

Protokoll zur Aufnahme von U-I-Kennlinien

Daniel Schury
Daniel.Schury@physik.uni-giessen.de

23. November 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Grundlagen	4
2.1	Bändermodell	4
2.1.1	Entstehung der Energiebänder	4
2.1.2	Metall, Halbleiter, Isolator	5
2.1.3	Dotierung	6
2.2	pn-Übergang	6
2.3	Diode	8
2.4	Bipolartransistor	8
2.5	Feldeffekttransistor	9
2.6	Solarzellen	10
3	Durchführung	11
3.1	U-I-Kennlinien	11
3.2	Solarzellen	11
4	Auswertung	12
4.1	U-I-Kennlinien an Halbleitern	12
4.1.1	Diode	12
4.1.2	Bipolartransistor	13
4.1.3	Feldeffekttransistor	14
4.2	Solarzellen	15
4.2.1	Dunkelkennlinien	15
4.2.2	Hellkennlinien	18
4.2.3	Intensitätsverteilung	21

1 Aufgabenstellung

Der Versuch war in zwei Teile geteilt. Im ersten Teil galt es, die Kennlinien einer Diode, die eines Bipolartransistors und die eines Feldeffekttransistors aufzunehmen. Im Speziellen sind das die Kennlinie der Diode, die Vierquadrantendarstellung der Kennlinien des Bipolartransistors und die Teilchencharakteristik des Feldeffekttransistors.

Im zweiten Teil galt es, die Eigenschaften verschiedener Solarzellen zu charakterisieren. Verwendet wurden eine amorphe, eine polykristalline und eine monokristalline Silizium-solarzelle. Ziel war die Aufnahme je einer Dunkelkennlinie sowie die Bestimmung des Idealitätsfaktors und des Sättigungsstroms. Unter Beleuchtung sollte der optimale Arbeitspunkt der Solarzellen sowie deren Füllfaktoren bestimmt werden.

Abschließend wurden Messungen zur Strahlungsleistungsdichte durchgeführt, welche Daten zur Lichtintensität sowie der spektralen Verteilung ergaben.

2 Grundlagen

2.1 Bändermodell

2.1.1 Entstehung der Energiebänder

In Festkörpern befinden sich die Hüllenelektronen nicht in einzelnen, diskreten Energieniveaus sondern in sogenannten Energiebändern. Der Grund dafür ist, dass sich die äußeren atomaren Energieniveaus überlagern und gegenseitig beeinflussen. Es entstehen überall im Festkörper besetzte und unbesetzte Energieniveaus, die energetisch sehr dicht beieinanderliegen und somit eine bandähnliche Struktur bilden. Innerhalb eines Bandes und somit innerhalb des Festkörpers kann sich das Elektron frei bewegen, ohne direkt an ein einzelnes Atom gebunden zu sein. Mathematisch lässt sich das Problem durch die sogenannten Bloch-Wellenfunktionen beschreiben. Diese beruhen auf der Annahme eines Potentials der Gestalt sich periodisch wiederholender Delta-Potentiale, welche gegenüber der Verschiebung des Ortsvektors entlang eines Gittervektors translationsinvariant sind.

$$\text{Blochwellen : } \Psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = u(\vec{r}) \cdot e^{i\vec{k}\vec{r}} \quad \text{mit} \quad u(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} c_{\vec{k}\vec{G}} \cdot e^{i\vec{G}\vec{r}} \quad (2.1)$$

An den Grenzflächen der Brillouin-Zone treten dabei Effekte auf, die dazu führen, dass zwischen zwei Bändern sogenannte Bandlücken entstehen, also Energiebereiche, in denen keine Energieniveaus liegen, die also für die Elektronen verboten sind.

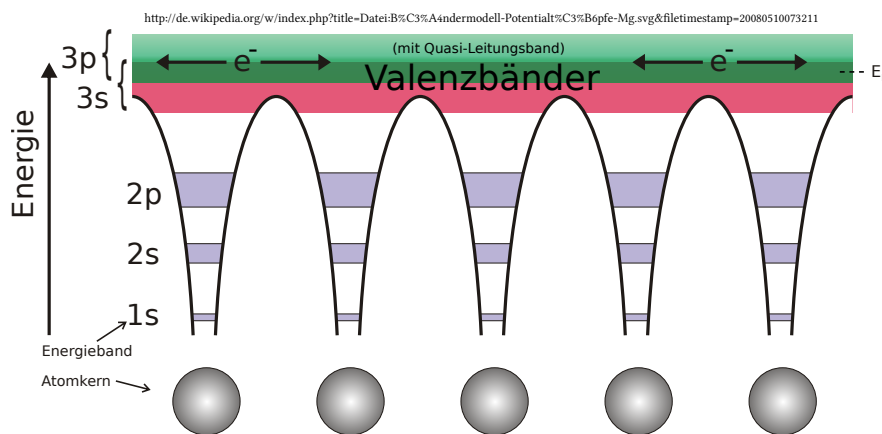


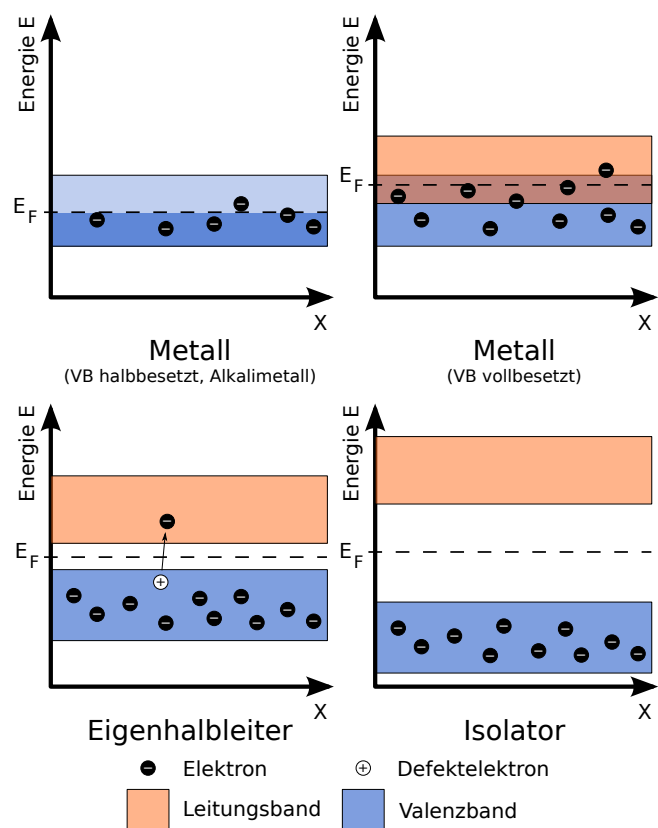
Abbildung 2.1: Entstehung der Bänder in Festkörpern

2.1.2 Metall, Halbleiter, Isolator

Aus diesem Modell lassen sich nun direkt die verschiedenen Eigenschaften der drei Klassen Metall, Halbleiter und Isolator ableiten.

Bei **Metallen** ist das oberste Valenzband nur zum Teil besetzt oder überschneidet sich mit dem untersten Leitungsband. In beiden Fällen existieren unbesetzte Energieniveaus in den Bändern, in welche ein Elektron wechseln und sich somit im Band und damit im Festkörper bewegen kann. Metalle sind darum also gute Leiter, da beim Anlegen einer Spannung immer freie Zustände vorhanden sind, über die sich die Elektronen bewegen können.

