

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DORTMUND

ANFÄNGERPRAKTIKUM PHYSIK
SOMMERSEMESTER
2014

NHV1
Die Solarzelle

03.06.2014

1.ABGABE: 10.06.2014

Joshua Luckey

joshua.luckey@udo.edu

1 Einleitung

EINLEITUNG

2 Theorie

In folgendem Abschnitt werden der Aufbau und die Funktionsweise einer Solarzelle erläutert. Zunächst werden jedoch die, für die Funktionsweise der Solarzelle wichtigen, Eigenschaften von Halbleitern, sowie die Auswirkung von Dotierung auf Halbleiter betrachtet.

2.1 Eigenschaften von Halbleitern und Dotierung

Bei Halbleitern (z.B. Silizium) handelt es sich um Elemente, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften in Bezug auf die elektrische Leitfähigkeit zwischen Leitern und Nichtleitern einordnen lassen. Diese Eigenschaft lässt sich mit Hilfe des Bändermodells beschreiben, welches zwei Elektronenbänder, das Valenzband und das Leiterband unterscheidet. Das Valenzband ist dabei das oberste vollständig mit Elektronen besetzte Band. Ein elektrischer Strom wird von einem Material jedoch nur im Leitungsband transportiert. Bei Leitern berühren sich diese beiden Bänder, so dass diese jederzeit elektrischen Strom leiten können. Bei Nichtleitern ist das genaue Gegenteil der Fall hier ist die Bandlücke zwischen Leiter- und Valenzband so groß, dass diese nicht überwunden werden kann. Bei Halbleitern berühren sich die beiden Bänder zwar nicht, doch ist die Bandlücke so klein, dass sie schon durch thermische Energie überwunden werden kann. Geschieht dies, so entsteht im Valenzband eine Elektronenfehlstelle, ein sogenanntes Loch, welches ebenfalls zu Leitung beiträgt.

Durch Dotierung mit Fremdatomen kann man die Leitungseigenschaften von Halbleitern noch weiter verbessern. *N*-dotierten Halbleitern, wie beispielsweise Silizium, wurde ein Fremdatom eingebracht, welches ein Elektron mehr besitzt als ein Atom des Halbleiters (z.B. Phosphor). Entsprechend verhält es sich bei *p*-dotierten Halbleitern, mit dem Unterschied, dass in diese ein Fremdatom mit einem Elektron weniger eingebracht wurde (z.B. Aluminium).

Werden nun zwei unterschiedlich dotierte Halbleiter zusammen gebracht, rekombinieren die Elektronen aus dem *n*-dotierten mit den Löchern aus dem *p*-dotierten Teil an der Kontaktfläche, dem sogenannten *p-n*-Übergang und bilden die Raumladungszone. Durch diese, Diffusion genannte, Bewegung der Elektronen in den *p*-dotierten Teil wird dieser, in der Nähe des *p-n*-Übergangs, negativ und der *n*-dotierte Teil positiv geladen. Durch diese Ladungstrennung wird ein elektrisches Feld E erzeugt, welches wiederum zu einem Strom I_D in Richtung der Feldlinien führt. Dieser lässt sich in Abhängigkeit des Sättigungsstroms

I_0 und der Diffusionsspannung U mit der Strom-Spannungscharakteristik einer Diode

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

beschreiben.

2.2 Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle

Bei einer Solarzelle handelt es um ein Halbleiterbauelement, dessen grundsätzlicher Aufbau dem einer Diode gleicht. So besteht die Solarzelle aus einer n -dotierten Ober- und einer p -dotierten Unterseite. Dabei ist die n -dotierte Oberseite so dünn, dass sie Lichtdurchlässig ist.

In einer nicht bestrahlten Solarzelle stellt sich ein, wie in Abschnitt 2.1 beschriebener Strom in np -Richtung ein. Da die n -dotierte Schicht Lichtdurchlässig ist, werden durch den photoelektrischen Effekt Elektronen-Loch-Paare in der Raumladungszone erzeugt. Dies führt zu einem dem Strom I_D entgegen gerichtetem Photostrom I_{Ph} so dass sich die Strom-Spannungs-Charakteristik einer Solarzelle zu

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) - I_{Ph} \quad (2)$$

ergibt.

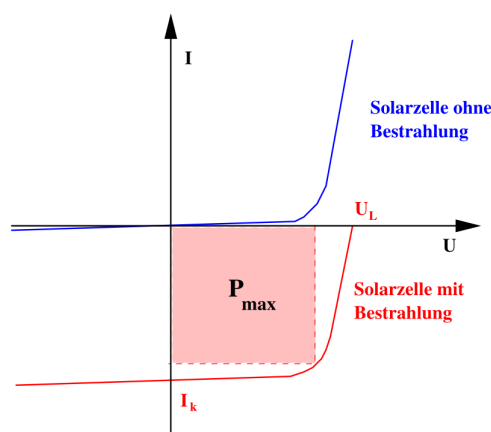


Abbildung 1: Qualitative Darstellung der I - U -Kennlinie einer bestrahlten und einer unbestrahlten Solarzelle [1]

Die Strom-Spannung-Kennlinie (siehe Abbildung 1) einer Solarzelle wird durch die drei Größen Kurzschlussstrom I_K , Leerlaufspannung U_L und den Wirkungsgrad η charakterisiert.

