

Gruppe Nr. 110

Kurs: Mo

WS 2012 / 2013

Versuch: Si-Solarzelle

Namen: Fleig, Georg

Krause, Marcel

Assistent: Horn, Michael

durchgeführt am: 19.11.12

Protokollabgabe am: _____

Note gesamt

+

-

0

Datum: _____

anerkannt: _____

Bemerkung:

Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum

P3

Versuch:

Si-Solarzelle

aus dem Teilgebiet

Festkörperphysik

Versuchsprotokoll

von

Georg Fleig (georg@leech.it)

Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: **110**

Datum der Versuchsdurchführung:

19.11.12

I. Vorbereitung

Vorwort

Wir betrachten in der nachfolgenden Versuchsreihe die Arbeitsweise von Silizium-Solarzellen in Theorie und Praxis. Da die Funktionsweise der Zellen einige tiefere Verständnis der Festkörperphysik voraussetzt, sollen zunächst in einem Block die theoretischen Grundlagen herausgearbeitet werden, die nötig sind, um die Bauteile verstehen zu können. Anschließend werden die einzelnen Versuche zur Si-Solarzelle näher aufgeführt und beschrieben.

Theoretische Grundlagen

Bändermodell

Das Bändermodell ist eines der grundlegendsten quantenmechanischen Modelle der Festkörperphysik zur energietheoretischen Beschreibung in Einkristallen. Mit Hilfe des Modells lassen sich einfache Beschreibungen der Leitungseigenschaften diverser Festkörper sowie Unterscheidungen zwischen Leitern, Halbleitern und Isolatoren vornehmen. Als Idealisierung betrachtet man perfekte Einkristalle, die aus unendlich vielen, äquidistanten Atomrümpfen aufgebaut sind.

Ein einzelnes Atom besitzt nach dem quantenmechanischen Modell diskrete Energiewerte, die im wesentlichen von der Ordnungszahl des Atoms abhängen. Betrachtet man die Lösung der dreidimensionalen Schrödingergleichung als ein Modell der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen, so lassen sich diese diskreten Energieniveaus veranschaulichen. Betrachtet man diese Atome nun in einem streng periodischen Gitter, so überlappen die einzelnen, von der Lösung der Schrödingergleichung vorhergesagten Orbitale zu sogenannten Bändern.

Es ergeben sich dadurch für die Elektronen des Atomgitters verschiedene Zustände, die sowohl gebun-

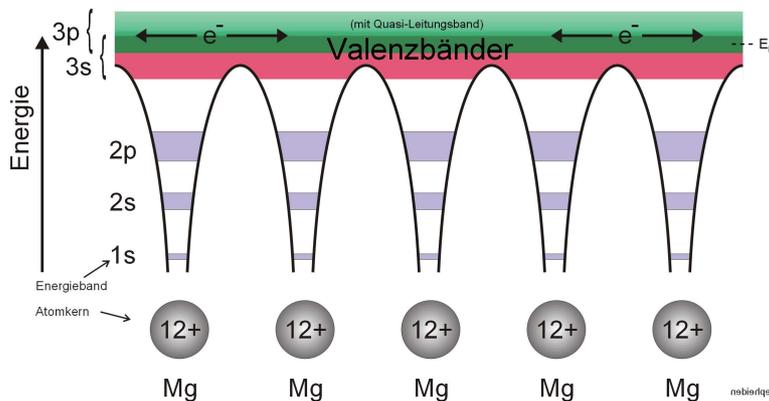


Abbildung 1: Bändermodell am Beispiel des Mg-Gitters (Quelle: [4])

den als auch quasifrei sein können. Am absoluten thermischen Nullpunkt, also bei einer Temperatur von Null Kelvin, ist stets das Valenzband das am höchsten besetzte Energieband des Kristalls. Die Höhe dieses Energieniveaus ist abhängig von der Fermi-Energie des Festkörpers, die im Wesentlichen die höchstmögliche Energie eines einzelnen Fermions in einem Vielteilchensystem aus lauter Fermionen angibt. Neben dem Valenzband existiert noch ein sogenanntes Leitungsband, welches für die elektrischen Leitungseigenschaften von Festkörpern verantwortlich ist. Die Bandstruktur ist in Abbildung 1 anhand

eines Magnesiumgitters dargestellt.

Es ist möglich, dass das Valenz- und das Leitungsband energetisch voneinander getrennt sind durch eine

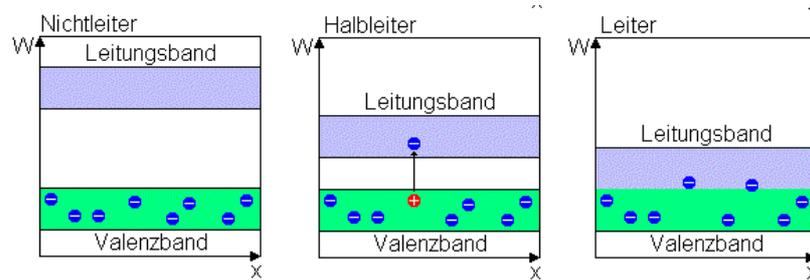


Abbildung 2: Übersicht über die drei Leitertypen (Quelle: [5])

sogenannte Bandlücke. Diese Lücke kann von Elektronen sowohl durch thermische Anregung als auch durch optische überwunden werden. Man kann die Eigenschaften von Festkörpern anhand der Größe der Bandlücke wesentlich in drei Gruppen einteilen: Leiter, Halbleiter und Isolatoren. Eine Übersicht findet sich dabei in Abbildung 2. Gleichermäßen wichtig für alle Untergruppen ist die Besetzung der jeweiligen Bänder. Ein voll besetztes Band trägt genauso wenig zum Ladungstransport bei wie ein leeres, daher sind für eine Leitfähigkeit stets teilbesetzte Bänder von Nöten.

- **Isolatoren**

Die Bandlücke liegt bei Isolatoren im Bereich über etwa 4 eV, sodass sowohl bei Raumtemperatur als auch bei höheren Temperaturen die Tunnelwahrscheinlichkeit der Elektronen im Valenzband zu gering ist, als dass sich ein wesentlicher Anteil der Elektronen im Leitungsband sammeln könnten. Da auf diese Weise das Valenzband voll und das Leitungsband praktisch nicht besetzt sind, ergibt sich keine elektrische Leitfähigkeit.

- **Halbleiter**

Bei Halbleitern liegt die Bandlücke in Bereichen zwischen 0,1 eV und 4 eV. Hier ist die Bandlücke gering genug, sodass sie die Elektronen entweder aufgrund von thermischer Anregung oder durch die Absorption eines Photons überwinden können. Gleichzeitig hinterlässt das Elektron dann eine Lücke im Valenzband, die von benachbarten Elektronen aufgefüllt werden kann. Man findet auf diese Weise ein teilbesetztes Valenz- sowie Leitungsband vor, sodass sich eine Leitfähigkeit des Halbleiters ergibt.

- **Leiter**

Überlappen sich das Valenz- und das Leitungsband, so spricht man von einem Leiter. Da keine Energielücke vorhanden ist, befinden sich immer einige Elektronen im Leitungsband, sodass sich eine permanente elektrische Leitfähigkeit ergibt. Ein Beispiel für Leiter bildet die Elementgruppe der Metalle.

Für die heutige Versuchsreihe wollen wir einen Blick auf die Halbleiter werfen. Deren charakteristische Leitungseigenschaften lassen sich gezielt durch sogenanntes Dotieren verändern.

Dotierung von Halbleitern

Unter der Dotierung von Halbleitern versteht man das gezielte Hinzufügen von Fremdatomen in ein einatomares Wirtsgitter. Das Fremdatom nimmt dabei den regulären Gitterplatz eines Atoms des Wirtsgitters ein. Am einfachsten lässt sich die Dotierung am Beispiel des Silizium erklären, welches häufig als Halbleitermaterial verwendet wird. Je nachdem, welches Fremdatom man einbringt, kann man so Silizium p - oder n -dotieren. Silizium befindet sich im Periodensystem der Elemente in der vierten Hauptgruppe und besitzt damit vier Valenzelektronen, die für kovalente Bindungen aufgebraucht werden können. Bildet sich ein ideales Siliziumgitter aus, so nehmen alle beteiligten Siliziumatome Edelgaskonfiguration an.

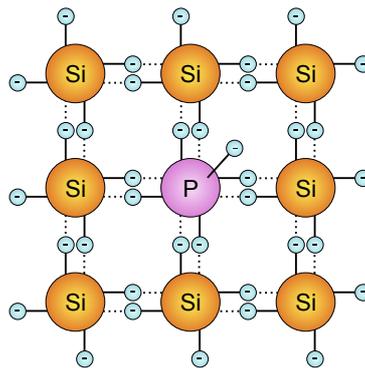


Abbildung 3: Beispiel einer n -Dotierung am Si-Kristall (Quelle: [6])

Tauscht man ein Siliziumatom mit einem Phosphoratom aus, welches fünf Valenzelektronen besitzt, so gehen vier davon in die kovalente Bindung mit umgebenden Siliziumatomen über, während eines ungebunden bleibt. Dieses quasifreie Elektron befindet sich energetisch knapp unterhalb des Leitungsbands und kann somit beispielsweise durch thermische Anregung einfach in dieses durchtunneln. Da durch die Dotierung ein zusätzliches, quasifreies Elektron in das Gitter eingebracht wird, nennt man diese Methode n -Dotierung.

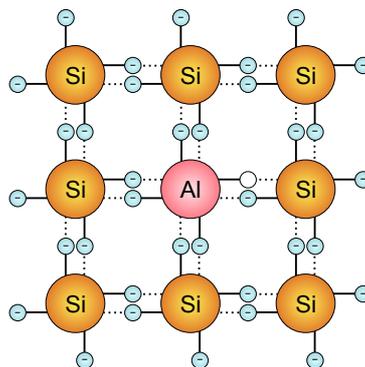


Abbildung 4: Beispiel einer p -Dotierung am Si-Kristall (Quelle: [7])

Bringt man hingegen durch Austausch beispielsweise ein Aluminiumatom in das Gitter ein, welches nur drei Valenzelektronen besitzt, so entsteht eine Lücke im Gitter. Legt man von außen eine Spannung an, so wandern Gitterelektronen in diese Löcher, wodurch neue Löcher entstehen. Es hat praktisch den

Anschein, als würden die Löcher als positive Ladungsträger durch den Halbleiter wandern, weshalb man diese Form der Dotierung auch *p*-Dotierung nennt.

Unabhängig von der Art der Dotierung verbessern sich also die Leitungseigenschaft des Halbleiters durch Einbringen von Fremdatomen. Kombiniert man nun Halbleiter, die auf verschiedene Weise dotiert wurden, so kann man interessante neue Materialien erschaffen. Eine Art neue Festkörperklasse, die dann entsteht, kennzeichnet sich durch den sogenannten *p-n*-Übergang aus.

Der *p-n*-Übergang

Durch das Zusammenfügen eines *p*- sowie eines *n*-dotierten Halbleiters entsteht ein Festkörper mit einem *p-n*-Übergang. Es hat sich herausgestellt, dass Festkörper dieser Art einige besondere Eigenschaften aufweisen, welche sie auch für die Industrie und Forschung sehr attraktiv machen. Heutzutage finden Materialien mit *p-n*-Übergang beispielsweise in Transistoren oder Dioden Anwendung.

Bringt man die verschieden dotierten Halbleiter aneinander, so findet nahe der Grenzschicht ein Re-

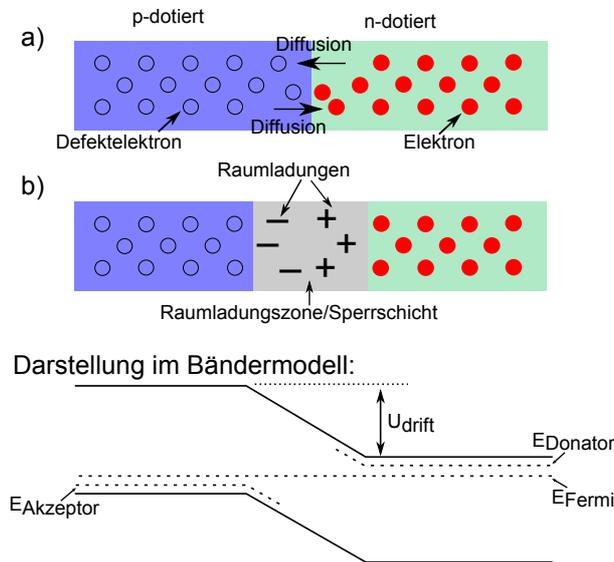


Abbildung 5: Ausbau des *p-n*-Übergangs (Quelle: [8])

kombinationsprozess statt, denn die quasifreien Elektronen des *n*-dotierten Halbleiters wandern dann in die Löcher des *p*-dotierten Halbleiters. Auf diese Weise entsteht um die Grenze der Materialien herum eine Sperrschicht, die keine Löcher oder quasifreien Elektronen enthält. Außerdem ist dann durch den Elektronendrift der *n*-dotierte Bereich positiv und der *p*-dotierte Bereich negativ geladen, weil beide vor dem Zusammenbringen elektrisch neutral waren. Dieses Prinzip ist in Abbildung 5 dargestellt.

Durch die Ausbildung unterschiedlicher Raumladungszonen existiert nun also eine Spannung zwischen dem *p*-dotierten und dem *n*-dotierten Bereich. In der Sichtweise des Bandmodells haben sich die Fermi-Niveaus der beiden Halbleiter angeglichen, wodurch sowohl das Leitungs- wie auch das Valenzband einen Knick erfahren. Anhand der Halbleiterdiode wollen wir das charakteristische Verhalten von *p-n*-Übergängen unter Vorspannungen näher untersuchen.

p - n -Übergang unter Vorspannung

Legt man von außen an einen p - n -Übergang eine Spannung an, so zeigt der Halbleiter unterschiedliche Eigenschaften, je nachdem, in welcher Polarität die Spannung anliegt. Man bezeichnet den Halbleiter dann als Diode und dieses unterschiedliche Verhalten als Sperr- und Durchlassrichtung. Die charakteristischen Vorgänge im Halbleiter sind dabei in Abbildung 6 gekennzeichnet.

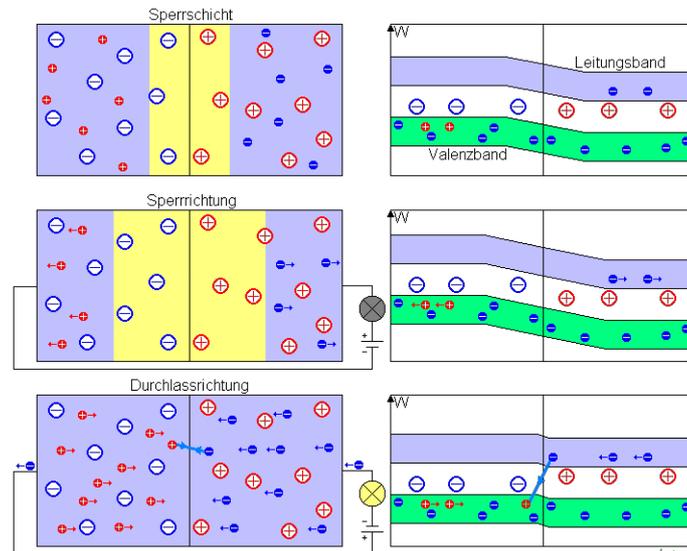


Abbildung 6: Ausbau des p - n -Übergangs (Quelle: [9])

- **Sperrrichtung**

Betreibt man die Diode in Sperrrichtung, so legt man ein positives Potential an das n -dotierte Ende und ein negatives Potential an das p -dotierte Ende der Diode. Durch diese Saugspannung trennt man die quasifreien Elektronen noch stärker von den Elektronenlöchern und die Sperrschicht in der Diode wird größer. Außer einem kurzen Ausgleichsstrom, welcher aufgrund der Elektronen- und Löcherdrifts entsteht, verhält sich die Diode in Sperrrichtung wie ein Isolator. Erhöht man die Spannung an der Diode weiter bis zur sogenannten Durchbruchspannung, so steigt der Strom schlagartig an. Ab dieser Stelle wird die Diode auch in Sperrrichtung zum Leiter. Häufig wirkt sich dieser Effekt allerdings nachteilig auf die Diode aus, sodass es vermieden werden sollte, Dioden derart zu betreiben.