Isolatoren hingegen besitzen ein vollständiges besetztes oberes Valenzband und ein vollkommen leeres unteres Valenzband. In beiden kann kein Ladungstransfer stattfinden, da entweder keine freien Plätze oder keine Ladungsträger zur Bewegung zur Verfügung stehen. Zudem ist die Bandlücke zwischen den beiden Bändern zu groß (7 eV und mehr), als dass die thermische Energie der Elektronen einen Bandwechsel und somit Ladungsbewegung ermöglichen könnte. Bei **Halbleitern** ist die Situation ähnlich wie bei Isolatoren, mit dem Unterschied, dass die Bandlücke nur wenige Elektronenvolt beträgt. Ab Temperaturen über 0 Kelvin können also Elektronen bedingt durch ihre thermische Energie vom Valenz- ins Leitungsband wechseln und somit eine gewisse Leitfähigkeit bewerkstelligen. Diese nimmt mit steigender Temperatur zu, da die Elektronen der Maxwell-Boltzmann-Verteilung folgend bei höheren Temperaturen eine größere Wahrscheinlichkeit besitzen, über die zum Bandwechsel nötige Energie zu verfügen. Bei Halbleitern tragen sowohl die Elektronen im Leitungsband als auch die Löcher im Valenzband, welche sich wie positive Ladungen verhalten, zur Leitfähigkeit bei.



http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Energy_band_model_%28DE%29_.svg&filetimestamp=20091025180640

Abbildung 2.2: Bandstruktur in den verschiedenen Festkörperarten

2.1.3 Dotierung

Dotierung bezeichnet ein Verfahren, bei dem man gezielt die elektronischen Eigenschaften von Halbleitern verändert. Durch das gezielte Einbringen von Fremdatomen in das Kristallgitter erzeugt man Störstellen, über die man die Ladungsträgerkonzentration im Halbleiter einfach beeinflussen kann. Elementhalbleiter sind solche Elemente, die über vier Valenzelektronen verfügen. Verbindungshalbleiter müssen *im Mittel* über vier Valenzelektronen verfügen, also zum Beispiel III-V-Halbleiter. Daneben gibt es noch organische Halbleiter. Außerdem bezeichnet man Materialien, deren spezifischer Widerstand ähnlich dem von Halbleitern ist ebenfalls als Halbleiter.

Beim Dotieren bringt man nun Atome in das Kristallgitter ein, welche entweder über mehr Elektronen verfügen, somit als Donator agieren (n-Dotierung) oder über weniger Elektronen verfügen (p-Dotierung). Die zusätzlichen Ladungsträger (das bei der p-Dotierung entstehende Loch, also die nicht vollständige Bindung, verhält sich wie eine positive Ladung) sitzen nun im Valenz- bzw. Leitungsband, welche somit nicht mehr voll besetzt sind. Dadurch lässt sich die Leitfähigkeit des dotierten Halbleiters über die Störstellenkonzentration gezielt beeinflussen. Der Effekt der Störstellenleitung überwiegt zudem den der temperaturbedingten Leitung, wodurch die Leitfähigkeit nur noch im geringen Maße von der Umgebungstemperatur abhängt.

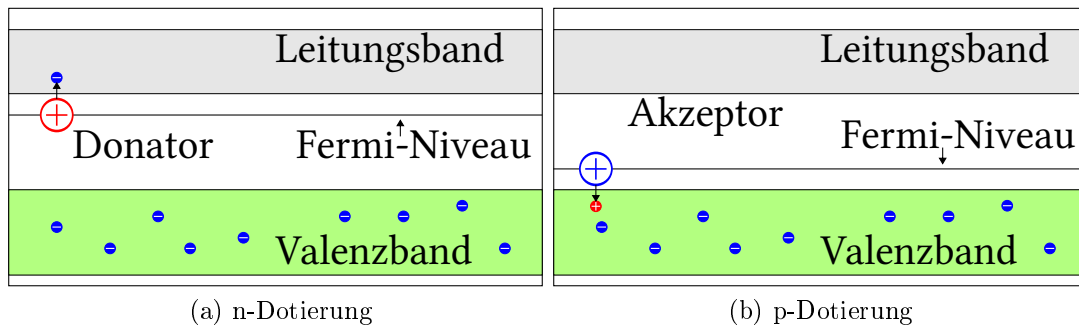


Abbildung 2.3: n- und p-Dotierung im Bändermodell

2.2 pn-Übergang

Wichtig für alle Halbleiterbauelemente ist der sogenannte pn-Übergang. Dabei bringt man einen n- und einen p-dotierten Halbleiter aneinander. Zunächst rekombinieren die Leitungselektronen des n-Halbleiters mit den Defektelektronen (Löchern) des p-Halbleiters. Durch die Ladungstrennung baut sich eine Raumladungszone und damit ein elektrisches Feld auf, welches der Ladungsdiffusion entgegenwirkt. Sobald diese die gleiche Feldstärke wie das Feld zwischen den zwei verschiedenen dotierten Schichten erreicht hat, kommt der Rekombinationsvorgang zum Erliegen. Die Raumladungszone selbst ist

frei von Ladungsträgern, weshalb man sie auch Verarmungszone nennt. Legt man nun eine Spannung an die beiden Schichten an, so erzeugt diese ein elektrisches Feld in Richtung des Felds der Raumladungszone oder entgegen diesem. Dadurch wird die Raumladungszone entweder verbreitert oder geschmälert.

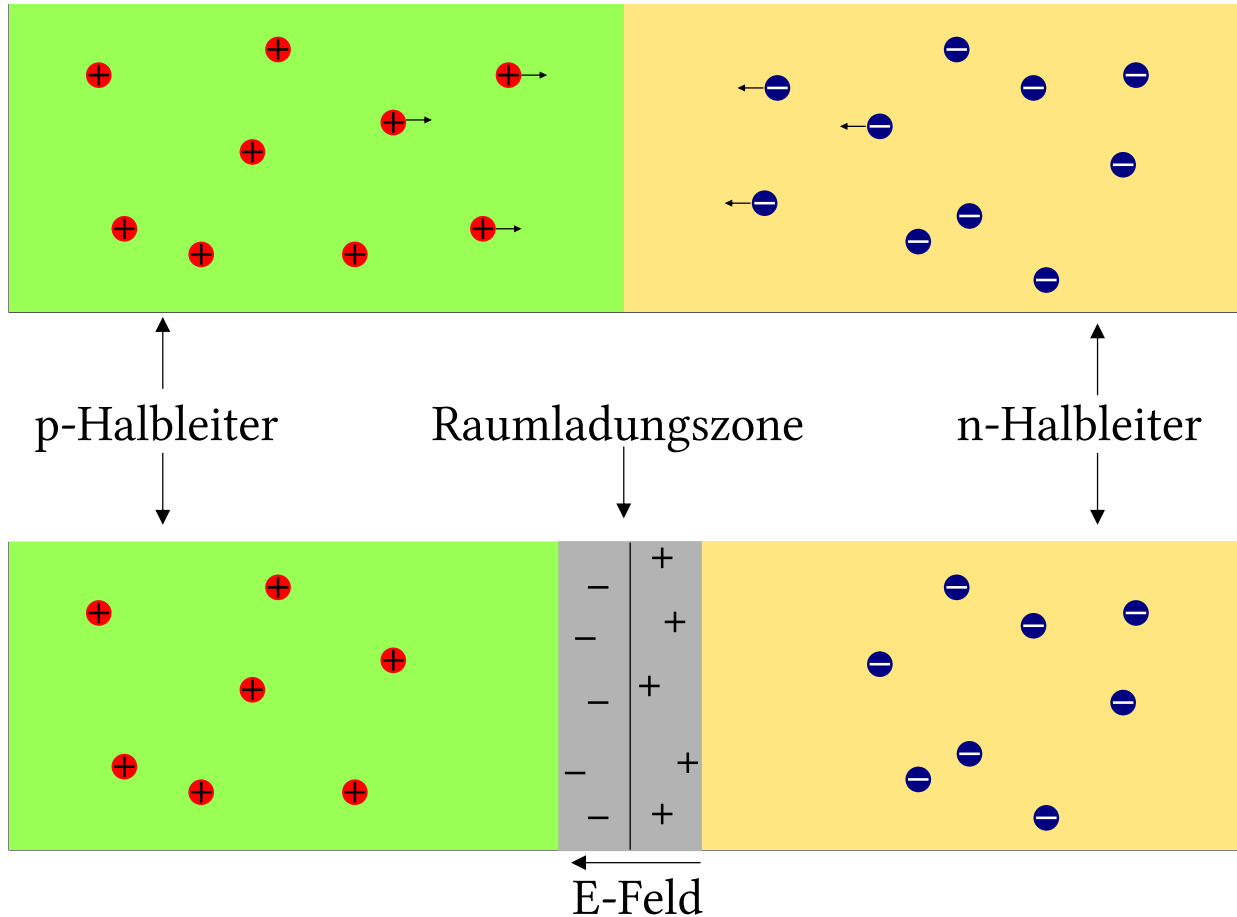


Abbildung 2.4: Ausbildung der Raumladungszone

Um den pn-Übergang im Bändermodell zu beschreiben, ist ein Blick auf das Fermi-Niveau zu werfen. Beim p-Halbleiter liegt dieses kurz überhalb des Valenzbandes, beim n-Halbleiter knapp unter dem Leitungsband. Bringt man die unterschiedlichen Halbleiter nun zusammen, werden die Energieniveaus auf der n-Halbleiterseite abgesenkt, um die Fermi-niveaus anzugleichen. Die Bänder werden dabei verbogen und bilden einen Potentialwall, für dessen Überwindung Energie benötigt wird.

