



Physik für Infotronik (22)

Gerald Kupris

13.01.2016

Auswertung der Evaluation

Umfrage

Umfrage Vorlesung Physik für AI, 13.01.2016

Sollte das Themengebiet „Mechanik“ im gleichen Umfang wie bisher
- also ca. 50% - Bestandteil der Vorlesung „Physik“ sein?

Ja, die Mechanik gehört zu den Grundlagen der Physik und sollte deswegen in der Vorlesung unbedingt einen angemessenen Anteil haben.


Nein, die Grundlagen der Mechanik wurden bereits in der Schule behandelt. Deswegen sollte man sich mehr auf die Elektrodynamik konzentrieren.

Kommentar: _____

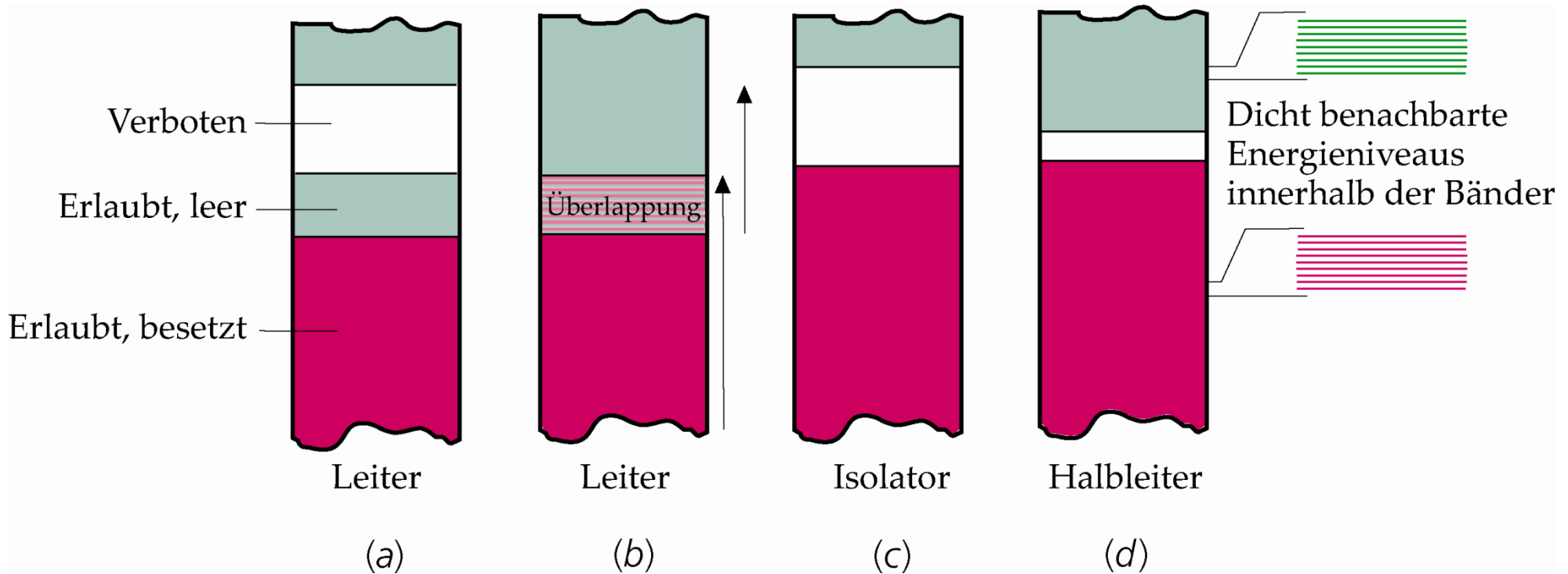
Vorlesungen Physik WS 2015/16

07.10.2015	Vorlesung 1	Messung und Maßeinheiten
07.10.2015	Vorlesung 2	Eindimensionale Bewegung
14.10.2015	Vorlesung 3	Bewegung in zwei und drei Dimensionen
14.10.2015	Vorlesung 4	Die Newtonschen Axiome
21.10.2015	Vorlesung 5	Anwendung der Newtonschen Axiome
21.10.2015	Vorlesung 6	Arbeit und kinetische Energie, Energieerhaltung
28.10.2015	Vorlesung 7	Der Impuls
28.10.2015	Vorlesung 8	Elastischer und inelastischer Stoß
04.11.2015	Vorlesung 9	Drehbewegungen
04.11.2015	Vorlesung 10	Drehimpuls
11.11.2015	Vorlesung 11	Harmonische Schwingungen und Resonanz
11.11.2015	Vorlesung 12	Wellenausbreitung und Doppler-Effekt
18.11.2015	erweitertes Tutorium	

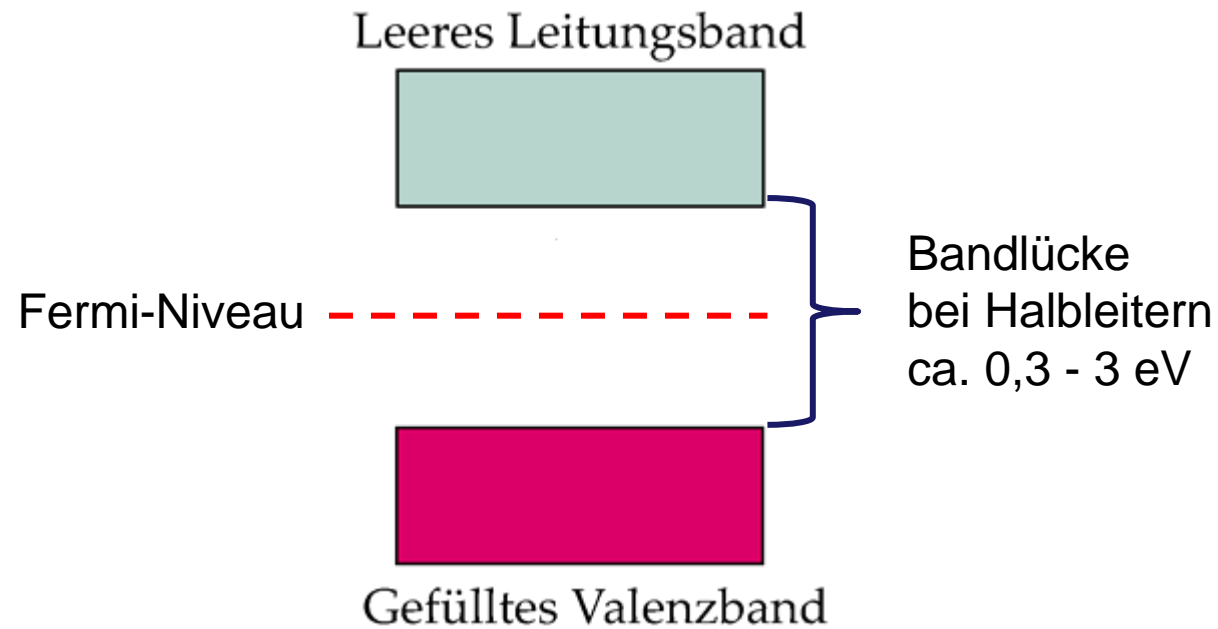
Vorlesungen Physik WS2015/16

25.11.2015	Vorlesung 13	Das elektrische Feld
25.11.2015	Vorlesung 14	Ladungsverteilung und elektrisches Potenzial
02.12.2015	Vorlesung 15	Die Kapazität
02.12.2015	Vorlesung 16	Das Magnetfeld
09.12.2015	Vorlesung 17	Quellen des Magnetfelds
09.12.2015	Vorlesung 18	Die magnetische Induktion
16.12.2015	Vorlesung 19	Magnetische Induktion und Transformatoren
16.12.2015	Vorlesung 20	Elektromagnetische Wellen
23.12.2015	vorlesungsfrei	
13.01.2016	Vorlesung 21	Aufbau von Festkörpern
 13.01.2016	Vorlesung 22	Leiter und Halbleiter
20.01.2016	Vorlesung 23	Wiederholung und Prüfungsvorbereitung
20.01.2016	Vorlesung 24	Wiederholung und Prüfungsvorbereitung

Bändermodell bei Leitern, Nichtleitern und Halbleitern



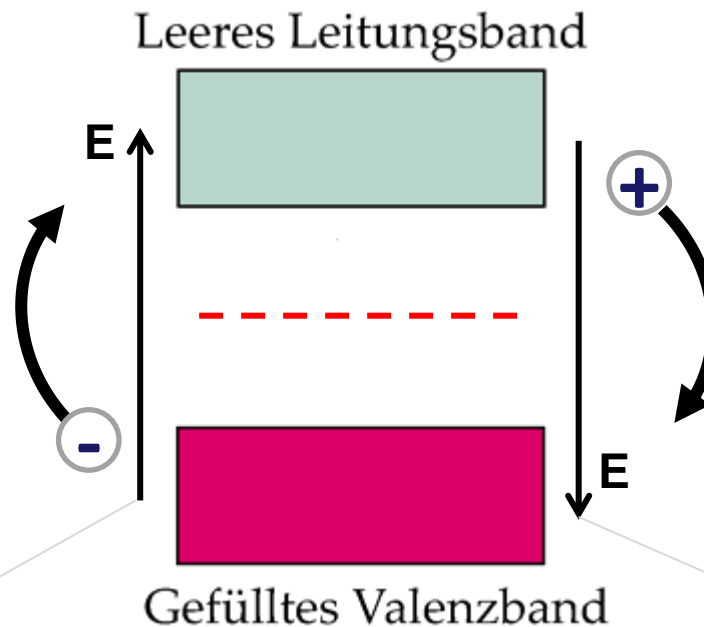
Intrinsischer Halbleiter



Leitungsvorgang im intrinsischen Halbleiter

Bei der Zufuhr von externer Energie werden die Elektronen angeregt.