- **Durchlassrichtung**

Kehrt man die Polarität an der Diode um, bringt also ein positives Potential an das p -dotierte Ende et vice versa, so betreibt man die Diode in Durchlassrichtung. Auf diese Weise werden die quasifreien Elektronen und die Lücken näher zueinander gebracht, sodass die Sperrschicht geringer wird oder gar ganz verschwindet. Auf diese Weise kann durch die Diode also ein Strom fließen, man betrachtet sie als Leiter. Bis zum Erreichen der Sperrspannung, also eben jener Spannung, die benötigt wird, um die Sperrschicht zum Verschwinden zu bringen, ist der Strom-Spannungsverlauf hinreichend linear. Danach stellt sich ein exponentieller Zusammenhang ein, der dann erneut in einen linearen Strom-Spannungs-Verlauf mit deutlich größerer Steigung übergeht. Der gesamte Verlauf ist in der Kennlinie in Abbildung 7 skizziert.

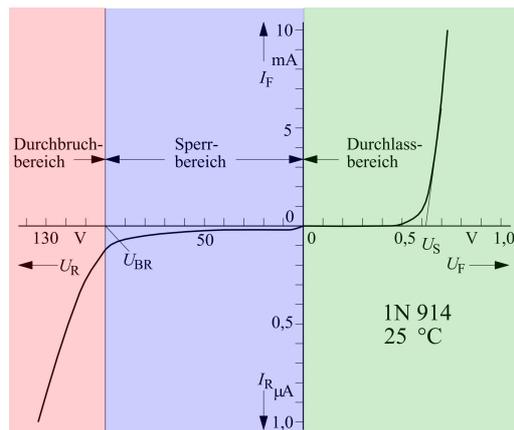


Abbildung 7: Kennlinie einer Halbleiterdiode (Quelle: [10])

Halbleiter unter Lichteinstrahlung

Es wurde bereits zuvor angemerkt, dass Anregungseffekte im Halbleiter nicht nur thermisch, sondern auch optisch angeregt werden können. Da dieser Prozess ein zentraler Bestandteil des Versuchs darstellt, werden wir uns noch mit den Effekten von Lichteinstrahlung auf Halbleiter und später speziell auf den p - n -Übergang beschäftigen. Bezeichnen wir mit E_g die Energiebreite der Bandlücke und mit ω die Kreisfrequenz eines einfallenden Photons, so lassen sich im Wesentlichen drei Fälle unterscheiden.

- $\hbar\omega < E_g$
Liegt die Photonenenergie unterhalb der Energie der Bandlücke, so durchläuft das Photon den Halbleiter im Wesentlichen, ohne mit ihm wechselwirken zu können. Dieser Fall ist für uns nicht weiter von Interesse.
- $\hbar\omega \geq E_g$
Tritt der Fall ein, dass die Photonenenergie im Bereich der Bandlückenenergie liegt, so kann das Photon absorbiert werden. Es entsteht dann ein zusätzliches Elektronen-Loch-Paar.
- $\hbar\omega \gg E_g$
Ist das Photon wesentlich energiereicher als die Energie der Bandlücke, so entsteht ebenfalls ein zusätzliches Elektronen-Loch-Paar. Die restliche, überschüssige Energie wird in Form von kinetischer Energie auf das Elektron übertragen, welches dann weiter Energie an das Kristallgitter abgibt. Durch diese Schwingungen entsteht im Kristall zusätzliche Wärme. Man bezeichnet diesen Prozess auch als Relaxation.

Da der p - n -Übergang auch unter Lichteinstrahlung wieder interessante Effekte aufweist, soll auf ihn im folgenden noch gesondert eingegangen werden.

p - n -Dioden als Solarzellen

Bestrahlt man Materialien mit einem p - n -Übergang mit Licht ausreichend hoher Energie, so kommt es wie im vorigen Abschnitt beschrieben zur Bildung zusätzlicher Elektronen-Loch-Paare. Da in p - n -Materialien stets ein internes elektrisches Feld aufgrund der Potentialdifferenz zwischen p - und n -

dotierter Schicht vorliegt, werden die quasifreien Ladungsträger schnell voneinander getrennt. Die Elektronen wandern dabei zum n -, die Löcher hingegen zum p -dotierten Ende. Das Funktionsschema dieser einfachen Solarzellen ist in Abbildung 8 dargestellt. Bringt man an eine solche Diode elektrische Kontak-

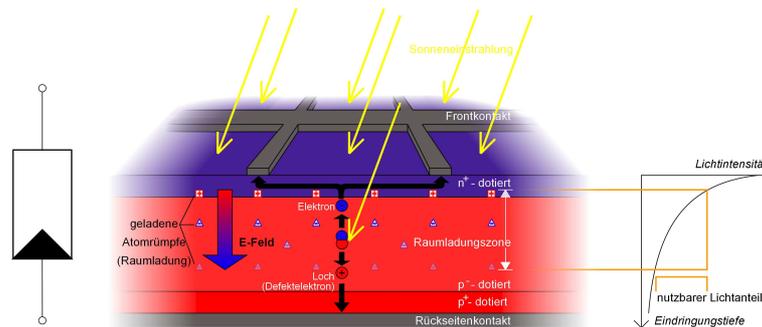


Abbildung 8: Der p - n -Übergang unter Sonneneinstrahlung (Quelle: [11])

te in Form eines Gitters am oberen und einer gewöhnlichen Platte am unteren Ende an, so kann man den durch die Wanderung der Elektronen und Löcher entstehenden Strom abgreifen und direkt nutzen oder speichern. Um den Wirkungsgrad der Solarzelle zu erhöhen sollte darauf geachtet werden, eine möglichst dünne n -dotierte und eine recht dicke p -dotierte Schicht zu verwenden. Dies liegt im Wesentlichen an der exponentiell abnehmenden Eindringtiefe der Photonen in das Halbleitermaterial.

Diodenkennlinie unter Lichteinstrahlung

Wir wollen abschließend noch den Einfluss der Lichteinstrahlung auf die Kennlinie der Solarzelle (respektive der entsprechenden Diode) diskutieren. Durch die Beleuchtung fließt auch ohne von außen angelegte Spannung ein Kurzschlussstrom I_K , welcher als Offset im Wesentlichen von der Lichtintensität abhängt. Für den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung U und dem erhaltenen Strom I gilt dann:

$$I = I_S \exp\left(\frac{eU}{\beta k_B T}\right) - (I_K + I_S) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet I_S den Sperrstrom und β den Idealitätsfaktor mit $\beta \in [1, 2]$. Je mehr Störstellen in der Diode vorhanden sind, desto mehr strebt β gegen seinen oberen Grenzwert et vice versa. Den genauen Einfluss der Lichteinstrahlung auf die Kennlinie entnimmt man der Abbildung 9.

Entnimmt man der Solarzelle die maximale Leistung $P_{\max} = U_{\max} I_{\max}$, so definiert man sich einen sogenannten Füllfaktor FF mit

$$FF = \frac{U_{\max} I_{\max}}{U_L I_K} < 1 \quad (2)$$

wo U_L die Leerlaufspannung bezeichne. Um ein geeignetes Material für Solarzellen zu finden kann man Kennlinien unter Lichteinstrahlung aufnehmen und dabei die Füllfaktoren vergleichen. Je mehr der Füllfaktor gegen Eins strebt, umso idealer arbeitet die Solarzelle. Es stellt sich dabei heraus, dass man einen geeignete Kompromiss eingehen muss hinsichtlich der Dicke der Sperrschichten. Ist diese zu groß, so würde sich kein Strom mehr einstellen, da die Absorptionsrate in den äußeren Bereichen zu groß wäre. Wählt man die Sperrschicht hingegen zu gering aus, so hat man zwar einen hohen Strom, allerdings ist dann die Leistungsausbeute sehr gering, da die von der Dicke der Sperrschicht abhängige Leerlaufspannung rasch abfällt.

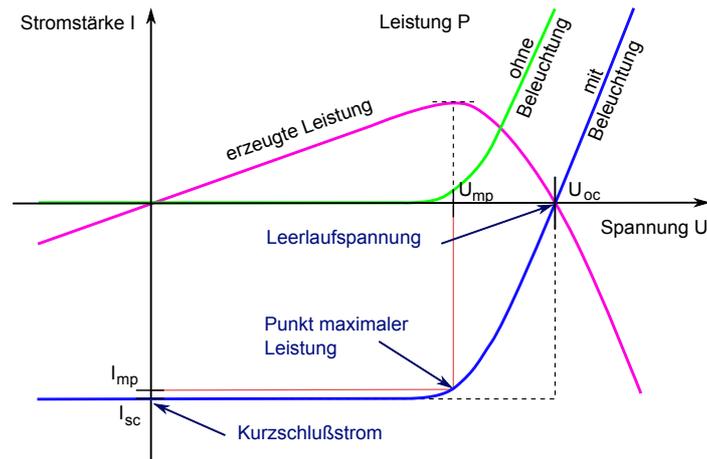


Abbildung 9: Abhängigkeit der Kennlinie von der Beleuchtung (Quelle: [12])

Aufgabe 1: Kennlinien intensitätsabhängig messen

In der ersten Aufgabe werden wir für drei verschiedene Solarzellen A , B und C die Kennlinie in den Spannungsbereichen $U \in [-4, 0, 6]$ V in Schritten von $0,01$ V aufnehmen. Die Variation der Lichtintensität erfolgt dabei durch Veränderung des Abstands der Solarzelle von der annähernd punktförmigen Lichtquelle.

Gemessen werden soll der Kurzschlussstrom sowie die Leerlaufspannung. Damit lassen sich Rückschlüsse auf den Idealitätsfaktor β sowie auf den Wirkungsgrad η und den Füllfaktor FF schließen. Für die Leerlaufspannung betrachten wir in Gleichung 1 $I(U_L) = 0$ und erhalten so:

$$U_L = \frac{\beta k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_K}{I_S} + 1 \right) \approx \frac{\beta k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_K}{I_S} \right) \quad (3)$$

Da der Faktor $\frac{I_K}{I_S}$ ein Maß für die eingestrahelte Leistung P_E ist, erwarten wir also einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Leerlaufspannung und Leistung. Außerdem lässt sich aus dieser Gleichung dann direkt der Idealitätsfaktor bestimmen.

Im Versuch werden wir eine Lampe der Leistung $P_L = 55$ W verwenden. In einem Abstand r von der Lampe ergibt sich auf der Fläche A die eingestrahelte Leistung P_E gemäß dem Abstandsgesetz zu:

$$P_E = P_L \frac{A}{4\pi r^2} \quad (4)$$

Die maximalen Werte der Spannung und der Stromstärke können ebenfalls direkt aus der Kennlinie abgelesen werden. Damit lässt sich auch direkt der Wirkungsgrad bestimmen:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_E} = \frac{U_{\max} I_{\max}}{P_L} \frac{4\pi r^2}{A} \quad (5)$$

Im Vergleich zur Einstrahlung durch die Halogenlampe dürfte der Wirkungsgrad unter der Einstrahlung von Sonnenlicht höher ausfallen, da die Sonne als hinreichend idealer schwarzer Strahler höherer Tem-

peratur auch einen höheren Frequenzbereich abdeckt als die Halogenlampe.

Mit Gleichung 2 schließlich erfolgt die Berechnung des Füllfaktors. Dieser kann dann noch mit theoretisch erreichbaren Werten verglichen werden, die sich durch Berechnung mit der Formel aus der Vorbereitungsmappe ergeben.

Aufgabe 2: Kurzschlussstrom spektral aufgelöst messen

Ziel der zweiten Aufgabe ist die Bestimmung des Bandabstands von Silizium. Wir werden dabei den Kurzschlussstrom der Solarzellen in Abhängigkeit von der Photonenenergie messen. Ein an einem Monochromator befestigter Schrittmotor sorgt dafür, dass die von der Lichtquelle ausgehende Wellenlänge schrittweise verändert werden kann.

Wir werden dabei feststellen, dass ab einer gewissen Wellenlänge der Kurzschlussstrom deutlich zusammenbrechen wird. Dies liegt darin begründet, dass die Photonen dann nicht mehr genug Energie haben, um die Bandlücke zu überwinden. Bestimmt man diese Wellenlänge λ_0 , bei der der Einbruch stattfindet, so ergibt sich die Energiebreite der Bandlücke einfach zu:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_0} \quad (6)$$

Aufgabe 3: Kennlinien temperaturabhängig messen

Nachdem zuvor bereits der Einfluss der Intensität und der Wellenlänge auf die Kennlinien untersucht wurden, betrachten wir in der dritten Aufgabe nun den Einfluss der Temperatur. Auch hier wollen wir wieder den Kurzschlussstrom I_K , den Sperrstrom I_S und die Leerlaufspannung U_L messen. Wir werden dabei feststellen, dass der Kurzschlussstrom nicht temperaturabhängig ist. Der Sperrstrom hingegen hängt von der Temperatur ab gemäß:

$$I_S = I_{S,0} \exp\left(-\frac{E_g}{\beta k_B T}\right) \quad (7)$$

Setzt man dies in Gleichung 3 für die Leerlaufspannung ein, so erhält man:

$$U_L \approx \frac{\beta k_B T}{e} (\ln(I_K) - \ln(I_{S,0})) + \frac{E_g}{e} \quad (8)$$

Eine Extrapolation der gemessenen Leerlaufspannungen zu $T \rightarrow 0$ liefert also:

$$E_g = eU_L \quad (9)$$

Den Sperrstrom selber können wir gemäß Aufgabenstellung in guter Näherung bei $U = -0,5 \text{ V}$ messen.

Aufgabe 4: Vergleich Solarzelle und Kernenergie

Aufgabe 4 dient rein theoretischen Überlegungen und wird im Zuge der Ausarbeitung ausgeführt.

II. Auswertung

Aufgabe 1: Kennlinien intensitätsabhängig messen

Ziel der ersten Aufgabe war die Untersuchung der Intensitätsabhängigkeit der Kennlinien sowie die Bestimmung charakteristischer Kenngrößen dreier verschiedener Solarzellen. Wir haben zunächst die Kennlinien aller drei Solarzellen *A*, *B* und *C* im Dunkeln vermessen. Dazu wurden sie mit einer Kappe abgeschirmt. Ein in LabView geschriebenes Skript übernahm dabei den größten Teil der Messungen, die Messdaten lagen nachher in Textform zur weiteren Verarbeitung in Origin vor. Unsere aufgenommenen

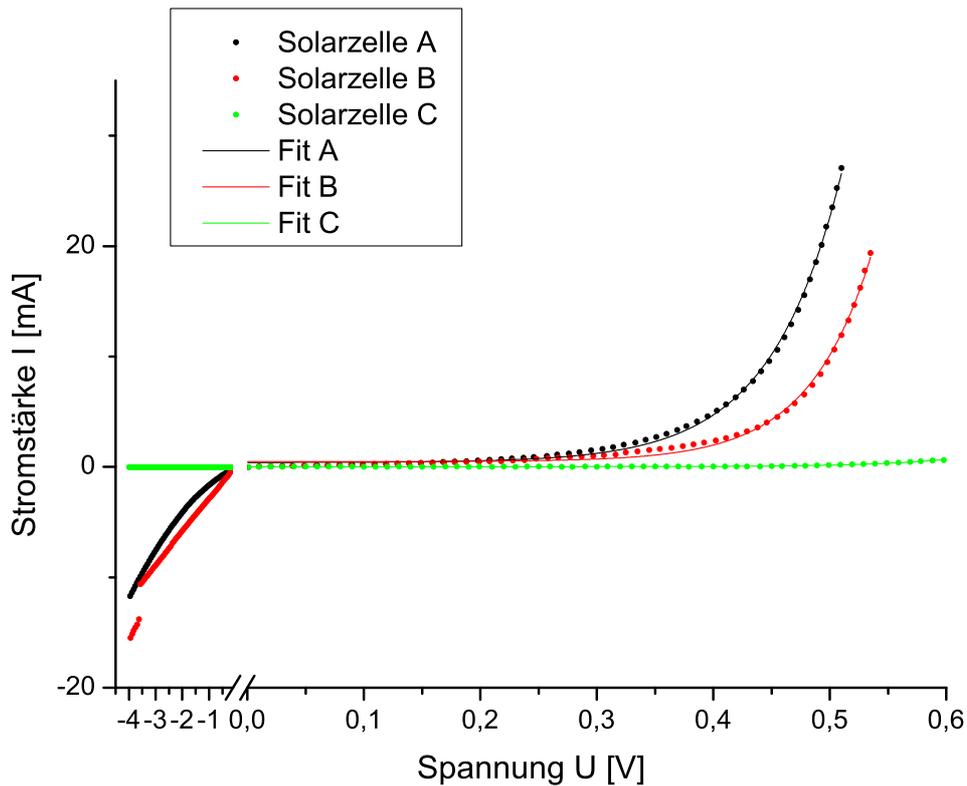


Abbildung 10: Dunkel-Kennlinien der drei Solarzellen

Messdaten für die drei Solarzellen sind in den Tabellen 6 und 7 im Anhang hinterlegt. Wir haben nun die Stromstärke I über der Spannung U aufgetragen und erhielten so die charakteristischen Kennlinien, wie sie in Abbildung 10 zu sehen sind. Da uns der theoretische Verlauf der Kennlinien durch Gleichung 1 bekannt ist, haben wir uns für einen gewöhnlichen exponentiellen Fit der Form

$$I(U) = m \exp(R_0 U) + y_0 \quad (10)$$

entschieden. Die Parameter m , R_0 und y_0 werden dabei direkt mitsamt den jeweiligen Fehlern von Origin geliefert. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt. Man erkennt anhand der Verlaufsformen der Kennlinien schön, dass es sich dabei im Wesentlichen um Dioden handelt.

	m in mA	σm in mA	R_0 in V ⁻¹	σR_0 in V ⁻¹	y_0 in mA	σy_0 in mA
Solarzelle A	$6,10 \cdot 10^{-3}$	$5,79 \cdot 10^{-4}$	16,40	0,19	0,39	0,05
Solarzelle B	$8,70 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	18,63	0,36	0,48	0,05
Solarzelle C	$6,31 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	15,47	0,43	0,02	0,00

Tabelle 1: Regressionsparameter der Dunkel-Kennlinien

Die Tatsache, dass man im Sperrbereich wesentliche Stromstärken feststellen kann lässt zunächst die Vermutung zu, dass es sich hierbei um Durchbrüche handeln könnte. Anhand der genauen Verlaufsformen der Kennlinien erkennt man allerdings, dass dies nicht der Fall ist. Es handelt sich viel mehr um Alterserscheinungen der Solarzellen.

