

Versuch 3.2

pn-Übergang und Solarzelle

Inhaltsverzeichnis

1 Lernziele	1	3 Häusliche Vorbereitung	11
2 Theorie	1	4 Aufbau, Durchführung, Auswertung	11
2.1 Grundlagen der Halbleiter	2	4.1 Teil A: Diode - unbeleuchtet	11
2.2 Dotierung	4	4.2 Teil B: Solarzelle	13
2.3 Der pn-Übergang	5	5 Bemerkungen	13
2.4 Bandmodell des pn-Übergangs	6	6 Fehlervermeidung	13
2.5 Solarzelle	8		

1 Lernziele

- Halbleiter
- Intrinsische, n- und p-dotierte Halbleiter
- Banddiagramme, FERMI-Energie
- Dioden und Solarzellen

In diesem Versuch ermitteln Sie die Kennlinien einer Diode sowie einer Solarzelle und bestimmen wichtige Kennwerte dieser Halbleiter.

2 Theorie

Sie finden die Theorie in einschlägigen Lehrbüchern, z.B:

- Hering [1]: Kapitel 9.2.3
- Demtröder [4]: Kapitel 14
- Luque [321]: Chapter 3
- Thuselt [322]: Kapitel 2 und 3
- Jewett [5]: Chapter 43 (especially 43.7)
- Halliday [6]: Chapter 41 (especially 41-6 to 41-10)
- Sze [323]: Chapter 2 and 13 (especially 13.9)
- Mahajan [324]: Chapter 1 and 2

Interaktive applets:

- Eine Sammlung verschiedener Applets der Halbleitertechnik:
Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, <https://smile.hsu-hh.de/>

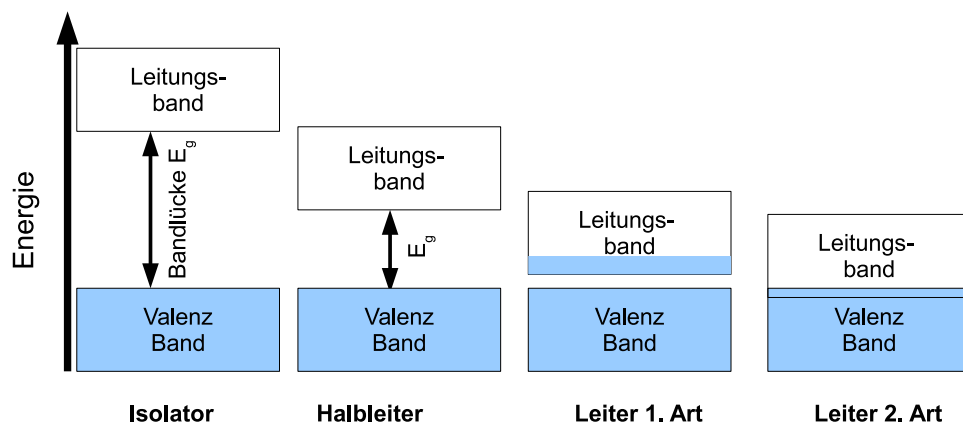


Abb. 1: Band Strukturen

Kurzzusammenfassung der Theorie¹

2.1 Grundlagen der Halbleiter

Das BOHR'sche Atommodell postuliert, dass sich die Elektronen auf diskreten Kreisbahnen um den Kern bewegen. Durch das Zusammenkommen von vielen Atomen in einem Festkörper bilden sich Bänder. Die Elektronen dürfen sich nur innerhalb der Bänder aufhalten. Die Bandlücken dagegen sind für die Elektronen verbotene „Zonen“ (energetisch betrachtet).

Für die folgenden Überlegungen betrachten wir nur die beiden oberen Bänder: Das *Valenzband* und das *Leitungsband*. Der energetische Abstand zwischen den Bändern wird *Gap-Energie* E_g genannt. Im Leitungsband können sich die Elektronen bewegen und zu einer elektrischen Leitfähigkeit beitragen.

Das Bandmodell² hilft uns, die Unterschiede zwischen einem Leiter, Halbleiter und Isolator zu verstehen (siehe Abbildung 1). Bei $T = 0\text{ K}$ ist bei Nichtmetallen (Halbleiter und Isolatoren) das Valenzband mit Elektronen gefüllt und das Leitungsband leer. Es kann daher weder im Leitungsband noch im Valenzband zu einer elektrischen Leitfähigkeit kommen. Ferner ist bei einem Isolator der energetische Abstand E_g zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband sehr groß ($E_g > 3\text{ eV}$). Diese Energielücke ist so groß, dass sie praktisch nicht von den Elektronen aus dem Valenzband auch bei höheren Temperaturen überwunden werden kann. Das Leitungsband ist praktisch leer. In einem Halbleiter ist die Bandlücke deutlich kleiner ($E_g < 3\text{ eV}$). Hier können die Elektronen bei Raumtemperatur genug (thermische) Energie erlangen, um das Leitungsband zu erreichen. Bei Metallen ist das Leitungsband teilweise gefüllt (Typ 1) oder es überlappen sich Leitungs- und Valenzband (Typ 2), so dass eine ständige Leitfähigkeit vorhanden ist. Tabelle 1 zeigt E_g für die wichtigsten Halbleiter.

Abbildung 2 zeigt das Banddiagramm eines reinen Halbleiters im Detail. Solch ein reiner Halbleiter wird *intrinsisch* genannt, da die Leitfähigkeit nur von ihm selbst ausgeht (intrinsischer Halbleiter = Eigenhalbleiter).