Wenn die Energie hoch genug ist, dann überspringen die Elektronen die Bandlücke und tragen zur Leitfähigkeit bei.



Wenn ein Elektron in das Leitungsband springt, dann entsteht im Valenzband ein Loch (Defektelektron).

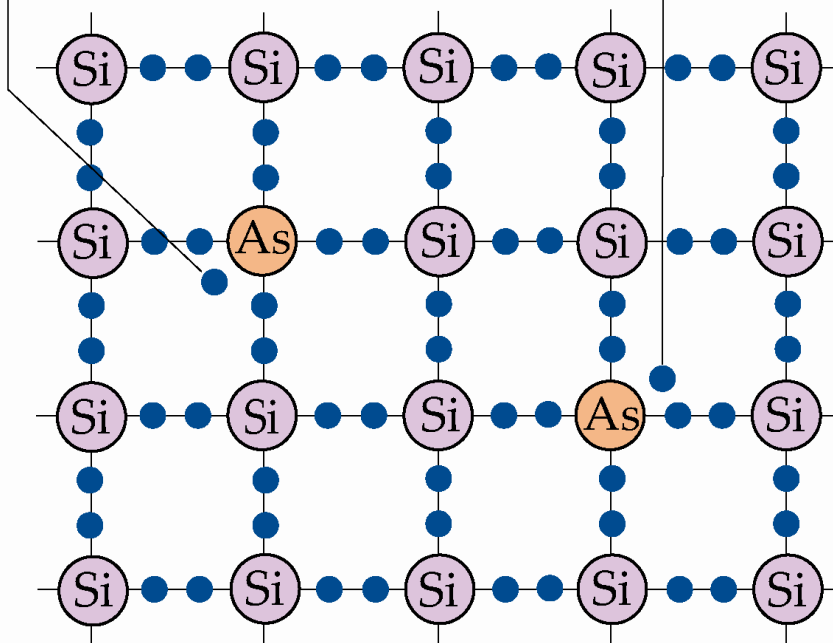
Das Defektelektron ist genau so als beweglicher Ladungsträger zu betrachten.

Energieachse für Elektronen

Energieachse für Löcher

n-Dotierung von Störstellenhalbleitern

(a) Überzähliges Elektron



(b) Leeres Leitungsband

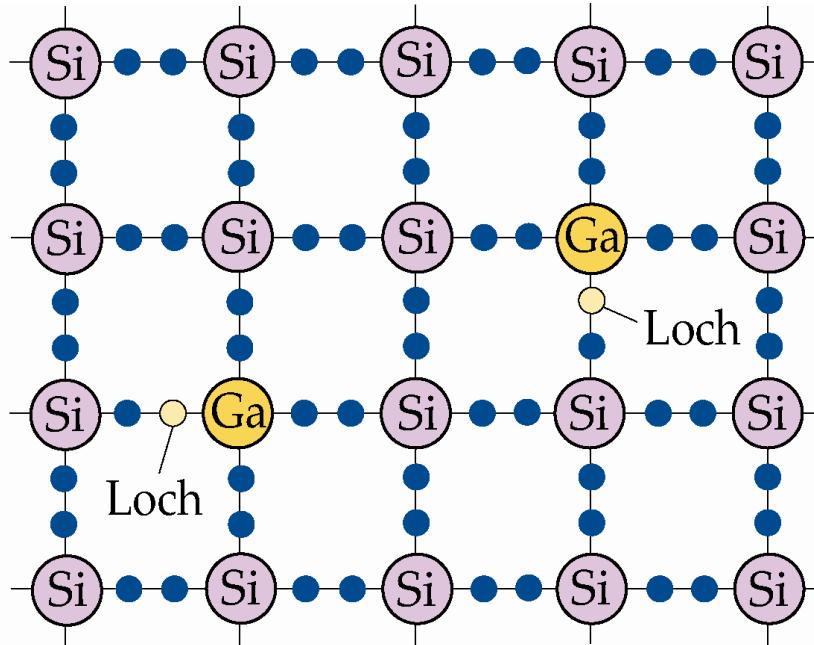


Donator-
niveaus

Gefülltes Valenzband

p-Dotierung von Störstellenhalbleitern

(a)



(b)

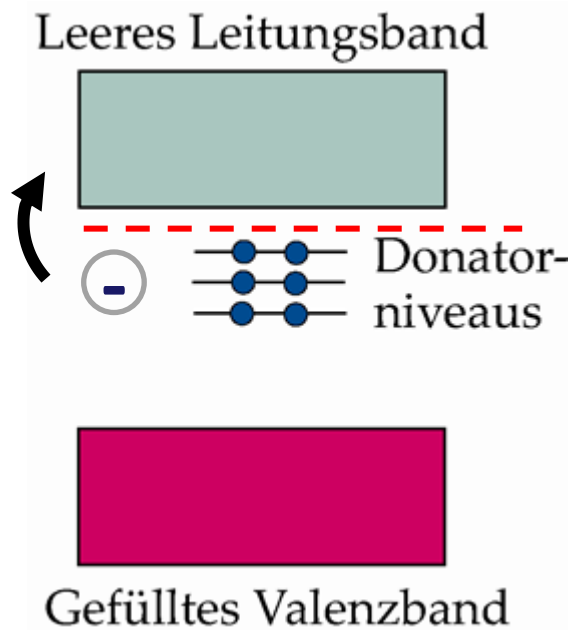
Leeres Leitungsband



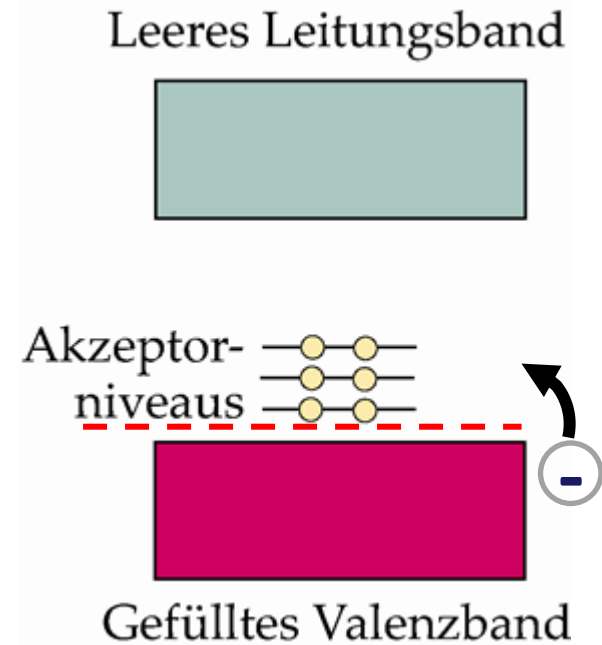
Akzeptor-
niveaus

Gefülltes Valenzband

Leitungsvorgang in dotierten Halbleitern



n-Halbleiter



p-Halbleiter

p-n-Übergang

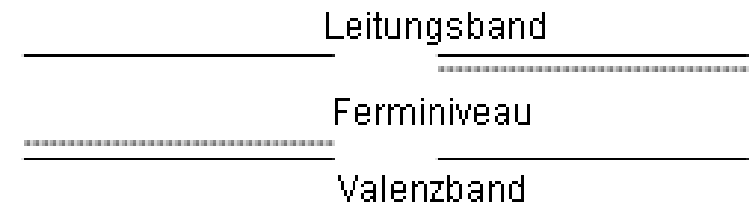
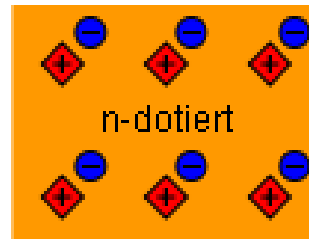
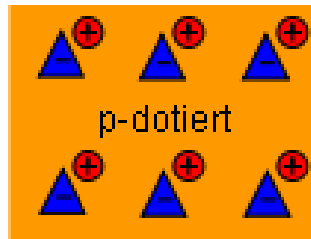
Der p-n-Übergang ist der Übergangsbereich aneinander liegender n- und p-dotierter Halbleiterkristalle. In diesem Bereich gibt es keine freien Ladungsträger, da die freien Elektronen des n-Leiters und die freien Löcher des p-dotierten Kristalls in der Nähe der Kontaktfläche der zwei Kristalle miteinander rekombinieren, d.h. die Elektronen besetzen die freien Löcher.

Diese Ladungsträgerbewegung (Diffusion) ergibt sich in Folge eines Konzentrationsgefälles. Da es im p-Gebiet nur wenige Elektronen und im n-Gebiet nur wenige Löcher gibt, wandern die Majoritätsladungsträger in den jeweils andersartig dotierten Halbleiterkristall.

