

# UNIVERSITÄT TÜBINGEN

## PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM II

SZ

---

# Solarzelle

---

*Von:*  
Fabian Kraus  
Simon Fischer

*Betreuung:*  
S. Struzek

10. Dezember 2021

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1	Bändermodell . . . . .	1
2.2	Dotierung . . . . .	1
2.3	Silizium-Solarzelle . . . . .	2
2.4	Parameter einer Solarzelle . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Ergebnisse &amp; Auswertung</b>	<b>4</b>
4.1	Qualitative Analyse . . . . .	4
4.2	Quantitative Analyse . . . . .	5

# 1 Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch werden verschiedene Parameter einer Solarzelle bestimmt.

## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Bändermodell

In einem Festkörper befinden sich Elektronen auf Niveaus/Bändern mit fester Energiespanne. Durch die Zufuhr von Energiemengen der Entfernung zweier Bänder (durch Wärme, Licht, etc.) können Elektronen von einem niedrigeren in ein höheres Niveau angehoben werden.

Zur Beschreibung der Leitfähigkeit verschiedener Materialien benötigt man das *Valenzband* (das Niveau der Valenz-/Bindungselektronen) und das *Leitungsband* (das Niveau über dem Valenzband).

Bei *Metallen* überschneiden sich das Valenz- und Leitungsband, wodurch Elektronen sich frei zwischen den beiden bewegen können. Metalle sind nach außen elektrisch neutral. Schon eine geringe Spannung reicht aus, um weitere Elektronen auszulösen, weshalb Metalle eine gute Leitfähigkeit haben.

Ein *Isolator* hat ein nicht besetztes Leitungsband und eine so große Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband, dass selbst bei großen Mengen zusätzlicher Energie nur sehr wenige Elektronen angeregt werden und ins Leitungsband springen. Isolatoren leiten demnach schlecht, unter 'normalen' Umständen quasi gar nicht.

Ein *Halbleiter* hat ebenso ein nicht besetztes Leitungsband, jedoch ist hier die Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband sehr klein. Durch Energiezufuhr können Elektronen aus dem Valenzband gelöst und in das Leitungsband angehoben werden. Es entstehen Lücken im Valenzband, welche *Löcher* genannt werden. Durch Bewegung verlieren die Elektronen an Energie und fallen zurück in das Loch eines benachbarten Atoms.

### 2.2 Dotierung

Als Dotierung/Doping bezeichnet man das Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiter.

Der Halbleiter Silizium hat im Valenzband vier Elektronen. Fügt man ein Element mit 5 Valenzelektronen (z.B. Phosphor) hinzu, so hat man ein Elektron, das nur schwach an das Valenzband gebunden ist. Dieses kann mit wenig Energieaufwand ins Leitungsband angehoben werden. Der Halbleiter besitzt nun bewegliche negative Ladungsträger, weshalb man von n-Dotierung spricht.

Bei p-Dotierung dahingegen werden Fremdatome mit nur drei Valenzelektronen eingefügt. Dies führt zu einer ungesättigten Bindung, da ein Elektron fehlt. Durch Energiezufuhr können Elektronen aus benachbarten Atomen herausgelöst werden (was ein neues Loch erzeugt) und in das alte Loch hineinfallen. Das Loch wandert dadurch innerhalb des Halbleiters, was einem positiv geladenen Ladungsträger entspricht.