Der Kurzschlussstrom, welcher bei konstanter Temperatur proportional zu Fläche der Solarzelle A_{SZ} und der Intensität des Lichtes J_{Ph} verläuft, stellt den maximalen Strom dar, der bei kurzgeschlossener Solarzelle ($U = 0$) fließt. Analog dazu ist die Leerlaufspannung die maximale Spannung der Solarzelle, wenn an diese kein Verbraucher angeschlossen ist ($I = 0$). Die Leerlaufspannung hängt, bei ebenfalls konstanter Temperatur logarithmisch von der Lichtintensität J_{Ph} ab, bis ein Sättigungswert erreicht ist und ist unabhängig von der Solarzellenfläche A_{SZ} . Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von gelieferter elektrischer Leistung der Solarzelle P_{SZ} und der eingestrahlt Lichtleistung P_{Ph}

$$\eta = \frac{P_{aus}}{P_{ein}} = \frac{P_{SZ}}{P_{Ph}} = \frac{U \cdot I}{J_{Ph} \cdot A_{SZ}}. \quad (3)$$

Das Maximum der Solarzellenleistung I kann als Flächeninhalt des größtmöglichen Rechtecks bestimmt werden, welches sich zwischen x- und y-Achse und der I - U -Kennlinie einzeichnen lässt (siehe Abbildung 1).

3 Durchführung

Vor Beginn des eigentlichen Versuchs werden die Maße der Solarzelle und die Offsets der des Abstandes von Lampe und Solarzelle aufgenommen. Dabei ist der erste Offset $d_{\text{off},1}$ der Abstand von der Solarzelle zur Steckplatte und der zweite $d_{\text{off},2}$ der Abstand der Lampe vom Nullpunkt der Skala. Für die Durchführung wird die Solarzelle dem Schaltplan in Abbildung 2 entsprechend mit den Multimetern und der Widerstandsdekade verbunden.

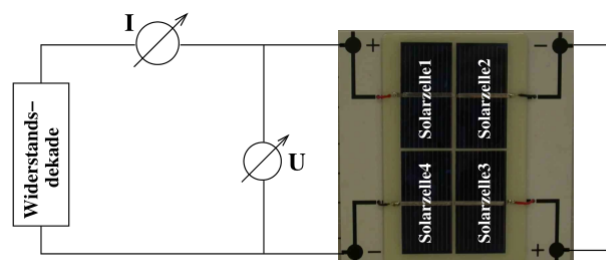


Abbildung 2: Plan der in diesem Versuch verwendeten Schaltung [1]

Zunächst werden der Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung für unterschiedliche Abstände von Solarzelle und Halogenlampe bestimmt. Für die Messung des Kurzschlussstromes wird dabei nur ein Amperemeter an die Solarzelle angeschlossen und der Strom I_K in Abhängigkeit des Abstandes d notiert. Entsprechend wird bei der Messung der Leerlaufspannung nur ein Voltmeter an die Solarzelle angeschlossen, dessen angezeigte Werte U_L ebenfalls in Abhängigkeit des Abstandes d notiert werden.

Die Messung der I - U -Kennlinie der Solarzelle erfolgt für vier unterschiedliche Abstände

in denen der Kurzschlussstrom jeweils einen der Werte 30 mA, 50 mA, 75 mA und 100 mA annimmt. Bei einer Messung werden jeweils Strom I_{SZ} und Spannung U in Abhängigkeit des an der Widerstandsdekade eingestellten Widerstands R zwischen $1\ \Omega$ und $250\ \Omega$ aufgenommen.

4 Auswertung

Im folgenden Abschnitt sind die während des Versuchs aufgenommenen Messwerte und die daraus berechneten Ergebnisse tabellarisch und graphisch dargestellt. An entsprechender Stelle sind Anmerkungen und Erklärungen zu den Rechnungen und Ergebnissen gegeben. Als Messfehler wurde allgemein die kleinste Skaleneinteilung bzw. die letzte angezeigte Stelle des jeweils verwendeten Messinstruments angenommen. Die für die Fehlerrechnung verwendeten Gleichungen sind in Abschnitt 4.4 aufgeführt und werden mit römischen Ziffern referenziert.

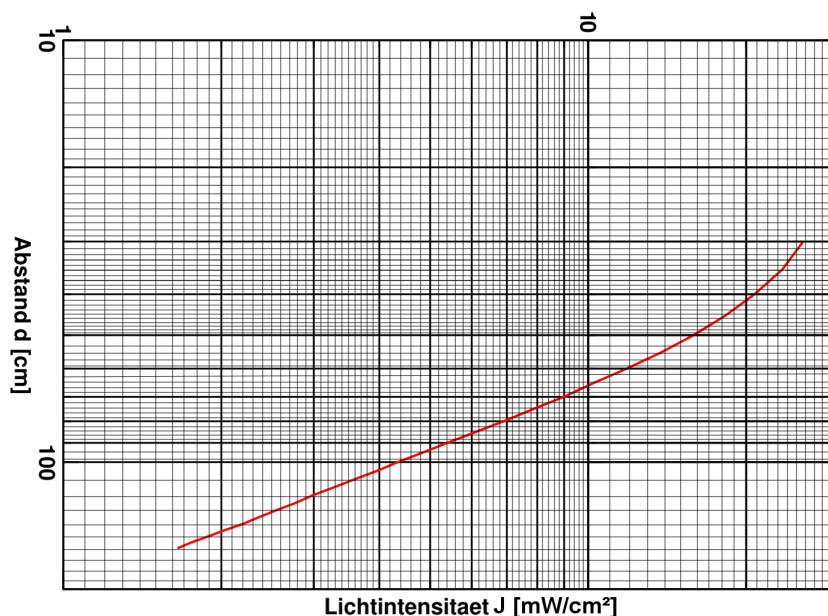


Abbildung 3: Intensität des Lichtes einer Halogenlampe J_{Ph} in Abhängigkeit des Abstand d [1, verändert]