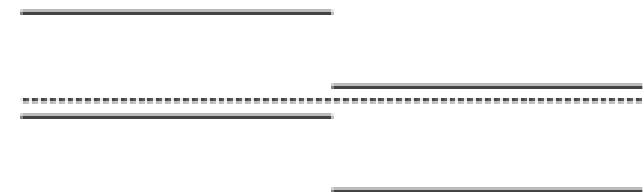
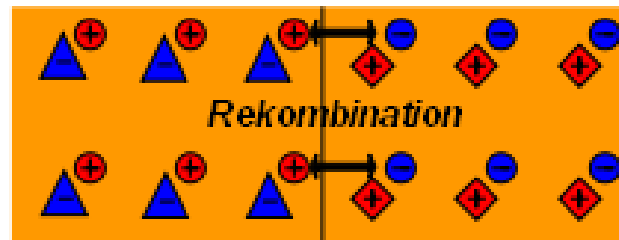
Das Kristallgitter an der Grenzfläche darf nicht unterbrochen werden, ein einfaches "Aneinanderpressen" eines p- und eines n-dotierten Siliziumkristalls ermöglicht keinen funktionstüchtigen p-n-Übergang.

Aufbau einer Sperrschicht (Raumladungszone) im p-n-Übergang

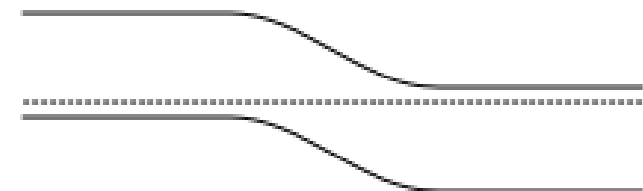
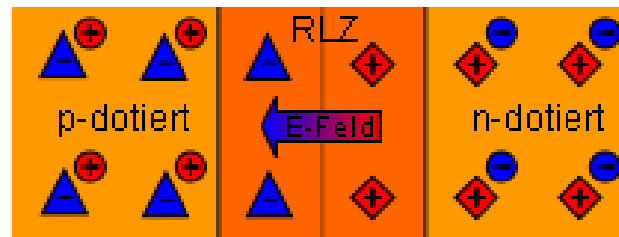
vor
Kontakt



Kontakt



nach
Kontakt



Raumladungszone

Die Gebiete in Nähe der Grenzschicht sind auf Grund der abgewanderten freien Ladungsträger positiv (n-Kristall) bzw. negativ (p-Kristall) geladen. Je mehr Ladungsträger rekombinieren, desto größer wird diese Verarmungs- oder Raumladungszone (RLZ) und damit die Spannungsdifferenz von n- zu p-Kristall. Bei einer bestimmten Höhe dieses Potentialgefälles kommt die Rekombination der Löcher und Elektronen zum Erliegen, die Ladungsträger können das elektrische Feld nicht mehr überwinden. Bei Silizium liegt diese Grenze bei etwa 0,6 bis 0,7 V.

Die Breite der RLZ ist temperaturabhängig und lässt sich zusätzlich über eine von außen angelegte Spannung gezielt verändern. Wird eine vom n-Gebiet zum p-Gebiet gerichtete Spannung angelegt (höheres elektrisches Potential am n-Gebiet), so wird die RLZ mit zunehmender Spannung breiter. Wird hingegen eine dazu entgegengerichtete Spannung angelegt, wirkt diese der Diffusionsspannung entgegen und das elektrische Gegenfeld wird abgebaut. Die RLZ wird mit zunehmender Spannung schmaler, bis der p-n-Übergang leitfähig wird.

Aufbau einer Sperrschicht (Raumladungszone) im p-n-Übergang

Dotierte Halbleiter sind in ihrem Grundzustand ungeladen. Die Verbindung zweier andersartig dotierter Halbleitermaterialien hat allerdings einen Konzentrationsgradienten der enthaltenen frei beweglichen Ladungsträger zur Folge. So werden die Majoritätsladungsträger durch die Diffusionskraft in das jeweils andere Halbleitermaterial gezogen, in denen ihre Konzentration geringer ist (Konzentrationsdiffusion).

Das heißt: die Elektronen des n-Kristalls streben in den p-Kristall, die Löcher des p-Kristalls umgekehrt in den n-Kristall. Aufgrund dieser Diffusion fehlen nun Ladungsträger in den zuvor ungeladenen Materialien. Dies resultiert in einem elektrischen Feld, welches eine Kraft auf die Ladungsträger ausübt. Die dadurch verursachte Driftbewegung ist der durch Diffusion verursachten Bewegung entgegengerichtet und es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Diffusion und elektrischer Feldkraft ein.

p-n-Übergang im Gleichgewicht

Wegen der Rekombination der Ladungsträger bildet sich in beiden Kristalltypen eine Verarmungszone (Raumladungszone, RLZ) aus. Die Ausdehnung dieser Verarmungszone, oder Sperrschicht, ist abhängig von der Dotierung der Zone und der intrinsischen Ladungsträgerdichte des Materials. Bei gleich hoher Dotierungsdichte in p- und n-Gebiet ist die Raumladungszone symmetrisch. Bei ungleichen Dotierungsdichten breitet sich die RLZ weiter in das weniger stark dotierte Gebiet aus.

Betrachtet man das Bändermodell dieser Anordnung, so haben sich durch den Diffusionsprozess die Fermi-Niveaus der beiden Kristalle angeglichen und es zeigt sich eine Krümmung der Energiebänder (Valenzband und Leitungsband) im Bereich des p-n-Übergangs. Die zuvor elektrisch neutralen Kristalle haben durch die zurückbleibenden, festen Ladungen nunmehr eine Raumladung erhalten, die den p-Kristall negativ, den n-Kristall positiv auflädt. Die dadurch entstandene Spannung wird Diffusionsspannung Φ_D (englisch built-in voltage, U_{bi}) genannt. Sie ist abhängig von Dotierung und Material. Bestehen die Schichten aus Silizium, so beträgt die Diffusionsspannung für typische Dotierungen ca. 0,6 bis 0,7 V.

Bandverbiegung

Bandverbiegung bedeutet, dass Leitungs- und Valenzband nicht exakt horizontal verlaufen.

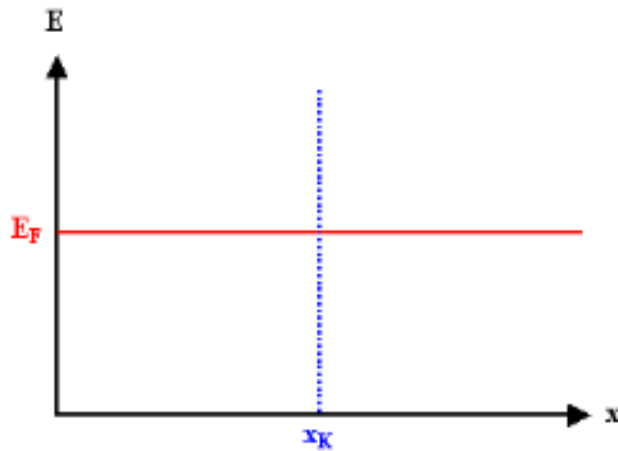
**Elektrische Felder verursachen Bandverbiegungen.
Verbogene Bänder enthalten ein elektrisches Feld.**

Bandverbiegungen sind immer mit elektrischen Feldern im Material gekoppelt, denn ein elektrisches Feld ist schlicht der Gradient des elektrischen Potentials, und ohne Gradient im Potential gibt es keine Bandverbiegung.

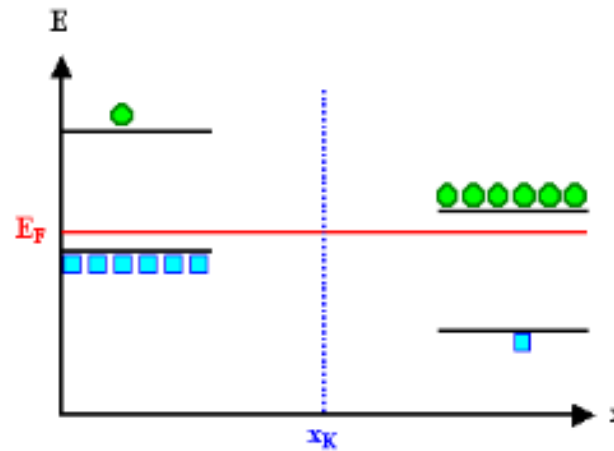
Die Elektronen im Leitungsband werden sich zur tiefsten Energie begeben - sie laufen in einem Energiediagramm immer bergab. Da sie beweglich sind, wird das auch geschehen.

Die Elektronen im Valenzband werden sich auch zur tiefsten Energie begeben. Da aber nur ein kleiner Teil beweglich ist - die mit einem Loch als Nachbar - laufen die Löcher entgegengesetzt, immer den Energieberg hinauf.