Im weiteren Verlauf des Versuchs haben wir nur noch mit Solarzelle *A* gearbeitet. Es wurden nun von uns die Kennlinien für verschiedene Abstände d zwischen punktförmiger Lichtquelle und Solarzelle aufgenommen. Dabei gingen wir analog vor wie bei der Aufnahme der Dunkel-Kennlinien. Unsere Messwerte finden sich auch hier im Anhang in den Tabellen 8 bis 11. Wieder haben wir die Daten in Origin plotten lassen und erhielten dadurch Kurven, wie sie in Abbildung 11 dargestellt sind. Auch hier wurde direkt wieder eine exponentielle Regression der Form 10 an die Daten gelegt, wodurch sich die Regressionsparameter in Tabelle 2 ergeben haben.

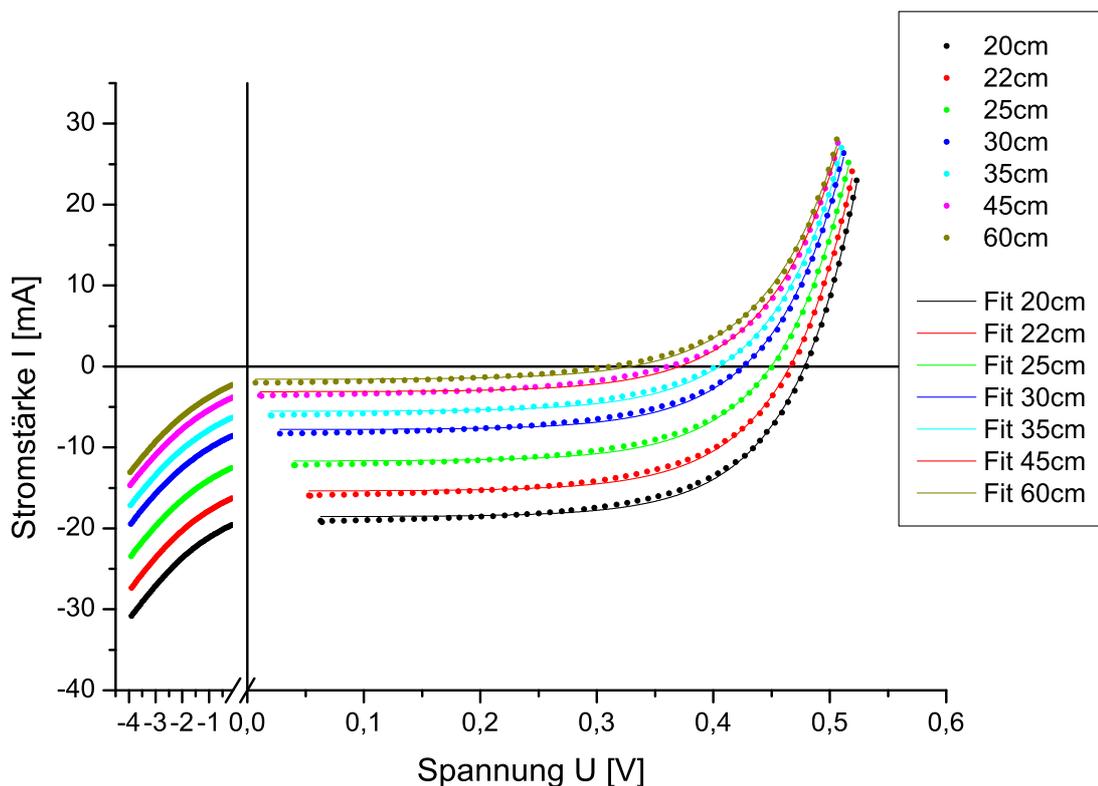


Abbildung 11: Kennlinien der Solarzelle *A* bei verschiedenen Abständen d

d in cm	m in mA	σ_m in mA	R_0 in V^{-1}	σ_{R_0} in V^{-1}	y_0 in mA	σ_{y_0} in mA
20	$3,71 \cdot 10^{-3}$	$3,22 \cdot 10^{-4}$	17,80	0,17	-18,54	0,07
22	$4,86 \cdot 10^{-3}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$	17,30	0,17	-15,37	0,07
25	$5,32 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-4}$	17,11	0,17	-11,67	0,07
30	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$5,39 \cdot 10^{-4}$	16,96	0,19	-7,80	0,07
35	$6,40 \cdot 10^{-3}$	$6,06 \cdot 10^{-4}$	16,71	0,19	-5,54	0,06
45	$6,52 \cdot 10^{-3}$	$6,61 \cdot 10^{-4}$	16,64	0,20	-3,12	0,06
60	$7,15 \cdot 10^{-3}$	$6,87 \cdot 10^{-4}$	16,41	0,19	-1,59	0,06

Tabelle 2: Regressionsparameter des Abhängigkeitsabstands

Bevor wir nun die gesuchten Kenngrößen der Solarzelle bestimmen konnten, haben wir zunächst die Leistung $P = U \cdot I$ durch punktweise Multiplikation unserer Messwerte bestimmt. Da für uns nur der Arbeitsbereich der Solarzelle unter $U = 0,6 \text{ V}$ relevant war, wurden nur die Beträge der sich einstellenden Leistungswerte betrachtet. Dieses Verfahren wurde für jeden Punkt der Kennlinien für alle Abstände durchgeführt. Die sich ergebenden Leistungswerte finden sich im Anhang ebenfalls in den Tabellen 8 bis 11.

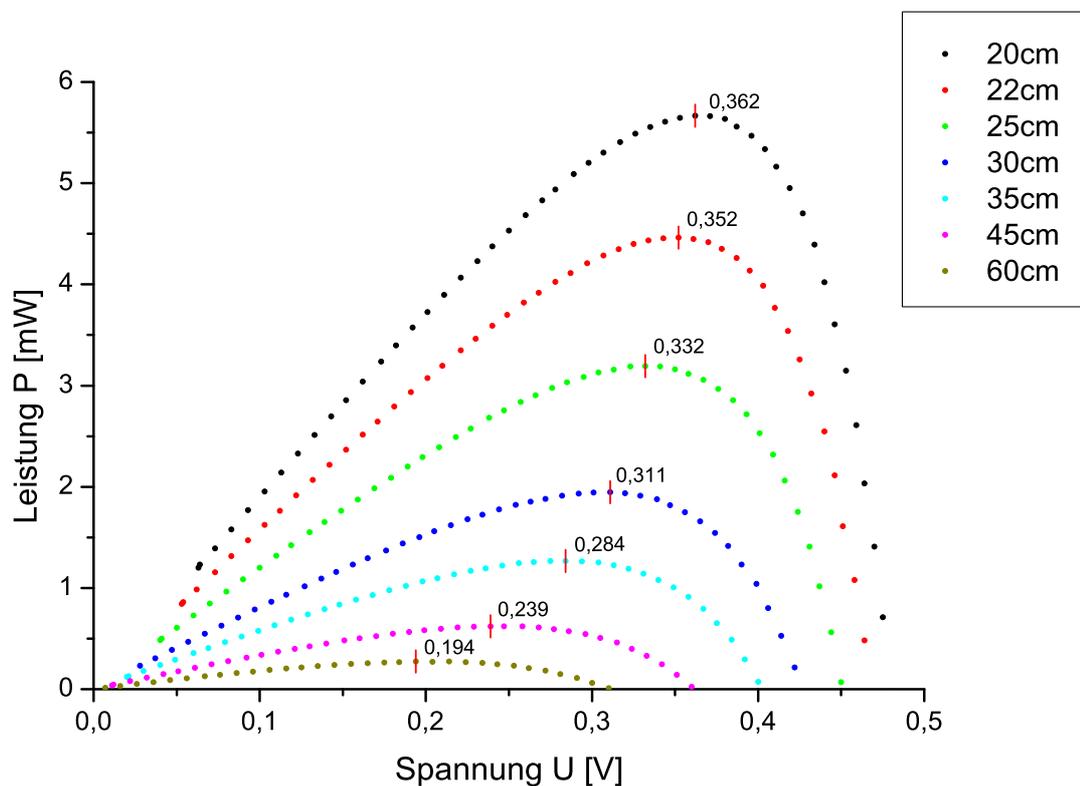


Abbildung 12: Leistung der Solarzelle für verschiedene Abstände

Der Übersichtlichkeit halber haben wir nun die Leistung P über der Spannung U aufgetragen. Man erkennt deutlich, dass sich stets ein Maximalwert einstellt, nämlich bei der Spannung U_{\max} . Es ist auch genau dieser Bereich, wo die Stromstärke I_{\max} den idealsten Beitrag zur Leistungsmaximierung liefert. In Tabelle 3 sind die mit Origin bestimmten Maximalwerte der Leistung, Spannung und damit auch

direkt der Stromstärke eingetragen.

d in cm	U_{max} in V	P_{max} in mW	I_{max} in mA
20	0,362	5,669	15,659
22	0,352	4,462	12,677
25	0,332	3,194	9,620
30	0,311	1,945	6,255
35	0,284	1,267	4,462
45	0,239	0,623	2,605
60	0,194	0,273	1,406

Tabelle 3: Maximalwerte der Leistung für verschiedene Abstände

Damit lassen sich alle gesuchten Kenngrößen nun direkt berechnen. Für die in Gleichung 10 eingeführten Parameter gilt durch Vergleich mit Gleichung 1:

$$m = I_S, \quad R_0 = \frac{e}{\beta k_B T}, \quad y_0 = -(m + I_K) \quad (11)$$

oder umgestellt

$$\beta = \frac{e}{R_0 k_B T}, \quad I_K = -(m + y_0) \quad (12)$$

wobei die auftretenden Konstanten e und k_B aus [13] entnommen werden. Für die Temperatur T wird die Raumtemperatur zu $T \approx 300$ K angenommen. Um die Fehler auf die gesuchten Größen zu bestimmen, wird hier und im Folgenden die Gaußsche Fehlerfortpflanzung genutzt. Als Fehler ergeben sich dann:

$$\sigma_\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial R_0} \sigma_{R_0}\right)^2} = \left|\frac{\beta}{R_0} \sigma_{R_0}\right| \quad (13)$$

$$\sigma_{I_K} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_K}{\partial m} \sigma_m\right)^2 + \left(\frac{\partial I_K}{\partial y_0} \sigma_{y_0}\right)^2} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_{y_0}^2} \quad (14)$$

Die Gleichungen 12 liefern uns also sofort den Kurzschlussstrom I_K und den Idealitätsfaktor β . Um die Leerlaufspannung U_L zu bestimmen, setzen wir in Gleichung 10 einfach $I(U_L) = 0$ und formen nach U_L um:

$$U_L = \frac{1}{R_0} \ln\left(-\frac{y_0}{m}\right) \quad (15)$$

Das Einsetzen der Parameter liefert uns dann die Leerlaufspannung. Hier ergibt sich der Fehler gemäß Gaußscher Fehlerfortpflanzung zu:

$$\sigma_{U_L} = \sqrt{\left(\frac{\partial U_L}{\partial R_0} \sigma_{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial U_L}{\partial y_0} \sigma_{y_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial U_L}{\partial m} \sigma_m\right)^2} = \frac{1}{R_0} \sqrt{(U_L \sigma_{R_0})^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y_0}}{y_0}\right)^2} \quad (16)$$

Somit kennen wir auch alle Größen, die nötig sind, um den Formfaktor FF über Gleichung 2 und den Wirkungsgrad η über Gleichung 6 auszurechnen. Die benötigte Fläche der Solarzellen ist dabei auf dem Aufgabenblatt mit $A_A = 8, 12 \text{ cm}^2$ angegeben. Hierbei ergeben sich die Fehler schließlich über:

$$\sigma_{FF} = \sqrt{\left(\frac{\partial FF}{\partial U_L} \sigma_{U_L}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial I_K} \sigma_{I_K}\right)^2} = |FF| \sqrt{\left(\frac{\sigma_{U_L}}{U_L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_K}}{I_K}\right)^2} \quad (17)$$

$$\sigma_{\eta} = 0 \quad (18)$$

Gleichung 18 folgt daraus, dass der Wirkungsgrad von keiner fehlerbehafteten Größe abhängt. Alle Resultate, die wir so erhalten haben, sind übersichtlich in Tabelle 4 zusammengefasst.

d in cm	I _K in mA	U _L in V	β	FF	FF _{Theorie}	η
20	18,537±0,071	0,478±0,007	2,173±0,021	0,639±0,009	0,661	0,064
22	15,365±0,072	0,466±0,007	2,235±0,023	0,624±0,010	0,650	0,061
25	11,668±0,066	0,450±0,007	2,260±0,023	0,609±0,010	0,640	0,056
30	7,793±0,066	0,426±0,007	2,281±0,025	0,586±0,011	0,626	0,049
35	5,538±0,064	0,405±0,007	2,315±0,026	0,565±0,012	0,612	0,044
45	3,114±0,064	0,371±0,008	2,325±0,029	0,539±0,016	0,591	0,035
60	1,583±0,060	0,329±0,007	2,357±0,028	0,523±0,023	0,561	0,028

Tabelle 4: Kenngrößen der Solarzelle in Abhängigkeit vom Abstand

Die Berechnung des theoretischen Füllfaktors erfolgte mittels Gleichung 37 in der Vorbereitungshilfe[3]. Die von uns experimentell bestimmten Werte sind in den Abbildungen 13 bis 15 noch einmal der Übersicht halber graphisch dargestellt. Bei näherer Betrachtung zeigen sie durchaus Diskussionsbedarf.

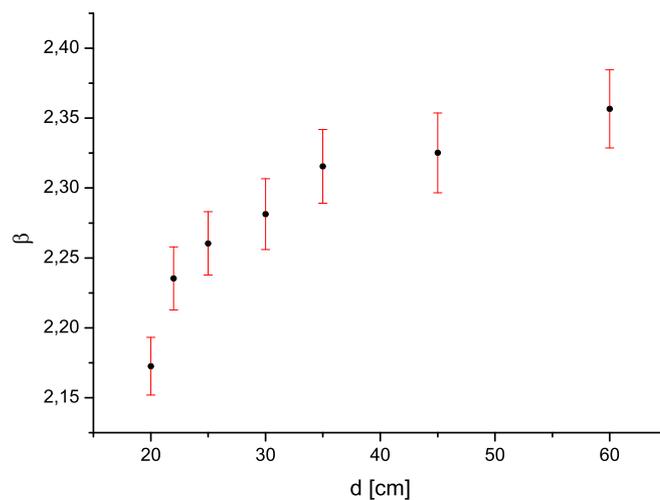


Abbildung 13: Idealitätsfaktor in Abhängigkeit des Abstands

Wir stellen fest, dass der Idealitätsfaktor β selbst mit Standardabweichungen über seinem oberen Grenzwert liegt, daher sind diese Werte von uns eher als unrealistisch anzusehen. Es scheint hierbei einige nicht beachtete Fehler in der Systematik zu geben, die eine hinreichend gute Bestimmung des Faktors erschweren.

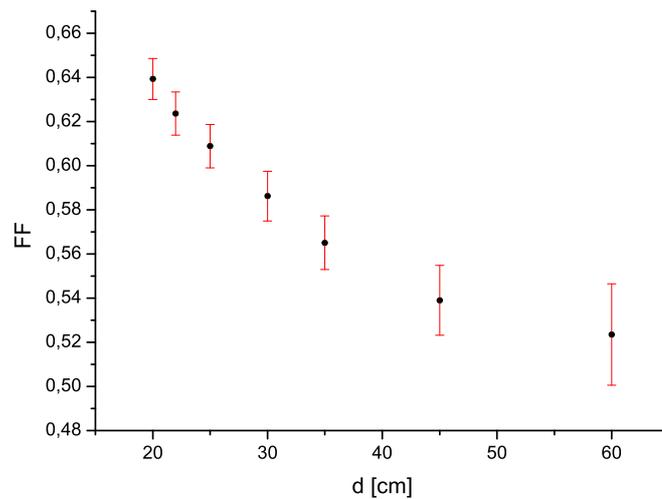


Abbildung 14: Experimenteller Füllfaktor in Abhängigkeit des Abstands

Vergleicht man die experimentellen und theoretischen Werte der Füllfaktoren FF , so erkennt man sehr schön, dass diese einigermaßen gut übereinstimmen. Auch hier liegen die Werte zwar außerhalb des Bereichs der Standardabweichung, allerdings wiegt der Fehler hier nicht so schwer. Wir vermuten auch hier Ungenauigkeiten bei der Messung oder Alterserscheinungen, die die wesentlichen Ursachen für die Fehler darstellen.

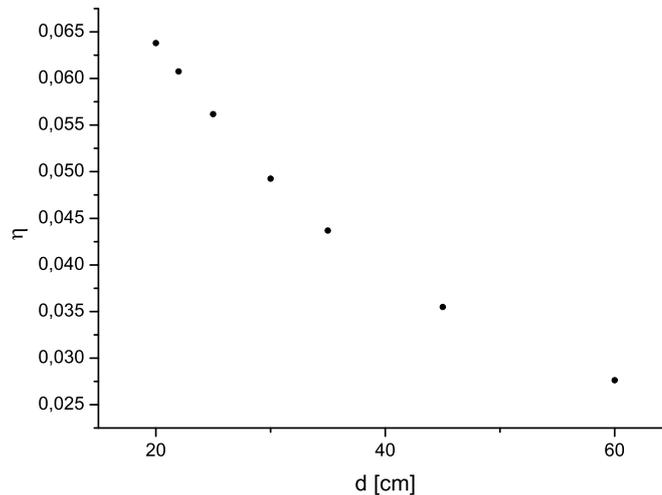


Abbildung 15: Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Abstands

Bei der Betrachtung des Wirkungsgrads stellen wir fest, dass dieser selbst für Solarzellen recht gering ist, er beträgt im Mittel nur etwa 4,8%. Die Solarzelle scheint also tatsächlich schon recht stark gealtert zu sein, sodass sie nicht mehr allzu verlässlich arbeitet.

Aufgabe 2: Kurzschlussstrom spektral aufgelöst messen

Um den Kurzschlussstrom bei monochromatischem Licht verschiedener Wellenlängen zu bestimmen, verwendeten wir einen Monochromator, welcher schrittweise die durchgelassene Wellenlänge änderte. Mit der Software am PC nahmen wir den Kurzschlussstrom I_K bei Wellenlängen von $\lambda_{\min} = 500 \text{ nm}$ bis $\lambda_{\max} = 1200 \text{ nm}$ in 5 nm-Schritten auf. Da die Software den Motor nicht korrekt steuerte, mussten wir permanent von Hand die korrekte Wellenlänge am Monochromator einstellen. Da die Messzyklen dabei sehr kurz waren, stimmt die gemessene Wellenlänge nicht genau mit der tatsächlichen Wellenlänge überein. Des Weiteren handelte es sich bei dem Monochromator um ein älteres Modell, welches wahrscheinlich nicht exakt eine Wellenlänge, sondern einen ganzen Bereich von mehreren Nanometern durchließ.

Dennoch bricht der Kurzschlussstrom, wie in Abbildung 16 gut zu erkennen ist, ab einer bestimmten Wellenlänge plötzlich ein. Ab dieser Wellenlänge reicht die Energie der Photonen nicht mehr aus, um die Bandlücke zu überwinden. Die Messwerte befinden sich in Tabelle 12. Wir haben eine Gauß-Funktion

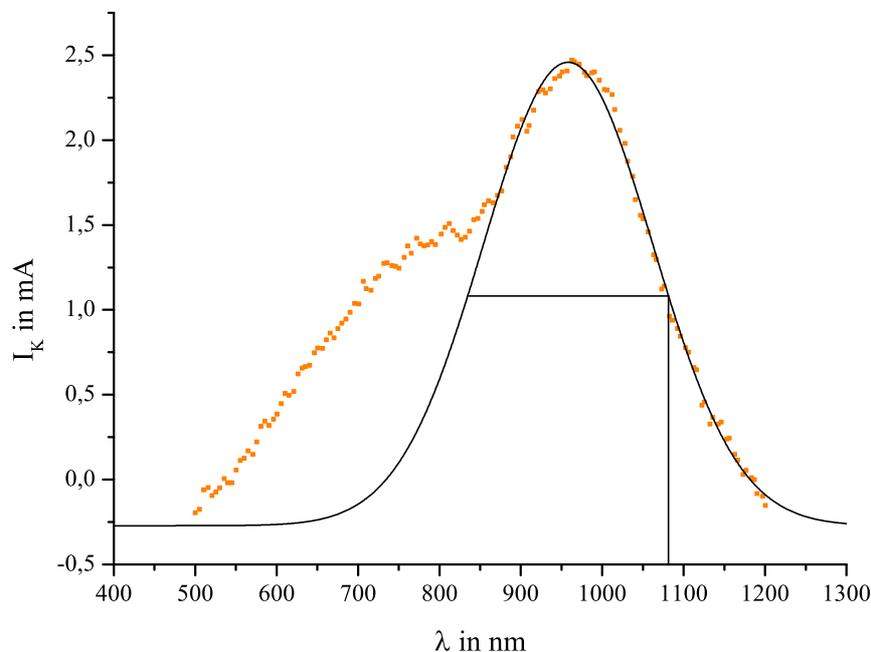


Abbildung 16: Kurzschlussstrom in Abhängigkeit von λ mit Gauß-Fit. Parameter in Tabelle 13.

über die Messwerte gelegt und über den x-Wert auf der Höhe der Halbwertsbreite die Wellenlänge λ_0 bestimmt, bei welcher in etwa die Bandlücke nicht mehr überwunden werden kann. So ergibt sich ein Wert von $\lambda_0 = 1081 \text{ nm}$. Mit Gleichung (6) ergibt sich daraus wiederum die Energiebreite der Bandlücke zu

$$E_g = 1,15 \text{ eV} .$$

Der Literaturwert wird mit $E_{g,\text{lit}} = 1,1 \text{ eV}$ angegeben [3], die relative Abweichung beträgt daher nur 4,5%. Das Ergebnis ist in Anbetracht der eher ungenauen Messung ziemlich gut. Die Fehlerquellen wurden im vorangehenden Abschnitt schon bestimmt und liegen vermutlich hauptsächlich in der Systematik. Da diese Fehler kaum abschätzbar und sehr verschwiegend sind, wurde bei diesem Ergebnis auch auf eine ausführliche Fehlerrechnung verzichtet. Analog gilt dies für die nachfolgenden Aufgaben.

Aufgabe 3: Kennlinien temperaturabhängig messen

Zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Kennlinie von Si-Solarzellen verwendeten wir wieder Solarzelle A. Mittels eines Heizelementes und eines Thermometers konnten wir die Temperatur der Solarzelle einigermaßen kontrollieren. Da uns während der Aufnahme der Kennlinie die Temperatur nicht angezeigt wurde, mittelten wir die Temperatur direkt vor und direkt nach der Messung (Messwerte siehe Tabelle 14). Die Spannung wurde im Bereich zwischen $-0,4\text{ V}$ und $0,6\text{ V}$ variiert. In Abbildung 17 sind die einzelnen Kennlinien bei der jeweiligen Temperatur aufgetragen. Die zugehörigen Messwerte befinden sich in den Tabellen 15 und 16. Mit Origin wurde außerdem ein exponentieller Fit der Form

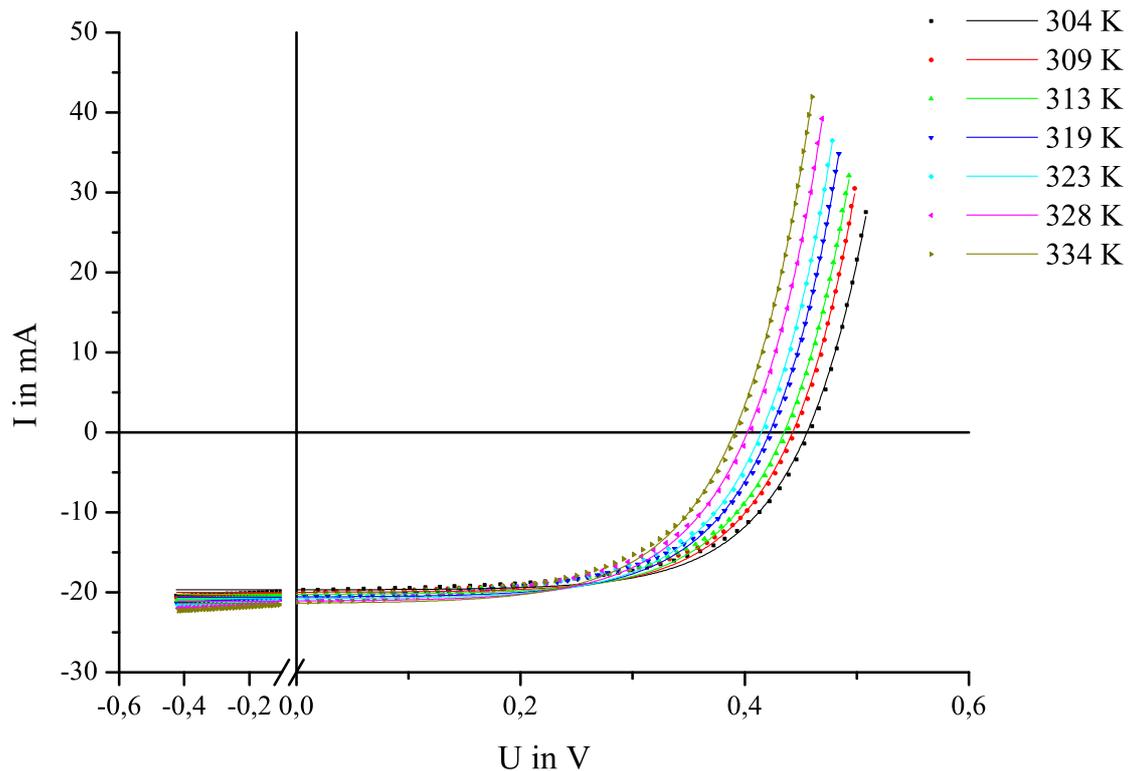


Abbildung 17: Kennlinie der Si-Solarzelle A bei verschiedenen Temperaturen.

$$y = y_0 + A \cdot e^{R_0 \cdot x}$$

durchgeführt. In Tabelle 5 sind die Parameter der Regressionskurve zu finden, sowie die daraus bestimmten Werte für den Kurzschlussstrom I_K , den Sperrstrom I_S und die Leerlaufspannung U_L . I_S wurde in guter Näherung bei $-0,42\text{ V}$ bestimmt, da dies unser geringster Messwert der Spannung war.

T in K	y_0	A	R_0	I_K in mA	I_S in mA	U_L in V
304	-19,6927	0,0109	16,4652	-19,69	-20,40	0,456
309	-19,9951	0,0135	16,4904	-20,00	-20,71	0,443
313	-20,2505	0,0174	16,2216	-20,25	-21,03	0,435
319	-20,5864	0,0238	16,0224	-20,59	-21,37	0,422
323	-20,8009	0,0280	15,9389	-20,80	-21,66	0,415
328	-21,1133	0,0380	15,7047	-21,11	-21,99	0,402
334	-21,3873	0,0482	15,6070	-21,39	-22,31	0,391

Tabelle 5: Regressionsparameter und berechnete Werte für I_K , I_S und U_L .

Da die Temperaturabhängigkeiten von I_K , I_S und U_L betrachtet werden sollen, wurden die jeweiligen Größen in den nachfolgenden Abbildungen gegen die Temperatur T aufgetragen.

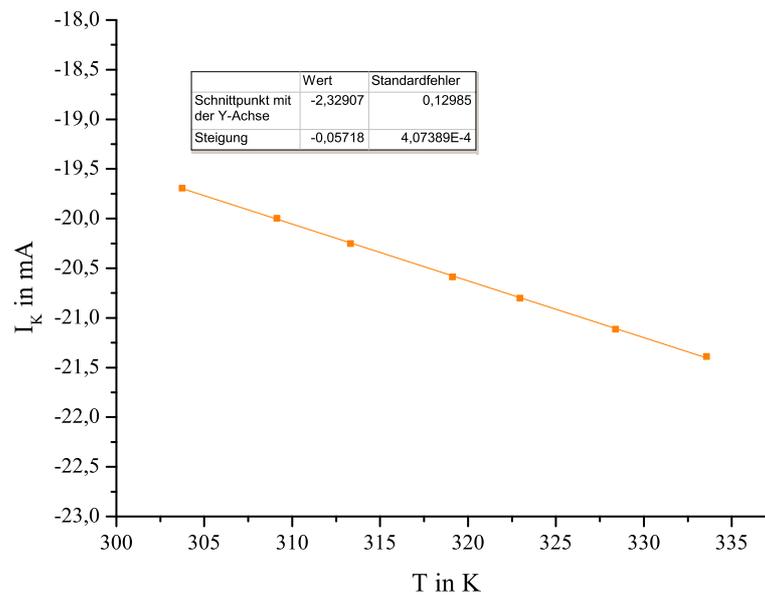


Abbildung 18: Kurzschlussstrom I_K über Temperatur T aufgetragen.

Wie in der Vorbereitung bereits vorhergesagt wurde, änderte sich der Kurzschlussstrom fast gar nicht bei den verschiedenen Temperaturen. Es ist dennoch eine gewisse lineare Tendenz zu erkennen.

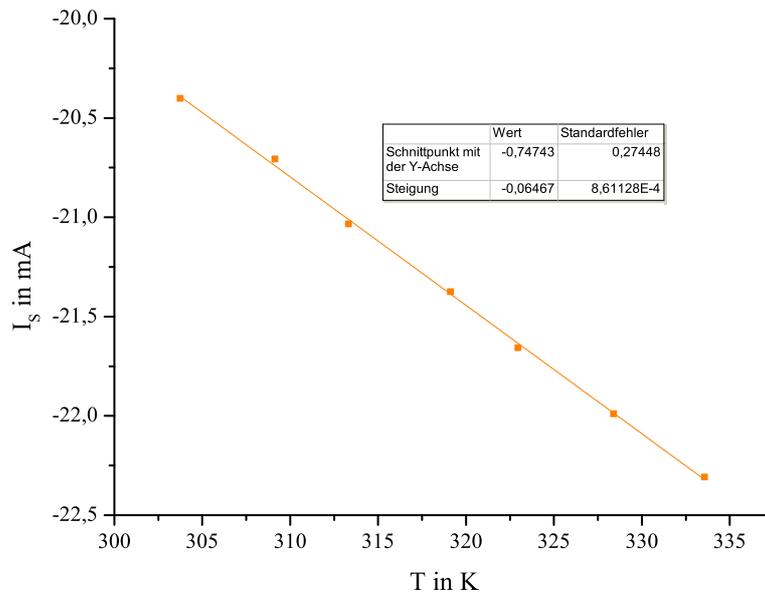


Abbildung 19: Sperrstrom I_S über Temperatur T aufgetragen.

Eigentlich erwarteten wir nach (7) einen exponentiellen Verlauf, welchen wir hier allerdings nicht bestätigen konnten. Bei den von uns aufgenommenen Werten sieht es viel mehr nach einem linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Sperrstrom aus. Eventuell wäre der exponentielle Verlauf erst bei noch höheren Temperaturunterschieden sichtbar geworden.

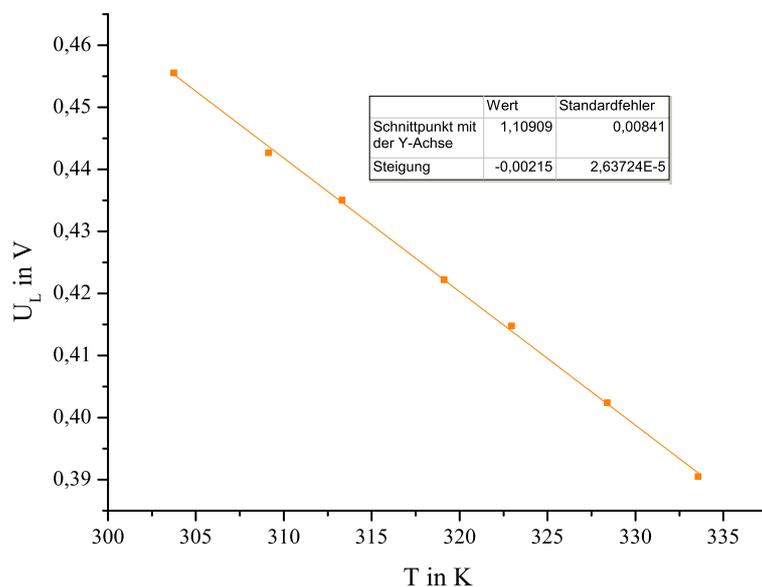


Abbildung 20: Leerlaufspannung U_L über Temperatur T aufgetragen.

Wie in Gleichung (8) in der Vorbereitung gezeigt wurde, herrscht zwischen der Temperatur und der Leerlaufspannung ein linearer Zusammenhang. Abbildung 20 zeigt dieses dabei ziemlich eindeutig. Mit Hilfe der Parameter der linearen Regression können wir schließlich die Energiebreite E_g der Bandlücke bestimmen, indem wir den Übergang $T \rightarrow 0$ durchführen. Der y-Achsenabschnitt entspricht daher dem

gesuchten Wert. So ergibt sich eine Energiebreite von

$$E_g = 1,11 \text{ eV} .$$

Auf eine Fehlerrechnung wurde hier in Absprache mit unserem Betreuer u.a. aufgrund der sehr ungenauen Temperatureinstellung verzichtet. Die relative Abweichung zum Literaturwert beträgt nur 0,9%. Damit ist auch die Energiebreitenbestimmung über verschiedene Temperaturen eine sehr genaue Methode.

Aufgabe 4: Vergleich Solarzelle und Kernenergie

in dieser letzten Aufgabe geht es um einen einfachen Vergleich zwischen einer Solarzelle und einem Block eines Atomkraftwerkes, welcher etwa eine Leistung von $P_{el} = 1 \text{ GW}$ hat. Die mittlere Leistung der einfallenden Sonnenstrahlung für unsere Breiten beträgt etwa $P_{ein} \approx 120 \text{ W/m}^2$. Ausgehend von einem Wirkungsgrad von $\eta = 15\%$ ergibt sich eine Fläche von $A = 55,56 \text{ km}^2$, welche komplett mit Solarzellen bedeckt sein müsste. Man kann einfach erkennen, dass für die Leistung eines vergleichsweise kleinen Reaktorblocks eine riesige Fläche von Solarzellen benötigt wird. Der Wirkungsgrad von 15% entspricht dabei dem Wirkungsgrad sehr effektiver Solarzellen, die bereits teilweise in der Industrie verwendet werden. Unter der Berücksichtigung eines geringeren Wirkungsgrades und der hohen Kosten für so eine Fläche von Solarpanels zeigt sich sehr schnell, dass heutzutage Kernenergie nicht einfach durch Solarenergie ersetzt werden kann.

Literatur

- [1] Eichler H.J., Kronfeldt H.-D., Sahn J. (2006): *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*. 2. Auflage, Berlin
- [2] Meschede, D. (2006): *Gerthsen Physik*. 23. Auflage, Berlin.
- [3] Vorbereitungsmappe zum Versuch „Si-Solarzelle“
- [4] <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bändermodell-Potentialtöpfe-Mg.svg>
- [5] <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bändermodell.PNG>
- [6] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Schema_-_n-dotiertes_Silicium.svg
- [7] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Schema_-_p-dotiertes_Silicium.svg
- [8] <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sperrschicht.svg>
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Halbleiter3.PNG>
- [10] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kennlinie_Diode_1N914.svg
- [11] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Solarzelle_Funktionsprinzip2.svg

[12] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Standard_iv_de.svg

[13] <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

III. Messprotokoll

U	I	U	I	U	I
V	mA	V	mA	V	mA
Solarzelle A		Solarzelle B		Solarzelle C	
-3,961	-11,713	-3,948	-15,473	-4	-0,027
-3,895	-11,392	-3,883	-15,123	-3,933	-0,03
-3,83	-11,1	-3,817	-14,819	-3,867	-0,024
-3,764	-10,802	-3,751	-14,54	-3,8	-0,03
-3,698	-10,501	-3,686	-14,261	-3,733	-0,027
-3,632	-10,203	-3,631	-13,807	-3,666	-0,027
-3,567	-9,921	-3,565	-10,601	-3,6	-0,024
-3,501	-9,629	-3,499	-10,468	-3,533	-0,024
-3,435	-9,344	-3,432	-10,196	-3,467	-0,021
-3,369	-9,065	-3,367	-10,002	-3,4	-0,021
-3,304	-8,789	-3,3	-9,843	-3,333	-0,03
-3,238	-8,523	-3,235	-9,638	-3,267	-0,021
-3,173	-8,235	-3,169	-9,425	-3,2	-0,024
-3,107	-7,982	-3,103	-9,217	-3,134	-0,027
-3,041	-7,723	-3,037	-9,032	-3,066	-0,024
-2,975	-7,463	-2,971	-8,835	-3	-0,027
-2,909	-7,214	-2,905	-8,634	-2,933	-0,027
-2,843	-6,958	-2,839	-8,416	-2,866	-0,027
-2,778	-6,718	-2,773	-8,232	-2,8	-0,027
-2,712	-6,471	-2,707	-8,024	-2,733	-0,014
-2,646	-6,235	-2,64	-7,826	-2,667	-0,027
-2,58	-5,992	-2,574	-7,622	-2,6	-0,027
-2,514	-5,768	-2,508	-7,418	-2,533	-0,027
-2,448	-5,535	-2,443	-7,204	-2,466	-0,024
-2,382	-5,311	-2,377	-6,919	-2,4	-0,024
-2,316	-5,1	-2,311	-6,728	-2,333	-0,027
-2,25	-4,88	-2,245	-6,527	-2,267	-0,021
-2,184	-4,669	-2,179	-6,322	-2,2	-0,024
-2,118	-4,465	-2,113	-6,121	-2,133	-0,021
-2,052	-4,261	-2,046	-5,907	-2,066	-0,021
-1,986	-4,066	-1,981	-5,723	-2	-0,024
-1,92	-3,872	-1,915	-5,512	-1,933	-0,027
-1,855	-3,69	-1,848	-5,324	-1,866	-0,024
-1,788	-3,502	-1,783	-5,129	-1,8	-0,024
-1,722	-3,327	-1,716	-4,935	-1,733	-0,027
-1,656	-3,152	-1,651	-4,744	-1,666	-0,027
-1,59	-2,99	-1,585	-4,552	-1,6	-0,024
-1,524	-2,805	-1,519	-4,358	-1,533	-0,027
-1,457	-2,659	-1,452	-4,167	-1,466	-0,024
-1,391	-2,507	-1,387	-3,975	-1,399	-0,024
-1,325	-2,358	-1,321	-3,784	-1,333	-0,027
-1,259	-2,206	-1,254	-3,59	-1,266	-0,027
-1,193	-2,063	-1,189	-3,398	-1,2	-0,024
-1,127	-1,924	-1,122	-3,214	-1,133	-0,014
-1,06	-1,781	-1,057	-3,022	-1,066	-0,021
-0,994	-1,648	-0,991	-2,828	-1	-0,027
-0,928	-1,522	-0,925	-2,65	-0,933	-0,03
-0,862	-1,389	-0,859	-2,458	-0,866	-0,03
-0,795	-1,265	-0,792	-2,27	-0,799	-0,024
-0,729	-1,149	-0,726	-2,082	-0,733	-0,027
-0,663	-1,026	-0,66	-1,894	-0,667	-0,021
-0,596	-0,909	-0,594	-1,706	-0,599	-0,024
-0,53	-0,792	-0,528	-1,522	-0,533	-0,027

Tabelle 6: Messwerte zu Aufgabe 1 (Dunkel-Kennlinien, Teil 1)

U	I	U	I	U	I
V	mA	V	mA	V	mA
Solarzelle A		Solarzelle B		Solarzelle C	
-0,464	-0,692	-0,462	-1,301	-0,466	-0,024
-0,398	-0,585	-0,396	-1,116	-0,399	-0,027
-0,331	-0,487	-0,33	-0,932	-0,333	-0,021
-0,265	-0,39	-0,263	-0,753	-0,266	-0,017
-0,199	-0,296	-0,198	-0,51	-0,199	-0,024
-0,132	-0,199	-0,132	-0,348	-0,133	-0,021
-0,066	-0,121	-0,066	-0,183	-0,067	-0,024
1,00E-03	-0,017	0	-0,021	1,00E-03	-0,021
-1,00E-03	0,021	0,01	0,047	-1,00E-03	0,021
0,01	0,04	0,02	0,066	0,01	0,024
0,02	0,053	0,03	0,086	0,02	0,027
0,03	0,073	0,039	0,105	0,03	0,024
0,039	0,089	0,049	0,128	0,04	0,027
0,049	0,105	0,059	0,15	0,05	0,03
0,06	0,124	0,069	0,17	0,06	0,027
0,069	0,147	0,079	0,189	0,07	0,027
0,079	0,17	0,089	0,205	0,08	0,027
0,09	0,186	0,099	0,235	0,09	0,03
0,099	0,212	0,109	0,254	0,1	0,024
0,109	0,235	0,119	0,27	0,11	0,024
0,119	0,267	0,129	0,296	0,12	0,024
0,129	0,293	0,139	0,319	0,13	0,03
0,139	0,322	0,149	0,345	0,14	0,024
0,149	0,361	0,159	0,371	0,15	0,024
0,159	0,393	0,169	0,403	0,16	0,021
0,168	0,439	0,178	0,419	0,17	0,027
0,178	0,481	0,188	0,452	0,18	0,027
0,188	0,53	0,199	0,481	0,19	0,021
0,198	0,575	0,208	0,507	0,199	0,03
0,208	0,63	0,218	0,53	0,21	0,024
0,218	0,695	0,228	0,572	0,22	0,027
0,227	0,766	0,238	0,604	0,23	0,024
0,237	0,834	0,248	0,734	0,24	0,027
0,246	0,912	0,258	0,795	0,25	0,027
0,257	1,009	0,267	0,841	0,26	0,027
0,266	1,113	0,277	0,893	0,27	0,021
0,276	1,233	0,287	0,938	0,279	0,021
0,285	1,34	0,297	1	0,29	0,034
0,295	1,492	0,306	1,058	0,3	0,021
0,305	1,635	0,316	1,133	0,309	0,027
0,314	1,804	0,325	1,301	0,32	0,027
0,323	2,005	0,335	1,418	0,33	0,027
0,333	2,202	0,345	1,522	0,34	0,027
0,342	2,449	0,354	1,625	0,35	0,027
0,351	2,708	0,364	1,742	0,36	0,034
0,36	3,006	0,374	1,885	0,37	0,034
0,369	3,347	0,383	2,037	0,379	0,021
0,377	3,71	0,392	2,206	0,39	0,034
0,386	4,121	0,402	2,41	0,4	0,03
0,395	4,591	0,411	2,627	0,41	0,037
0,403	5,1	0,42	2,909	0,42	0,037
0,411	5,664	0,429	3,227	0,429	0,04
0,419	6,3	0,438	3,583	0,44	0,053
0,426	7,016	0,446	4,008	0,45	0,06
0,434	7,784	0,455	4,52	0,459	0,066
0,441	8,66	0,463	5,094	0,47	0,095
0,448	9,583	0,47	5,762	0,479	0,102
0,455	10,598	0,478	6,549	0,489	0,128
0,461	11,733	0,485	7,405	0,499	0,157
0,467	12,912	0,492	8,41	0,509	0,186
0,473	14,219	0,498	9,473	0,519	0,228
0,478	15,554	0,504	10,634	0,529	0,267
0,483	16,99	0,51	11,934	0,539	0,306
0,488	18,54	0,516	13,269	0,549	0,358
0,493	20,112	0,521	14,673	0,559	0,403
0,497	21,756	0,526	16,225	0,569	0,462
0,502	23,506	0,53	17,778	0,578	0,517
0,506	25,26	0,535	19,386	0,588	0,572
0,51	27,069			0,598	0,627

Tabelle 7: Messwerte zu Aufgabe 1 (Dunkel-Kennlinien, Teil 2)

U	I	P	U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
20cm			22cm			25cm			30cm		
-3,897	-30,813	-120,07826	-3,909	-27,344	-106,8877	-3,921	-23,431	-91,87295	-3,935	-19,425	-76,4374
-3,831	-30,495	-116,82635	-3,843	-27,062	-103,99927	-3,856	-23,14	-89,22784	-3,869	-19,166	-74,1533
-3,766	-30,239	-113,88007	-3,777	-26,77	-101,11029	-3,791	-22,842	-86,59402	-3,803	-18,88	-71,8006
-3,7	-29,941	-110,7817	-3,712	-26,492	-98,3383	-3,725	-22,582	-84,11795	-3,738	-18,595	-69,5081
-3,634	-29,662	-107,79171	-3,646	-26,203	-95,53614	-3,659	-22,297	-81,58472	-3,672	-18,336	-67,3298
-3,569	-29,396	-104,91432	-3,58	-25,937	-92,85446	-3,593	-22,038	-79,18253	-3,606	-18,057	-65,1135
-3,503	-29,088	-101,89526	-3,514	-25,665	-90,18681	-3,527	-21,772	-76,78984	-3,541	-17,791	-62,9979
-3,438	-28,832	-99,12442	-3,449	-25,393	-87,58046	-3,462	-21,493	-74,40877	-3,475	-17,532	-60,9237
-3,372	-28,553	-96,28072	-3,383	-25,124	-84,99449	-3,396	-21,237	-72,12085	-3,409	-17,276	-58,8939
-3,306	-28,278	-93,48707	-3,317	-24,851	-82,43077	-3,33	-20,981	-69,86673	-3,343	-17,023	-56,9079
-3,24	-28,015	-90,7686	-3,251	-24,592	-79,94859	-3,264	-20,722	-67,63661	-3,277	-16,754	-54,9029
-3,174	-27,749	-88,07533	-3,186	-24,333	-77,52494	-3,198	-20,462	-65,43748	-3,211	-16,501	-52,9847
-3,109	-27,493	-85,47574	-3,12	-24,073	-75,10776	-3,132	-20,206	-63,28519	-3,146	-16,261	-51,1571
-3,042	-27,224	-82,81541	-3,054	-23,814	-72,72796	-3,067	-19,996	-61,21732	-3,08	-16,015	-49,3262
-2,977	-26,978	-80,31351	-2,988	-23,564	-70,40923	-3,001	-19,697	-59,1107	-3,014	-15,772	-47,5368
-2,911	-26,725	-77,79648	-2,922	-23,318	-68,1352	-2,935	-19,464	-57,12684	-2,948	-15,535	-45,7972
-2,845	-26,472	-75,31284	-2,856	-23,065	-65,87364	-2,869	-19,237	-55,19095	-2,882	-15,285	-44,0514
-2,779	-26,229	-72,89039	-2,791	-22,829	-63,71574	-2,803	-18,997	-53,24859	-2,816	-15,065	-42,423
-2,713	-25,992	-70,5163	-2,725	-22,589	-61,55503	-2,737	-18,767	-51,36528	-2,75	-14,835	-40,7963
-2,648	-25,762	-68,21778	-2,659	-22,362	-59,46056	-2,671	-18,537	-49,51233	-2,684	-14,611	-39,2159
-2,582	-25,503	-65,84875	-2,593	-22,135	-57,39606	-2,606	-18,31	-47,71586	-2,619	-14,394	-37,6979
-2,516	-25,276	-63,59442	-2,527	-21,901	-55,34383	-2,54	-18,102	-45,97908	-2,553	-14,173	-36,1837
-2,45	-25,065	-61,40925	-2,461	-21,691	-53,38155	-2,474	-17,879	-44,23265	-2,486	-13,956	-34,6946
-2,383	-24,835	-59,18181	-2,395	-21,461	-51,39909	-2,408	-17,665	-42,53732	-2,421	-13,749	-33,2863
-2,317	-24,611	-57,02369	-2,329	-21,25	-49,49125	-2,342	-17,454	-40,87727	-2,354	-13,554	-31,9061
-2,252	-24,41	-54,97132	-2,263	-21,039	-47,61126	-2,276	-17,25	-39,261	-2,288	-13,334	-30,5082
-2,186	-24,193	-52,8858	-2,197	-20,835	-45,7745	-2,21	-17,062	-37,70702	-2,222	-13,133	-29,1815
-2,12	-23,989	-50,85668	-2,131	-20,631	-43,96466	-2,144	-16,858	-36,14355	-2,157	-12,942	-27,9159
-2,054	-23,791	-48,86671	-2,065	-20,452	-42,23338	-2,077	-16,657	-34,59659	-2,091	-12,757	-26,6749
-1,988	-23,597	-46,91084	-1,999	-20,261	-40,50174	-2,011	-16,488	-33,15737	-2,024	-12,562	-25,4255
-1,922	-23,393	-44,96135	-1,933	-20,05	-38,75665	-1,945	-16,293	-31,68988	-1,959	-12,387	-24,2661
-1,856	-23,208	-43,07405	-1,867	-19,885	-37,1253	-1,88	-16,112	-30,29056	-1,893	-12,209	-23,1116
-1,789	-23,03	-41,20067	-1,801	-19,694	-35,46889	-1,814	-15,937	-28,90972	-1,826	-12,031	-21,9686
-1,724	-22,854	-39,4003	-1,735	-19,529	-33,88282	-1,747	-15,772	-27,55368	-1,76	-11,856	-20,8666
-1,657	-22,673	-37,56916	-1,669	-19,354	-32,30183	-1,681	-15,587	-26,20175	-1,694	-11,69	-19,8029
-1,591	-22,491	-35,78318	-1,603	-19,185	-30,75355	-1,615	-15,425	-24,91138	-1,628	-11,525	-18,7627
-1,525	-22,329	-34,05172	-1,536	-19,023	-29,21933	-1,549	-15,269	-23,65168	-1,562	-11,357	-17,7396
-1,459	-22,171	-32,34749	-1,47	-18,861	-27,72567	-1,483	-15,104	-22,39923	-1,496	-11,204	-16,7612
-1,393	-22,008	-30,65714	-1,404	-18,708	-26,26603	-1,417	-14,938	-21,16715	-1,429	-11,045	-15,7833
-1,327	-21,843	-28,98566	-1,338	-18,559	-24,83194	-1,351	-14,796	-19,9894	-1,363	-10,899	-14,8553
-1,261	-21,694	-27,35613	-1,272	-18,407	-23,4137	-1,284	-14,647	-18,80675	-1,297	-10,744	-13,935
-1,194	-21,551	-25,73189	-1,205	-18,261	-22,00451	-1,218	-14,501	-17,66222	-1,231	-10,604	-13,0535
-1,129	-21,396	-24,15608	-1,14	-18,115	-20,6511	-1,152	-14,361	-16,54387	-1,165	-10,462	-12,1882
-1,063	-21,266	-22,60576	-1,073	-17,969	-19,28074	-1,086	-14,219	-15,44183	-1,099	-10,313	-11,334
-0,996	-21,114	-21,02954	-1,007	-17,824	-17,94877	-1,019	-14,076	-14,34344	-1,032	-10,183	-10,5089
-0,93	-20,978	-19,50954	-0,941	-17,691	-16,64723	-0,953	-13,953	-13,29721	-0,966	-10,05	-9,7083
-0,863	-20,851	-17,99441	-0,874	-17,561	-15,34831	-0,887	-13,807	-12,24681	-0,9	-9,911	-8,9199
-0,798	-20,718	-16,53296	-0,808	-17,431	-14,08425	-0,821	-13,681	-11,2321	-0,834	-9,784	-8,15986
-0,731	-20,589	-15,05056	-0,741	-17,305	-12,82301	-0,755	-13,561	-10,23856	-0,768	-9,661	-7,41965
-0,665	-20,459	-13,60524	-0,676	-17,185	-11,61706	-0,688	-13,434	-9,24259	-0,701	-9,532	-6,68193
-0,599	-20,345	-12,18665	-0,61	-17,055	-10,40355	-0,622	-13,308	-8,27758	-0,635	-9,412	-5,97662
-0,532	-20,226	-10,76023	-0,543	-16,939	-9,19788	-0,556	-13,195	-7,33642	-0,569	-9,298	-5,29056
-0,466	-20,109	-9,37079	-0,478	-16,822	-8,04092	-0,49	-13,065	-6,40185	-0,503	-9,172	-4,61352
-0,4	-19,976	-7,9904	-0,411	-16,705	-6,86575	-0,423	-12,968	-5,48546	-0,436	-9,068	-3,95365
-0,334	-19,879	-6,63959	-0,344	-16,598	-5,70971	-0,357	-12,844	-4,58531	-0,37	-8,955	-3,31335
-0,267	-19,778	-5,28073	-0,278	-16,488	-4,58366	-0,291	-12,741	-3,70763	-0,303	-8,851	-2,68185
-0,201	-19,674	-3,95447	-0,212	-16,387	-3,47404	-0,224	-12,637	-2,83069	-0,237	-8,744	-2,07233
-0,135	-19,58	-2,6433	-0,145	-16,287	-2,36161	-0,158	-12,54	-1,98132	-0,171	-8,64	-1,47744
-0,068	-19,483	-1,32484	-0,079	-16,18	-1,27822	-0,092	-12,436	-1,14411	-0,105	-8,549	-0,89764
-0,002	-19,367	-0,03873	-0,013	-16,083	-0,20908	-0,025	-12,335	-0,30838	-0,038	-8,442	-0,3208

Tabelle 8: Messwerte zu Aufgabe 1 (Intensitätsabhängigkeit, Teil 1)

U	I	P	U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
	20cm		22cm			25cm			30cm		
0,064	-19,227	1,23053	0,054	-15,95	0,8613	0,041	-12,203	0,50032	0,028	-8,284	0,23195
0,063	-19,066	1,20116	0,053	-15,912	0,84334	0,04	-12,177	0,48708	0,037	-8,258	0,30555
0,073	-19,046	1,39036	0,062	-15,879	0,9845	0,05	-12,151	0,60755	0,047	-8,245	0,38751
0,083	-19,04	1,58032	0,073	-15,853	1,15727	0,06	-12,122	0,72732	0,057	-8,219	0,46848
0,093	-19,014	1,7683	0,083	-15,847	1,3153	0,07	-12,103	0,84721	0,067	-8,2	0,5494
0,103	-18,975	1,95443	0,093	-15,808	1,47014	0,08	-12,064	0,96512	0,077	-8,168	0,62894
0,113	-18,949	2,14124	0,103	-15,769	1,62421	0,09	-12,054	1,08486	0,087	-8,142	0,70835
0,123	-18,917	2,32679	0,112	-15,746	1,76355	0,1	-12,019	1,2019	0,097	-8,116	0,78725
0,133	-18,891	2,5125	0,122	-15,701	1,91552	0,11	-11,993	1,31923	0,107	-8,09	0,86563
0,143	-18,852	2,69584	0,132	-15,662	2,06738	0,119	-11,95	1,42205	0,116	-8,051	0,93392
0,152	-18,78	2,85456	0,142	-15,623	2,21847	0,13	-11,928	1,55064	0,127	-8,015	1,01791
0,162	-18,761	3,03928	0,152	-15,574	2,36725	0,139	-11,879	1,65118	0,137	-7,98	1,09326
0,173	-18,712	3,23718	0,162	-15,523	2,51473	0,149	-11,837	1,76371	0,146	-7,941	1,15939
0,182	-18,664	3,39685	0,171	-15,468	2,64503	0,159	-11,792	1,87493	0,156	-7,889	1,23068
0,192	-18,609	3,57293	0,181	-15,425	2,79193	0,169	-11,743	1,98457	0,165	-7,847	1,29475
0,201	-18,534	3,72533	0,191	-15,364	2,93452	0,179	-11,675	2,08982	0,176	-7,795	1,37192
0,211	-18,466	3,89633	0,201	-15,296	3,0745	0,189	-11,636	2,1992	0,186	-7,736	1,4389
0,221	-18,398	4,06596	0,21	-15,224	3,19704	0,198	-11,578	2,29244	0,196	-7,662	1,50175
0,231	-18,31	4,22961	0,221	-15,147	3,34749	0,208	-11,497	2,39138	0,205	-7,616	1,56128
0,24	-18,229	4,37496	0,23	-15,056	3,46288	0,218	-11,422	2,49	0,215	-7,539	1,62088
0,25	-18,132	4,533	0,24	-14,962	3,59088	0,227	-11,338	2,57373	0,225	-7,458	1,67805
0,26	-18,015	4,6839	0,249	-14,861	3,70039	0,238	-11,266	2,68131	0,234	-7,367	1,72388
0,27	-17,895	4,83165	0,259	-14,748	3,81973	0,247	-11,153	2,75479	0,244	-7,279	1,77608
0,278	-17,763	4,93811	0,268	-14,618	3,91762	0,257	-11,046	2,83882	0,254	-7,169	1,82093
0,289	-17,613	5,09016	0,278	-14,482	4,026	0,266	-10,92	2,90472	0,263	-7,052	1,85468
0,298	-17,451	5,2004	0,287	-14,323	4,1107	0,276	-10,79	2,97804	0,272	-6,92	1,88224
0,307	-17,27	5,30189	0,297	-14,171	4,20879	0,285	-10,641	3,03268	0,282	-6,78	1,91196
0,317	-17,056	5,40675	0,307	-13,96	4,28572	0,295	-10,463	3,08658	0,292	-6,621	1,93333
0,326	-16,842	5,49049	0,316	-13,759	4,34784	0,304	-10,297	3,13029	0,301	-6,456	1,94326
0,335	-16,586	5,55631	0,325	-13,536	4,3992	0,313	-10,09	3,15817	0,311	-6,255	1,94531
0,344	-16,304	5,60858	0,334	-13,276	4,43418	0,323	-9,869	3,18769	0,32	-6,048	1,93536
0,353	-15,996	5,64659	0,343	-12,988	4,45488	0,332	-9,62	3,19384	0,329	-5,811	1,91182
0,362	-15,659	5,66856	0,352	-12,677	4,4623	0,341	-9,357	3,19074	0,339	-5,535	1,87637
0,371	-15,267	5,66406	0,361	-12,32	4,44752	0,35	-9,033	3,16155	0,347	-5,244	1,81967
0,38	-14,835	5,6373	0,37	-11,944	4,41928	0,358	-8,702	3,11532	0,356	-4,916	1,7501
0,387	-14,365	5,55926	0,378	-11,51	4,35078	0,367	-8,33	3,05711	0,365	-4,543	1,6582
0,396	-13,814	5,47034	0,387	-11,014	4,26242	0,376	-7,895	2,96852	0,374	-4,132	1,54537
0,404	-13,208	5,33603	0,395	-10,476	4,13802	0,385	-7,415	2,85478	0,382	-3,704	1,41493
0,411	-12,56	5,16216	0,403	-9,892	3,98648	0,393	-6,91	2,71563	0,39	-3,159	1,23201
0,419	-11,818	4,95174	0,41	-9,189	3,76749	0,401	-6,307	2,52911	0,399	-2,605	1,0394
0,427	-11,014	4,70298	0,418	-8,472	3,5413	0,409	-5,665	2,31698	0,406	-1,976	0,80226
0,434	-10,125	4,39425	0,425	-7,668	3,2589	0,416	-4,952	2,06003	0,414	-1,273	0,52702
0,44	-9,137	4,02028	0,432	-6,761	2,92075	0,424	-4,135	1,75324	0,422	-0,511	0,21564
0,446	-8,083	3,60502	0,44	-5,791	2,54804	0,431	-3,266	1,40765	0,428	0,325	-0,1391
0,453	-6,949	3,1479	0,446	-4,741	2,11449	0,437	-2,326	1,01646	0,435	1,278	-0,55593
0,459	-5,688	2,61079	0,451	-3,571	1,61052	0,444	-1,263	0,56077	0,442	2,277	-1,00643
0,464	-4,381	2,03278	0,458	-2,359	1,08042	0,45	-0,151	0,06795	0,448	3,366	-1,50797
0,47	-2,997	1,40859	0,464	-1,043	0,48395	0,456	1,052	-0,47971	0,455	4,556	-2,07298
0,475	-1,5	0,7125	0,468	0,364	-0,17035	0,462	2,371	-1,0954	0,46	5,817	-2,67582
0,48	0,053	-0,02544	0,474	1,83	-0,86742	0,467	3,732	-1,74284	0,466	7,152	-3,33283
0,484	1,661	-0,80392	0,478	3,36	-1,60608	0,472	5,129	-2,42089	0,471	8,601	-4,05107
0,488	3,395	-1,65676	0,483	5,013	-2,42128	0,477	6,737	-3,21355	0,476	10,092	-4,80379
0,493	5,139	-2,53353	0,487	6,682	-3,25413	0,482	8,319	-4,00976	0,481	11,703	-5,62914
0,497	6,964	-3,46111	0,492	8,468	-4,16626	0,487	10,018	-4,87877	0,485	13,331	-6,46554
0,501	8,812	-4,41481	0,495	10,258	-5,07771	0,49	11,736	-5,75064	0,49	15,01	-7,3549
0,504	10,702	-5,39381	0,499	12,092	-6,03391	0,495	13,502	-6,68349	0,494	16,822	-8,31007
0,508	12,699	-6,45109	0,504	14,021	-7,06658	0,499	15,379	-7,67412	0,498	18,627	-9,27625
0,511	14,676	-7,49944	0,507	15,969	-8,09628	0,503	17,259	-8,68128	0,502	20,482	-10,282
0,514	16,686	-8,5766	0,51	17,94	-9,1494	0,506	19,159	-9,69445	0,505	22,44	-11,3322
0,517	18,802	-9,72063	0,514	20,002	-10,28103	0,509	21,179	-10,78011	0,508	24,375	-12,3825
0,52	20,88	-10,8576	0,517	22,041	-11,3952	0,513	23,179	-11,89083	0,512	26,362	-13,4973
0,523	22,987	-12,0222	0,519	24,119	-12,51776	0,516	25,218	-13,01249			

Tabelle 9: Messwerte zu Aufgabe 1 (Intensitätsabhängigkeit, Teil 2)

U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
35cm			45cm			60cm		
-3,943	-17,14	-67,583	-3,951	-14,647	-57,8703	-3,957	-13,075	-51,7378
-3,877	-16,861	-65,3701	-3,885	-14,371	-55,8313	-3,89	-12,786	-49,7375
-3,811	-16,566	-63,133	-3,82	-14,109	-53,8964	-3,825	-12,514	-47,8661
-3,745	-16,293	-61,0173	-3,754	-13,827	-51,9066	-3,759	-12,235	-45,9914
-3,68	-16,018	-58,9462	-3,688	-13,558	-50,0019	-3,694	-11,979	-44,2504
-3,614	-15,765	-56,9747	-3,623	-13,289	-48,1461	-3,627	-11,7	-42,4359
-3,548	-15,499	-54,9905	-3,556	-13,026	-46,3205	-3,562	-11,434	-40,7279
-3,483	-15,233	-53,0565	-3,491	-12,76	-44,5452	-3,497	-11,169	-39,058
-3,417	-14,974	-51,1662	-3,425	-12,504	-42,8262	-3,43	-10,912	-37,4282
-3,351	-14,721	-49,3301	-3,359	-12,245	-41,131	-3,364	-10,66	-35,8602
-3,285	-14,472	-47,5405	-3,293	-11,992	-39,4897	-3,299	-10,391	-34,2799
-3,219	-14,216	-45,7613	-3,227	-11,742	-37,8914	-3,232	-10,151	-32,808
-3,154	-13,956	-44,0172	-3,162	-11,493	-36,3409	-3,167	-9,904	-31,366
-3,087	-13,726	-42,3722	-3,096	-11,246	-34,8176	-3,1	-9,658	-29,9398
-3,021	-13,477	-40,714	-3,03	-11,016	-33,3785	-3,035	-9,418	-28,5836
-2,955	-13,227	-39,0858	-2,964	-10,757	-31,8838	-2,969	-9,178	-27,2495
-2,89	-13,003	-37,5787	-2,898	-10,54	-30,5449	-2,903	-8,942	-25,9586
-2,824	-12,773	-36,071	-2,833	-10,309	-29,2054	-2,838	-8,711	-24,7218
-2,758	-12,549	-34,6101	-2,766	-10,083	-27,8896	-2,771	-8,488	-23,5203
-2,692	-12,326	-33,1816	-2,7	-9,859	-26,6193	-2,705	-8,267	-22,3622
-2,626	-12,105	-31,7877	-2,634	-9,642	-25,397	-2,639	-8,053	-21,2519
-2,56	-11,882	-30,4179	-2,568	-9,425	-24,2034	-2,574	-7,836	-20,1699
-2,494	-11,677	-29,1224	-2,503	-9,214	-23,0626	-2,508	-7,622	-19,116
-2,428	-11,464	-27,8346	-2,437	-9,006	-21,9476	-2,442	-7,421	-18,1221
-2,362	-11,259	-26,5938	-2,37	-8,802	-20,8607	-2,376	-7,207	-17,1238
-2,296	-11,058	-25,3892	-2,304	-8,601	-19,8167	-2,31	-7,016	-16,207
-2,23	-10,864	-24,2267	-2,238	-8,403	-18,8059	-2,244	-6,818	-15,2996
-2,164	-10,666	-23,0812	-2,173	-8,212	-17,8447	-2,178	-6,624	-14,4271
-2,098	-10,485	-21,9975	-2,107	-8,027	-16,9129	-2,112	-6,439	-13,5992
-2,032	-10,297	-20,9235	-2,04	-7,839	-15,9916	-2,045	-6,258	-12,7976
-1,966	-10,112	-19,8802	-1,974	-7,655	-15,111	-1,98	-6,069	-12,0166
-1,9	-9,917	-18,8423	-1,908	-7,483	-14,2776	-1,913	-5,894	-11,2752
-1,834	-9,752	-17,8852	-1,842	-7,311	-13,4669	-1,847	-5,723	-10,5704
-1,768	-9,59	-16,9551	-1,776	-7,133	-12,6682	-1,781	-5,554	-9,89167
-1,702	-9,421	-16,0345	-1,71	-6,971	-11,9204	-1,715	-5,386	-9,23699
-1,636	-9,253	-15,1379	-1,644	-6,805	-11,1874	-1,649	-5,223	-8,61273
-1,569	-9,094	-14,2685	-1,577	-6,64	-10,4713	-1,583	-5,068	-8,02264
-1,504	-8,932	-13,4337	-1,512	-6,484	-9,80381	-1,517	-4,906	-7,4424
-1,437	-8,779	-12,6154	-1,445	-6,335	-9,15408	-1,45	-4,76	-6,902
-1,371	-8,627	-11,8276	-1,379	-6,183	-8,52636	-1,384	-4,608	-6,37747
-1,305	-8,475	-11,0599	-1,313	-6,04	-7,93052	-1,318	-4,455	-5,87169
-1,238	-8,332	-10,315	-1,247	-5,894	-7,34982	-1,252	-4,316	-5,40363
-1,173	-8,193	-9,61039	-1,181	-5,749	-6,78957	-1,186	-4,17	-4,94562
-1,106	-8,053	-8,90662	-1,115	-5,609	-6,25404	-1,119	-4,037	-4,5174
-1,04	-7,917	-8,23368	-1,048	-5,473	-5,7357	-1,054	-3,898	-4,10849
-0,974	-7,778	-7,57577	-0,982	-5,334	-5,23799	-0,988	-3,761	-3,71587
-0,907	-7,645	-6,93401	-0,916	-5,21	-4,77236	-0,921	-3,632	-3,34507
-0,841	-7,522	-6,326	-0,849	-5,074	-4,30783	-0,855	-3,505	-2,99678
-0,775	-7,389	-5,72648	-0,783	-4,948	-3,87428	-0,788	-3,379	-2,66265
-0,709	-7,269	-5,15372	-0,717	-4,828	-3,46168	-0,722	-3,259	-2,353
-0,643	-7,146	-4,59488	-0,651	-4,702	-3,061	-0,656	-3,133	-2,05525
-0,576	-7,029	-4,0487	-0,584	-4,585	-2,67764	-0,589	-3,016	-1,77642
-0,51	-6,912	-3,52512	-0,518	-4,468	-2,31442	-0,524	-2,906	-1,52274
-0,444	-6,805	-3,02142	-0,452	-4,345	-1,96394	-0,457	-2,786	-1,2732
-0,377	-6,682	-2,51911	-0,385	-4,244	-1,63394	-0,391	-2,679	-1,04749
-0,311	-6,575	-2,04482	-0,319	-4,141	-1,32098	-0,325	-2,565	-0,83363
-0,245	-6,475	-1,58637	-0,253	-4,034	-1,0206	-0,258	-2,468	-0,63674
-0,178	-6,381	-1,13582	-0,187	-3,933	-0,73547	-0,192	-2,361	-0,45331
-0,112	-6,277	-0,70302	-0,12	-3,839	-0,46068	-0,126	-2,267	-0,28564
-0,046	-6,173	-0,28396	-0,054	-3,736	-0,20174	-0,059	-2,173	-0,12821

Tabelle 10: Messwerte zu Aufgabe 1 (Intensitätsabhängigkeit, Teil 3)

U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
35cm			45cm			60cm		
0,021	-6,057	0,1272	0,012	-3,629	0,04355	0,007	-2,018	0,01413
0,02	-6,018	0,12036	0,011	-3,584	0,03942	0,016	-1,999	0,03198
0,03	-5,996	0,17988	0,022	-3,568	0,0785	0,026	-1,983	0,05156
0,04	-5,97	0,2388	0,032	-3,539	0,11325	0,036	-1,96	0,07056
0,049	-5,954	0,29175	0,042	-3,516	0,14767	0,046	-1,937	0,0891
0,06	-5,931	0,35586	0,051	-3,5	0,1785	0,056	-1,915	0,10724
0,069	-5,905	0,40745	0,061	-3,474	0,21191	0,067	-1,902	0,12743
0,079	-5,876	0,4642	0,071	-3,448	0,24481	0,076	-1,866	0,14182
0,089	-5,85	0,52065	0,081	-3,428	0,27767	0,086	-1,846	0,15876
0,099	-5,821	0,57628	0,092	-3,402	0,31298	0,096	-1,817	0,17443
0,109	-5,788	0,63089	0,101	-3,367	0,34007	0,106	-1,791	0,18985
0,119	-5,762	0,68568	0,111	-3,341	0,37085	0,116	-1,759	0,20404
0,129	-5,723	0,73827	0,121	-3,305	0,39991	0,125	-1,727	0,21587
0,139	-5,684	0,79008	0,13	-3,257	0,42341	0,135	-1,688	0,22788
0,148	-5,642	0,83502	0,14	-3,234	0,45276	0,145	-1,649	0,2391
0,158	-5,6	0,8848	0,151	-3,185	0,48094	0,155	-1,607	0,24909
0,168	-5,542	0,93106	0,16	-3,143	0,50288	0,165	-1,561	0,25756
0,178	-5,49	0,97722	0,17	-3,091	0,52547	0,175	-1,513	0,26477
0,188	-5,432	1,02122	0,18	-3,043	0,54774	0,184	-1,457	0,26809
0,198	-5,383	1,06583	0,19	-2,981	0,56639	0,194	-1,406	0,27276
0,207	-5,305	1,09813	0,199	-2,929	0,58287	0,204	-1,328	0,27091
0,217	-5,231	1,13513	0,209	-2,855	0,59669	0,214	-1,273	0,27242
0,227	-5,15	1,16905	0,219	-2,783	0,60948	0,224	-1,188	0,26611
0,236	-5,065	1,19534	0,229	-2,699	0,61807	0,234	-1,107	0,25904
0,246	-4,965	1,22139	0,239	-2,605	0,6226	0,243	-1,02	0,24786
0,256	-4,861	1,24442	0,247	-2,511	0,62022	0,253	-0,916	0,23175
0,265	-4,735	1,25478	0,258	-2,401	0,61946	0,262	-0,796	0,20855
0,275	-4,602	1,26555	0,268	-2,281	0,61131	0,272	-0,676	0,18387
0,284	-4,462	1,26721	0,277	-2,148	0,595	0,281	-0,537	0,1509
0,294	-4,297	1,26332	0,286	-2,005	0,57343	0,291	-0,381	0,11087
0,304	-4,122	1,25309	0,296	-1,837	0,54375	0,3	-0,213	0,0639
0,313	-3,915	1,2254	0,305	-1,658	0,50569	0,31	-0,031	0,00961
0,322	-3,701	1,19172	0,315	-1,47	0,46305	0,319	0,173	-0,05519
0,331	-3,451	1,14228	0,324	-1,231	0,39884	0,328	0,41	-0,13448
0,34	-3,179	1,08086	0,333	-0,994	0,331	0,338	0,666	-0,22511
0,349	-2,884	1,00652	0,342	-0,718	0,24556	0,346	0,961	-0,33251
0,358	-2,553	0,91397	0,351	-0,401	0,14075	0,356	1,278	-0,45497
0,367	-2,161	0,79309	0,36	-0,064	0,02304	0,364	1,632	-0,59405
0,375	-1,743	0,65362	0,368	0,316	-0,11629	0,373	2,047	-0,76353
0,384	-1,276	0,48998	0,377	0,763	-0,28765	0,381	2,484	-0,9464
0,392	-0,751	0,29439	0,386	1,223	-0,47208	0,389	2,971	-1,15572
0,4	-0,184	0,0736	0,394	1,742	-0,68635	0,398	3,531	-1,40534
0,408	0,471	-0,19217	0,402	2,342	-0,94148	0,406	4,141	-1,68125
0,416	1,181	-0,4913	0,41	2,984	-1,22344	0,414	4,812	-1,99217
0,423	1,953	-0,82612	0,417	3,693	-1,53998	0,422	5,574	-2,35223
0,431	2,831	-1,22016	0,425	4,51	-1,91675	0,428	6,387	-2,73364
0,437	3,778	-1,65099	0,432	5,356	-2,31379	0,435	7,279	-3,16636
0,444	4,789	-2,12632	0,439	6,303	-2,76702	0,442	8,274	-3,65711
0,45	5,914	-2,6613	0,445	7,36	-3,2752	0,449	9,34	-4,19366
0,456	7,1	-3,2376	0,451	8,465	-3,81772	0,455	10,485	-4,77067
0,461	8,368	-3,85765	0,458	9,645	-4,41741	0,461	11,742	-5,41306
0,467	9,749	-4,55278	0,464	10,958	-5,08451	0,466	13,045	-6,07897
0,473	11,175	-5,28578	0,469	12,316	-5,7762	0,471	14,478	-6,81914
0,478	12,728	-6,08398	0,474	13,781	-6,53219	0,477	15,95	-7,60815
0,482	14,297	-6,89115	0,479	15,289	-7,32343	0,482	17,48	-8,42536
0,487	15,93	-7,75791	0,483	16,861	-8,14386	0,486	19,133	-9,29864
0,491	17,691	-8,68628	0,488	18,55	-9,0524	0,49	20,806	-10,1949
0,495	19,441	-9,62329	0,492	20,255	-9,96546	0,495	22,517	-11,1459
0,499	21,227	-10,5923	0,496	21,986	-10,9051	0,499	24,31	-12,1307
0,503	23,166	-11,6525	0,5	23,879	-11,9395	0,503	26,197	-13,1771
0,506	25,059	-12,6799	0,504	25,733	-12,9694	0,506	28,073	-14,2049
0,51	27,017	-13,7787	0,507	27,629	-14,0079			

Tabelle 11: Messwerte zu Aufgabe 1 (Intensitätsabhängigkeit, Teil 4)

λ in nm	I_K in mA	λ in nm	I_K in mA
500,111	-0,195	852,534	1,581
505,179	-0,175	855,167	1,619
510,388	-0,06	860,467	1,643
515,744	-0,046	865,81	1,63
520,454	-0,093	871,195	1,674
525,278	-0,074	876,622	1,7
530,198	-0,048	882,091	1,839
535,762	0,006	887,602	1,902
540,056	-0,018	890,372	2,018
545,261	-0,019	895,944	2,083
550,323	0,056	901,556	2,121
555,278	0,114	907,207	2,053
560,163	0,127	910,047	2,087
565,009	0,17	915,757	2,177
570,819	0,149	921,505	2,286
575,69	0,223	927,292	2,297
580,617	0,315	930,199	2,278
585,626	0,345	936,041	2,302
590,742	0,32	941,92	2,363
595,986	0,355	947,834	2,377
600,287	0,385	950,805	2,402
605,815	0,447	956,773	2,407
610,368	0,509	962,776	2,472
615,047	0,496	965,79	2,463
621,085	0,519	971,843	2,448
626,077	0,622	977,93	2,401
631,218	0,656	980,986	2,38
635,177	0,666	987,122	2,396
640,597	0,674	990,202	2,402
646,183	0,747	996,386	2,353
650,485	0,776	1002,6	2,299
656,374	0,774	1005,719	2,295
660,909	0,824	1011,979	2,268
665,545	0,864	1015,121	2,181
670,286	0,835	1021,425	2,057
675,131	0,89	1027,758	1,98
680,083	0,922	1030,935	1,875
685,142	0,946	1037,31	1,787
690,31	0,986	1040,508	1,65
695,586	1,039	1046,924	1,557
700,972	1,035	1050,141	1,537
706,469	1,169	1056,596	1,46
710,195	1,125	1063,077	1,324
715,876	1,115	1066,326	1,297
721,668	1,186	1072,844	1,123
725,592	1,199	1076,111	1,14
731,57	1,273	1082,664	0,963
735,618	1,277	1085,95	0,939
741,782	1,26	1092,537	0,89
745,953	1,256	1095,839	0,845
750,174	1,246	1102,459	0,777
756,597	1,31	1105,777	0,75
760,941	1,377	1112,429	0,66
765,333	1,334	1115,763	0,648
772,014	1,422	1122,445	0,439
776,528	1,388	1125,793	0,458
781,091	1,377	1132,504	0,328
785,702	1,382	1135,866	0,367
790,361	1,402	1142,604	0,328
795,068	1,384	1145,98	0,338
802,217	1,446	1152,744	0,24
807,042	1,486	1156,132	0,244
811,914	1,509	1162,921	0,148
816,832	1,467	1166,322	0,115
821,797	1,441	1173,134	0,03
826,807	1,415	1176,545	0,055
831,863	1,428	1183,38	0,011
836,964	1,464	1186,802	0
842,109	1,531	1190,228	-0,083
847,3	1,538	1197,089	-0,098
..	..	1200,525	-0,152

Tabelle 12: Messwerte zu Aufgabe 2

Parameter	Wert
y0	-0,27155
xc	958,05534
w	208,23523
A	712,53865
Sigma	104,11761
Halbwertsbreite	245,17825
Höhe	2,7302

Tabelle 13: Parameter des Gauß-Fits aus Aufgabe 2

T_{soll} in °C	T₁ in °C	T₂ in °C	T_{mittel} in °C	T in K
30	29,8383	31,3456	30,6	304
35	34,0917	37,8524	36,0	309
40	38,9661	41,3531	40,2	313
45	44,6297	47,2821	46,0	319
50	48,8863	50,7283	49,8	323
55	53,9936	56,4739	55,2	328
60	58,8519	61,9643	60,4	334

Tabelle 14: Messwerte zu Aufgabe 3 (Temperaturen)

30°C		35°C		40°C		45°C		50°C		55°C		60°C	
U in V	I in mA												
-0,424	-20,401	-0,423	-20,706	-0,422	-21,033	-0,421	-21,374	-0,42	-21,656	-0,419	-21,99	-0,418	-22,307
-0,413	-20,411	-0,415	-20,696	-0,414	-21,001	-0,413	-21,361	-0,409	-21,633	-0,408	-21,967	-0,41	-22,294
-0,401	-20,385	-0,407	-20,667	-0,406	-20,988	-0,405	-21,361	-0,397	-21,617	-0,396	-21,944	-0,402	-22,265
-0,389	-20,362	-0,398	-20,667	-0,397	-20,962	-0,396	-21,341	-0,385	-21,588	-0,384	-21,915	-0,393	-22,252
-0,376	-20,343	-0,389	-20,661	-0,388	-20,959	-0,387	-21,319	-0,372	-21,562	-0,371	-21,889	-0,384	-22,246
-0,363	-20,314	-0,38	-20,631	-0,378	-20,946	-0,377	-21,309	-0,359	-21,532	-0,358	-21,857	-0,375	-22,203
-0,349	-20,294	-0,37	-20,615	-0,369	-20,926	-0,368	-21,293	-0,345	-21,497	-0,344	-21,847	-0,365	-22,2
-0,336	-20,259	-0,361	-20,609	-0,36	-20,907	-0,358	-21,27	-0,332	-21,477	-0,331	-21,811	-0,355	-22,178
-0,322	-20,252	-0,351	-20,589	-0,35	-20,887	-0,348	-21,244	-0,318	-21,451	-0,317	-21,782	-0,345	-22,145
-0,309	-20,233	-0,341	-20,583	-0,34	-20,868	-0,339	-21,238	-0,305	-21,416	-0,304	-21,756	-0,336	-22,135
-0,295	-20,213	-0,331	-20,563	-0,33	-20,861	-0,329	-21,218	-0,292	-21,4	-0,29	-21,714	-0,326	-22,116
-0,282	-20,181	-0,321	-20,55	-0,32	-20,826	-0,319	-21,199	-0,278	-21,37	-0,276	-21,688	-0,316	-22,09
-0,268	-20,155	-0,312	-20,537	-0,31	-20,819	-0,309	-21,166	-0,264	-21,338	-0,263	-21,662	-0,307	-22,067
-0,254	-20,132	-0,302	-20,518	-0,301	-20,803	-0,3	-21,156	-0,25	-21,315	-0,249	-21,633	-0,297	-22,041
-0,241	-20,129	-0,291	-20,511	-0,291	-20,784	-0,289	-21,144	-0,237	-21,286	-0,235	-21,604	-0,286	-22,022
-0,227	-20,08	-0,282	-20,485	-0,281	-20,777	-0,279	-21,111	-0,223	-21,263	-0,222	-21,584	-0,277	-22,006
-0,213	-20,071	-0,272	-20,46	-0,271	-20,758	-0,27	-21,101	-0,209	-21,238	-0,208	-21,542	-0,267	-21,98
-0,199	-20,054	-0,262	-20,456	-0,261	-20,725	-0,26	-21,095	-0,196	-21,212	-0,195	-21,51	-0,257	-21,964
-0,186	-20,038	-0,252	-20,44	-0,251	-20,719	-0,25	-21,069	-0,182	-21,182	-0,181	-21,487	-0,247	-21,938
-0,172	-20,006	-0,242	-20,417	-0,241	-20,706	-0,24	-21,049	-0,168	-21,156	-0,167	-21,458	-0,237	-21,905
-0,159	-19,983	-0,232	-20,408	-0,231	-20,677	-0,23	-21,02	-0,155	-21,114	-0,154	-21,429	-0,227	-21,889
-0,145	-19,96	-0,222	-20,391	-0,221	-20,667	-0,22	-21,011	-0,141	-21,095	-0,14	-21,393	-0,217	-21,847
-0,131	-19,931	-0,213	-20,378	-0,211	-20,651	-0,21	-20,998	-0,127	-21,056	-0,127	-21,364	-0,207	-21,837
-0,117	-19,915	-0,202	-20,359	-0,201	-20,625	-0,2	-20,981	-0,114	-21,03	-0,113	-21,332	-0,197	-21,821
-0,103	-19,886	-0,193	-20,349	-0,191	-20,609	-0,19	-20,955	-0,1	-21,011	-0,099	-21,309	-0,188	-21,798
-0,09	-19,863	-0,183	-20,336	-0,182	-20,592	-0,18	-20,936	-0,086	-20,978	-0,085	-21,26	-0,178	-21,763
-0,076	-19,847	-0,172	-20,314	-0,172	-20,573	-0,17	-20,92	-0,073	-20,943	-0,072	-21,231	-0,167	-21,753
-0,063	-19,831	-0,162	-20,297	-0,162	-20,57	-0,161	-20,907	-0,059	-20,904	-0,058	-21,195	-0,158	-21,724
-0,049	-19,805	-0,152	-20,288	-0,152	-20,537	-0,151	-20,884	-0,046	-20,874	-0,044	-21,153	-0,148	-21,688
-0,035	-19,779	-0,142	-20,272	-0,141	-20,524	-0,14	-20,865	-0,032	-20,842	-0,031	-21,121	-0,138	-21,665
-0,022	-19,763	-0,133	-20,252	-0,132	-20,508	-0,13	-20,849	-0,018	-20,803	-0,017	-21,059	-0,128	-21,659
-0,008	-19,717	-0,123	-20,233	-0,122	-20,485	-0,121	-20,823	-0,005	-20,771	-0,004	-21,02	-0,118	-21,62
0,006	-19,691	-0,113	-20,22	-0,112	-20,476	-0,111	-20,81	0,009	-20,709	0,01	-20,972	-0,108	-21,597
0,019	-19,662	-0,103	-20,197	-0,102	-20,45	-0,101	-20,78	0,022	-20,657	0,023	-20,917	-0,098	-21,568
0,033	-19,633	-0,093	-20,19	-0,092	-20,434	-0,091	-20,767	0,036	-20,609	0,037	-20,861	-0,088	-21,536
0,046	-19,601	-0,083	-20,161	-0,082	-20,421	-0,081	-20,758	0,05	-20,547	0,05	-20,797	-0,078	-21,51
0,06	-19,545	-0,073	-20,155	-0,072	-20,395	-0,071	-20,732	0,063	-20,492	0,064	-20,725	-0,068	-21,487
0,074	-19,49	-0,063	-20,126	-0,063	-20,382	-0,061	-20,712	0,077	-20,43	0,077	-20,651	-0,059	-21,458
0,088	-19,451	-0,053	-20,119	-0,052	-20,362	-0,051	-20,68	0,09	-20,356	0,091	-20,557	-0,049	-21,429
0,101	-19,425	-0,043	-20,103	-0,042	-20,343	-0,041	-20,651	0,104	-20,272	0,104	-20,46	-0,039	-21,393
0,115	-19,374	-0,033	-20,087	-0,033	-20,317	-0,032	-20,611	0,117	-20,161	0,118	-20,343	-0,029	-21,354
0,128	-19,306	-0,023	-20,058	-0,022	-20,297	-0,021	-20,599	0,13	-20,064	0,131	-20,226	-0,019	-21,322
0,141	-19,234	-0,013	-20,048	-0,012	-20,268	-0,011	-20,576	0,144	-19,954	0,144	-20,109	-0,009	-21,267
0,155	-19,163	-0,003	-20,019	-0,003	-20,246	-0,002	-20,55	0,157	-19,824	0,158	-19,96	0	-21,238
0,168	-19,066	0,006	-19,996	0,007	-20,213	0,008	-20,531	0,17	-19,695	0,171	-19,782	0,011	-21,199
0,182	-18,975	0,017	-19,967	0,017	-20,19	0,018	-20,498	0,184	-19,519	0,184	-19,588	0,012	-21,16
0,195	-18,887	0,026	-19,947	0,027	-20,171	0,028	-20,466	0,197	-19,328	0,197	-19,361	0,03	-21,111
0,209	-18,748	0,036	-19,925	0,037	-20,148	0,038	-20,434	0,21	-19,124	0,21	-19,124	0,04	-21,056
0,222	-18,609	0,046	-19,886	0,047	-20,106	0,048	-20,388	0,222	-18,884	0,223	-18,852	0,05	-21,014
0,235	-18,45	0,056	-19,857	0,057	-20,077	0,057	-20,346	0,236	-18,592	0,235	-18,531	0,06	-20,959
0,248	-18,265	0,066	-19,844	0,066	-20,025	0,068	-20,304	0,248	-18,307	0,248	-18,187	0,069	-20,894
0,261	-18,061	0,076	-19,805	0,076	-19,999	0,077	-20,246	0,261	-17,951	0,261	-17,769	0,079	-20,816
0,274	-17,837	0,086	-19,759	0,086	-19,96	0,087	-20,213	0,273	-17,549	0,273	-17,322	0,089	-20,758
0,287	-17,549	0,096	-19,72	0,096	-19,905	0,097	-20,158	0,285	-17,095	0,285	-16,777	0,099	-20,667
0,3	-17,247	0,105	-19,695	0,106	-19,87	0,107	-20,109	0,297	-16,579	0,296	-16,197	0,108	-20,592
0,313	-16,894	0,115	-19,63	0,116	-19,811	0,117	-20,038	0,31	-15,963	0,308	-15,493	0,118	-20,492
0,325	-16,489	0,125	-19,591	0,126	-19,753	0,127	-19,977	0,321	-15,299	0,319	-14,715	0,128	-20,401
0,337	-16,019	0,135	-19,529	0,136	-19,688	0,136	-19,912	0,332	-14,515	0,33	-13,827	0,137	-20,291
0,349	-15,455	0,145	-19,464	0,145	-19,617	0,146	-19,818	0,343	-13,62	0,34	-12,793	0,147	-20,171
0,36	-14,839	0,154	-19,409	0,155	-19,552	0,155	-19,733	0,353	-12,631	0,349	-11,662	0,157	-20,048
0,372	-14,113	0,164	-19,344	0,165	-19,49	0,165	-19,643	0,363	-11,461	0,359	-10,356	0,166	-19,921
0,382	-13,283	0,174	-19,257	0,175	-19,403	0,175	-19,545	0,372	-10,184	0,368	-8,936	0,176	-19,763
0,393	-12,307	0,184	-19,176	0,184	-19,302	0,185	-19,442	0,382	-8,712	0,377	-7,328	0,185	-19,591
0,403	-11,218	0,193	-19,092	0,194	-19,186	0,194	-19,315	0,39	-7,143	0,385	-5,62	0,194	-19,413
0,413	-9,963	0,203	-18,978	0,203	-19,075	0,204	-19,186	0,398	-5,386	0,392	-3,71	0,204	-19,202
0,422	-8,589	0,213	-18,871	0,213	-18,975	0,213	-19,036	0,405	-3,5	0,399	-1,707	0,213	-18,985
0,431	-7,007	0,222	-18,751	0,223	-18,823	0,223	-18,878	0,412	-1,441	0,406	0,475	0,222	-18,754
0,439	-5,292	0,232	-18,605	0,232	-18,68	0,233	-18,696	0,419	0,695	0,412	2,724	0,232	-18,495
0,446	-3,396	0,242	-18,463	0,242	-18,518	0,242	-18,505	0,425	2,99	0,418	5,139	0,24	-18,216
0,453	-1,406	0,251	-18,32	0,251	-18,336	0,251	-18,304	0,431	5,366	0,423	7,583	0,25	-17,912
0,46	0,766	0,26	-18,132	0,261	-18,129	0,26	-18,074	0,436	7,869	0,428	10,19	0,259	-17,568
0,466	3,022	0,27	-17,934	0,269	-17,915	0,269	-17,821	0,441	10,436	0,433	12,831	0,267	-17,179
0,472	5,389	0,279	-17,724	0,279	-17,682	0,278	-17,532	0,446	13,068	0,438	15,528	0,276	-16,793
0,477	7,92	0,288	-17,484	0,288	-17,412	0,287	-17,205	0,451	15,833	0,442	18,349	0,284	-16,33
0,482	10,488	0,297	-17,218	0,297	-17,121	0,296	-16,868	0,455	18,614	0,447	21,179	0,292	-15,844
0,487	13,211	0,306	-16,936	0,306	-16,79	0,305	-16,492	0,459	21,487	0,451	24,09	0,301	-15,276
0,491	15,934	0,316	-16,602	0,315	-16,427	0,314	-16,064	0,463	24,401	0,454	27,017	0,309	-14,677
0,496	18,764	0,324	-16,249	0,323	-16,041	0,322	-15,617	0,467	27,399	0,459	30,064	0,317	-14,038
0,5	21,642	0,333	-15,853	0,332	-15,604	0,33	-15,104	0,471	30,369	0,462	33,072	0,324	-13,331
0,504	24,608	0,341	-15,39	0,34	-15,108	0,338	-14,54	0,474	33,432	0,465	36,171	0,331	-12,524
0,508	27,555	0,349	-14,926	0,348	-14,583	0,346	-13,918	0,478	36,495	0,4			

30°C		35°C		40°C		45°C		50°C		55°C		60°C	
U in V	I in mA												
	
		0,358	-14,391	0,356	-14,006	0,354	-13,231					0,346	-10,735
		0,366	-13,775	0,364	-13,328	0,361	-12,479					0,352	-9,701
		0,373	-13,114	0,372	-12,608	0,368	-11,659					0,358	-8,621
		0,381	-12,401	0,379	-11,827	0,376	-10,774					0,364	-7,448
		0,389	-11,581	0,386	-10,949	0,382	-9,756					0,37	-6,18
		0,396	-10,706	0,393	-9,996	0,389	-8,725					0,376	-4,868
		0,402	-9,769	0,399	-8,994	0,395	-7,597					0,382	-3,47
		0,409	-8,709	0,406	-7,86	0,401	-6,352					0,387	-1,97
		0,415	-7,587	0,412	-6,683	0,407	-5,062					0,391	-0,446
		0,421	-6,394	0,418	-5,438	0,412	-3,691					0,396	1,162
		0,427	-5,085	0,423	-4,051	0,417	-2,21					0,401	2,854
		0,432	-3,723	0,428	-2,641	0,422	-0,705					0,404	4,582
		0,437	-2,304	0,434	-1,15	0,427	0,87					0,409	6,342
		0,442	-0,744	0,439	0,442	0,431	2,549					0,412	8,209
		0,447	0,831	0,443	2,079	0,436	4,274					0,416	10,044
		0,451	2,471	0,447	3,768	0,44	6,018					0,42	11,969
		0,456	4,232	0,451	5,541	0,443	7,859					0,423	13,953
		0,46	5,982	0,455	7,347	0,447	9,723					0,426	15,917
		0,464	7,755	0,459	9,191	0,451	11,619					0,43	17,914
		0,468	9,7	0,463	11,133	0,454	13,613					0,433	20,028
		0,471	11,593	0,466	13,055	0,458	15,587					0,436	22,109
		0,474	13,603	0,47	15,062	0,461	17,661					0,439	24,274
		0,478	15,606	0,473	17,097	0,464	19,713					0,442	26,407
		0,481	17,632	0,476	19,153	0,467	21,791					0,445	28,55
		0,484	19,749	0,479	21,269	0,47	23,94					0,447	30,764
		0,487	21,83	0,482	23,373	0,473	26,07					0,45	32,929
		0,49	23,947	0,485	25,432	0,475	28,223					0,452	35,124
		0,493	26,129	0,487	27,723	0,478	30,466					0,455	37,445
		0,495	28,287	0,49	29,876	0,481	32,647					0,457	39,679
		0,498	30,495	0,493	32,087	0,484	34,848					0,46	41,922

Tabelle 16: Messwerte zu Aufgabe 3 (Kennlinien, Teil 2)