Die in der Auswertung benötigten Fläche der Solarzelle A_{SZ} berechnet sich aus der Anzahl $n = 8$ der quadratischen Elemente, mit der jeweiligen Seitenlänge $a = (2,5 \pm 0,1)$ cm zu

$$A_{SZ} = n \cdot a^2 = (5 \pm 4) \text{ cm}^2. \quad (4)$$

4.1 Bestimmung des Kurzschlussstroms der Solarzelle

Die aufgenommenen Messwerte für den Abstand d' den offsetbereinigten Abstand $d = d' - (d_{\text{off},1} + d_{\text{off},2})$ mit $d_{\text{off},1} = (3,5 \pm 0,1)$ cm und $d_{\text{off},2} = (14,0 \pm 0,1)$ cm und der in

diesem Abstand gemessene Kurzschlussstrom I_K sind in ?? eingetragen. Außerdem sind die für den jeweiligen Abstand die aus Abbildung 3 abgelesenen Werte für die Lichtintensität der Halogenlampe angegeben.

Kurzschlussstrom I_K [mA]	Abstand+Offset d' [cm]	Abstand d [cm]	Lichtintensität J_{Ph} [mW]
$-31,7 \pm 0,1$	$99,0 \pm 0,1$	$81,5 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,1$
$-34,2 \pm 0,1$	$95,0 \pm 0,1$	$77,5 \pm 0,2$	$7,2 \pm 0,1$
$-37,3 \pm 0,1$	$91,0 \pm 0,1$	$73,5 \pm 0,2$	$8,0 \pm 0,1$
$-40,8 \pm 0,1$	$87,0 \pm 0,1$	$69,5 \pm 0,2$	$9,0 \pm 0,1$
$-44,9 \pm 0,1$	$83,0 \pm 0,1$	$65,5 \pm 0,2$	$9,8 \pm 0,1$
$-47,3 \pm 0,1$	$81,0 \pm 0,1$	$63,5 \pm 0,2$	10 ± 1
$-49,9 \pm 0,1$	$79,0 \pm 0,1$	$61,5 \pm 0,2$	11 ± 1
$-50,1 \pm 0,1$	$77,0 \pm 0,1$	$59,5 \pm 0,2$	12 ± 1
$-55,6 \pm 0,1$	$75,0 \pm 0,1$	$57,5 \pm 0,2$	12 ± 1
$-56,0 \pm 0,1$	$73,0 \pm 0,1$	$55,5 \pm 0,2$	13 ± 1
$-62,0 \pm 0,1$	$71,0 \pm 0,1$	$53,5 \pm 0,2$	14 ± 1
$-70,8 \pm 0,1$	$67,0 \pm 0,1$	$49,5 \pm 0,2$	16 ± 1
$-81,4 \pm 0,1$	$63,0 \pm 0,1$	$45,5 \pm 0,2$	17 ± 1
$-92,6 \pm 0,1$	$59,0 \pm 0,1$	$41,5 \pm 0,2$	19 ± 1
$-97,1 \pm 0,1$	$57,0 \pm 0,1$	$39,5 \pm 0,2$	21 ± 1

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Abhängigkeit des Kurzschlussstrom I_K von der Lichtintensität J_{Ph}

In Abbildung 4 sind die Messwerte für den Kurzschlussstrom I_K gegen die Lichtintensität J aufgetragen. Die Parameter der ebenfalls eingezeichnete und mit Hilfe des *Python*-Pakets *SciPy* [2] bestimmte Regressionsgerade der Form

$$I_K(J) = A \cdot J + I_{K,0} \quad (5)$$

sind

$$A = (-4,8 \pm 0,2) \text{ A W}^{-1} \quad \text{und} \quad (5a)$$

$$I_{K,0} = (1 \pm 2) \text{ A.} \quad (5b)$$

4.2 Bestimmung der Leerlaufspannung der Solarzelle

Tabelle 2 enthält die Messwerte der Leerlaufspannung U_L , des Abstandes d und die entsprechenden, aus Abbildung 3 abgelesenen, Lichtintensitäten J_{Ph} . Die grafische Darstellung der Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_L und Intensität J_{Ph} ist in Abbildung 5 gegeben.