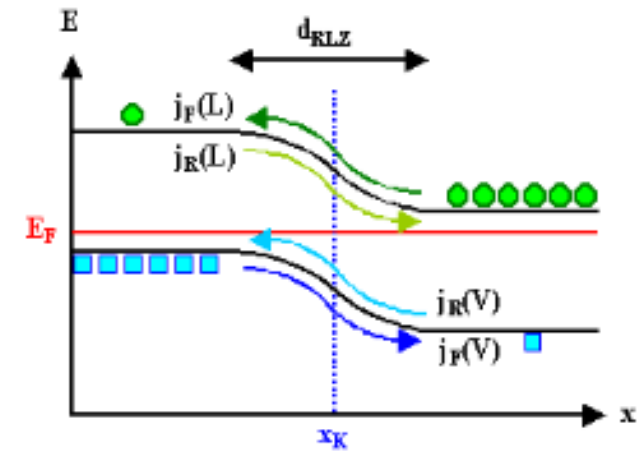
Banddiagramm des p-n-Übergangs



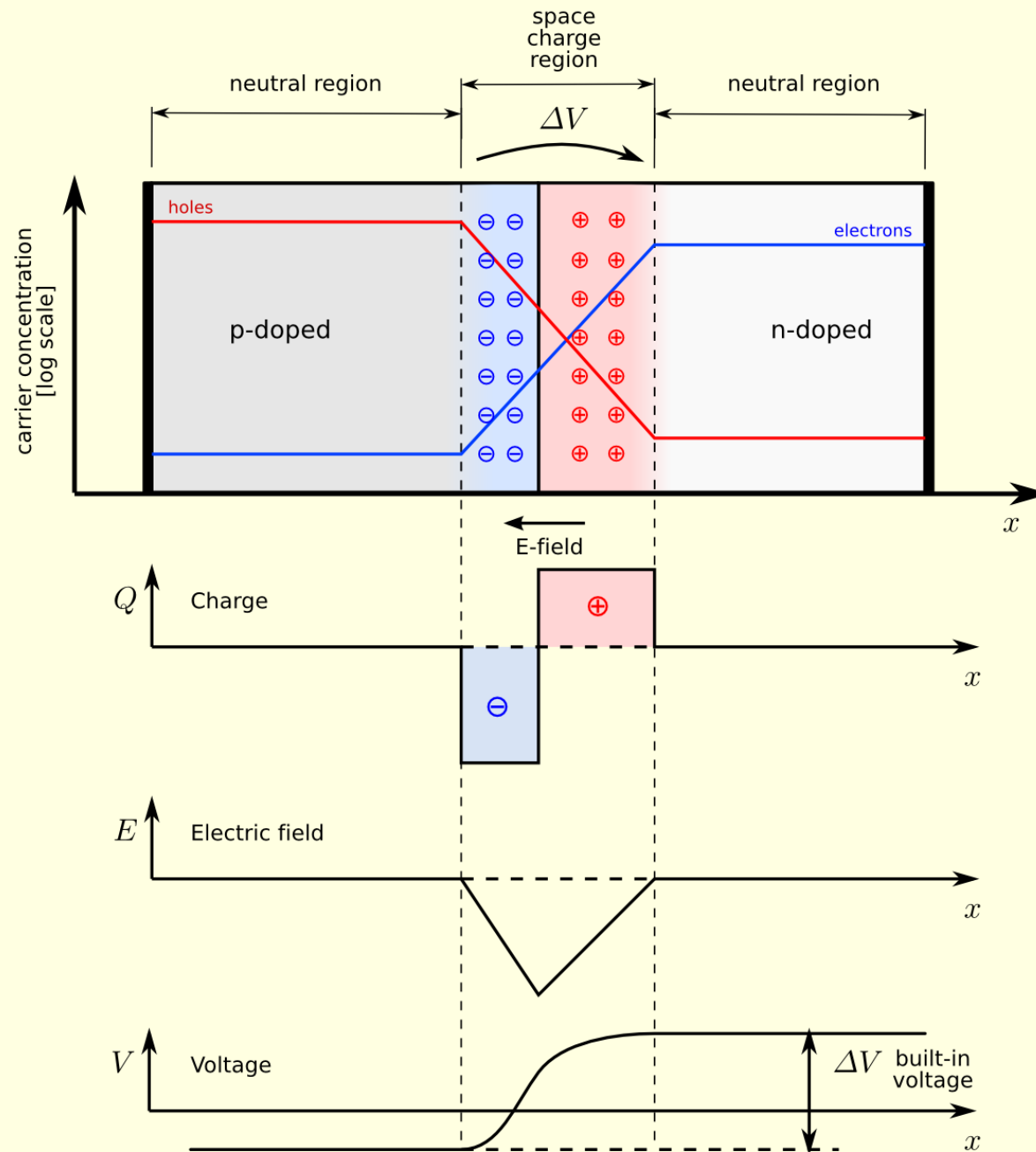
1. Zeichne die Fermi-Energie als horizontale Linie; markiere den Kontakt.



2. Zeichne "weit" links vom Kontakt das Banddiagramm von Material 1; weit rechts das von Material 2; immer relativ zu der bereits festgelegten Fermi-Energie.