## 2.3 Silizium-Solarzelle

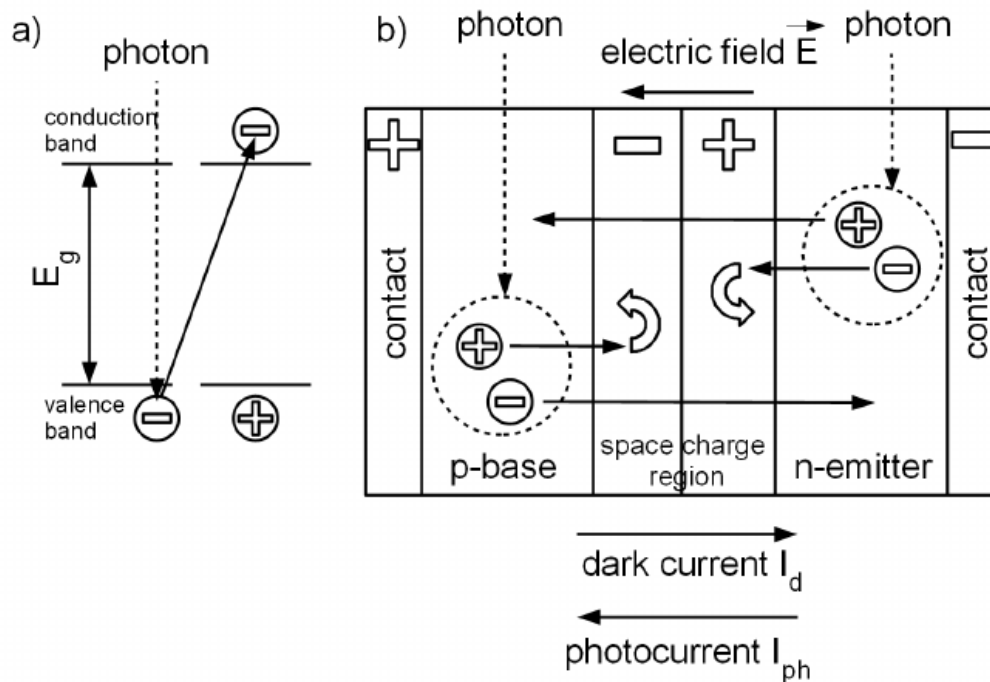


Abbildung 1: a) Photoelektrischer Effekt b) Photovoltaischer Effekt (aus der Anleitung)

Eine Solarzelle besteht aus einer p-dotierten und einer n-dotierten Silizium-Schicht, die sich berühren. Im Kontaktbereich entsteht ein p-n-Übergang. Aufgrund der Dotierungen und der daraus resultierenden Änderung der Ladungskonzentration bewegen sich im des Kontaktbereich freie Elektronen von dem n in den p-dotierten Bereich und fallen dort in die Löcher; ebenso wandern die Löcher aus dem p in das n-dotierte-Silizium und neutralisieren sich dort mit den Elektronen.

Der Mangel an bewegliche Ladungsträgern in diesem Kontaktbereich führt insgesamt zu einer elektrischen Aufladung der Dotierungsatome. Diese Ladungsverteilung erzeugt ein elektrisches Feld, das eine Kraft auf die freien Ladungsträgern entgegen der Diffusionsbewegung verursacht. Das Feld drängt die freien Ladungen zurück, es entsteht eine Raumladungszone nahe der Grenzschicht. Der Feldstrom und der Diffusionsstrom kompensieren sich und es stellt sich ein Gleichgewicht ein.

Licht mit der Energie  $W = h\nu$  der Bandlücke des Halbleitermaterials wird von der Solarzelle absorbiert und zwingt ein Elektron von einem besetzten Niveau im Valenzband in ein unbesetztes Niveau im Leitungsband. Dieses Elektron bildet mit dem Loch im Valenzband ein bewegliches Elektronen-Loch-Paar, diesen Effekt nennt man (innerer) photoelektrischer Effekt.

Wird ein solches Elektron-Loch-Paar in der Raumladungszone gebildet, dann wird das Elektron aufgrund des elektrischen Feldes zum n-dotierten Bereich und das Loch zum p-dotierten Bereich geleitet.

Je weiter die Elektronen sich von den ursprünglichen Atomen entfernen, um so mehr elektrische Energie müssen sie aufwenden. Die Grenze, bis zu der die Elektronen noch elektrische Energie abgeben können, ist dann erreicht, wenn sie genau so viel elektrische Energie abgeben wie sie durch die Bindungsenergie gewinnen können. Diese Energie entspricht der Bandlücke den n- und p-Bereiches. Dies ist die maximale Energie, die ein Elektron abgeben kann. Die gemessenen Spannung hängt als von der Bandlücke ab.

Elektronen-Loch-Paare außerhalb der Raumladungszone können ebenfalls in diese diffundieren; anschließend werden diese durch das E-Feld erfasst und getrennt. (photovoltaischer Effekt).