Die höchste Energie des Valenzbandes ist E_v , die niedrigste Energie des Leitungsbandes ist E_C (aus dem englischen $E_c = E_{\text{Conductance}}$). Zwischen diesen beiden Energien ist die FERMI-Energie

¹ Dies ist nur eine sehr kurze Darstellung der wichtigsten Aspekte. Die alleinige Kenntnis des Skriptes reicht nicht aus, um die Prüfung zu bestehen. Arbeiten Sie in jedem Fall mit Lehrbüchern!

² Die Banddiagramme sind in dieser Anleitung sehr vereinfacht dargestellt. In Wirklichkeit ist der Bandverlauf eine Funktion vom Wellenzahlvektor \vec{k} der Löcher und Elektronen, also $E(\vec{k})$. Aus diesem Grunde wird bei den hier gezeichneten Banddiagrammen auf eine Beschriftung der unteren Achse weitgehend verzichtet, sofern es sich nicht eindeutig um den Ort handelt (wie beim pn-Übergang).

Tabelle 8.1: Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband.
(i = indirekte Lücke, d = direkte Lücke)

Kristall	Lücke	E_g , eV		Kristall	Lücke	E_g , eV	
		0 K	300 K			0 K	300 K
Diamant	i	5,4		SiC (hex)	i	3,0	–
Si	i	1,17	1,11	Te	d	0,33	–
Ge	i	0,744	0,66	HgTe ^a	d	–0,30	
α Sn	d	0,00	0,00	PbS	d	0,286	0,34–0,37
InSb	d	0,23	0,17	PbSe	i	0,165	0,27
InAs	d	0,43	0,36	PbTe	i	0,190	0,29
InP	d	1,42	1,27	CdS	d	2,582	2,42
GaP	i	2,32	2,25	CdSe	d	1,840	1,74
GaAs	d	1,52	1,43	CdTe	d	1,607	1,44
GaSb	d	0,81	0,68	SnTe	d	0,3	0,18
AlSb	i	1,65	1,6	Cu ₂ O	d	2,172	–

^a HgTe ist ein Halbmetall, die Bänder überlappen.

Tabelle 1: Energielücken [1]

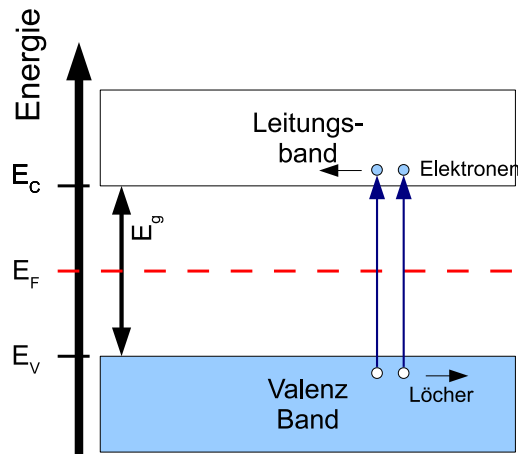


Abb. 2: Band-Diagramm eines intrinsischen Halbleiters

E_F lokalisiert (die FERMI-Energie ist nicht exakt in der Mitte der Bandlücke, für die Überlegungen im Rahmen dieser Veranstaltung arbeiten wir jedoch mit dieser Näherung). Wenn genügend (thermische) Energie zur Verfügung steht, kann das Elektron das Valenzband verlassen und das Leitungsband erreichen. Dort kann sich das Elektron „bewegen“ und zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Im Valenzband bleibt ein „Loch“ (englisch: „Hole“) oder „Defektelektron“ zurück. Dieses „Loch“ kann sich im Valenzband bewegen und ebenfalls zur Leitfähigkeit beitragen. Da das Loch eine „positive Ladung“ hat, ist die Richtung des Lochs bei angelegtem elektrischem Feld entgegengesetzt zur Richtung des Elektrons.

Die Leitfähigkeit σ wird daher sowohl von den Elektronen als auch von den Löchern erzeugt. Dementsprechend besteht die Gleichung zur Leitfähigkeit bei intrinsischen Halbleitern aus zwei Summanden:

$$\sigma = \frac{1}{\varrho} = q_n \cdot n_n \cdot \mu_n + q_p \cdot n_p \cdot \mu_p \quad (1)$$

σ	Leitfähigkeit $[\sigma] = 1/\Omega\text{m}$
ϱ	spezifischer Widerstand $[\varrho] = \Omega\text{m}$
q	Ladung $[q] = \text{C}$
n	Ladungsträgerdichte $[n] = 1/\text{m}^3$
μ	Beweglichkeit der Ladungsträger $[\mu] = \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
Index n :	negative Ladungsträger (Elektronen)
Index p :	positive Ladungsträger (Löcher)

Bei einem intrinsischen Halbleiter ist die Anzahl der Elektronen im Leitungsband gleich der Anzahl der Löcher im Valenzband (da ja jedes Elektron, das ins Leitungsband kommt, ein „Loch“ hinterlässt). Daher erhalten wir:

$$\sigma = \frac{1}{\varrho} = e \cdot n(\mu_n + \mu_p)$$

e Elementarladung $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Die intrinsische Leitfähigkeit ist recht gering und abhängig von der Temperatur, für Halbleiter bei Raumtemperatur: $\sigma = 10^{-6} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ bis $\sigma = 10^3 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Um die Leitfähigkeit zu steigern, können die Halbleiter dotiert werden.

2.2 Dotierung

Mit Hilfe einer Dotierung können die elektrischen Eigenschaften der Halbleiter signifikant beeinflusst werden. Bei der Dotierung werden Fremdatome in den Ursprungskristall eingebaut. Diese Fremdatome haben ein Elektron mehr bzw. weniger als der Ursprungskristall. Dementsprechend wird zwischen n- und p-Dotierung unterschieden. Tabelle 2 gibt einen Überblick am Beispiel des Siliziums.