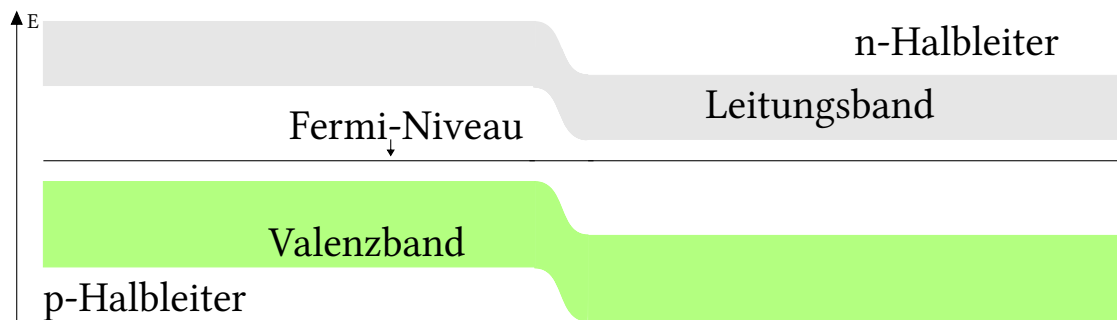
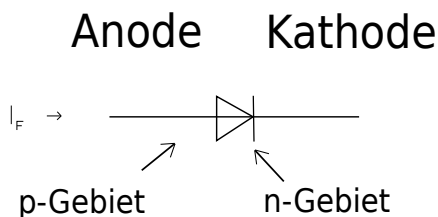


Abbildung 2.5: Verbogene Bandstruktur beim pn-Übergang

2.3 Diode

Eine Halbleiterdiode ist im Grunde nichts anderes als ein mit Kontakten versehener pn-Übergang. Eine Diode lässt sich in Sperr- oder in Durchlassrichtung betreiben, je nachdem ob der Pluspol an die p-Halbleiterseite gelegt wird (Durchlassrichtung) oder an die n-Halbleiterseite (Sperrrichtung). Dabei ist zu beachten, dass beim Betrieb in Sperrrichtung ab einer gewissen Spannung das elektrische Feld so groß wird, dass es die Atome ionisiert. Es kommt zum Durchschlag, was dieser Spannung, welche eine charakteristische Betriebsgröße einer Diode ist, den Namen Durchschlagsspannung einbringt. Durch Stöße werden weitere Ionen erzeugt, womit der einmal ausgelöste Strom schnell ansteigt und die Diode durchaus zerstören kann. Die Höhe der Durchschlagsspannung ist bauartbedingt. Je nach Einsatzzweck der Diode kann der Durchschlag durchaus erwünscht sein, um diese als eine Art »Überdruckventil« einzusetzen.



http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Diode_Schaltzeichen.svg&filetimestamp=20080222191244

Abbildung 2.6: Diodenschaltzeichen

2.4 Bipolartransistor

Ein Bipolartransistor besteht aus einem doppelten pn-Übergang, entweder in der Form pnp oder npn. Anders als die Diode besitzt er drei Anschlüsse, je einen an jeder Schicht. Die mittlere Schicht nennt man Basis, die beiden äußeren Kollektor und Emitter. Legt man nur eine Spannung zwischen Kollektor und Emitter an, so verhält sich der Bipolartransistor wie zwei entgegengesetzt eingebaute Dioden: Die Raumladungsschicht des einen pn-Übergangs wird schmaler, die des anderen dafür breiter, der Transistor sperrt. Legt man jedoch eine Spannung zwischen Basis und Emitter, so werden der Basis ihre Ladungsträger entzogen und in den Kollektor »gesaugt«. Dort rekombiniert ein

kleiner Teil, der größte Teil jedoch erreicht den Kollektor-pn-Übergang und wird wegen der Emitter-Kollektor-Spannung zum Kollektor gezogen. Ein kleiner Strom (Basisstrom) steuert also einen großen Strom (Emitterstrom).

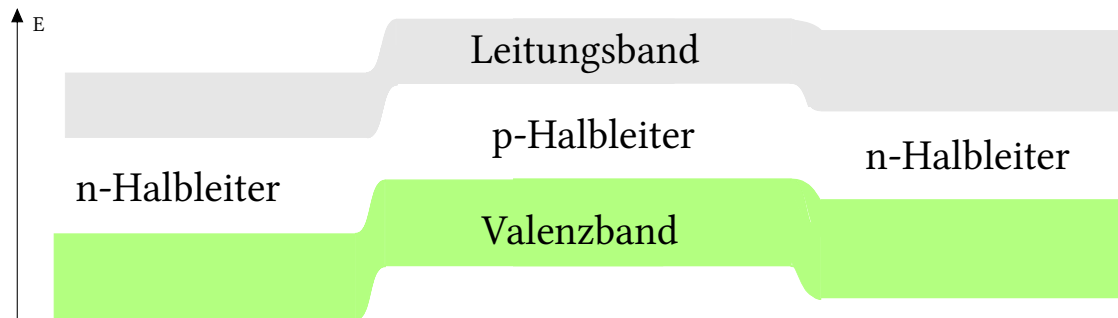


Abbildung 2.7: Bandstruktur Bipolartransistor mit rechts abgesenktem Potentialwall

Im Bändermodell reduziert der Basisstrom den Potentialwall des einen pn-Übergangs, so dass Ladungsträger in den energetisch höher gelegenen Teil diffundieren können. Einmal oben, können sie leicht auf der anderen Seite wieder runterrutschen.

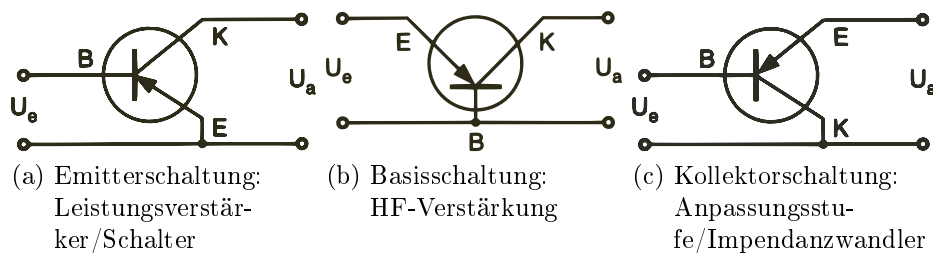


Abbildung 2.8: Die drei verschiedenen Arten, einen Bipolartransistor zu beschalten. Darunter jeweils die Bezeichnung sowie Einsatzzweck

2.5 Feldeffekttransistor

Der Feldeffekttransistor (FET) funktioniert ähnlich dem Bipolartransistor. Wie der Name schon suggeriert, wird der Strom hier nicht über einen Strom, sondern eine Spannung gesteuert. Der FET verfügt ebenfalls über drei Anschlüsse: Drain, Source und Gate. Verallgemeinert wird beim FET der Strom dadurch gesteuert, dass die Breite eines Leitungskanals durch spannungsgesteuertes Ausdehnen bzw. Zusammenziehen von Raumladungszonen variiert und somit der Stromfluss gesteuert wird. Technisch kann das auf mehrere Arten umgesetzt werden, am häufigsten sind der Junction-FET (JFET), auch Sperrschicht-FET (SFET) genannt und der Metal-Insulator-Semiconductor-FET (MISFET), auch Metall-Isolator-Halbleiter-FET.

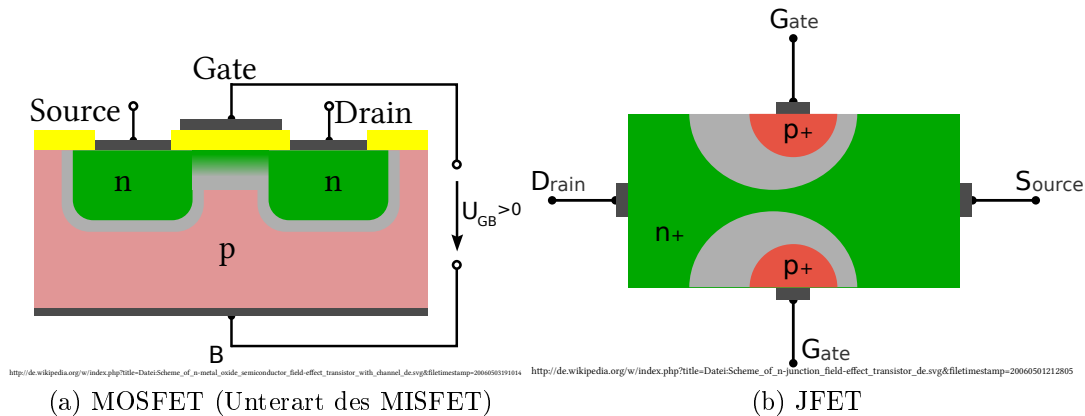
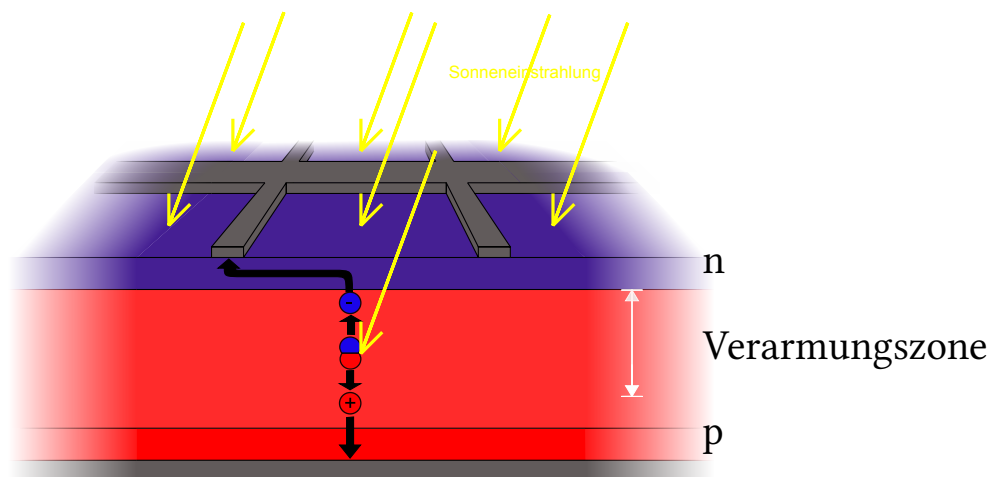


Abbildung 2.9: MOSFET und JFET, die beiden gängigsten FET-Typen

2.6 Solarzellen

Eine Solarzelle ist im Prinzip nichts anderes als eine großflächige Photodiode. Strahlt man auf eine Diode mit Licht der Energie größer der Bandlücke, so können die Photonen absorbiert und Elektron-Loch-Paare erzeugt werden, indem Elektronen in das Leitungsband gehoben werden. Die Elektronen fließen zur n-Halbleiterschicht, die Löcher zur p-Halbleiterschicht, es fließt ein Strom. Solarzellen werden gewöhnlich an der Oberfläche dünn stark n-dotiert, darunter dick schwach p-dotiert. Dadurch entsteht eine knapp unter der Oberfläche der Zelle liegende, breite Verarmungszone. Die große Breite der Zone begünstigt, dass möglichst viele Photonen eine Elektron-Loch-Paar erzeugen, die Lage knapp unter der Oberfläche, dass wenige Photonen vorher absorbiert werden.



http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Solarzelle_Funktionsprinzip2.svg&filetimestamp=20091102202111

Abbildung 2.10: Schematische Funktionsweise einer Solarzelle

3 Durchführung

3.1 U-I-Kennlinien

Zur Charakterisierung der Diode sowie der beiden Transistoren mussten diese nur an die Messelektronik angeschlossen und das zur Messung verwendete Programm gestartet werden. In diesem galt es dann, geeignete Parameter zu wählen, um eine feine Auflösung bei möglichst geringer Schwingung im Messkreis sowie sinnvolle Grenzen der Messwerte zu erreichen. Die erhaltenen Daten wurden im Anschluss an die Messung gespeichert.

3.2 Solarzellen

Die Messungen an den Solarzellen wurden vom Aufbau her wie bei der Diode durchgeführt, auch hierfür wurde das vorhandene Programm benutzt. Zur Aufnahme der Dunkelkennlinie wurden die in einem oben offenem Zylinder eingebetteten Solarzellen verkehrt herum auf dem Tisch platziert, wodurch sie hinreichend vor Licht geschützt waren. Anschließend wurden die Solarzellen in eine Apparatur eingesetzt, in welcher sie gezielt beleuchtet wurden. Hierbei war zu beachten, dass der Abstand so gewählt wurde, dass der gewonnene Strom unter 100 mA lag, um die Elektronik nicht zu beschädigen. Nach der Beleuchtung wurde die Solarzelle durch ein Strahlungsleistungsdichtemessgerät ersetzt, um die während der Messung eingestrahlte Leistungsdichte zu bestimmen. Abschließend wurde mit dem Strahlungsleistungsdichtemessgerät und einem Monochromator die spektrale Verteilung der Lichtquelle beobachtet.

4 Auswertung

4.1 U-I-Kennlinien an Halbleitern

4.1.1 Diode

Bei dem Versuch wurde folgende Kennlinie für die Diode aufgenommen:

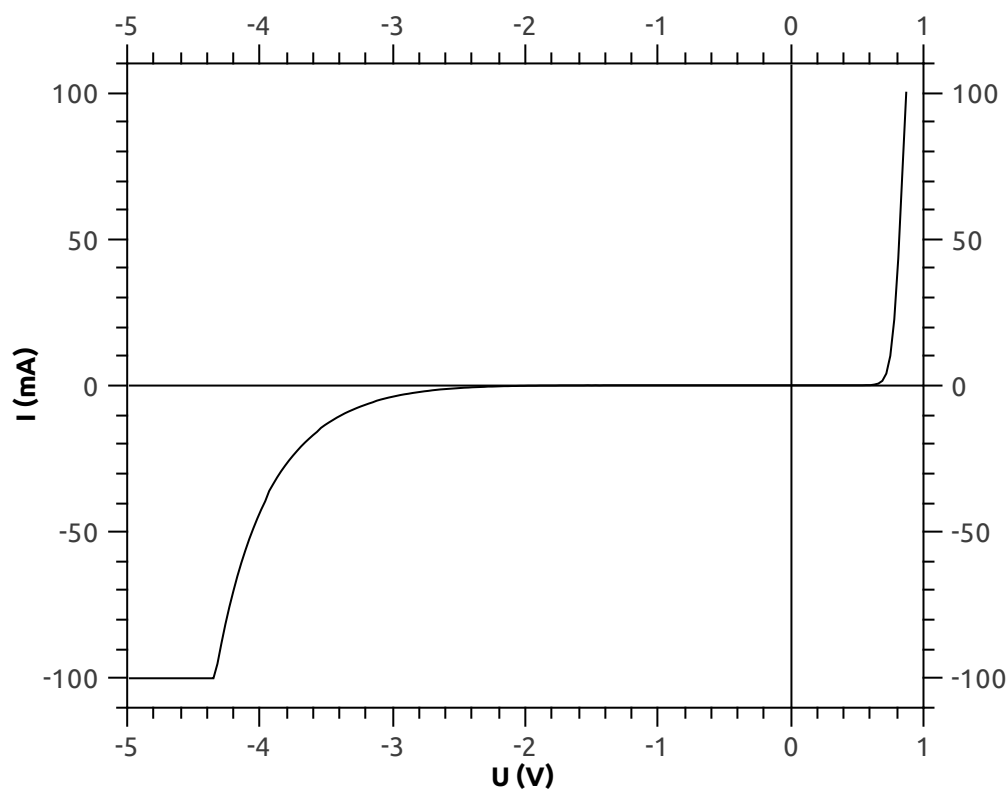


Abbildung 4.1: Diodenkennlinie

Die aufgenommene Kennlinie stimmt sehr gut mit den erwarteten Ergebnissen überein. In Durchlassrichtung fließt bei geringer Spannung zunächst kein Strom, bis das elektrische Feld der Raumladungszone überwunden ist, danach steigt er schnell an. In Sperrichtung fließt bis zum Erreichen der Durchschlagsspannung kein Strom.

Der lineare Verlauf im Bereich von -5 bis 4,3 V ist technisch bedingt, da die Messapparatur bei Strömen von betragsmäßig mehr als 100 mA abregelt. Die geringe Durch-

bruchsspannung von etwas weniger als vier Volt und der langsame Anstieg legen nahe, dass es sich bei der verwendeten Diode um eine Zenerdiode (Z-Diode) handelt.

4.1.2 Bipolartransistor

Vierquadrantendarstellung

Zur Charakterisierung eines Bipolartransistors reicht es in der Regel aus, von den zahlreichen Möglichkeiten der Zusammenhänge zwischen den Größen I_E , I_C , I_B , U_{CE} , U_{BE} und U_C die vier wichtigsten darzustellen.

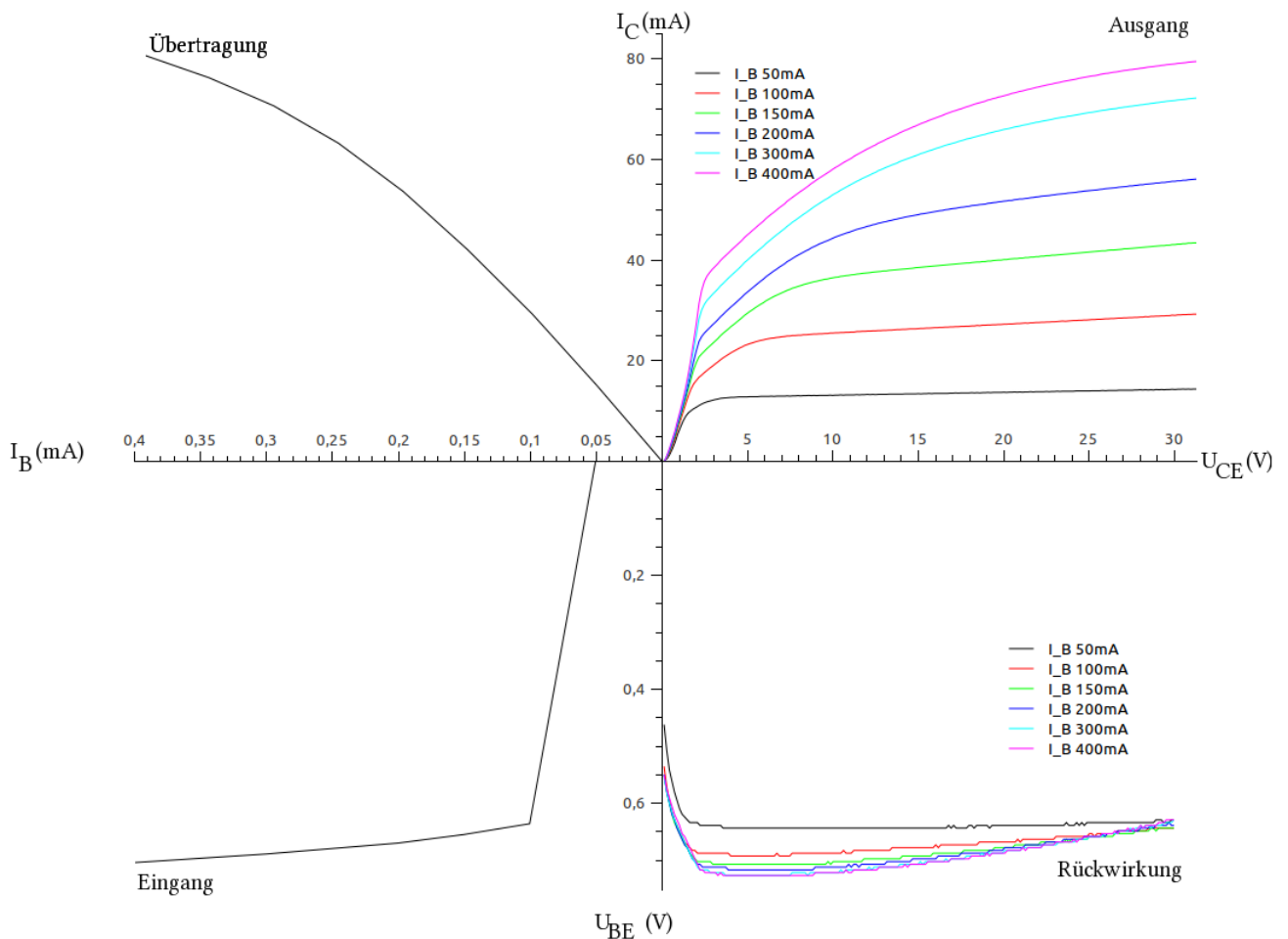


Abbildung 4.2: Vierquadrantendarstellung der Kennlinien des Bipolartransistors

Dazu trägt man im **1. Quadranten** den Kollektorstrom gegen die Kollektor-Emitterspannung bei verschiedenen (aber konstanten) Basisströmen auf und erhält somit das *Ausgangskennlinienfeld*. Die Ausgangskennlinien sind typische Sperrkennlinien der pn-Übergänge. Im **2. Quadranten** trägt man den Kollektorstrom gegen den Basisstrom auf und erhält

somit das *Übertragungs-* oder auch *Verstärkungskennlinienfeld*. Die Kurzschlussstromverstärkung $B = \frac{I_C}{I_B}$ ist ein wichtiges Maß für das Verstärkungsverhalten des Transistors. Im **3. Quadranten** trägt man die Basis-Emitterspannung gegen den Basisstrom auf und erhält somit das *Eingangskennlinienfeld*. Aus dem Verhältnis von U_{BE} zu I_B kann man den Ersatzwiderstand R_{BE} zwischen Basis und Emmitter bestimmen, welcher die Steuerspannungsquelle belastet.

Im letzten, den **4. Quadranten** trägt man die Basis-Emitterspannung gegen die Kollektor-Emitterspannung bei verschiedenen, aber konstanten Basisströmen auf und erhält somit das *Rückwirkungskennlinienfeld*. Die Rückwirkungskennlinien haben bei üblichen Schaltungen keine Bedeutung, da die Rückwirkung in der Regel klein und somit vernachlässigbar ist.

Auffällig ist hierbei, dass der Plot im Eingangskennlinienfeld nicht durch den Koordinatennullpunkt geht, sondern bei einer Basis-Emitterspannung von 0 Volt noch ein Basisstrom von 0,05 mA fließt. Zusammen mit dem scharfen Knick bei 0,1 mA lässt das darauf schließen, dass diese Darstellung auf Grund eines Messfehlers insgesamt um 0,05 mA nach links verschoben ist.

Vierpolparameter

Zur Berechnung der Vierpolparameter wurden die Steigungen der Kennlinien an einem festen Arbeitspunkt mit Hilfe des Programms qtiplot bestimmt. Der frei wählbare Arbeitspunkt wurde von uns auf $U_{CE} = 20,1$ V und $I_B = 200$ mA festgelegt. Damit ergaben sich die Vierpolparameter folgendermaßen.

	Wert	Fehler (absolut)	Fehler (relativ)
h_{11}	221,21 Ω	$\pm 27,21$ Ω	12,36%
h_{21}	168,36	$\pm 11,74$	6,97%
h_{12}	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$\pm 1,96 \cdot 10^{-4}$	10,16%
h_{22}	$0,47 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\Omega}$	$\pm 4,56 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\Omega}$	0,97%

Tabelle 4.1: Vierpolparameter

4.1.3 Feldeffekttransistor

Der Plot der Daten der Messreihe für den Feldeffekttransistor ergab folgende Kennlinien.

Man sieht an der Eingangskennlinie sehr schön, dass es sich um einen selbstsperrenden FET handelt, da bei abnehmender Drain-Source-Spannung der Drain-Source-Strom abnimmt.

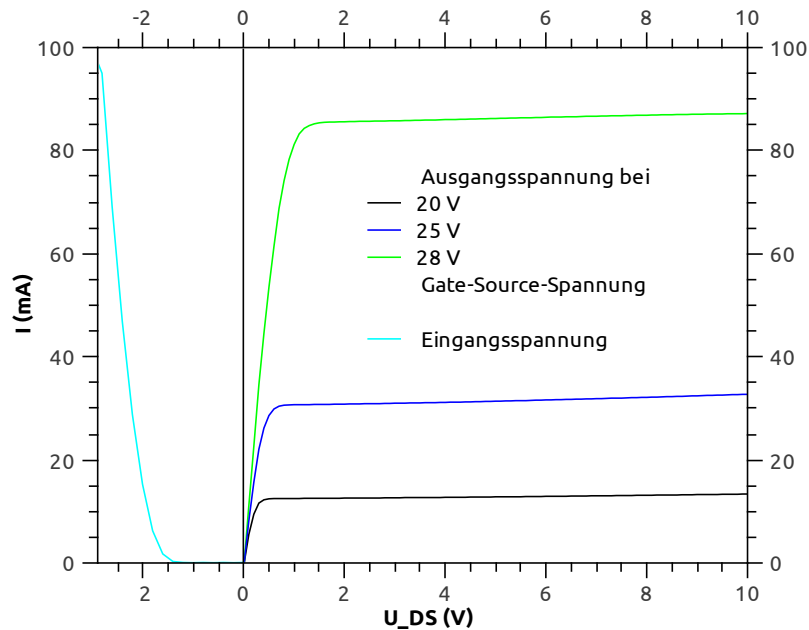


Abbildung 4.3: Kennlinien Feldeffekttransistor

4.2 Solarzellen

4.2.1 Dunkelkennlinien

Zur Bestimmung des Idealitätsfaktors n und des Sättigungsstroms I_0 wurden die Messergebnisse der Dunkelmessung mit der idealen Diodengleichung $I = I_0(e^{\frac{eU}{nk_B T}} - 1)$ gefittet. $\frac{e}{k_B T}$ wurde dabei gleich $39,6 \frac{1}{V}$ gesetzt. Damit ergeben sich folgende Werte:

	n	I_0	Δn	ΔI_0
amorph	58,9	115 mA	0,279	3,11 mA
polykristallin	9,17	231 mA	0,216	168 mA
monokristallin	2,05	3,46 mA	0,035	0,54 mA

Tabelle 4.2: Idealitätsfaktor und Sättigungsstrom der Solarzellen

An den Ergebnissen sieht man, dass nicht alle drei Solarzellenarten gleich gut mit der Formel für eine ideale Diode beschrieben werden können. Die unrealistisch hohen Werte des Idealitätsfaktors bei der polykristallinen und der amorphen Solarzelle zeigen, dass man für eine realistische Berechnung noch parasitäre Widerstände berücksichtigen müsste. Diese ergeben sich einmal als Serienwiderstände an den Leiterbahnen, der Leitung innerhalb des Siliziums sowie bei der der amorphen Zelle zwischen den in Reihe geschalteten Einzelzellen. Dazu kommen noch Verluste in Form paralleler Widerstände an den Grenzübergängen der verschiedenen Siliziumschichten. Da die monokristalline Solarzelle

aus einem Einkristall besteht und somit am reinsten ist, weist sie die geringsten Verluste auf. Die polykristalline Zelle besitzt dahingegen nur noch eine Nahordnung – sie ist zusammengesetzt aus mehreren einkristallinen Strukturen – und hat somit mehr Störstellen. Die amorphe Solarzelle ist nicht nur vollkommen ungeordnet, zudem sind auch noch fünf Einzelzellen hintereinander geschaltet. Dadurch weist sie die größte Abweichung von der Idealformel vor.

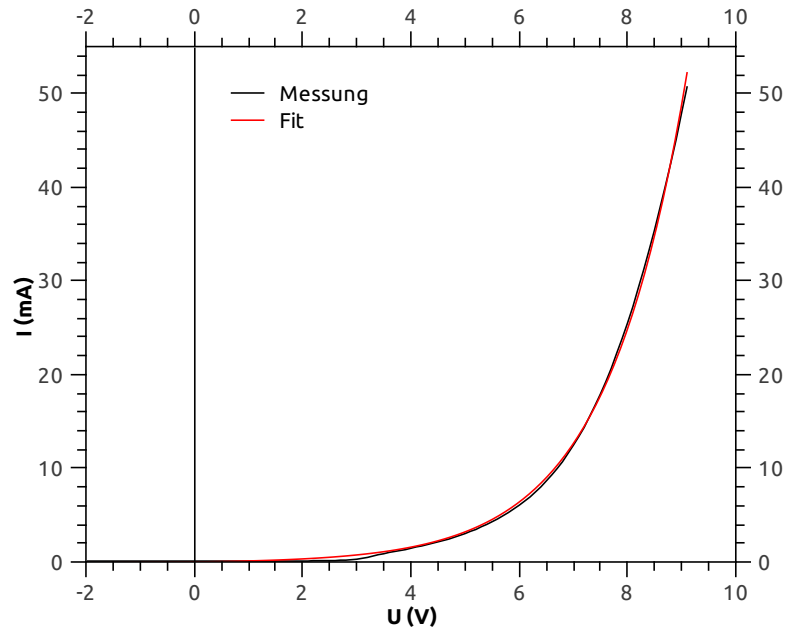


Abbildung 4.4: Fit der Dunkelkennlinie der amorphen Siliziumsolarzelle

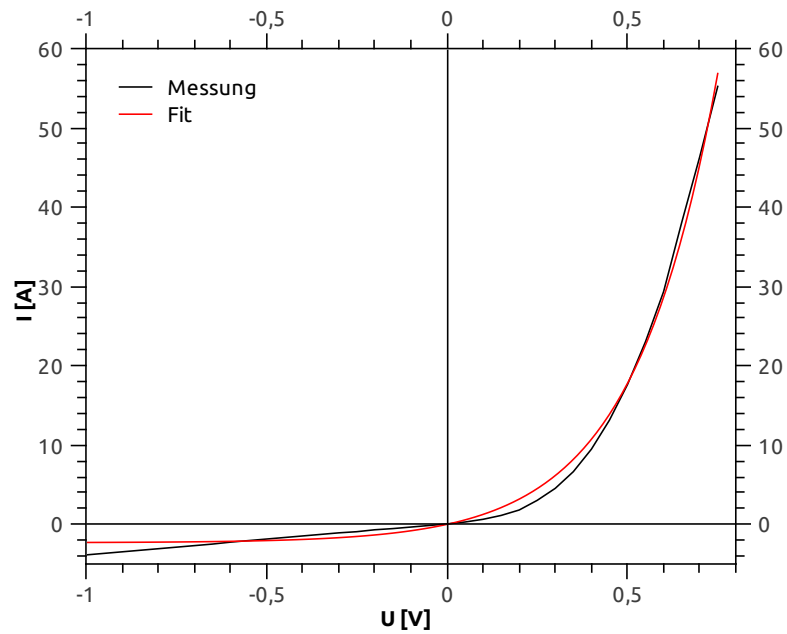


Abbildung 4.5: Fit der Dunkelkennlinie der polykristallinen Siliziumsolarzelle

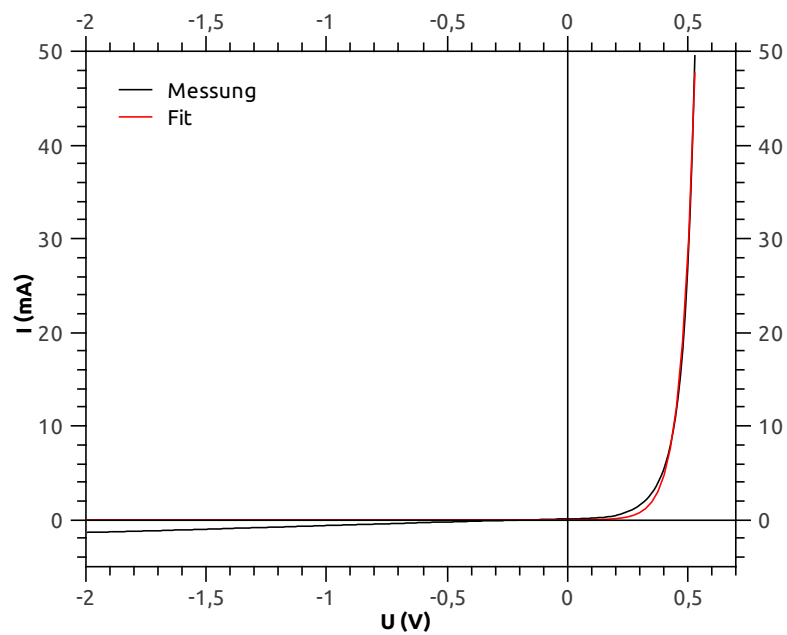


Abbildung 4.6: Fit der Dunkelkennlinie der monokristallinen Siliziumsolarzelle

Man sieht hier schon gut die Unterschiede der verschiedenen Solarzellentypen. Verhalten sich die poly- und die monokristalline Solarzelle stark wie eine normale Diode

(abgesehen von dem frühen Einsetzen des Stromflusses in Sperrichtung bei der polykristallinen Solarzelle), so steigt der Strom bei der amorphen Solarzelle nur langsam an, was für hohe Verluste in Form von Widerständen innerhalb der Zelle spricht.

4.2.2 Hellkennlinien

Der Kurzschlussstrom sowie die Sättigungsspannung lassen sich einfach aus den Schnittpunkten der Achsen ablesen. Es ist jedoch zu beachten, dass der Kurzschlussstrom noch durch die Flächen der Zellen ($A_{\text{amorph}}: 6,3 \text{ cm}^2$, $A_{\text{polykristallin}}: 9,45 \text{ cm}^2$, $A_{\text{monokristallin}}: 19,63 \text{ cm}^2$) zu teilen ist. Außerdem sind bei der amorphen Solarzelle fünf Einzelzellen hintereinandergeschaltet, weshalb der Strom noch mit 5 multipliziert und die Spannung durch 5 geteilt werden muss.

	amorph	polykristallin	monokristallin
U_{OC}	0,68 V	0,4 V	0,51 V
I_{SC}	$3,57 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	$1,8 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	$2,19 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$
A	$6,3 \text{ cm}^2$	$9,45 \text{ cm}^2$	$19,63 \text{ cm}^2$

Tabelle 4.3: Kurzschlussspannung und Sättigungsstrom

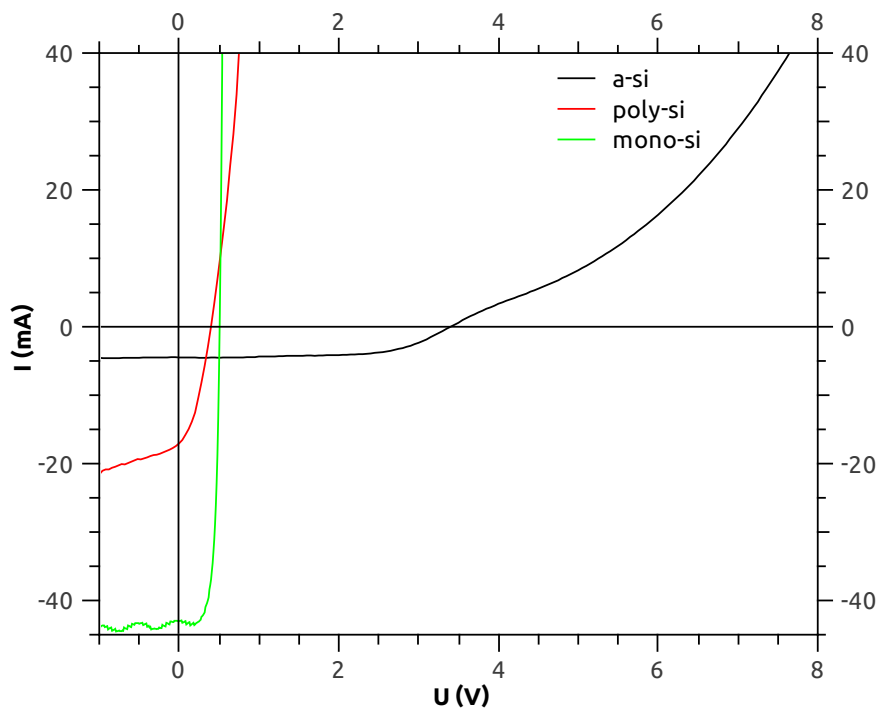


Abbildung 4.7: Hellkennlinien der Solarzellen

Man sieht im Vergleich deutlich die Qualitätsunterschiede zwischen den verschiedenen Bauarten. Während die amorphe Solarzelle nur einen verhältnismäßig geringen Sättigungsstrom aufweist, also viele erzeugte Ladungsträger wieder an den Korngrenzen verschwinden, weisen die kristallinen Solarzellen deutlich bessere Werte auf.

Zur Bestimmung des optimalen Arbeitspunkts und des Füllfaktors wurde zunächst die Leistung gegen die Spannung aufgetragen. Das Maximum der Kurve gibt dabei den optimalen Arbeitspunkt an. Der Füllfaktor ergibt sich dann als $\frac{P_{Max}}{U_{OC}I_{SC}}$, wobei P_{Max} die Leistung am optimalen Arbeitspunkt ist. Der Wirkungsgrad η ergibt sich als Quotient aus elektrischer Leistung $P_{elektrisch}$ und eingestrahler Lichtleistung P_{Licht} : $\eta = \frac{P_{elektrisch}}{P_{Licht}}$.

	amorph	polykristallin	monokristallin
$V_{optimal}$	0,51 V	0,2 V	0,4 V
$I_{optimal}$	18,56 mA	12,549 mA	36,96 mA
$\frac{P_{elektrisch}}{A}$	1,5 $\frac{mW}{cm^2}$	0,27 $\frac{mW}{cm^2}$	0,75 $\frac{mW}{cm^2}$
Füllfaktor	61,96 %	36,82 %	67,39 %
P_{Licht}	71,4 $\frac{mW}{cm^2}$	19,42 $\frac{mW}{cm^2}$	19,2 $\frac{mW}{cm^2}$
η	2,1 %	1,37 %	3,92 %

Tabelle 4.4: Füllfaktor und Wirkungsgrad

Wie erwartet weist die monokristalline Solarzelle den besten Füllfaktor und Wirkungsgrad auf, wobei der Wirkungsgrad stark hinter dem technisch realisierbarem Wert liegt, was aber auf Grund des Praktikumcharakters des Versuchs nicht verwunderlich ist. Überraschenderweise schlägt die amorphe Solarzelle die polykristalline Solarzelle um gute 50%, liegt aber immer noch deutlich hinter der monokristallinen zurück.

