehlerrechnung für den Wirkungsgrad durchgeführt werden. Der relative Fehler ergibt sich zu

$$\eta = \frac{U_{\text{MP}} I_{\text{MP}}}{SA} \Rightarrow \frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta U_{\text{MP}}}{U_{\text{MP}}} + \frac{\Delta I_{\text{MP}}}{I_{\text{MP}}} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta A}{A}$$

wobei  $I_{\text{MP}}$  ( $U_{\text{MP}}$ ) der Strom (Spannung) am Maximum Power Point,  $S$  die Beleuchtungsintensität und  $A$  die Fläche der Solarzelle darstellen. Für die ersten Beiden haben wir einen Fehler von einem Digit für die letzte Stelle angenommen. Für den Fehler der Intensität haben wir die Schwankung des Spannungsabfalls an der geeichten Solarzelle über der gesamten Solarzelle benutzt. Dieser betrug in jedem Versuch ungefähr 1 mV. Es folgt also  $\Delta S/S = \Delta U_S/U_S$ . Der Fehler der Solarzellenfläche ist bestimmt durch die halbe Ablesegenauigkeit des benutzen Messschiebers, diese entspricht 0.05 mm. Für die exemplarische Rechnung haben wir den Wert bei  $S = 100 \text{ mW/cm}^2$  gewählt. Somit erhält man

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = 5.2\%$$

Weil der Fehler hauptsächlich durch den der gleichmäßigen Intensitätsverteilung bestimmt wird, ist er ähnlich für alle Teilversuche. Denn bei niedrigeren Intensitäten ist auch die Schwankung kleiner geworden.

## **4 Zusammenfassung**

Dieser Versuch hat uns die grundlegende Funktionsweise einer Solarzelle näher gebracht und gezeigt, mit welchen Größen man sinnvoll die Qualität einer Solarzelle bewerten kann. Der Wirkungsgrad unserer Solarzelle betrug 11 % und war nur wenig von der Intensität abhängig. Die erzeugte Leistung jedoch stark.

Leider wurde die spektrale Abhängigkeit der abgreifbaren Leistung nicht besprochen.