Bei $T = 0 \text{ K}$ sind die Elektronen bzw. Löcher noch (leicht) an die Dotierungsatome gebunden. Das Energieniveau (*Donator level*) dieser bei $T = 0 \text{ K}$ nicht ionisierten „Störstellen“ liegt bei der n-Dotierung knapp unterhalb des Leitungsbandes (Größenordnung 0,01 eV bis 0,1 eV). Ähnliches gilt für die Löcher: Das Energieniveau (*Acceptor level*) der nicht ionisierten Akzeptoren liegt leicht über dem Valenzband. Aufgrund des kleinen energetischen Abstands zwischen diesem Donator-Level und dem Leitungsband (bzw. dem Acceptor-Level und dem Valenzband bei der p-Dotierung) ist nur wenig thermische Energie notwendig, um diese Störstellen zu ionisieren, d.h. um das zusätzliche Elektron in das Leitungsband zu heben (bzw. das Loch in das Valenzband zu bringen). Bei Raumtemperatur wird die Leitfähigkeit der dotierten Halbleiter also praktisch ausschließlich durch die Dotierungsatome bestimmt. Entsprechend sind diese die Majoritäts-Ladungsträger.

Bitte beachten Sie, dass trotz der Dotieratome mit dem zusätzlichen Elektron (bzw. für die p-Dotierung die Dotieratome mit dem fehlenden Elektron) das Gitter elektrisch neutral ist! Das „zusätzliche“ Proton (gegenüber dem Silizium) im Kern des Arsens (bzw. das „fehlende“ Proton

³ Die Lage der Fermi Energie E_F ist für sehr tiefe Temperaturen eingezeichnet. Für höhere Temperaturen verändert sich die Lage. Bei Raumtemperatur liegt E_F knapp unterhalb des Donatorlevels, bzw. knapp oberhalb des Akzeptorlevels (bei nicht zu hohen Dotierungen)

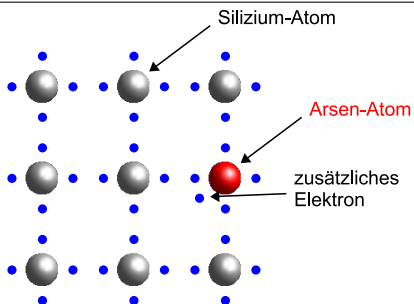
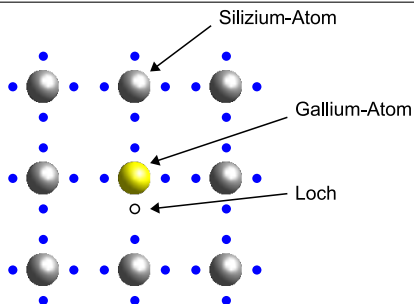
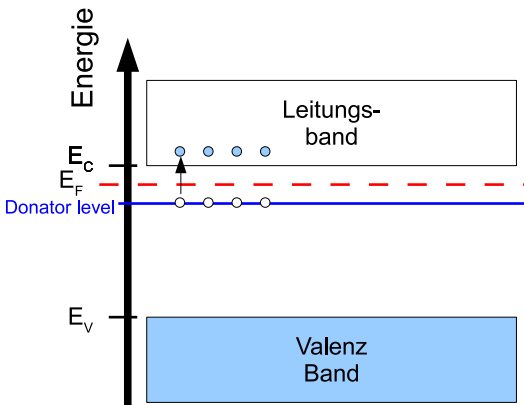
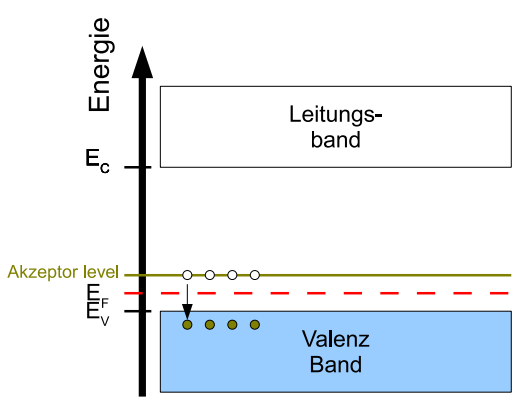
	n-dotiert	p-dotiert
Original-Gitter	Silizium mit 4 Valenzelektronen	Silizium mit 4 Valenzelektronen
Dotier-Atome	Mit einem zusätzlichen Elektron und Proton <i>Donatoren</i> genannt, z.B. Arsen oder Phosphor	Mit einem Elektron und Proton weniger <i>Akzeptoren</i> genannt, z.B. Gallium oder Bor
Ladungs-träger	Majoritäts Ladungsträger: Elektronen Minoritäts Ladungsträger: Löcher	Majoritäts-Ladungsträger: Löcher Minoritäts-Ladungsträger: Elektronen
Atom-aufbau		
Band-struktur ³		

Tabelle 2: Übersicht der Dotierung am Beispiel des Siliziums

im Kern des Galliums) kompensiert die Ladung, so dass der Gesamt-Kristall elektrisch neutral bleibt.

Von großer technischer Bedeutung ist die Kombination einer n-dotierten mit einer p-dotierten Schicht, pn-Übergang genannt.

2.3 Der pn-Übergang

Die Situation an einem pn-Übergang veranschaulichen die Abbildungen 3 und 4.