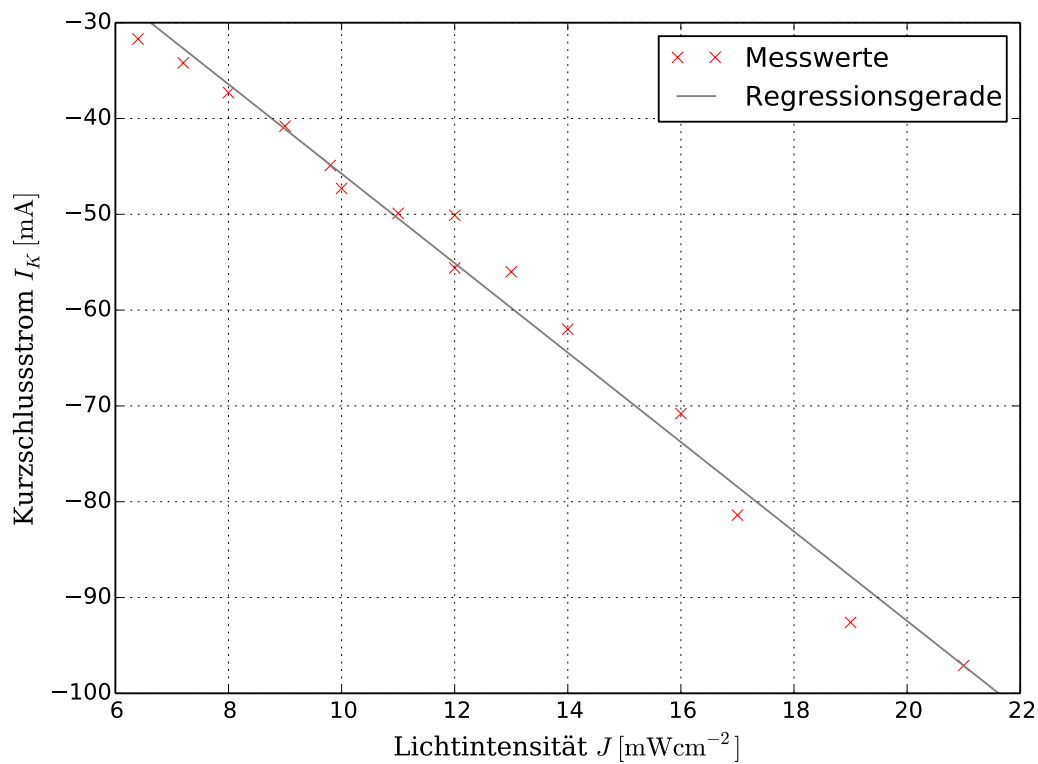


Abbildung 4: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Kurzschlussstrom I_K und der Lichtintensität J_{Ph}

Leerlaufspannung U_L [V]	Abstand+Offset d' [cm]	Abstand d [cm]	Lichtintensität J_{Ph} [mW]
$1,87 \pm 0,01$	$99,0 \pm 0,1$	$81,5 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,1$
$1,89 \pm 0,01$	$95,0 \pm 0,1$	$77,5 \pm 0,2$	$7,2 \pm 0,1$
$1,92 \pm 0,01$	$91,0 \pm 0,1$	$73,5 \pm 0,2$	$8,0 \pm 0,1$
$1,94 \pm 0,01$	$87,0 \pm 0,1$	$69,5 \pm 0,2$	$9,0 \pm 0,1$
$1,96 \pm 0,01$	$83,0 \pm 0,1$	$65,5 \pm 0,2$	$9,8 \pm 0,1$
$1,98 \pm 0,01$	$81,0 \pm 0,1$	$63,5 \pm 0,2$	10 ± 1
$2,00 \pm 0,01$	$74,0 \pm 0,1$	$56,5 \pm 0,2$	13 ± 1
$2,01 \pm 0,01$	$73,0 \pm 0,1$	$55,5 \pm 0,2$	13 ± 1
$2,02 \pm 0,01$	$71,0 \pm 0,1$	$53,5 \pm 0,2$	14 ± 1
$2,03 \pm 0,01$	$69,0 \pm 0,1$	$51,5 \pm 0,2$	14 ± 1
$2,04 \pm 0,01$	$67,0 \pm 0,1$	$49,5 \pm 0,2$	16 ± 1
$2,05 \pm 0,01$	$63,0 \pm 0,1$	$45,5 \pm 0,2$	17 ± 1
$2,08 \pm 0,01$	$59,0 \pm 0,1$	$41,5 \pm 0,2$	19 ± 1
$2,09 \pm 0,01$	$55,0 \pm 0,1$	$37,5 \pm 0,2$	22 ± 1
$2,11 \pm 0,01$	$51,0 \pm 0,1$	$33,5 \pm 0,2$	24 ± 1

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung der Abhängigkeit der Leerlaufspannung U_L von der Lichtintensität J_{Ph}

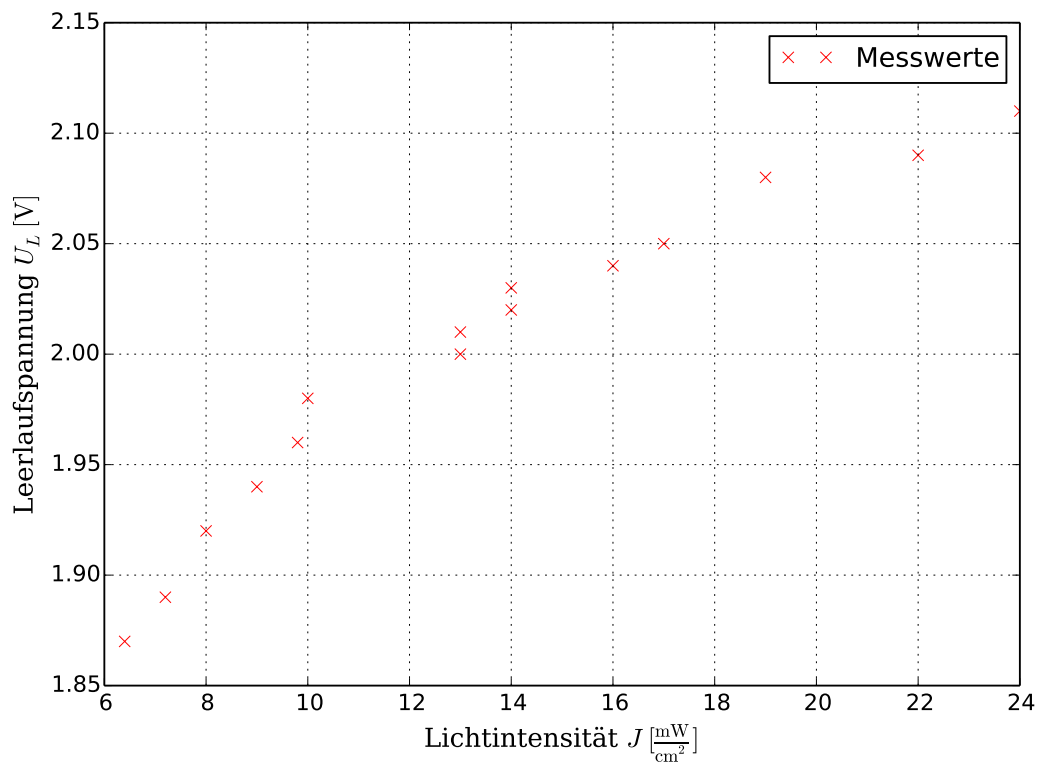


Abbildung 5: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Leerlaufspannung U_L und der Lichtintensität J_{Ph}

4.3 Bestimmung der I-U-Kennlinie

In den folgenden Abschnitten befinden sich die Auswertungen der jeweils für einen festen Abstand d aufgenommenen Messwerte für die Bestimmung der I - U -Kennlinien der untersuchten Solarzelle.