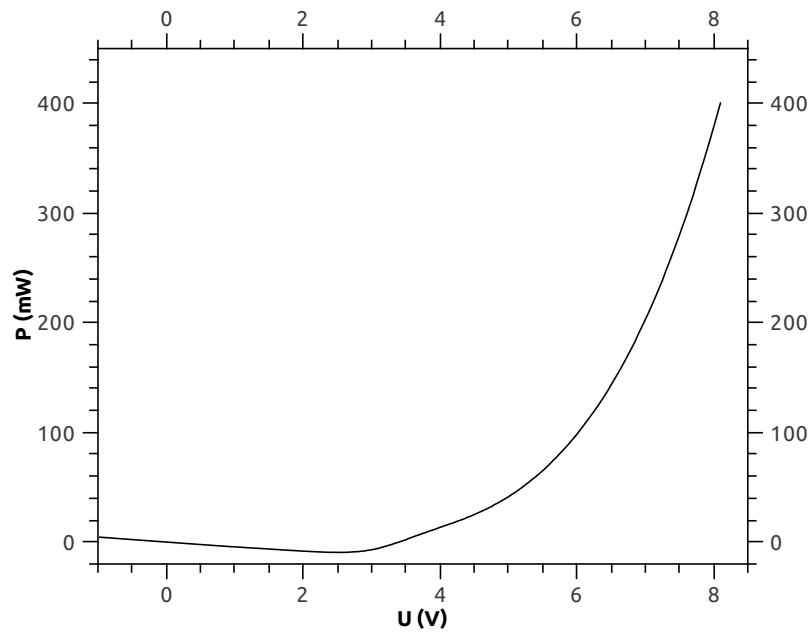


Abbildung 4.8: Leistungskurve der amorphen Siliziumsolarzelle

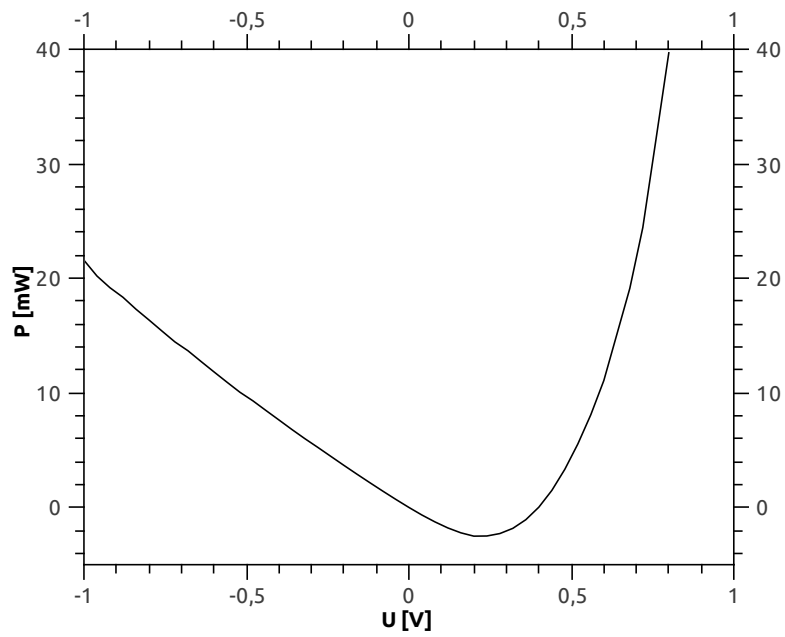


Abbildung 4.9: Leistungskurve der polykristallinen Siliziumsolarzelle

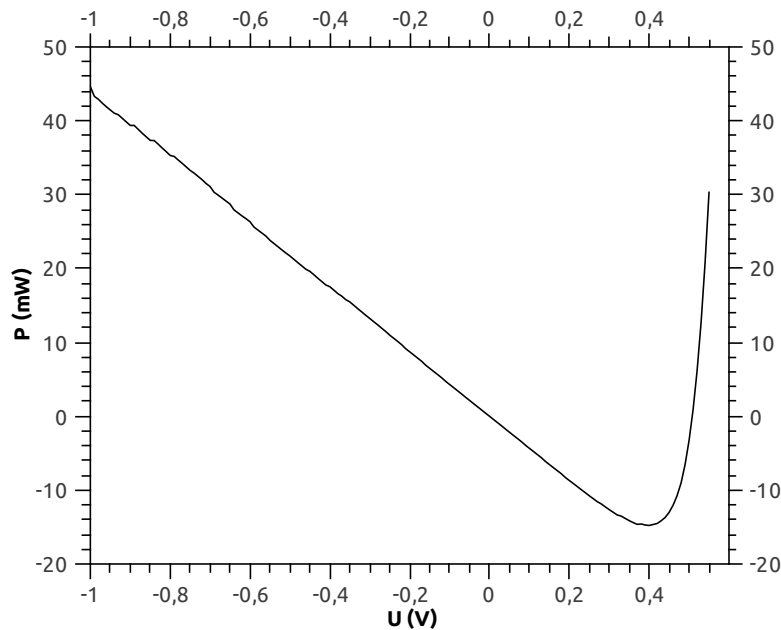


Abbildung 4.10: Leistungskurve der monokristallinen Siliziumsolarzelle

4.2.3 Intensitätsverteilung

Abschließend wurde eine Strahlungsleistungsdichtemessung in Kombination mit einem Monochromator durchgeführt. Dabei ergab sich eine hohe Intensität bei mittleren Wellenlängen, mit Abfall zu beiden Seiten. Die Verteilung entsteht dadurch, dass Photonen mit zu großer Wellenlänge zu wenig Energie besitzen, um eine Elektron-Loch-Paar zu erzeugen. Photonen höherer Energie sind in geringerer Menge enthalten, da entweder nicht so viele erzeugt werden (Stichwort Boltzmann-Verteilung) oder sie ihre Energie durch Wechselwirkung reduzieren. Dieser Effekt lässt sich auch nicht dadurch ausgleichen, dass sie über mehr Energie verfügen, da jedes Photon nur genau ein Elektron-Loch-Paar erzeugen kann und seine überschüssige Energie in Form von Wärme an das Gitter abgibt.

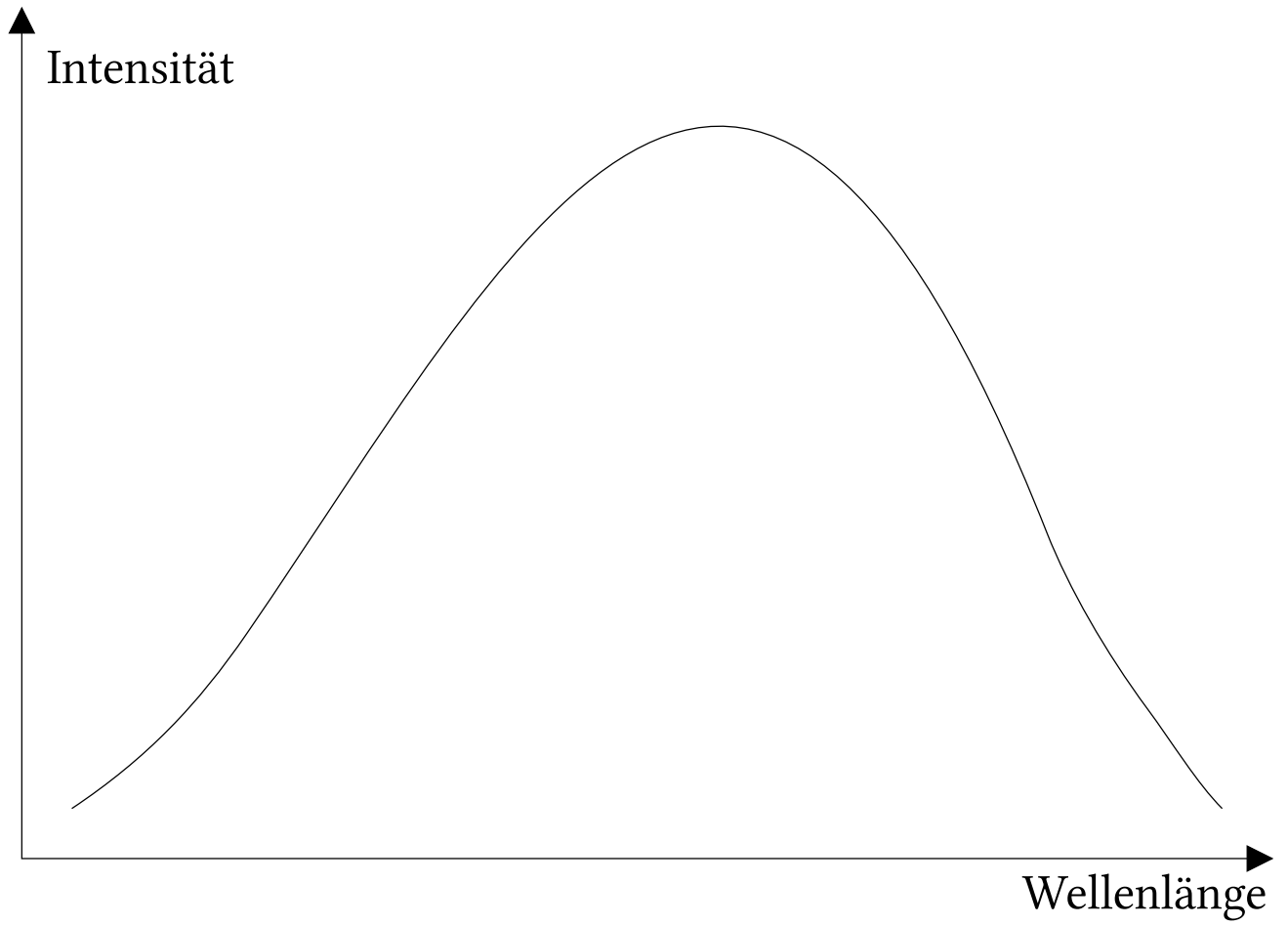


Abbildung 4.11: Intensitätsverteilung

Tabellenverzeichnis

4.1	Vierpolparameter	14
4.2	Idealitätsfaktor und Sättigungsstrom der Solarzellen	15
4.3	Kurzschlussspannung und Sättigungsstrom	18
4.4	Füllfaktor und Wirkungsgrad	19

Abbildungsverzeichnis

2.1	Bändermodell	4
2.2	Bandstruktur in den verschiedenen Festkörperarten	5
2.3	n- und p-Dotierung im Bändermodell	6
2.4	Ausbildung der Raumladungszone	7
2.5	Verbogene Bandstruktur beim pn-Übergang	8
2.6	Diodenschaltzeichen	8
2.7	Bandstruktur Bipolartransistor	9
2.8	Schaltungen Bipolartransistor	9
2.9	MOSFET und JFET	10
2.10	Schematische Funktionsweise einer Solarzelle	10
4.1	Diodenkennlinie	12
4.2	Vierquadrantendarstellung der Kennlinien des Bipolartransistors	13
4.3	Kennlinien Feldeffekttransistor	15
4.4	Fit der Dunkelkennlinie der amorphen Siliziumsolarzelle	16
4.5	Fit der Dunkelkennlinie der polykristallinen Siliziumsolarzelle	17
4.6	Fit der Dunkelkennlinie der monokristallinen Siliziumsolarzelle	17
4.7	Hellkennlinien der Solarzellen	18
4.8	Leistungskurve der amorphen Siliziumsolarzelle	20
4.9	Leistungskurve der polykristallinen Siliziumsolarzelle	20
4.10	Leistungskurve der monokristallinen Siliziumsolarzelle	21
4.11	Intensitätsverteilung	22