An der Grenze zwischen dem n- und p- Gebiet können die Elektronen und die Löcher aufgrund der Konzentrationsunterschiede zueinander diffundieren und rekombinieren miteinander. Es bleiben daher an der Grenzschicht die ionisierten Rumpfatome der Dotierungsatome übrig. Diese Rumpfatome sind, ohne ihre Elektronen bzw. Löcher, relativ zum Ursprungsgitter geladen. Diese Rumpfatome erzeugen daher ein starkes elektrisches Feld an der Grenzschicht das der Diffusion

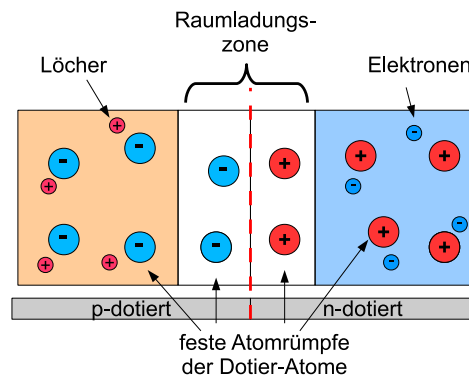


Abb. 3: Der pn-Übergang

entgegenwirkt und damit bewirkt, dass nicht alle Löcher mit allen Elektronen rekombinieren. Das Feld hält die Ladungsträger in den jeweiligen Bereichen zurück. Die Grenzschicht ohne freie Ladungsträger wird *Verarmungszone* oder *Raumladungszone* genannt.

Solch ein pn-Übergang wirkt als Gleichrichter, als eine *Diode*, wie in Abbildung 6 dargestellt.

Wird die p-Seite des pn-Übergangs an den Plus-Pol und die n-Seite an den Minus-Pol einer Spannungsquelle angeschlossen, so werden die Löcher und die Elektronen in die Verarmungszone „gedrückt“. Hier rekombinieren sie und ein elektrischer Stromfluss entsteht: die Diode ist in *Flussrichtung* gepolt. Wird die Polung umgekehrt, werden die Elektronen im n-Gebiet von dem Plus-Pol der Spannungsquelle angezogen, ebenso die positiv geladenen Löcher von dem Minus-Pol. Die Verarmungszone (Sperrschicht) wird also größer, es fließt fast kein Strom. Dies ist die Sperrrichtung der Diode.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie wird durch die SHOCKLEY-Gleichung beschrieben:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{e \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2)$$

Der Graph ist in Abbildung 7 dargestellt.

2.4 Bandmodell des pn-Übergangs

Eine exaktere Betrachtungsweise des pn-Übergangs ergibt sich mittels des Bandmodells.

Wie in Tabelle 2 dargestellt, liegt das Energieniveau der n-Donatoren knapp unterhalb des Leitungsbandes (für P in Si ca. 44 meV). Entsprechend liegt das Energieniveau der p-Akzeptoren knapp oberhalb des Valenzbandes (für B in Si ca. 45 meV). Zwischen den Bändern liegt die Fermi-Energie E_F (siehe Abb. 5a). Werden nun der n-dotierte und der p-dotierte Bereich zusammengefügt, so muss die Fermi-Energie bei beiden Bereichen auf dem gleichen Niveau liegen. Dies kann nur erreicht werden, wenn sich die Bänder im n-Gebiet und im p-Gebiet verzerren. Die Bänder im n-Gebiet werden nach unten „gezogen“, im p-Gebiet dagegen nach oben. Es bildet sich, wie in Abb. 5 b dargestellt, eine Potentialstufe.

Beim Anlegen einer externen Spannung $-U_{ext}$ in Sperrrichtung an den pn-Übergang erhöht sich die Potentialstufe um die Energie $E = -e \cdot U_{ext}$ und die Elektronen und Löcher werden noch stärker daran gehindert, die Barriere zu überwinden (Abb. 5 c).

Wird dagegen in Flussrichtung gepolt verringert sich die Potentialstufe. Elektronen können nun in das p-Gebiet und Löcher in das n-Gebiet gelangen (Abb. 5 d).

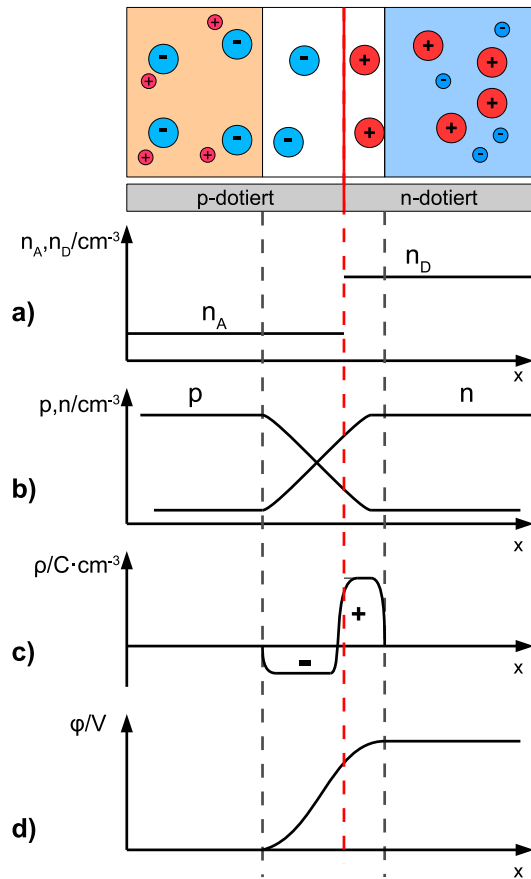


Abb. 4: Der pn-Übergang im Detail:
a) Konzentration der Akzeptoren und Donatoren (wird bei der Herstellung des Halbleiters festgelegt)
b) Konzentration der freien Ladungsträger. In der Verarmungszone rekombinieren Löcher und Elektronen, so dass die Konzentration dort abnimmt.
c) Die Rekombination führt zu einem Gebiet, in dem die Rumpfatome übrig bleiben. Dadurch wird ein elektrisches Feld erzeugt.
d) Potentialdifferenz zwischen dem n- und p-dotierten Bereich

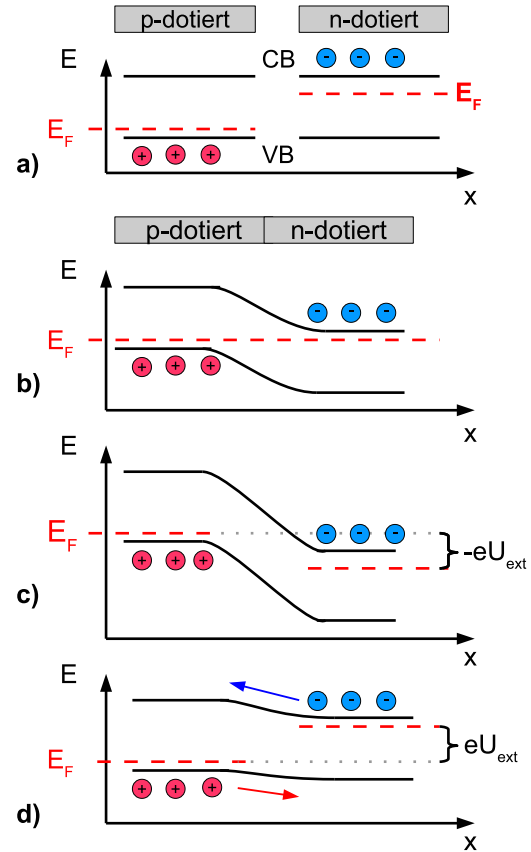


Abb. 5: Band Diagramm des pn-Übergangs
a) zeigt die Situation mit getrennten n- und p- Gebieten.
b) Beim „Zusammenfügen“ der beiden Bereiche muss die Fermi-Energie E_F auf dem gleichen Energieniveau liegen. Dies kann nur durch eine Verformung der Bänder erreicht werden.
c) Das Anlegen einer Spannung in Sperrrichtung führt zu einem Absenken von E_F um $-e \cdot U_{ext}$ auf der n-dotierten Seite, so dass die Potentialstufe noch höher wird.
d) Eine externe Spannung in Flussrichtung führt dagegen zu einer Verkleinerung der Potentialstufe

Hinweis:

Natürlich werden bei der Herstellung des pn-Übergangs die beiden dotierten Bereiche nicht getrennt produziert und dann zusammengefügt (dies ist hier nur zur Erklärung der Theorie so dargestellt). Vielmehr erfolgt die Dotierung am fertigen Kristall z.B. durch Diffusion, Ionenimplantation oder direkt beim Wachsen des Halbleiters z.B. mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE).

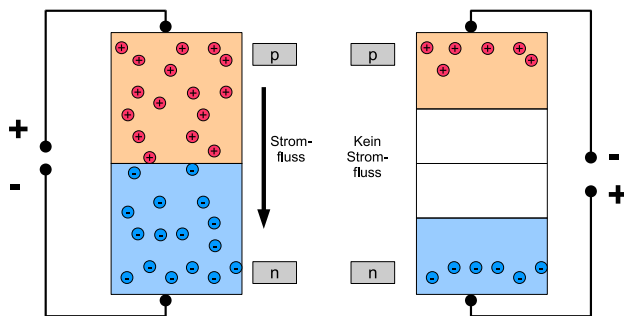


Abb. 6: Der pn-Übergang als Diode. Bitte beachten Sie, dass in diesem Bild nur die freien Ladungsträger (also die Elektronen und Löcher) eingezeichnet sind. Auf die Darstellung der Rumpfatome wurde hier verzichtet.

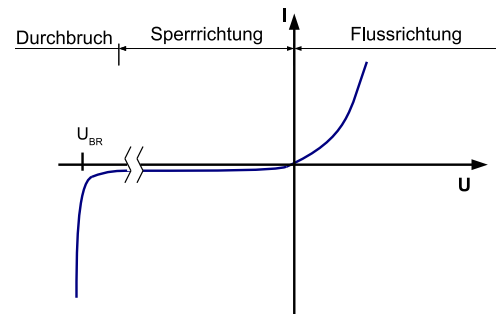


Abb. 7: I-U Diagramm einer Diode (Diodenkennlinie)

2.5 Solarzelle

Bei einer Solarzelle liegen die pn-Regionen großflächig und parallel und in der Nähe zur Oberfläche, so dass möglichst viel Licht den pn-Übergang erreichen kann. Normalerweise ist die Oberfläche mit einer Anti-Reflexschicht beschichtet, um Verluste durch Lichtreflexion zu vermeiden. Die oberen elektrischen Kontakte müssen zudem transparent sein (Abb. 8).

Erreicht ein Photon mit einer Energie $E = h \cdot f$, die größer ist als E_g , den pn-Übergang wird durch die eingestrahlte Energie ein Elektron-Loch-Paar erzeugt. Dieses Paar aus positiven und negativen Ladungsträgern wird durch das elektrische Feld am pn-Übergang (oder durch Diffusion) getrennt. Die positiven Atomrümpfe in der n-dotierten Region ziehen das Elektron an (siehe Abbildung 4). Das Loch wird durch die negativen Atomrümpfe in die p-dotierte Region gezogen (das ist die umgekehrte Richtung wie bei einem normalen Stromfluss durch eine Diode). Die so getrennten Ladungsträger können durch die Kontakte nach außen abgeführt werden und durch einen externen Widerstand (dem Verbraucher) fließen.

Dieser Effekt kann auch mittels des Bändermodells erklärt werden (Abb. 9). Durch die Energie des Photons werden Elektronen in das Leitungsband "gehoben". Von dort können sie den Potentialberg in die n-dotierte Region hinunter "laufen". Die Löcher bewegen sich aufgrund ihrer positiven Ladung den Potentialberg hinauf in die p-dotierte Region.