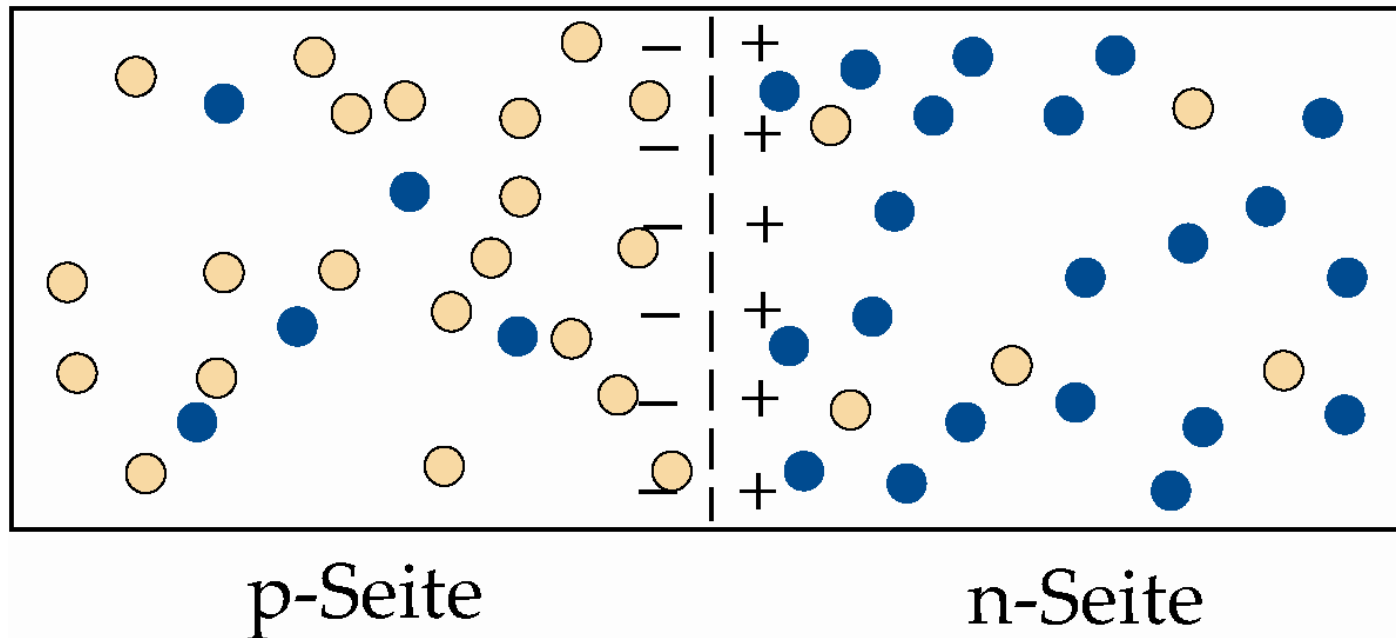


3. Verbinde Leitungs- und Valenzband durch eine "gefühlsmäßig" gezeichnete Bandverbiegung.

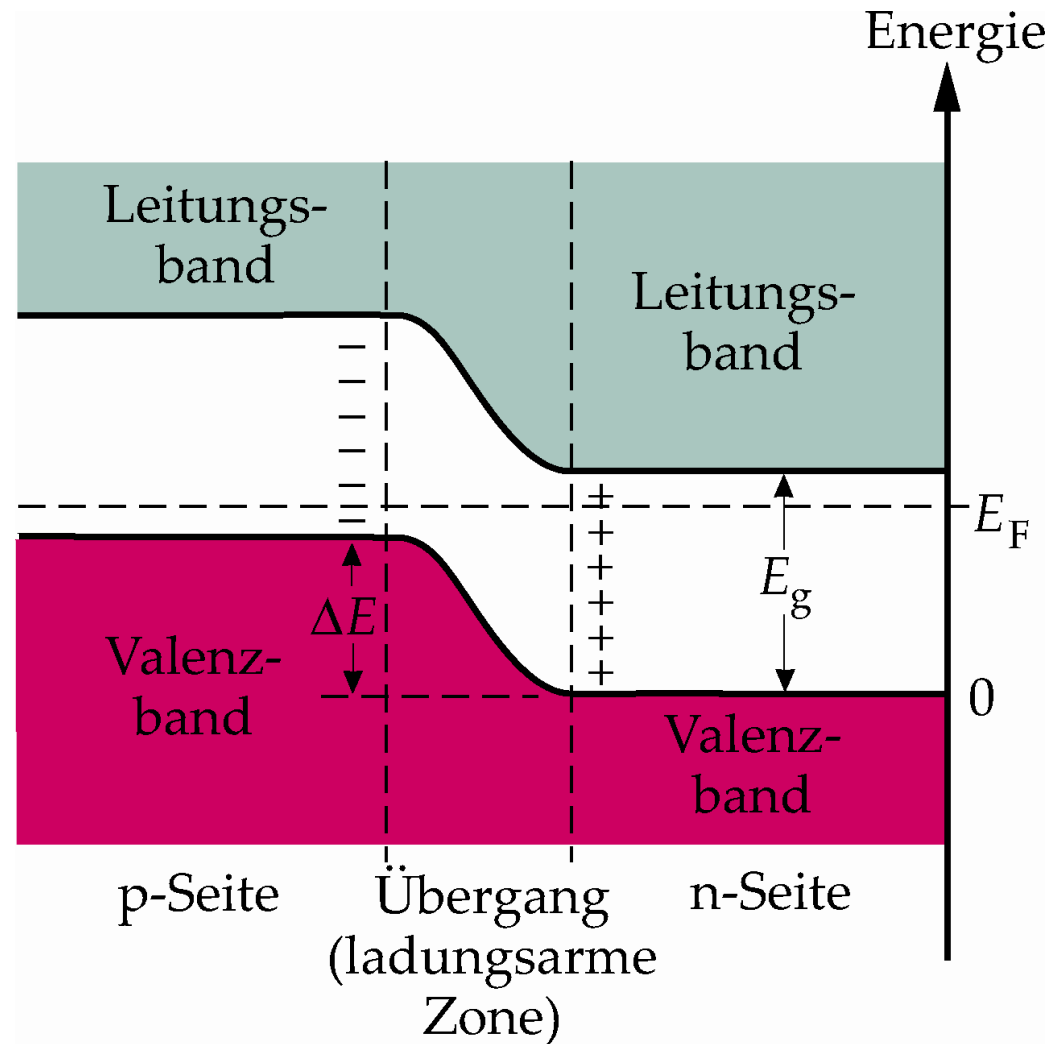


p-n-Übergang im Gleichgewicht

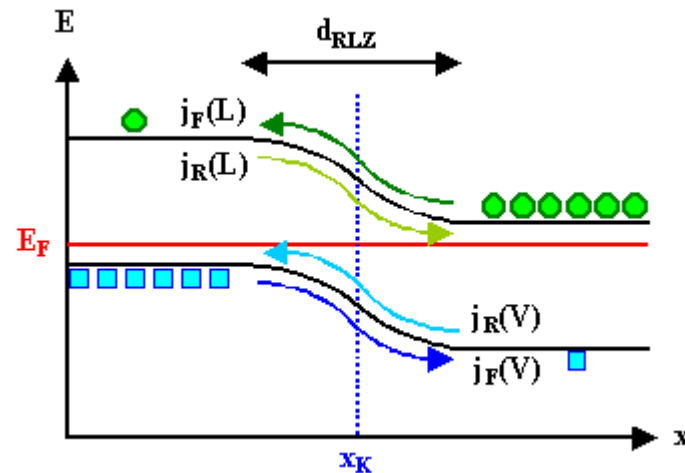
- – Elektronen
- + Löcher



p-n-Übergang im Gleichgewicht



Ströme im p-n-Übergang im Gleichgewicht



$j_F(L)$ - Diffusionsstrom, Rekombinationsstrom, Vorwärtsstrom der Elektronen

$j_F(V)$ - Diffusionsstrom, Rekombinationsstrom, Vorwärtsstrom der Löcher

$j_R(L)$ - Feld- oder Driftstrom, Generationsstrom, Rückwärtsstrom der Elektronen

$j_R(V)$ - Feld- oder Driftstrom, Generationsstrom, Rückwärtsstrom der Löcher

Im Gleichgewicht heben sich alle diese Ströme gegenseitig auf.

Berechnung der Weite der Raumladungszone

$$w_{\text{RLZ}} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \cdot (U_D - U)}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_D}{N_A} \cdot \frac{1}{N_A + N_D} \cdot (U_D - U)}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_A}{N_D} \cdot \frac{1}{N_A + N_D} \cdot (U_D - U)}$$

mit:

U der angelegten Spannung

U_D die Diffusionsspannung, manchmal auch als „built-in“-Spannung U_{bi} bezeichnet

w_{RLZ} der Weite der Raumladungszone

x_n der Rand der Raumladungszone im n-dotierten Gebiet

x_p der Rand der Raumladungszone im p-dotierten Gebiet

N_A der Akzeptorkonzentration im p-dotierten Gebiet

N_D der Donatorkonzentration im n-dotierten Gebiet

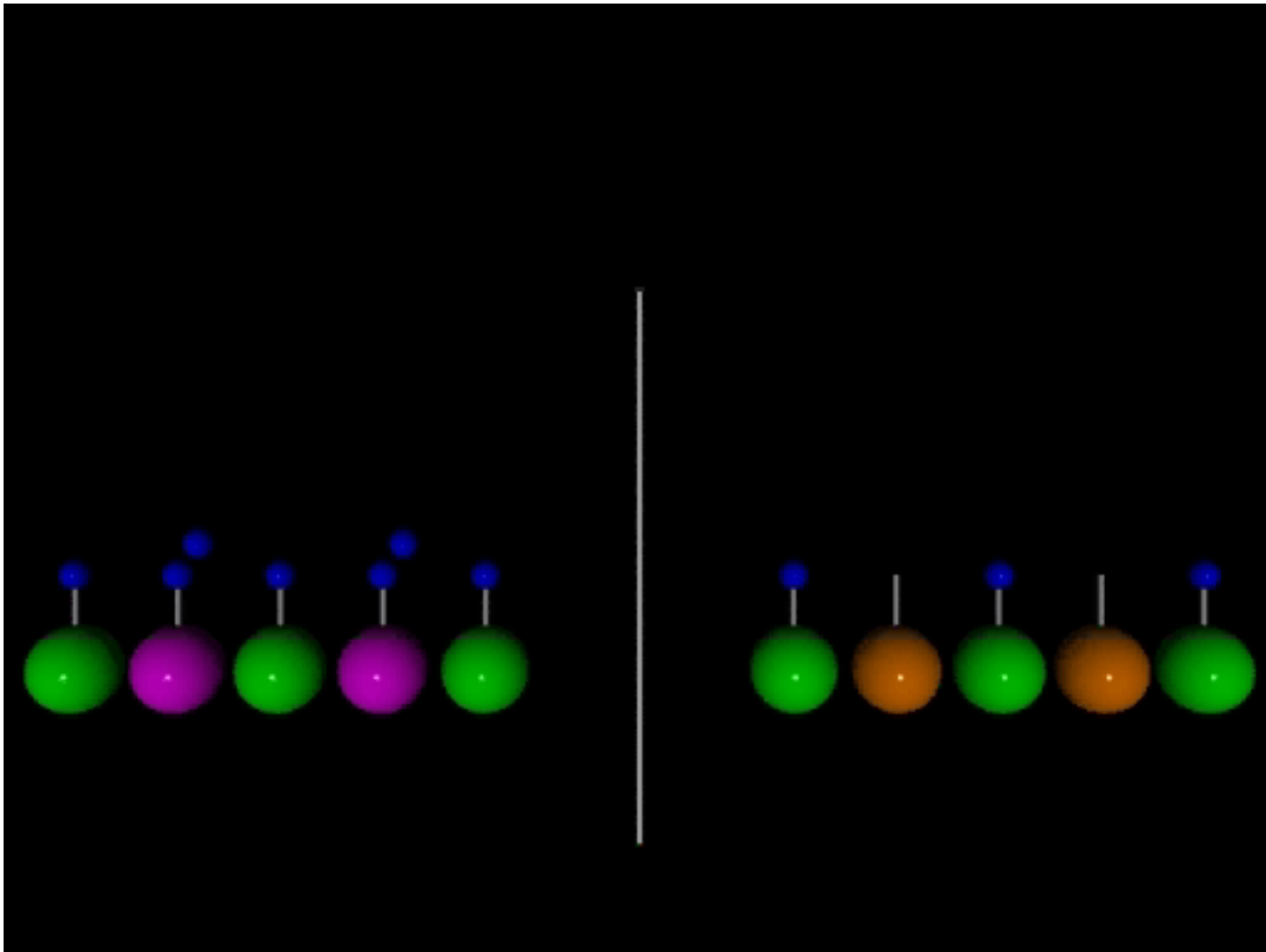
ϵ der Dielektrizitätskonstante

q der elektrischen Ladung

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} = 8,854\,187\,817\,62 \dots \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

$$e = 1,602\,176\,487(40) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Entstehung der Raumladungszone im pn-Übergang



Beispiele / Visualisierung

Flash-Animation zur Stromleitung bei Halbleitern

<http://www.zum.de/dwu/depotan/apet003.htm>

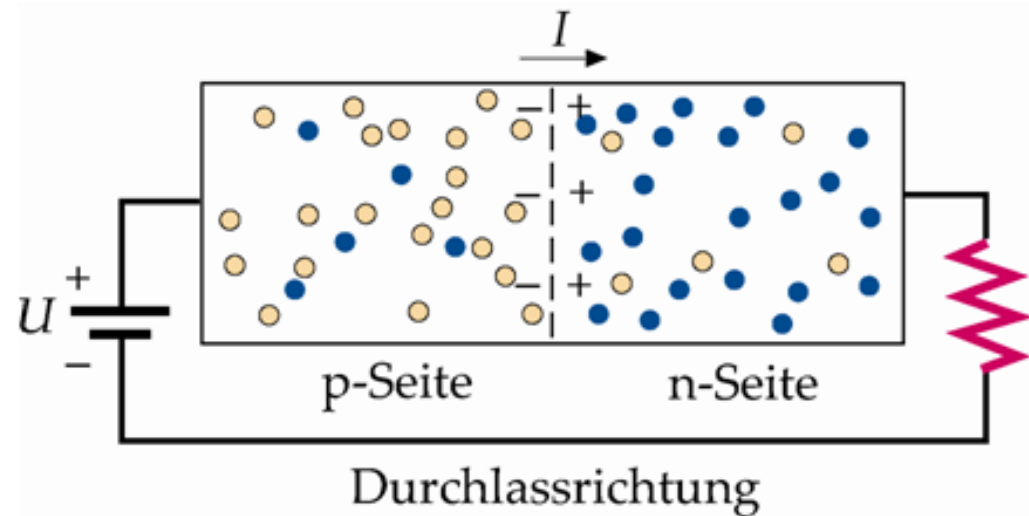
Java Applet Simulation von RLZ/FN/Bänder für verschiedene Materialien/Dotierungen