Die Messwerte der I - U -Kennlinie für den jeweils festen Abstand $d = 81,5 \text{ cm}$ befinden sich in Tabelle 4 bis 7. Bei diesen Messwerten handelte es sich um den an der Widerstandsdekade eingestellten Widerstand R und die jeweils aufgenommenen Spannungen U und der Strom I . Desweiteren sind die durch $P_{SZ} = U \cdot I$ bestimmte Leistung der Solarzelle, der daraus berechnete Wirkungsgrad η nach (3) und der Lastwiderstand $R_{\text{last}} = U/I$ aufgeführt. Die für die Berechnung des Wirkungsgrades nötigen Leistungen P_{Ph} und die dafür verwendeten Intensitäten J_{Ph} sind in ?? angegeben.

Abstand d [cm]	Lichtintensität J_{Ph} [mW cm^{-2}]	Lichtleistung P_{Ph} [mW]
$81,5 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,1$	$(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^2$
$60,5 \pm 0,2$	12 ± 1	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$
$48,0 \pm 0,2$	17 ± 1	$(8,5 \pm 0,8) \cdot 10^2$
$40,0 \pm 0,2$	21 ± 1	$(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^3$

Tabelle 3: Lichtintensität und -leistung bei den vier Messungen der Kennlinien

Widerstand R [Ω]	Spannung U [V]	Strom I [mA]	Leistung J [mW]	Lastwiderstand R_{last} [$\text{m}\Omega$]	Wirkungsgrad η [%]
0	$30,30 \pm 0,01$	$-0,2 \pm 0,1$	5 ± 3	$(2 \pm 1) \cdot 10^2$	2 ± 1
10	$31,20 \pm 0,01$	$-0,4 \pm 0,1$	14 ± 3	$(7 \pm 2) \cdot 10^1$	4 ± 1
20	$31,40 \pm 0,01$	$-0,8 \pm 0,1$	24 ± 3	42 ± 6	7 ± 1
30	$31,10 \pm 0,01$	$-1,1 \pm 0,1$	34 ± 3	29 ± 3	11 ± 1
40	$30,10 \pm 0,01$	$-1,4 \pm 0,1$	41 ± 3	22 ± 2	13 ± 1
50	$27,50 \pm 0,01$	$-1,5 \pm 0,1$	41 ± 3	18 ± 1	13 ± 1
60	$24,90 \pm 0,01$	$-1,6 \pm 0,1$	39 ± 2	16 ± 1	12 ± 1
70	$22,20 \pm 0,01$	$-1,6 \pm 0,1$	37 ± 2	$13,5 \pm 0,8$	11 ± 1
80	$20,10 \pm 0,01$	$-1,7 \pm 0,1$	34 ± 2	$11,9 \pm 0,7$	11 ± 1
90	$18,50 \pm 0,01$	$-1,7 \pm 0,1$	32 ± 2	$10,8 \pm 0,6$	10 ± 1
100	$15,70 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	28 ± 2	$8,9 \pm 0,5$	$8,6 \pm 0,9$
110	$14,60 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	26 ± 1	$8,2 \pm 0,5$	$8,1 \pm 0,8$
120	$13,60 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	24 ± 1	$7,6 \pm 0,4$	$7,6 \pm 0,8$
130	$12,70 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	23 ± 1	$7,1 \pm 0,4$	$7,1 \pm 0,7$
140	$11,90 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	22 ± 1	$6,6 \pm 0,4$	$6,7 \pm 0,7$
150	$11,20 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	20 ± 1	$6,2 \pm 0,3$	$6,4 \pm 0,6$
200	$8,60 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	$15,7 \pm 0,9$	$4,7 \pm 0,3$	$4,9 \pm 0,5$
210	$8,20 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	$15,1 \pm 0,8$	$4,5 \pm 0,2$	$4,7 \pm 0,5$
220	$7,90 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	$14,5 \pm 0,8$	$4,3 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,4$
230	$7,60 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	$14,0 \pm 0,8$	$4,1 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,4$
240	$7,30 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	$13,4 \pm 0,7$	$4,0 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,4$
250	$7,10 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	$13,1 \pm 0,7$	$3,9 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,4$

Tabelle 4: Messwerte für die Bestimmung der I - U -Kennlinie der Solarzelle im Abstand $d = 81,5\text{cm}$