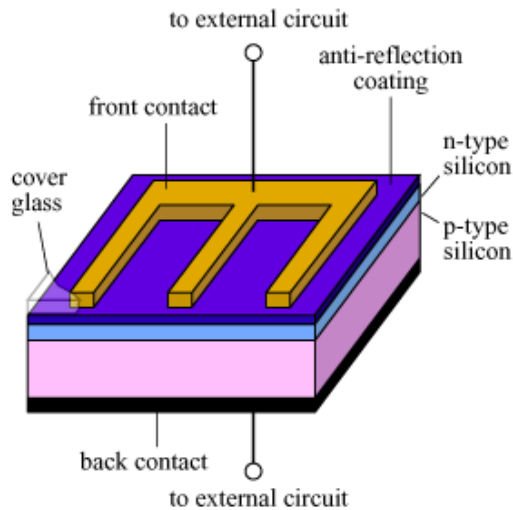


Abb. 8: Solarzelle [325]

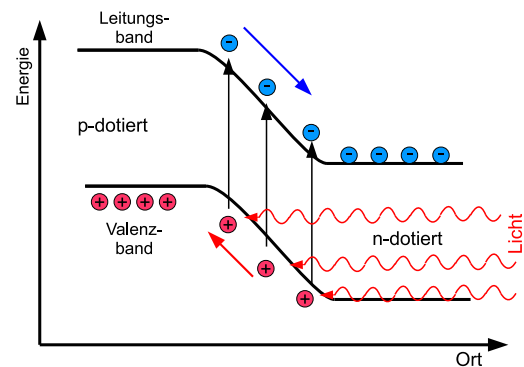


Abb. 9: Photoeffekt am pn-Übergang

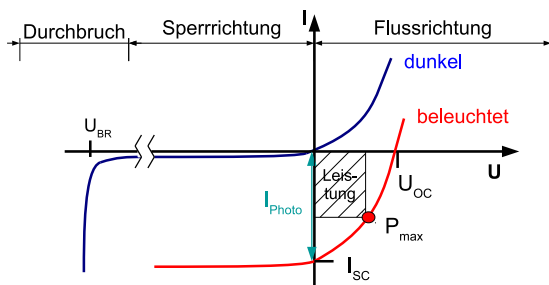


Abb. 10: Kennlinie einer beleuchteten und un-
beleuchteten Diode

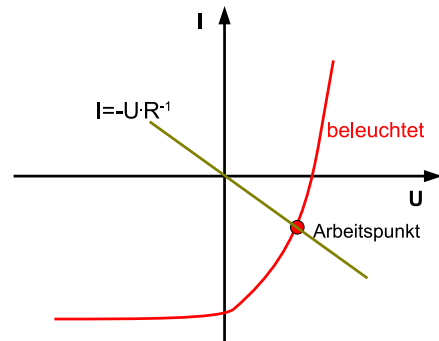


Abb. 11: OHMsche Last und Arbeitspunkt

Der von den Photonen erzeugte *Photostrom* hat also die umgekehrte Richtung wie der Flussstrom in einer unbeleuchteten Diode. Damit hat der Photostrom die gleiche Richtung wie der Sperrstrom in der unbeleuchteten Zelle. Jedes absorbierte Photon erhöht damit den Sperrstrom. Somit ist die I-U Kennlinie einer beleuchteten Solarzelle um den Photostrom I_{Ph} nach unten verschoben, wie in Abbildung 10 dargestellt.

Somit ändert sich Gleichung (2) bei einer beleuchteten Diode durch den beleuchtungsabhängigen Photostrom:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{e \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) - I_{ph} \quad (3)$$

mit

I_{ph} Photostrom

Abb. 10 zeigt weitere Details der I-U Kennlinie.

Ohne äußere Beschaltung (offene Kontakte) stellt sich die Leerlaufspannung (open-circuit voltage) U_{oc} ein. Bei einem Kurzschluss (p- und n- Kontakt ohne Verbraucher verbunden) fließt der *Kurzschlussstrom* (short-circuit) I_{sc} . Die durch die Solarzelle produzierte Leistung ist $P = I \cdot U$. Im I-U Diagramm (Abb. 10) ist dies das Rechteck aus I und U unterhalb der Kurve. Beachten Sie, dass hier beliebig viele Rechtecke eingezeichnet werden könnten (je nachdem wie Sie I und U auf der Kurve wählen). Für ein bestimmtes Paar von I und U wird P maximal. Die an dieser Stelle entnommene Leistung wird P_{max} bzw. P_{MPP} (*Maximum Power Point*) genannt.

Der Füllfaktor ist definiert als:

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (4)$$

Mit zunehmendem Füllfaktor nähert sich die Kennlinie einer idealen Stromquelle an. Je besser der Füllfaktor den Wert 1 erreicht, desto effizienter ist die Solarzelle.

Im I-U Diagramm wird eine Ohmsche Last durch eine Gerade dargestellt (Abb. 11: $U = -R \cdot I \Rightarrow I = -U \cdot R^{-1}$). Die Steigung dieser Geraden ist der Widerstand R . Der Schnittpunkt der Geraden mit der I-U Kennlinie der Solarzelle ist der Arbeitspunkt der Ohmschen Last. Um die maximale Leistung zu erzielen, sollte dieser Arbeitspunkt möglichst bei P_{max} liegen. Dies ist aber nicht automatisch der Fall, da P_{max} mit Bestrahlungsstärke und Temperatur im Betrieb variiert.