<http://jas.eng.buffalo.edu/education/pn/pnformation/>

Java Applet : Zusätzliche Darstellung der Raumladung

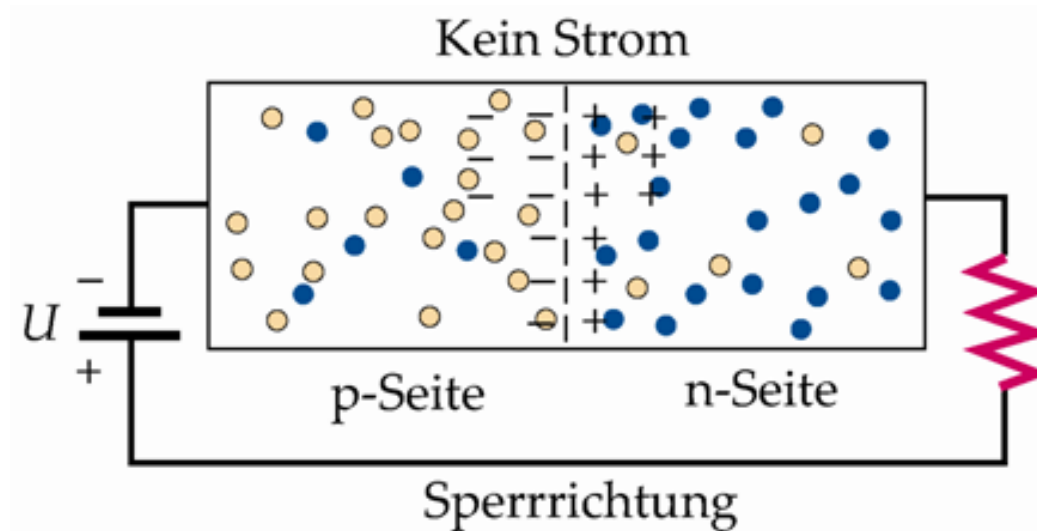
<http://jas.eng.buffalo.edu/education/pn/pnformation3/index.html>

p-n-Übergang bei angelegter elektrischer Spannung



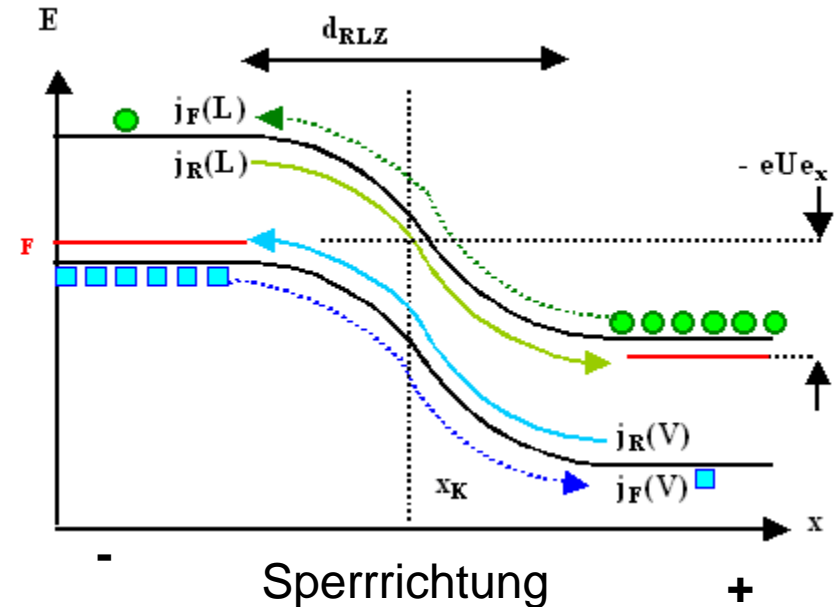
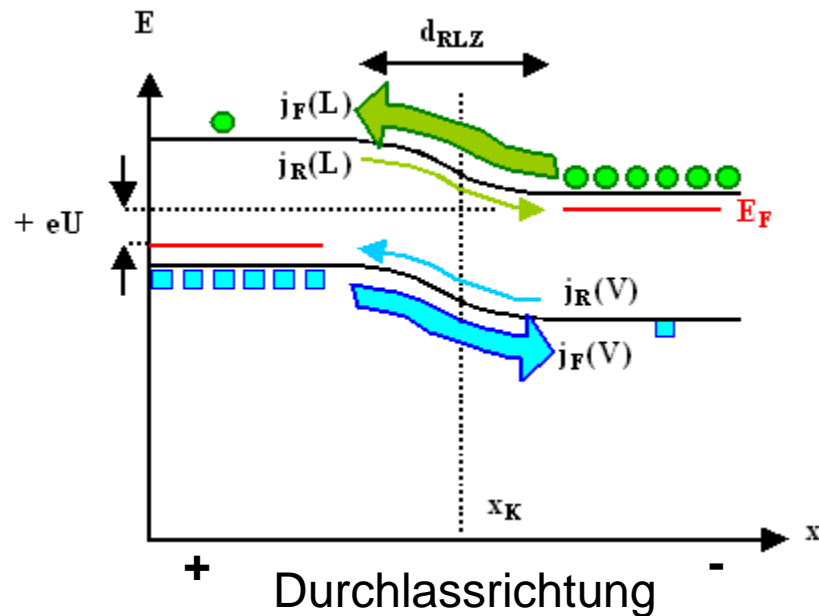
Bei Polung in Durchlassrichtung (+ am p-Kristall, – am n-Kristall) wird der Potenzialwall abgebaut. Neue Ladungsträger fließen von der äußeren Quelle auf die Sperrschicht zu und rekombinieren hier fortwährend. Bei ausreichender angelegter Spannung fließt ein signifikanter elektrischer Strom.

p-n-Übergang bei angelegter elektrischer Spannung



Durch Anlegen einer äußeren Spannung in Sperrrichtung (+ am n-Kristall, – am p-Kristall) wird das Feld der Sperrschicht verstärkt und die Ausdehnung der Raumladungszone vergrößert. Elektronen und Löcher werden von der Sperrschicht weg gezogen. Es fließt nur ein sehr geringer Strom, erzeugt durch Minoritätsladungsträger (Sperrstrom).

p-n-Übergang bei angelegter elektrischer Spannung



Gegenüber der Gleichgewichtskonstruktion für $U_{ex} = 0 \text{ V}$ müssen wir nur eines der Bänder zusätzlich um eU_{ex} verschieben und die beiden Bänder dann wieder "nach Gefühl" verbinden.

Falls wir rechts den *Minuspol* der Spannungsquelle anschließen, erhöhen wir das Potential der Elektronen, die **n**-Seite rutscht um $-e \cdot U_{ex} = +e \cdot |U_{ex}|$ nach oben (oder die **p**- Seite nach unten; wir sind frei bei der Wahl des Nullpunkts).