4.4 Fehlerrechnung

Widerstand R [Ω]	Spannung U [V]	Strom I [mA]	Leistung J [mW]	Lastwiderstand R_{last} [$k\Omega$]	Wirkungsgrad η [%]
0	$51,50 \pm 0,01$	$-0,3 \pm 0,1$	13 ± 5	$(2,0 \pm 0,8) \cdot 10^2$	$2,2 \pm 0,9$
10	$51,10 \pm 0,01$	$-0,7 \pm 0,1$	37 ± 5	$(7 \pm 1) \cdot 10^1$	6 ± 1
20	$50,90 \pm 0,01$	$-1,2 \pm 0,1$	62 ± 5	42 ± 3	10 ± 1
30	$46,10 \pm 0,01$	$-1,6 \pm 0,1$	73 ± 5	29 ± 2	12 ± 2
40	$38,70 \pm 0,01$	$-1,7 \pm 0,1$	67 ± 4	22 ± 1	11 ± 1
50	$33,10 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	59 ± 3	18 ± 1	10 ± 1
100	$18,50 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	35 ± 2	$9,7 \pm 0,5$	$5,9 \pm 0,7$
110	$17,00 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	33 ± 2	$8,9 \pm 0,5$	$5,4 \pm 0,7$
120	$15,70 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	30 ± 2	$8,1 \pm 0,4$	$5,1 \pm 0,6$
130	$14,50 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	28 ± 1	$7,5 \pm 0,4$	$4,7 \pm 0,6$
140	$13,50 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	26 ± 1	$7,0 \pm 0,4$	$4,4 \pm 0,6$
150	$12,70 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	25 ± 1	$6,5 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,5$
200	$9,60 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	19 ± 1	$4,9 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,4$
210	$9,20 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$18,0 \pm 0,9$	$4,7 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,4$
230	$8,80 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$17,2 \pm 0,9$	$4,5 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,4$
240	$8,40 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$16,5 \pm 0,8$	$4,3 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,3$
250	$8,00 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$15,7 \pm 0,8$	$4,1 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,3$
220	$7,70 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$15,1 \pm 0,8$	$3,9 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,3$

Tabelle 5: Messwerte für die Bestimmung der I - U -Kennlinie der Solarzelle im Abstand $d = 68,5\text{cm}$

Widerstand R [Ω]	Spannung U [V]	Strom I [mA]	Leistung J [mW]	Lastwiderstand R_{last} [$k\Omega$]	Wirkungsgrad η [%]
0	$75,90 \pm 0,01$	$-0,4 \pm 0,1$	27 ± 8	$(2,1 \pm 0,6) \cdot 10^2$	$3,2 \pm 0,9$
10	$75,20 \pm 0,01$	$-1,1 \pm 0,1$	80 ± 8	71 ± 7	9 ± 1
20	$69,20 \pm 0,01$	$-1,6 \pm 0,1$	114 ± 7	42 ± 3	13 ± 2
30	$54,40 \pm 0,01$	$-1,8 \pm 0,1$	100 ± 5	30 ± 2	12 ± 1
40	$43,80 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	83 ± 4	23 ± 1	10 ± 1
50	$36,50 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	71 ± 4	19 ± 1	$8,3 \pm 0,9$
100	$19,50 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	39 ± 2	$9,8 \pm 0,5$	$4,6 \pm 0,5$
110	$17,90 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	36 ± 2	$8,9 \pm 0,4$	$4,2 \pm 0,5$
120	$16,40 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	33 ± 2	$8,2 \pm 0,4$	$3,9 \pm 0,4$
130	$14,80 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	30 ± 1	$7,4 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,4$
140	$13,90 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	28 ± 1	$6,9 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,4$
150	$13,00 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	26 ± 1	$6,5 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,3$
200	$10,00 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	20 ± 1	$5,0 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,3$
210	$9,50 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	19 ± 1	$4,7 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$
220	$9,10 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$18,3 \pm 0,9$	$4,5 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$
230	$8,70 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$17,5 \pm 0,9$	$4,3 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$
240	$8,30 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$16,7 \pm 0,8$	$4,1 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$
250	$8,00 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$16,1 \pm 0,8$	$4,0 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$

Tabelle 6: Messwerte für die Bestimmung der I - U -Kennlinie der Solarzelle im Abstand $d = 48,0\text{cm}$

Widerstand $R [\Omega]$	Spannung $U [V]$	Strom $I [mA]$	Leistung $J [mW]$	Lastwiderstand $R_{\text{last}} [k\Omega]$	Wirkungsgrad $\eta [\%]$
0	$101,80 \pm 0,01$	$-0,5 \pm 0,1$	$(5 \pm 1) \cdot 10^1$	$(2,1 \pm 0,4) \cdot 10^2$	5 ± 1
10	$100,20 \pm 0,01$	$-1,4 \pm 0,1$	$(1,4 \pm 0,1) \cdot 10^2$	70 ± 5	14 ± 2
20	$76,40 \pm 0,01$	$-1,9 \pm 0,1$	142 ± 8	41 ± 2	14 ± 1
30	$53,80 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	105 ± 5	27 ± 1	10 ± 1
40	$43,40 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	86 ± 4	22 ± 1	$8,2 \pm 0,9$
50	$36,40 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	73 ± 4	$18,2 \pm 0,9$	$6,9 \pm 0,7$
100	$19,50 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	40 ± 2	$9,6 \pm 0,5$	$3,8 \pm 0,4$
110	$17,90 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	37 ± 2	$8,8 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,4$
120	$16,60 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	34 ± 2	$8,1 \pm 0,4$	$3,2 \pm 0,3$
130	$15,30 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	31 ± 2	$7,5 \pm 0,4$	$3,0 \pm 0,3$
140	$14,20 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	29 ± 1	$7,0 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,3$
150	$13,20 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	27 ± 1	$6,5 \pm 0,3$	$2,6 \pm 0,3$
200	$10,10 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	21 ± 1	$5,0 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$
210	$9,60 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	19 ± 1	$4,7 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$
220	$9,10 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$18,5 \pm 0,9$	$4,5 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$
230	$8,80 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$17,9 \pm 0,9$	$4,3 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,2$
240	$8,40 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$17,1 \pm 0,8$	$4,1 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,2$
250	$8,10 \pm 0,01$	$-2,0 \pm 0,1$	$16,4 \pm 0,8$	$4,0 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,2$

Tabelle 7: Messwerte für die Bestimmung der I - U -Kennlinie der Solarzelle im Abstand $d = 40,0\text{cm}$