Diese zuvor genannten Ladungsbewegungen bilden den Photostrom, das p-Gebiet lädt sich positiv auf, das n-Gebiet negativ.

Die Spannung, die durch das elektrische Feld der Raumladungszone entsteht, kann mit einem Voltmeter gemessen werden und entspricht der Leerlaufspannung. Der Diffusionsstrom setzt nicht aus, wird aber durch den Photostrom dominiert.

## 2.4 Parameter einer Solarzelle

Eine reale Solarzelle kann als eine Ersatzschaltung mit einer Diode, einem Parallelwiderstand und einem Reihenwiderstand veranschaulicht werden, siehe Abb. 2, der Ausgangsstrom  $I$  wird über den Diodenstrom  $I_d$  und den Strom  $I_p$  durch den Parallelwiderstand begrenzt.

Für die Beschreibung von Solarzellen nutzt man ein Strom-Spannungsdiagramm, aus dem die folgenden charakteristischen Parameter abgelesen werden können:

- Der *Kurzschlussstrom*  $I_{SC}$  ist der Strom bei  $U = 0V$ . Dieser kann approximiert werden durch  $I_{SC} = I_{ph} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)$ , wobei  $R_s$  der Reihen- und  $R_p$  der Parallelwiderstand ist.
- Die *Leerlaufspannung*  $U_{OC}$  ist die Spannung bei  $I = 0A$ . Sie ist gegeben durch  $U_{OC} = \frac{k_b T}{e} \log \frac{I_{SC}}{I_0}$ .
- Der *Maximum Power Point*  $P_{MPP}$  ist das Maximum der Ausgangsleistung  $P_{MPP} = U_{max} I_{max}$ .

Der Parallelwiderstand  $R_p$  und der Serienwiderstand  $R_s$  können über die Steigung des Graphen abgelesen werden. Es gilt:

$$R_p = \left[ - \left( IU \right)_{I_{SC}} \right]^{-1} \quad (\text{bei } U = 0V)$$

$$R_s = \left[ - \left( IU \right)_{U_{OC}} \right]^{-1} \quad (\text{bei } I = 0A)$$

Für die Güte einer Solarzelle definiert man den *Füllfaktor*  $FF$  als

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} U_{OC}} = \frac{U_{max} I_{max}}{I_{SC} U_{OC}} \quad (1)$$

und den Wirkungsgrad  $\eta$  als Verhältnis der maximalen Nutzleistung und der eingestrahnten Leistung  $P_{in}$ :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}} = \frac{P_{MPP}}{A E_e} \quad (2)$$

wobei  $A$  die bestrahlte Fläche und  $E_e$  die Beleuchtungsstärke ist.

### 3 Versuchsdurchführung

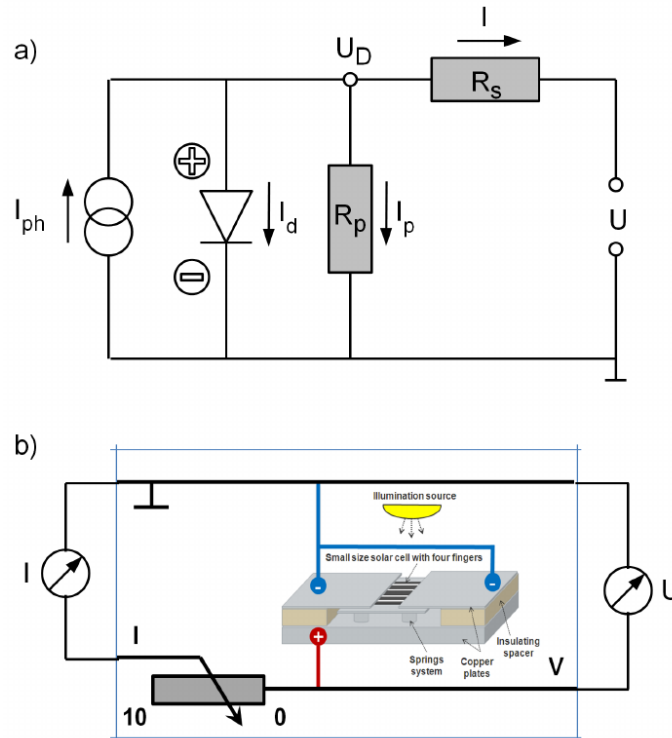


Abbildung 2: a) Ersatzschaltplan Solarzelle b) Versuchsaufbau (aus der Anleitung)

Der Versuch besteht aus einer Halogenlampe und einer Solarzelle, die an die Messung angeschlossen ist.