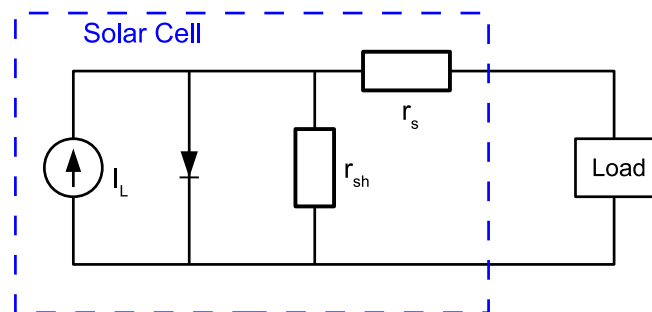


Abb. 12: Ersatzschaltbild der Solarzelle

Abbildung. 12 zeigt das Ersatzschaltbild einer realen Solarzelle. Es besteht aus der Parallelschaltung einer idealen Diode und einer Stromquelle, die den Photostrom liefert. Beide zusammen bilden die ideale Solarzelle nach. In einer realen Zelle kommen der *Serienwiderstand* r_s (series resistance) und der *Parallelwiderstand* r_{sh} (shunt resistance) hinzu. Alle diese Elemente (gestrichelt eingerahmt) bilden die reale Solarzelle nach.

Der Serienwiderstand ergibt sich aus dem Widerstand der p- und n-Zonen des Halbleiters außerhalb der Sperrschicht, aus dem Kontaktwiderstand (Übergangswiderstand) zu den aufgebrachtten Metallbahnen (Stromabnahmegitter) und aus dem Widerstand der Metallbahnen selbst. Er sollte möglichst klein (idealerweise Null) sein. Bereits im 100 mΩ Bereich (typischer Wert) bewirkt er wegen der großen Zellenströme eine nachweisbare Verschlechterung. Der Serienwiderstand dominiert bei großen Flussspannungen: der Strom wächst nicht mehr exponentiell, er wird durch die geradlinige ohmschen Kennlinie des Serienwiderstands begrenzt. Da diese Kennlinie flacher verläuft, verschlechtert sich der Füllfaktor.

Der Parallelwiderstand ergibt sich aus Nebenschlüssen zur Sperrschicht, die aufgrund von Materialfehlern insbesondere bei inhomogenem Material auftreten (z. B. an den Korngrenzen von polykristallinem Silizium). Er sollte möglichst groß (idealerweise ∞) sein. Der Parallelwiderstand dominiert bei mittleren Sperrspannungen: der Sperrstrom ist nicht mehr konstant (durch

den Diodenleckstrom gegeben), er fällt mit der geradlinigen ohmschen Kennlinie des Parallelwiderstands. Wegen der Steigung dieser Kennlinie verschlechtert sich der Füllfaktor ebenfalls. Aus diesen Gründen bietet die Messung des Füllfaktors ein einfaches Verfahren, im Fertigungsprozess die Qualität der Zellentechnologie zu prüfen. Die Messung des Wirkungsgrades ist sehr viel aufwendiger, weil dazu das Sonnenspektrum nachgebildet werden muss.

3 Häusliche Vorbereitung

1. Erarbeiten Sie sich die vollständige Theorie und ein vollständiges Verständnis der physikalischen Zusammenhänge mit Hilfe verschiedener Lehrbücher!
2. Sie werden die I-U Diagramme einer unbeleuchteten und einer beleuchteten Diode messen. Überlegen Sie, an welchen Stellen Sie eine höhere Dichte der Messwerte benötigen.
3. Zeichnen Sie die folgenden I-U Diagramme jeweils einer a) unbeleuchteten und b) beleuchteten Solarzelle
 - einer idealen Diode
 - mit einem Serienwiderstand
 - mit einem Paralellwiderstand
4. Diskutieren Sie den Einfluss der Widerstände auf den Füllfaktor.
5. Ermitteln Sie mit externen Quellen den Stand der Technik von Solarzellen:
 - Aus welchem Material können Solarzellen bestehen?
 - Wie groß sind typische Füllfaktoren?
 - Wie groß sind typische Wirkungsgrade?

4 Aufbau, Durchführung, Auswertung

4.1 Teil A: Diode - unbeleuchtet

1. Bauen Sie den Versuch auf, wie in Abb. 14 dargestellt.
2. Stellen Sie die Strombegrenzung der Stromquelle auf ein Limit von $I = 100 \text{ mA}$ ein. Verwenden Sie dazu das Menü "*Display Limit*" (und **nicht** "*over current*").
3. Messen Sie die $I - U$ Kennlinie der unbeleuchteten Diode. Decken Sie dazu die Solarzelle vollständig ab.
4. Messen Sie die Werte für U_D und U_R für $U_D = -2,0 \text{ V}$ bis $+0,6 \text{ V}$. Berechnen Sie daraus I_D .
5. Stellen Sie die Messwerte in einem Excel-Diagramm dar (I-U Kennlinie).
6. Messen Sie die Sperrschichtkapazität und die Größe der (aktiven) Fläche der Zelle
7. Werten Sie die „Durchlassspannung“ aus, indem sie den steil ansteigenden Teil des Flussstroms linear auf die Spannungsachse extrapolieren.
8. Werten Sie den zur Durchlassspannung gehörigen Diodenstrom aus.

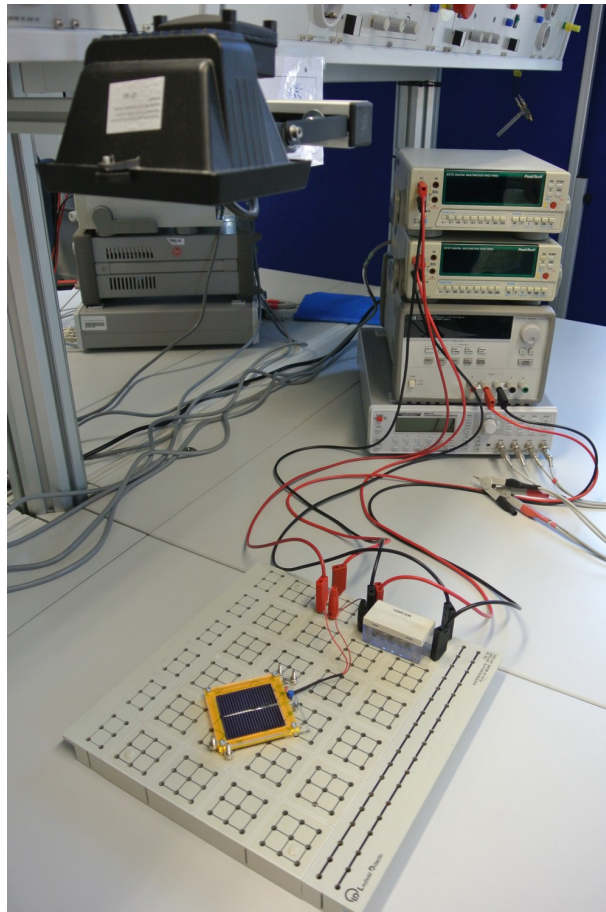


Abb. 13: Versuchsaufbau

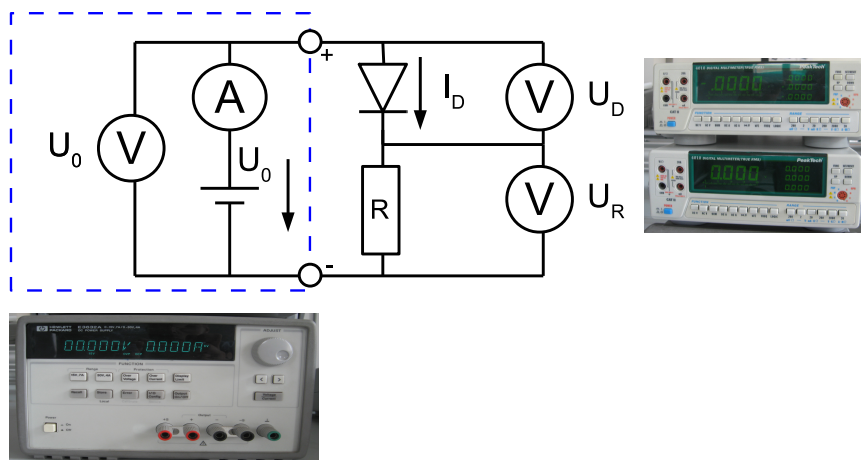


Abb. 14: Schaltbild des Versuchsaufbaus: Die blau umrahmte Spannungsquelle, das Voltmeter und das Amperemeter sind in einem Gerät zusammen gefasst.

9. Prüfen Sie, ob Sie die Durchbruchspannung auswerten können.
10. Beschreiben Sie die beobachtbaren Abweichungen von der theoretisch beschriebenen Kennlinie und erklären Sie diese anhand des Ersatzschaltbildes (Abb. 12).
11. Berechnen Sie die Weite (Ausdehnung) der Sperrschicht. Betrachten Sie dazu die Zelle als einen Plattenkondensator mit der Fläche A und dem Plattenabstand d . Für solch einen Plattenkondensator gilt bekanntlich: $C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$. mit $\varepsilon_r(Si) = 11,9$. Geben Sie auch die Messunsicherheit Δd an.

4.2 Teil B: Solarzelle

1. Bestimmen Sie die $I - U$ Kennlinie der beleuchteten Zelle. Messen Sie U_D und U_R und berechnen Sie daraus I_D .
2. Stellen Sie die Messwerte in einem Excel-Diagramm dar.
3. Bestimmen Sie die Leerlaufspannung U_{oc} , den Kurzschlussstrom I_{sc} und den Füllfaktor.
4. Zeichnen Sie in das I-U Diagramm das Rechteck mit maximaler Fläche ein (dessen Fläche die Leistung P darstellt). Berechnen Sie dazu für alle Messwerte (I-U Paare) das Produkt $P = I \cdot U$ und finden Sie den größten Wert. Bestimmen Sie so P_{max} .
5. Konstruieren Sie im I-U Diagramm den Arbeitspunkt für eine Ohmsche Last R für P_{max} . Bestimmen Sie den Widerstand R .
6. Bestimmen Sie die Messunsicherheiten der o.g. Größen.

5 Bemerkungen

- Verändern Sie nicht die Beleuchtungsstärke der Solarzelle während des Versuches.

6 Fehlervermeidung

- Zeichnen Sie Ihre Messwerte direkt während des Experimentes (also während Sie die Messwerte aufnehmen) mittels Excel in ein I-U Diagramm ein. Dadurch können Sie an dem Kurvenverlauf direkt erkennen, ob Sie genug Messwerte bestimmt haben, oder ob Sie die Intervalle zwischen Ihren Messwerten enger legen müssen.

Literatur

- [1] E. Hering, *Physik für Ingenieure*. Berlin [u.a.]: Springer, 2004.
- [4] W. Demtröder, *Experimentalphysik*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005.
- [321] A. Luque, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Chichester: Wiley, 2011.
- [322] F. Thuselt, *Physik der Halbleiterbauelemente*. Berlin [u.a.]: Springer, 2005.
- [5] Jewett, John W. *Physics for scientists and engineers with modern physics*. Belmont, Calif.: Thomson / Brooks/Cole, 2008.

- [2] Giancoli, Douglas C. *Physics*. Prentice-Hall International editions. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [6] Halliday, David and Resnick, Robert. *Fundamentals of physics extended*. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [7] Breithaupt, Jim. *Physics*. Palgrave foundations. Basingstoke: Palgrave MacMillian, 2010.
- [323] S. M. Sze, *Physics of semiconductor devices*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007.
- [324] S. Mahajan, *Principles of growth and processing of semiconductors*. Boston: WCB, McGraw-Hill, 1999.
- [325] http://www.hk-phy.org/energy/alternate/solar_phy/images/solar_cell_struc.gif