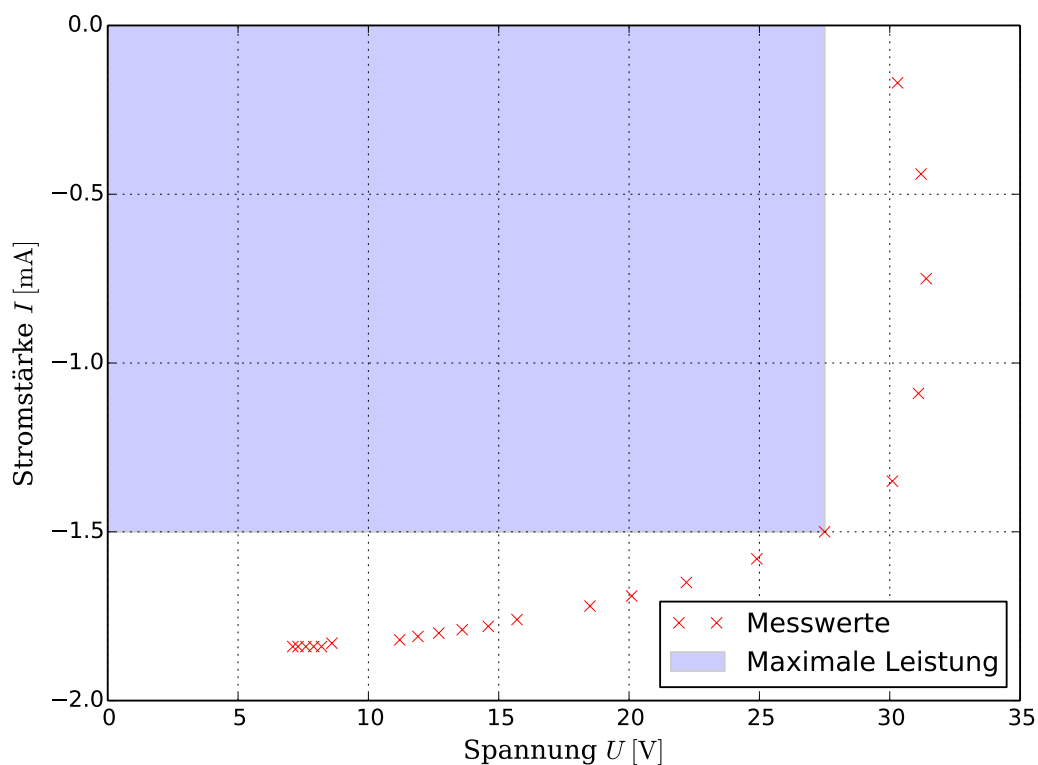


Abbildung 6: Grafische Darstellung der Messwerte der I - U -Kennlinie im Abstand $81,5\text{cm}$

5 Diskussion

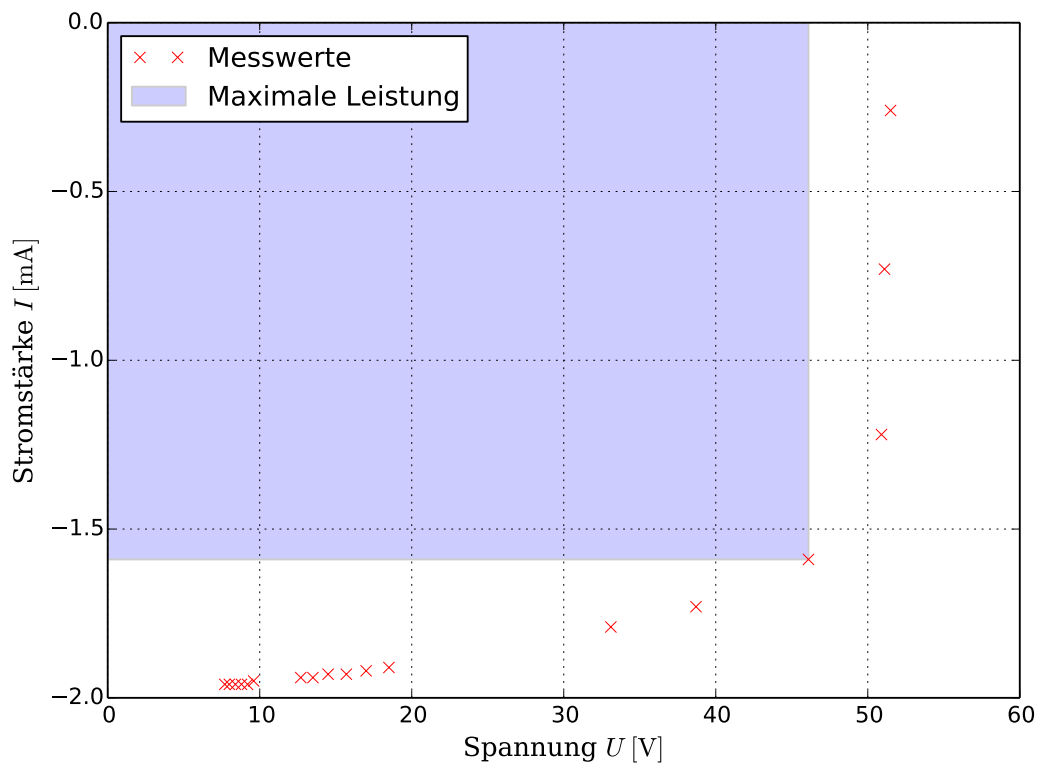


Abbildung 7: Grafische Darstellung der Messwerte der I - U -Kennlinie im Abstand 60,5 cm

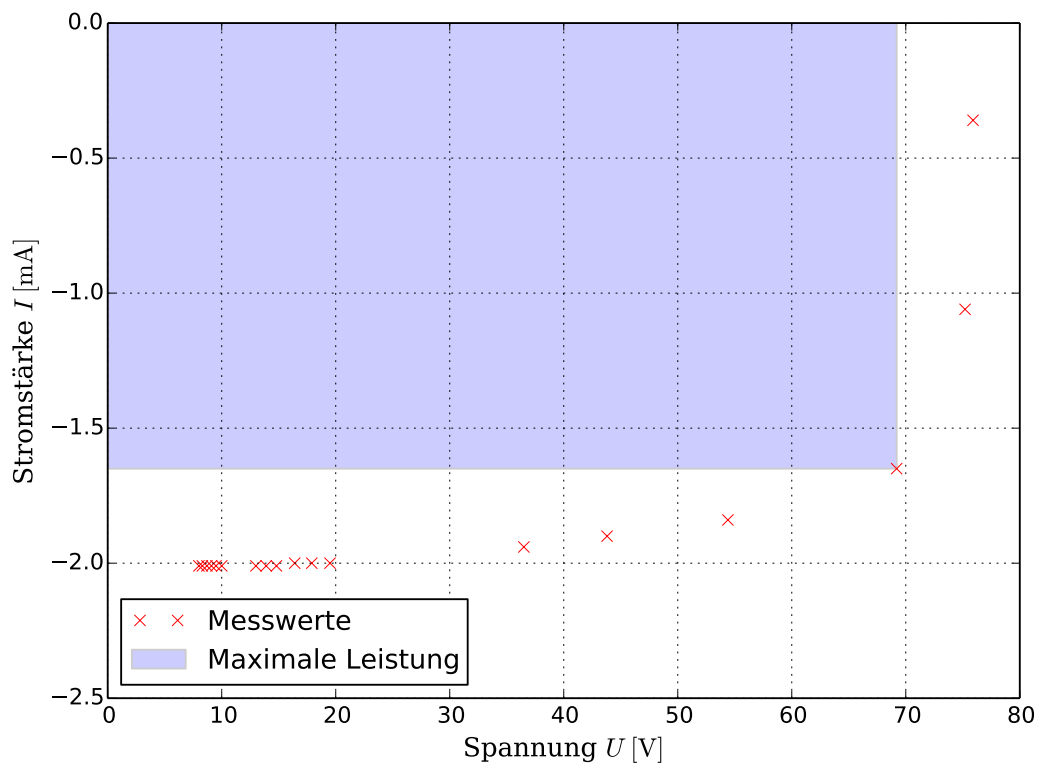


Abbildung 8: Grafische Darstellung der Messwerte der I - U -Kennlinie im Abstand 48,0 cm

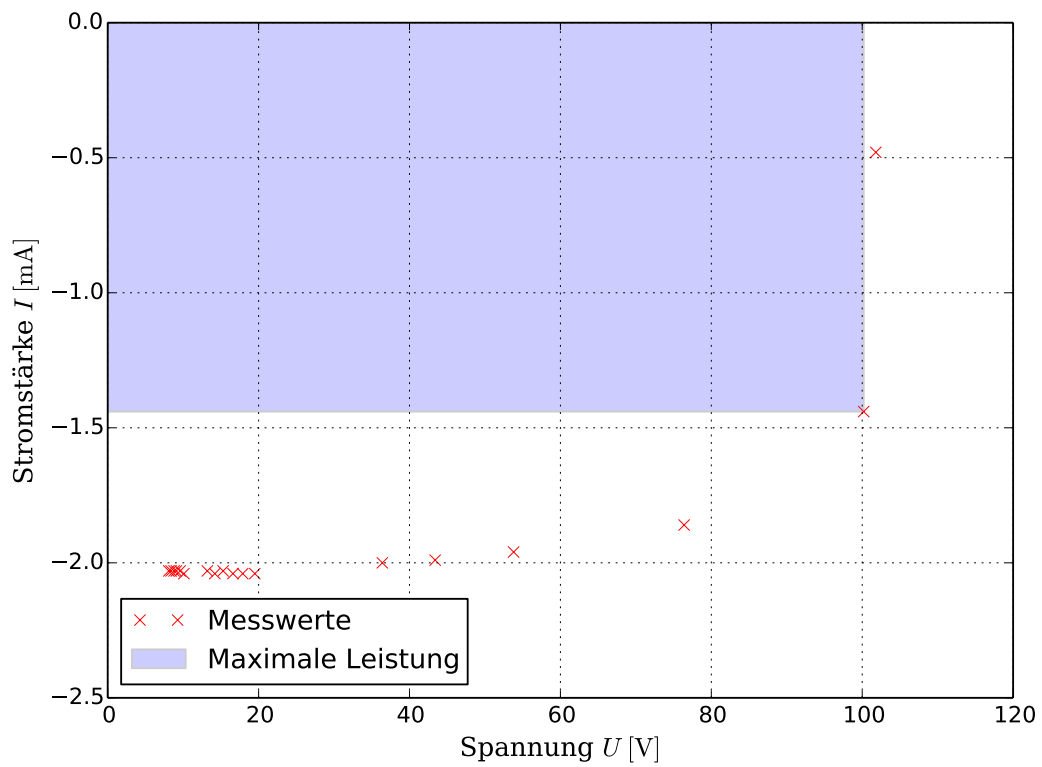


Abbildung 9: Grafische Darstellung der Messwerte der I - U -Kennlinie im Abstand 40,0 cm

Literatur

- [1] Versuchsanleitung. NHV1: Die Solarzelle. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/SolarzelleMP.pdf> (besucht am 07.06.2014).
- [2] SciPy. URL: <http://docs.scipy.org/doc/> (besucht am 02.06.2014).