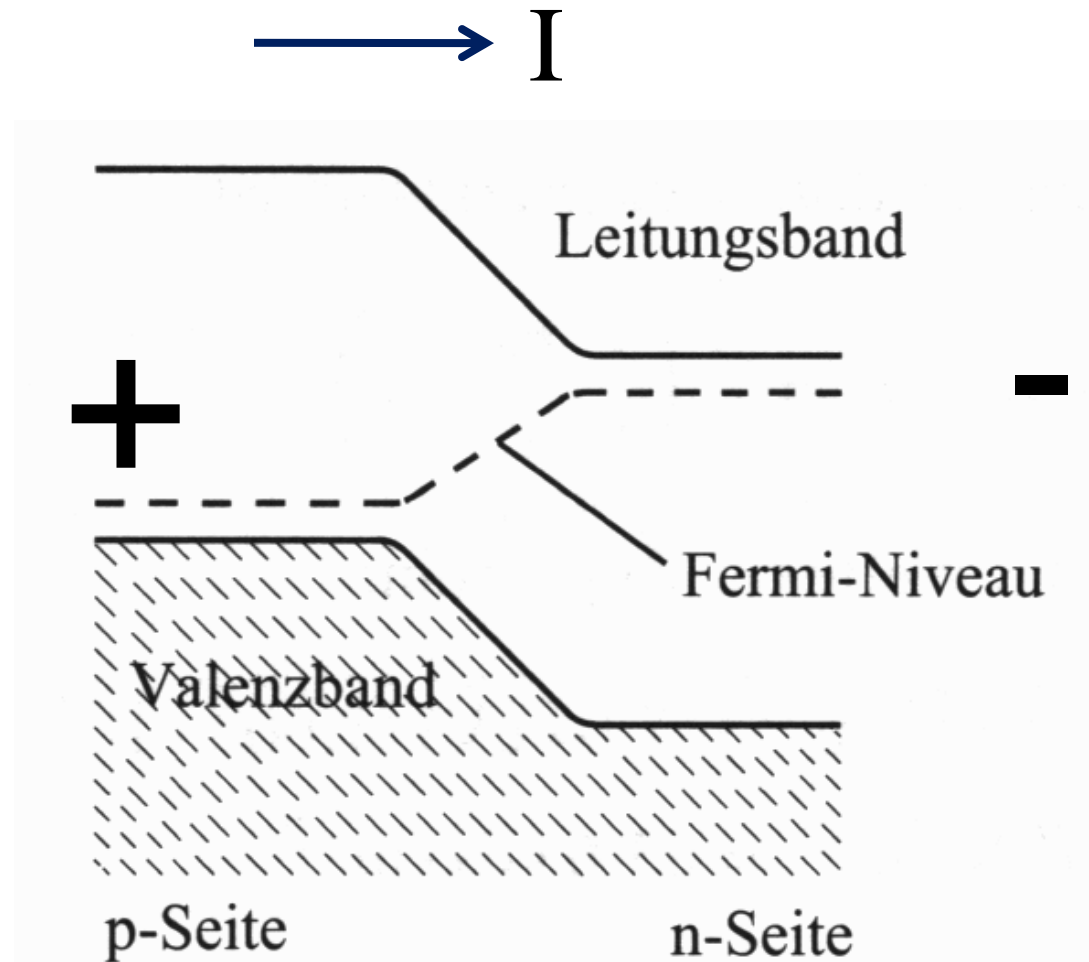
p-n-Übergang in Durchlassrichtung

Falls wir rechts den *Minuspol* der Spannungsquelle anschließen, erhöhen wir das Potential der Elektronen, die **n-Seite** rutscht um $-e \cdot U_{\text{ex}} = +e \cdot |U_{\text{ex}}|$ nach oben

Die Raumladungszone wird kleiner, die Energiebarriere wird kleiner.

Der Vorwärtsstrom wird sich also deutlich erhöhen.

Der Rückwärtsstrom bleibt jedoch unverändert.



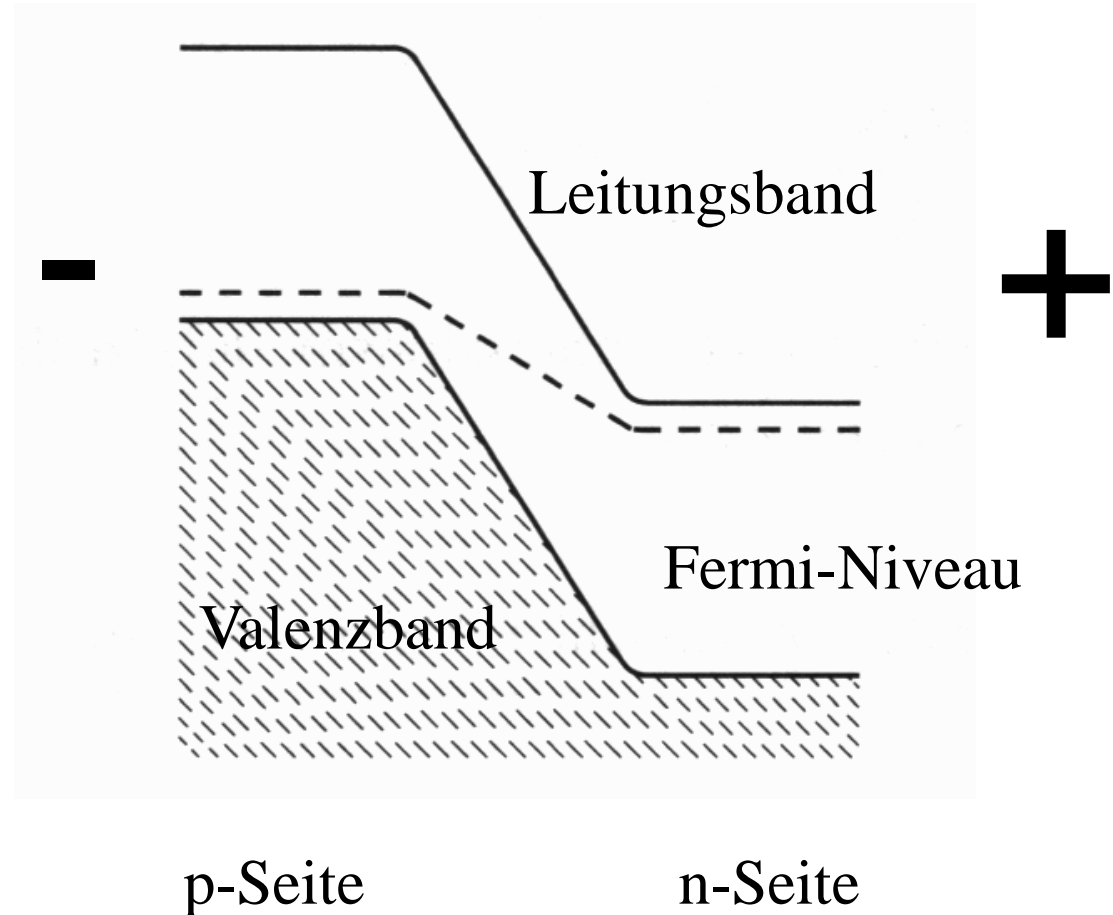
p-n-Übergang in Sperrrichtung

Das Potential der Elektronen (also die **n-Seite**) rutscht um $e \cdot U_{\text{ex}}$ nach unten (oder die **p-Seite** nach oben).

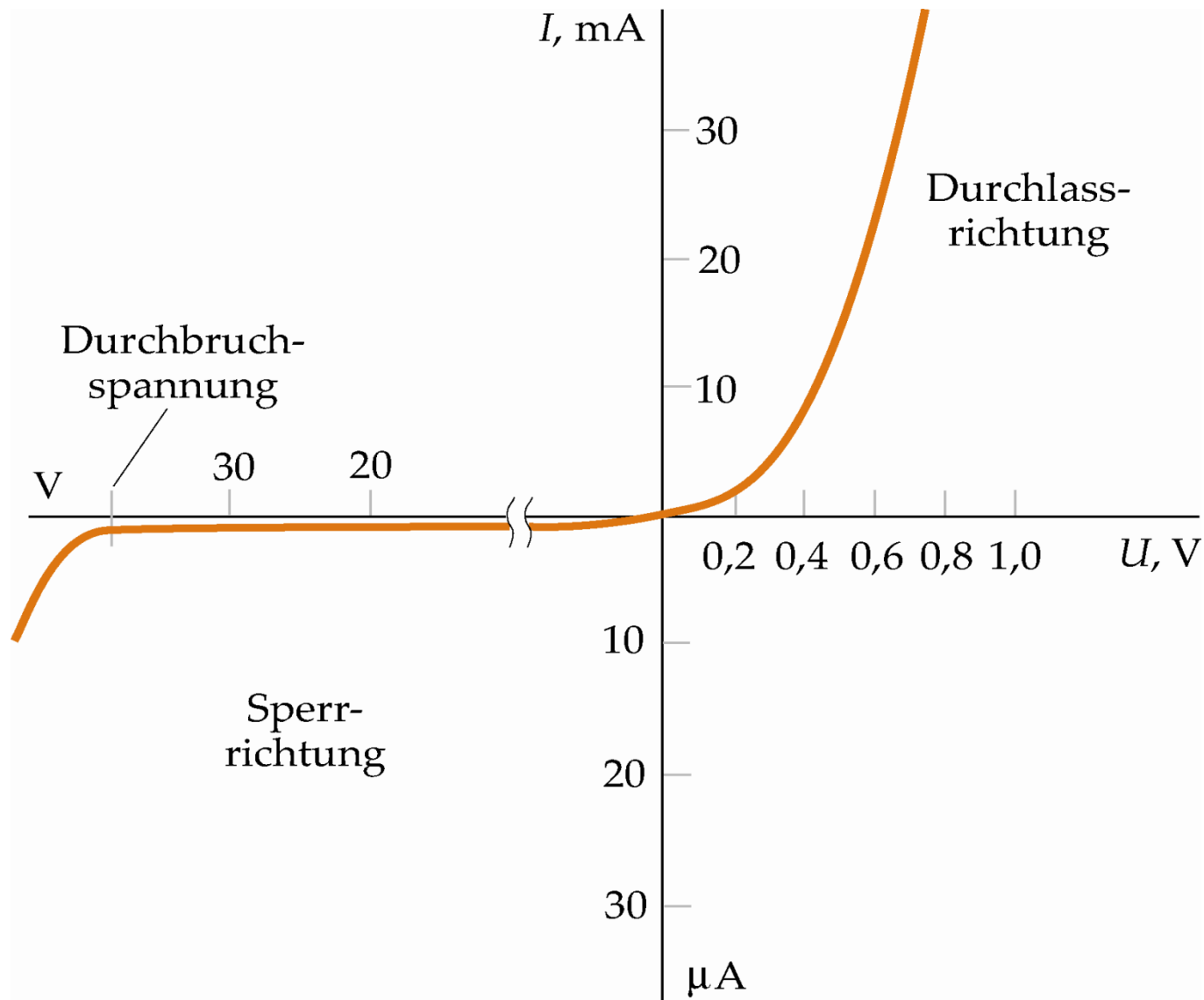
Die Raumladungszone wird größer, die Energiebarriere wird größer.

Der Vorwärtsstrom wird also deutlich kleiner; wir können ihn vernachlässigen. Der Rückwärtsstrom bleibt jedoch unverändert.