Es werden insgesamt vier Versuchsanordnungen untersucht, für jede dieser Messung stellen wir den Kurzschlussstrom auf einen festen Wert ein und messen die Leerlaufspannung mit getrennten Messungen. Der Widerstand des Potentiometers wird hierfür auf  $0\Omega$  gestellt. Die Solarzelle wird im Abstand zur Lampe verschoben, bis das Ampere-Meter den gewünschten Wert besitzt.

Im Laufe des Versuches wird der Lastwiderstand des Potentiometers von 0 auf  $120\Omega$  verstellt; es werden gleichzeitig Spannung und Strom gemessen.

Für die ersten drei Durchgänge stellt man einen Kurzschlussstrom von 60mA ein. Der erste Versuch wird ohne zusätzlichen Widerstand durchgeführt, der zweite mit einem Widerstand parallel zur Solarzelle und der dritte mit einem Widerstand in Reihe zur Solarzelle. Zuletzt verwendet man einen Kurzschlussstrom von 30mA, indem man wieder den Abstand zur Lampe verändert. Die Messung erfolgt wie im ersten Teil.

Dann wird die Beleuchtungsstärke mit einem Luxmeter in den Positionen der Solarzellen der vorherigen Versuchsanordnungen gemessen. Außerdem wird die Fläche  $A$  der Solarzelle vermessen.

Zuletzt wird mit einem MATLAB-Skript der Einfluss der Temperatur auf die Solarzelle untersucht.

## 4 Ergebnisse & Auswertung

### 4.1 Qualitative Analyse

- Halbiert man die Beleuchtungsstärke, so wird der Kurzschlussstrom auch ungefähr halbiert.

- Verdoppelt man den Abstand zwischen Lampe und Solarzelle, wo wird der Kurzschlussstrom ungefähr geviertelt (bei uns im Experiment etwas mehr).

## 4.2 Quantitative Analyse

Der Verlauf der Spannung und der Leistung ist in Abbildungen 3 und 5 abgebildet:

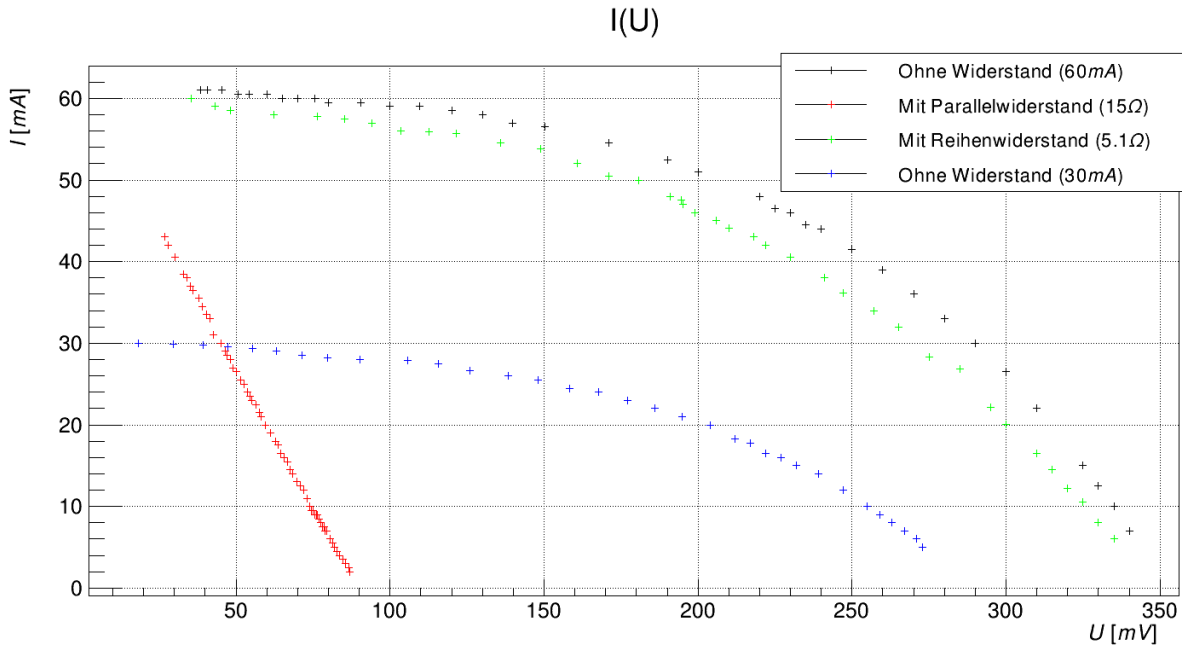


Abbildung 3: Strom-Spannungs-Kurven

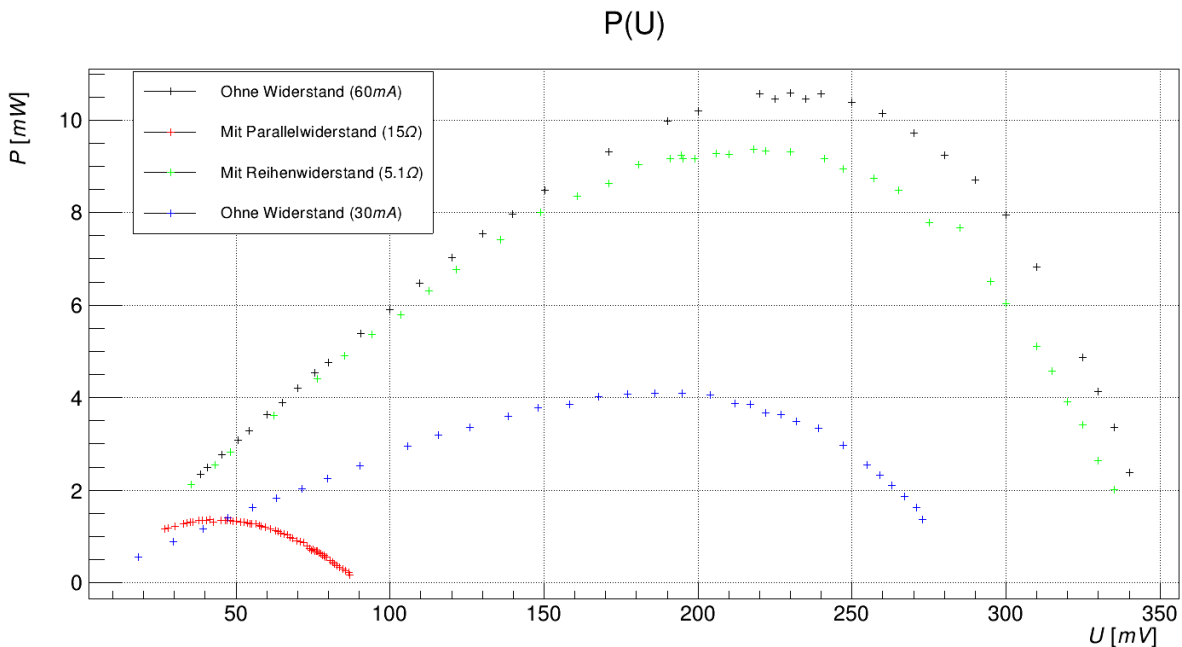


Abbildung 4: Leistung-Spannungs-Kurven

Die Fläche der Solarzelle betrug  $A \approx 0.6\text{cm} \cdot 1.5\text{cm} = 0.9\text{cm}^2$ , die Beleuchtungsstärke betrug in den ersten drei Messreihen  $E_v \approx 141500\text{lx}$ , bei der letzten (blaue Messpunkte in den obigen plots)  $E_v \approx 69800\text{lx}$ .

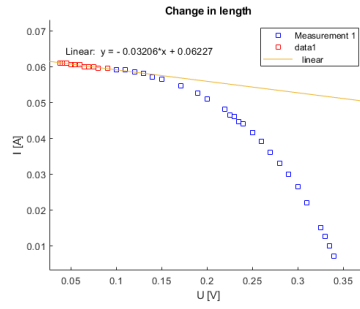
Mit einem Parallelwiderstand von  $R_P = 15\Omega$  und einem Serienwiderstand von  $R_S = 5.1\Omega$  berechnen

sich der Kurzschlussstrom  $I_{SC}$ , die Leerlaufspannung  $U_{OC}$ , der Füllfaktor  $FF$ , Maximum-Power-Point  $P_{MPP}$  und der Wirkungsgrad  $\eta$  für jede der Versuchsreihen zu

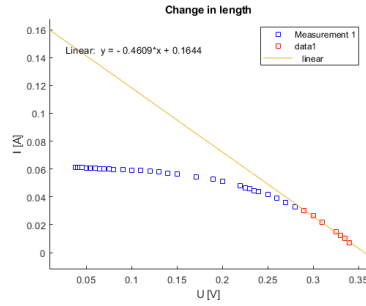
Nr	Messung	$E_g / \text{W m}^{-2}$	$I_{sc} / \text{mA}$	$V_{oc} / \text{V}$	$P_{MPP} / \text{mW}$	$FF / \%$	$\eta / \%$	$R_p / \Omega$	$R_s / \Omega$	
#1	$I_{sc} = 60 \text{ mA}$	471.6666667	61	0.384	10.58	45.1673497	24.9234393	31.19	2.17	
#2	$I_{sc} = 60 \text{ mA}, R_p = 15 \Omega$	471.5094968	43	0.43	13.662	73.8885884	32.1944735	1.45	1.59	
#3	$I_{sc} = 60 \text{ mA}, R_s = 5.1 \Omega$	471.5094968	59	0.355	9.374	44.7553115	22.0898108	23.02	2.37	
#4	$I_{sc} = 30 \text{ mA}$	232.6666667	30	0.184	4.0908	74.1086957	19.5358166	625	36.49	

Abbildung 5: Ergebnisse

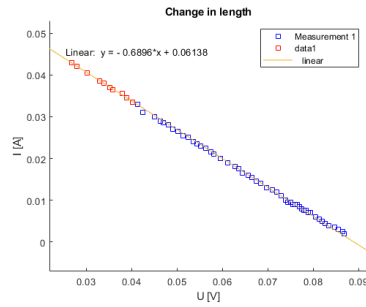
Es ist offensichtlich, dass zwei Fehler vorliegen: Erstens ist die zweite Messreihe klar misslungen, da sich eine Gerade abzeichnet (siehe unten). In der ersten Messreihe wurde  $V_{OC}$  nicht richtig bestimmt, was zu Folgefehlern in der Berechnung der anderen Größen führt. Ein möglicher Grund dafür könnte eine falsche Befestigung der Solarzelle sein, ein anderer ein falsches Ablesen der Messe von dem Voltmeter, welches sich wiederholt ausgeschaltet hatte und stets neu in Betrieb genommen werden musste. Die Wahl eines digitalen Amperemeters hätte durchaus auch zur Vermeidung dieser Fehler beigetragen, wohingegen wir ein analoges Gerät nutzten.



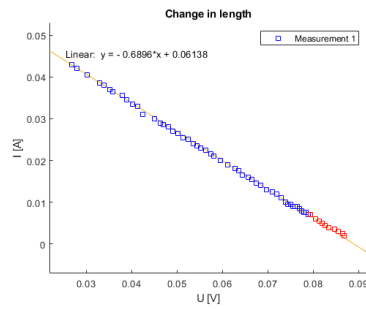
(a) Messreihe 1, fit 1



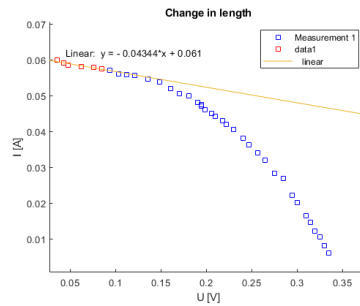
(b) Messreihe 1, fit 2



(c) Messreihe 2, fit 1



(d) Messreihe 2, fit 2



(e) Messreihe 3, fit 1