Als Nettostromfluss im äußeren Stromkreis bleibt in "Rückwärtsrichtung" also nur noch der Rückwärtsstrom.



Strom-Spannungs-Kennlinie einer Sperrschicht



Stromfluss durch die Sperrschicht

Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Sperrschicht hat jedoch keinen Kennlinienknick oder eine natürliche Schwellspannung, dies ist ein Missverständnis, das durch den groben Maßstab bei der Darstellung der Kennlinie entsteht.

Vielmehr ist die Kennlinie eine Exponentialfunktion und der differentielle Innenwiderstand wird zum Koordinatenursprung hin immer höher.

Der Stromfluss durch die Sperrschicht kann nach Shockley folgendermaßen beschrieben werden:

$$I_d = I_s (e^{U_d/U_t} - 1)$$

Dabei ist:

I_d : Diodenstrom

I_s : Sättigungssperrstrom: 10-100 nA bei Silizium

U_d : Diodenspannung

U_t : Temperaturspannung,

$$U_t = \frac{kT}{e} \approx 26 \text{ mV bei } 300 \text{ K}$$

e : Elementarladung: $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ [As]

k : Boltzmannkonstante: $8,617343 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

T : Absolute Temperatur

Durchbruchspannung

Bei Halbleiterbauelementen bezeichnet die Durchbruchspannung die Sperrspannung, bei deren Überschreiten der Sperrstrom stark ansteigt.

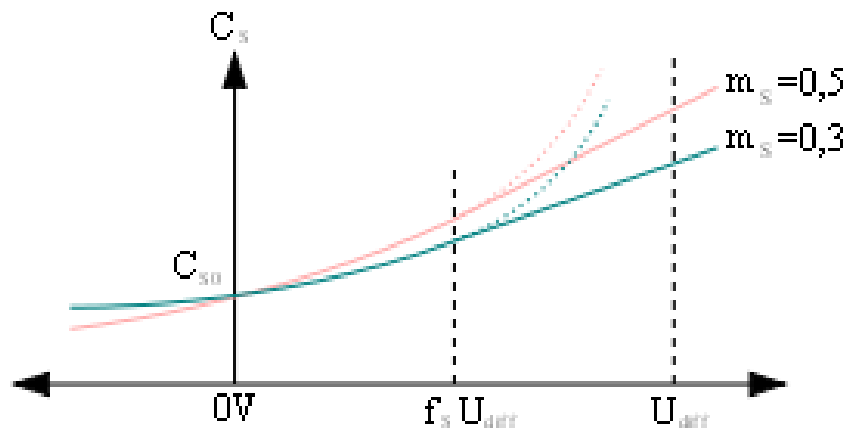
Wird eine p-n-Übergang in Sperrrichtung betrieben, so fließt durch sie dennoch ein geringer Sperrstrom. Der Sperrstrom einer Germanium-Diode liegt bei 1-100 μA , der einer Silizium-Diode bei 10-100 nA.

Vergrößert man jedoch die Spannung in Sperrrichtung $U_R = - U_D$ weiter, so steigt der Sperrstrom $I_R = - I_D$ ab einer bestimmten Sperrspannung zunächst langsam und dann schlagartig an.

Diese Zunahme des Sperrstroms (reverse current) nennt man allgemein „Durchbruch“, und die zugehörige Spannung wird als Durchbruchspannung $U_{BR} > - U_D$ bezeichnet. Die Durchbruchspannung einer Diode hängt allgemein vom Halbleitermaterial und der Dotierung ab und kann für Gleichrichterioden im Bereich zwischen 50 und 1000 V liegen.

Sperrschichtkapazität

Der p-n-Übergang einer Diode hat eine Kapazität, die von der Breite der Raumladungszone abhängig ist. Wird eine Diode in Sperrrichtung betrieben, so entsteht am p-n-Übergang eine Ladungsträgerverarmungszone, an der sich auch ein elektrisches Feld, bedingt durch die fehlenden Ladungsträger, aufbaut. Mit steigender Spannung vergrößert sich die Breite der ladungsfreien Zone, wodurch die Kapazität abnimmt.



Der Kapazitätskoeffizient m_s stellt das Dotierungsprofil des p-n-Überganges dar.

Die Grafik für C_s ist nur bis zu einem Wert von etwa $0,5 U_{\text{diff}}$ gültig.

Anwendung eines p-n-Übergangs

Wie oben gezeigt, leitet der einfache p-n-Übergang elektrischen Strom in eine Richtung sehr gut, in die andere fast nicht. Eine solche Anordnung nennt man Diode (Halbleiterdiode). Eine wichtige Anwendung der Diode ist daher der Gleichrichter zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom. Eine Sonderform der Diode ist die Fotodiode sowie die Solarzelle. Bei diesen wird die entgegengesetzte elektrische Polarisierung der Raumladungszonen verwendet, um generierte Elektron-Loch-Paare zu trennen. Fotodioden werden daher in Sperrrichtung betrieben. Dadurch hebt sich die Wirkung des Widerstandes auf, und der p-n-Übergang verliert seinen Einfluss auf die Elektron-Loch-Paare.

Auch die meisten übrigen Halbleiterbauelemente beinhalten in klassischer Bauweise einen oder mehrere p-n-Übergänge zur Erzielung ihrer Funktion, z. B. im Bipolartransistor, Feldeffekttransistor (FET), MOS-FET, Halbleiterdetektor usw.

Aufgaben

1. Berechnen Sie die Breite der Raumladungszone für folgenden p-n-Übergang:
 $U = 0 \text{ V}$ (keine angelegte äußere Spannung)
 $U_D = 0,5 \text{ V}$
 $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
2. Welche äußere Spannung muss angelegt werden, damit die Breite der Raumladungszone Null wird?
3. Berechnen Sie die Ströme, die durch den p-n-Übergang in Durchlassrichtung bei 300 K fließen, wenn der Sättigungssperrstrom 50 nA beträgt und die angelegte Spannung 0,5 V, 1 V, 2 V und 4 V beträgt.

Fragen (1)

1. Welche Ladungen findet man in der Raumladungszone von **n**-Silizium?
 - a) Ionisierte positiv geladene Donatoren.
 - b) Ionisierte negativ geladene Donatoren.
 - c) Ionisierte positiv geladene Akzeptoren.
 - d) Ionisierte negativ geladene Akzeptoren.
 - e) Elektronen.
 - f) Löcher.
2. Wie groß ist die Kapazität **C** eines Plattenkondensators (Fläche **A**, Abstand **d** der Platten; Material mit **ϵ_r** dazwischen)?
3. Wie groß ist die Ladung auf einer 'Platte' des Raumladungszonenkondensators?
 - a) Zahl der in der RLZ fehlenden Majoritätsladungsträger.
 - b) Dichte der ionisierten Dotieratome mal Volumen der RLZ.
 - c) Zahl der Minoritätsladungsträger in der RLZ.
 - d) Dichte der Dotieratome.

Fragen (2)

4. Welche Aussagen über einen p-n-Übergang sind richtig?
- a) Nach Kontakt von p- und n-Halbleiter fließen solange Elektronen und Löcher auf energetisch günstigere Plätze bis das entstehende Feld jeglichen Ladungsträger'verkehr' über den Kontakt unterbindet.
 - b) Die Ladungen an den Oberflächen vom p- und n-Teil bewirken beim Kontakt das Entstehen der Raumladungszone (RLZ).
 - c) Über den Kontakt fließen solange Nettoströme, bis die Fermi-Energie überall gleich ist.
 - d) Die Höhe der Bandverbiegung in der RLZ hängt von der Dotierung ab.
 - e) Die Weite der Bandverbiegung hängt von der Dotierung ab.
 - f) Alle Ströme durch die RLZ sind im Gleichgewicht = 0.
 - g) Der Nettostrom durch die RLZ ist im Gleichgewicht = 0.
5. Die Feldlinien in der Raumladungszone...
- a) ...beginnen und enden auf Ladungen.
 - b) ...beginnen und enden auf Löchern und Elektronen.
 - c) ...sind praktisch gar nicht vorhanden, da es in (Halb)leitern gar kein nennenswertes elektrisches Feld geben kann.
 - d) ...beginnen oder enden an Oberflächen oder Grenzflächenladungen.
 - e) ...beginnen und enden an ionisierten Dotieratomen.

Fragen (3)

6. Die Ausdehnung d_{RLZ} der Raumladungszone...
- a) ...ist proportional zur angelegten Spannung
 - b) ...ist proportional zur reziproken angelegten Spannung.
 - c) ...ist proportional zur Wurzel der angelegten Spannung.
 - d) ...ist proportional zur Wurzel der 'mittleren' Dotierung.
 - e) ...ist proportional zur Wurzel der reziproken 'mittleren' Dotierung.
 - f) ...ist proportional zur reziproken 'mittleren' Dotierung.
7. Die Größenordnung von d_{RLZ} in 'normalem' Silizium ist...
- a) ...wenige **nm**.
 - b) ...etliche **nm** bis einige **µm**.
 - c) ...viele **µm**.
 - d) ...bis zu **mm**.
 - e) ...von wenigen **nm** bis **mm** je nachdem.
 - f)nur bei niedrig dotiertem Material auch mal **> 1 µm**.

Literatur und Quellen

Paul A. Tipler, Gene Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, August 2009

<http://de.wikipedia.org/>



Technische Hochschule Deggendorf – Edlmaistr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf