




Physik für Infotronik (21)

Gerald Kupris

13.01.2016

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

Leiter - Nichtleiter - Halbleiter

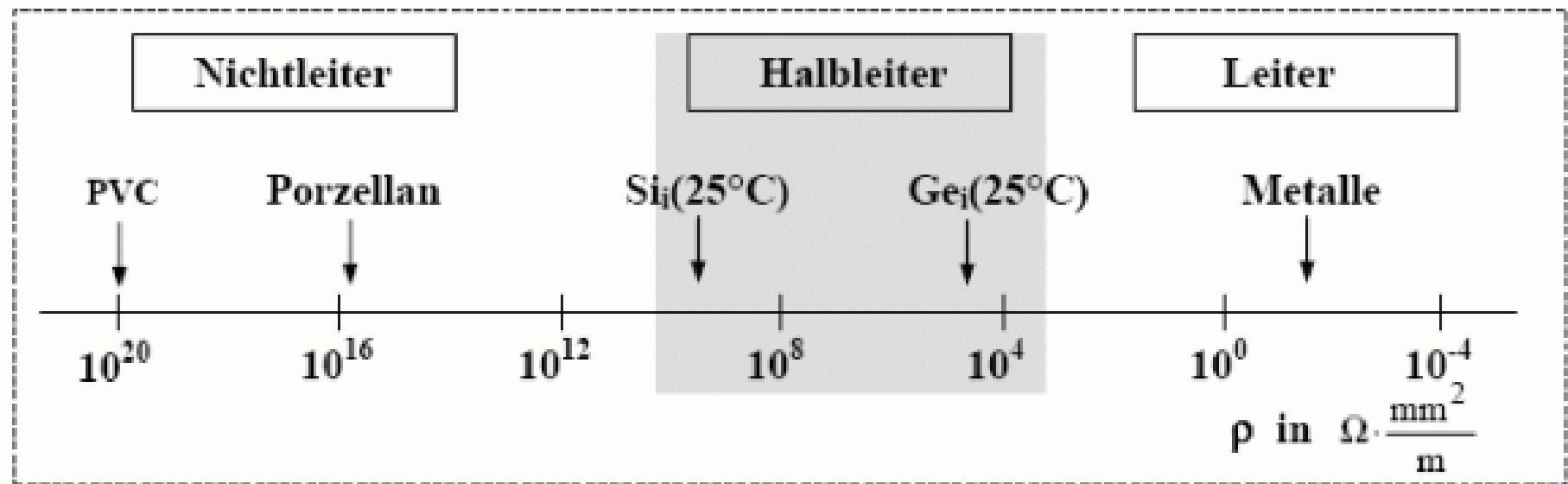
Ein elektrischer Leiter ist ein Medium, das frei bewegliche Ladungsträger besitzt und somit zum Transport geladener Teilchen benutzt werden kann.

Halbleiter

Als Nichtleiter bezeichnet man in der Physik und der Technik einen Stoff, der keine oder eine praktisch unbedeutende elektrische Leitfähigkeit besitzt

Material	Spezifischer Widerstand r [$\Omega \cdot m$]	Temperaturkoeffizient α [K^{-1}]
Silber	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Kupfer	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Blei	$22 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Kohlenstoff	$3500 \cdot 10^{-8}$	$-0,5 \cdot 10^{-3}$
Germanium	0,45	$-4,8 \cdot 10^{-2}$
Silizium	640	$-7,5 \cdot 10^{-2}$
Porzellan	10^{11}	
Holz	$10^8 - 10^{14}$	
Glas	$10^{10} - 10^{14}$	
Hartgummi	$10^{13} - 10^{16}$	
Teflon	10^{14}	

Wertebereich des spezifischen Widerstandes von Materialien

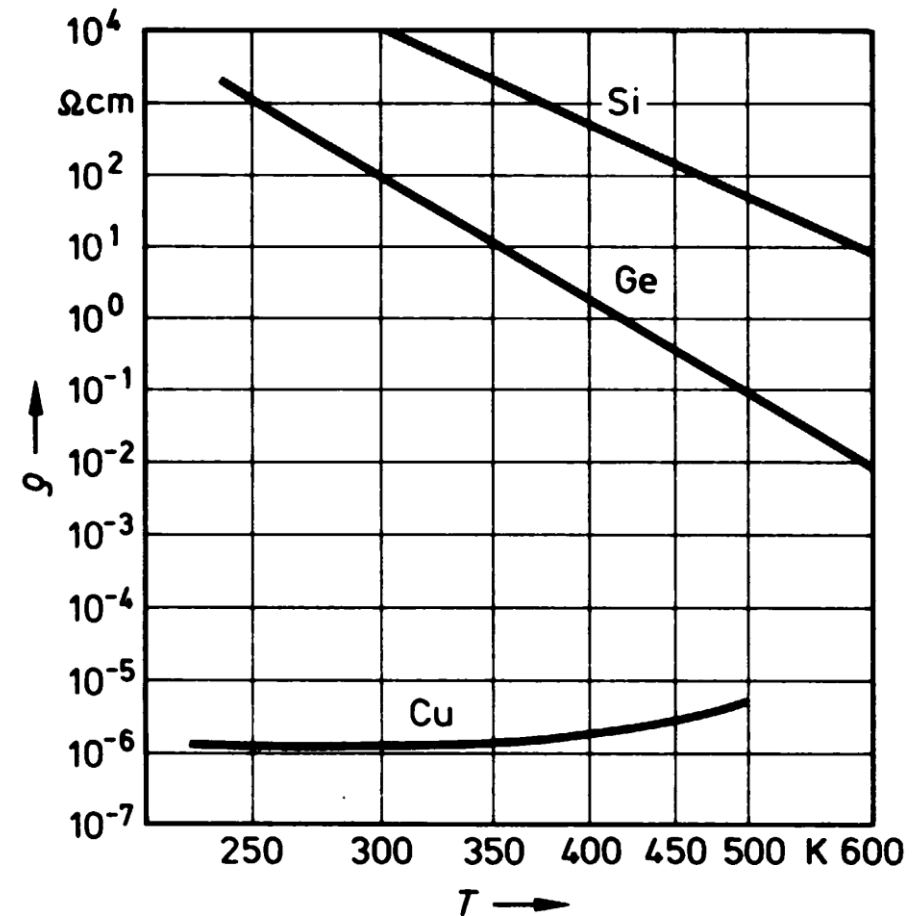


Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands

Mit steigender Temperatur werden bei Halbleitern mehr und mehr Elektronen aus ihren kovalenten Bindungen gelöst und tragen als negative Ladungsträger, sogenannte n-Träger, zur Leitfähigkeit bei. Die zurückbleibende positiv geladene Fehlstelle wird als Defektelektron oder Loch bezeichnet und kann als positiver Ladungsträger, sogenannter p-Träger, angesehen werden.

Beim reinen Halbleiter ist die Anzahl der n-Träger immer gleich der Anzahl der p-Träger.

Die sogenannte intrinsische Leitfähigkeit bzw. Eigenleitung des reinen Halbleiters wächst mit steigender Temperatur, d. h. der intrinsische Halbleiter weist ein Heißleiter-Verhalten auf.



Elektronenkonfiguration

Die Elektronenkonfiguration gibt die Verteilung der Elektronen in der Elektronenhülle eines Atoms auf verschiedene Energiezustände bzw. Aufenthaltsräume (Orbitale) an.

Der Zustand jedes Elektrons der Hülle wird nach dem Atommodell von Bohr-Sommerfeld sowie des Orbitalmodells durch vier Quantenzahlen bestimmt.

Gemäß dem Pauli-Prinzip darf der Zustand keines Paares von Elektronen eines Atoms in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen. Das ist der Grund dafür, dass sich die Elektronen auf die verschiedenen erlaubten Zustände und damit auf die Schalen und Unterschalen verteilen.

Die Hauptquantenzahlen bilden die Schalen, die Nebenquantenzahlen die Unterschalen. Jede Schale kann gemäß den Beschränkungen von l , m und s mit maximal $2n^2$ Elektronen besetzt werden. Die Schalen werden aufsteigend mit K, L, M, N, O, P, Q bezeichnet.

Die äußerste, besetzte Schale (Valenzschale) bestimmt das chemische Verhalten und ist daher Maßstab für die Einordnung ins Periodensystem.

Aufbau der Atome

In Atomen mit mehreren Elektronen werden die Energiewerte durch alle vier Quantenzahlen n , m , l und s bestimmt.

Beim Kohlenstoff z. B. taucht aber noch eine Frage auf, ob zwei Elektronen ein 2p-Orbital zusammen besetzen sollen oder zwei unterschiedliche 2p-Orbitale. Die Antwort liefert die Hundsche Regel:

Energiegleiche Orbitale mit gleicher Nebenquantenzahl l werden zunächst einfach besetzt.

Das bedeutet: Die Elektronen verteilen sich so auf Orbitale, dass eine maximale Zahl von ungepaarten Elektronen mit derselben Richtung des Spins, also derselben Spinquantenzahl, resultiert.

Element	Elektronenkonfiguration	Kästchenschema		
		1s	2s	2p
H	$1s^1$	\uparrow		
He	$1s^2$	$\uparrow\downarrow$		
Li	$1s^2 2s^1$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow	
Be	$1s^2 2s^2$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	
B	$1s^2 2s^2 2p^1$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow
C	$1s^2 2s^2 2p^2$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow \uparrow
N	$1s^2 2s^2 2p^3$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow \uparrow \uparrow
O	$1s^2 2s^2 2p^4$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ \uparrow \uparrow
F	$1s^2 2s^2 2p^5$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ \uparrow
Ne	$1s^2 2s^2 2p^6$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$

Anzahl der Elektronen in einer Schale

Mit dem Pauli-Prinzip können wir die maximale Anzahl der Elektronen in einer Schale berechnen, indem wir die Zahl ihrer Orbitale mit zwei multiplizieren. Die Anzahl der Elemente in jeder Periode ergibt sich dann nach dem Energieprinzip:

Periodennummer	Unterschalen, die in dieser Periode aufgefüllt werden	Maximale Elektronenzahl dieser Unterschalen	Anzahl von Elementen
1	1s	$2 \cdot 1$	2
2	2s 2p	$2 \cdot (1+3)$	8
3	3s 3p	$2 \cdot (1+3)$	8
4	4s 3d 4p	$2 \cdot (1+5+3)$	18
5	5s 4d 5p	$2 \cdot (1+5+3)$	18
6	6s 4f 5d 6p	$2 \cdot (1+7+5+3)$	32
7	7s 5f 6d 7p	$2 \cdot (1+7+5+3)$	32

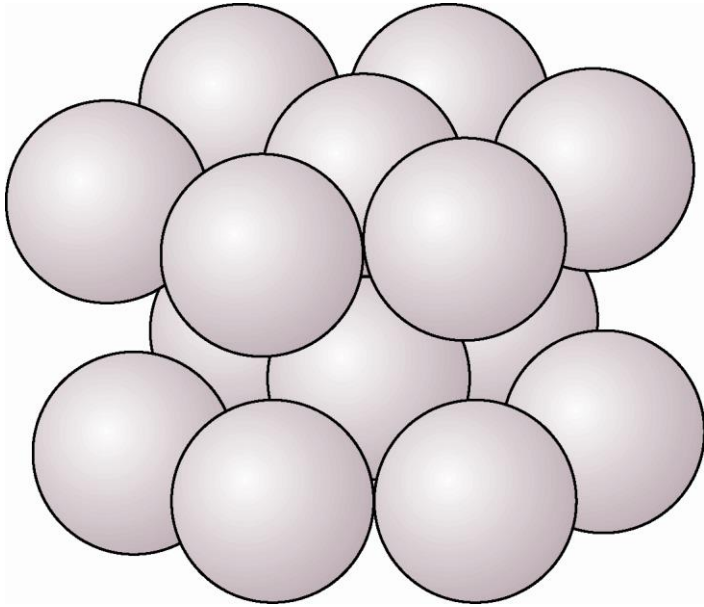
Periodensystem der Elemente

P.	I - 1																	VIII-18
1	1 H	II 2											III 13	IV 14	V 15	VI 16	VII 17	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	IIIA 3	IVA 4	VA 5	VIA 6	VIIA 7	VIIIA 8	VIIIA 9	VIIIA 10	IA 11	IIA 12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
Lanthanoide			*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinoide			**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

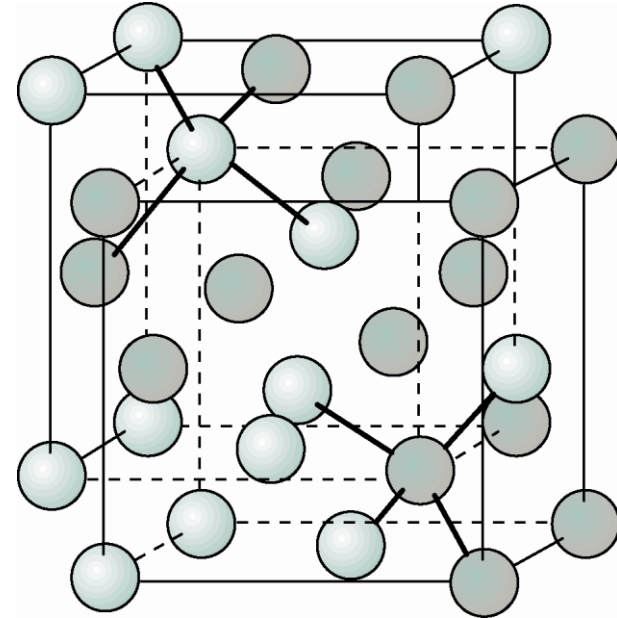
Belegung der Elektronenschalen bei verschiedenen Elementen

Kernladung	Element	K	L	M	N	O	P	Metall	Halbleiter	Edelgas
2	He	2								X
5	B	2	3							
6	C	2	4							
10	Ne	2	8							X
13	Al	2	8	3				X		
14	Si	2	8	4					X	
15	P	2	8	5						
18	Ar	2	8	8						X
29	Cu	2	8	18	1			X		
31	Ga	2	8	18	3			X		
32	Ge	2	8	18	4				X	
33	As	2	8	18	5					
36	Kr	2	8	18	8					X
47	Ag	2	8	18	18	1		X		
49	In	2	8	18	18	3		X		
51	Sb	2	8	18	18	5				
54	Xe	2	8	18	18	8				X
79	Au	2	8	18	32	18	1	X		

Aufbau von Festkörpern



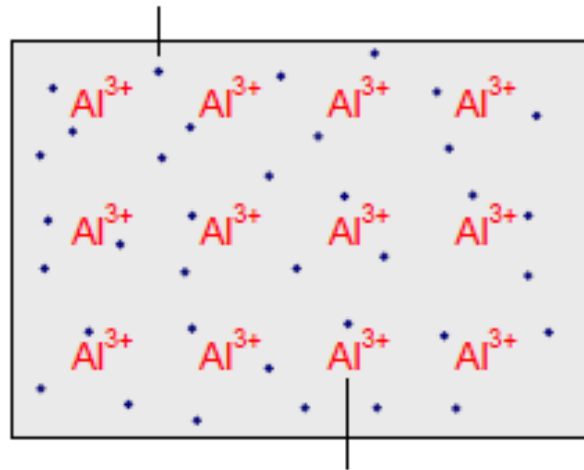
Hexagonal dichte Kristallstruktur



Diamantstruktur

Aufbau von Metallen

Freie Elektronen bilden ein Elektronengas



Feste positive Aluminiumionen

Jedes Metallatom gibt seine Außen-elektronen ab: es entstehen positiv geladene Metallionen (Atomrümpfe) und freie Elektronen zwischen denen starke Anziehungskräfte herrschen. Die Metallionen stoßen sich untereinander ebenso ab wie die Elektronen.

Da die Anziehungs- und Abstoßungskräfte in alle Richtungen des Raumes wirken ordnen sich die Atomrümpfe zu einem regelmäßigen Gitter an. In den Zwischenräumen befinden sich die frei beweglichen Elektronen als so genanntes Elektronengas. Auf Grund der frei beweglichen Elektronen leiten Metalle den elektrischen Strom sehr gut.

Leitfähigkeit von Metallen

Die Leitfähigkeit von Metallen beruht auf den freien Elektronen die bei der Metallbindung als Elektronengas vorliegen. Bereits mit wenig Energie werden genug Elektronen von den Atomen gelöst um eine Leitfähigkeit zu erreichen.

Die Leitfähigkeit hängt unter anderem von der Temperatur ab. Steigt diese an, schwingen die Atomrümpfe immer stärker, so dass die Elektronen in ihren Bewegungen behindert werden. Die Folge ist, dass der Widerstand steigt.

Die besten Leiter, Gold und Silber, werden auf Grund der hohen Kosten relativ selten eingesetzt (Gold u.a. bei der Kontaktierung der fertigen Chips). Die Alternativen in der Halbleitertechnologie zur Verdrahtung der einzelnen Komponenten eines Chips sind Aluminium und Kupfer.

Der Halbleiter

Halbleiter sind Feststoffe, deren Leitfähigkeit zwischen der von Leitern und Nichtleitern liegt. Halbleiter können verschiedene chemische Strukturen besitzen. So unterscheidet man zwischen Elementhalbleitern (aufgebaut aus einem einzigen Element) und Verbindungshalbleitern.

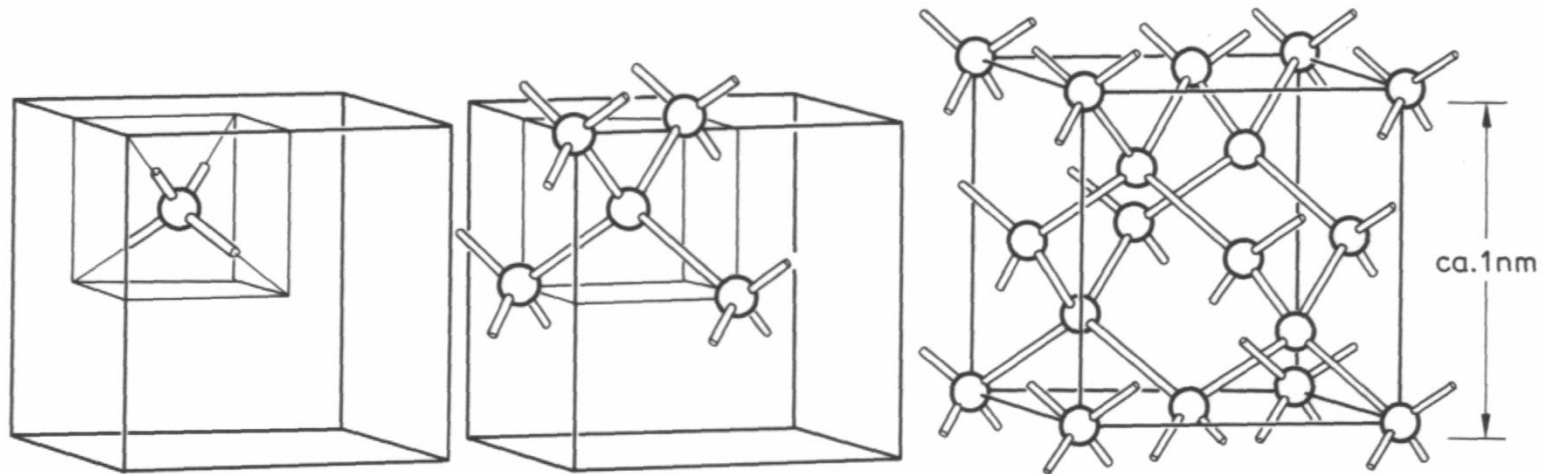
Durch Elektronenaustausch gleichartiger Atome, um das Elektronenoktett zu vervollständigen, ordnen sich diese als Gitterstruktur an. Im Gegensatz zu Metallen nimmt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur - bis zu einem gewissen Maß - zu.

Durch den Temperaturanstieg brechen Bindungen auf und Elektronen werden freigesetzt. An der Stelle an der sich das Elektron befand verbleibt ein so genanntes Defektelektron (auch Loch genannt).



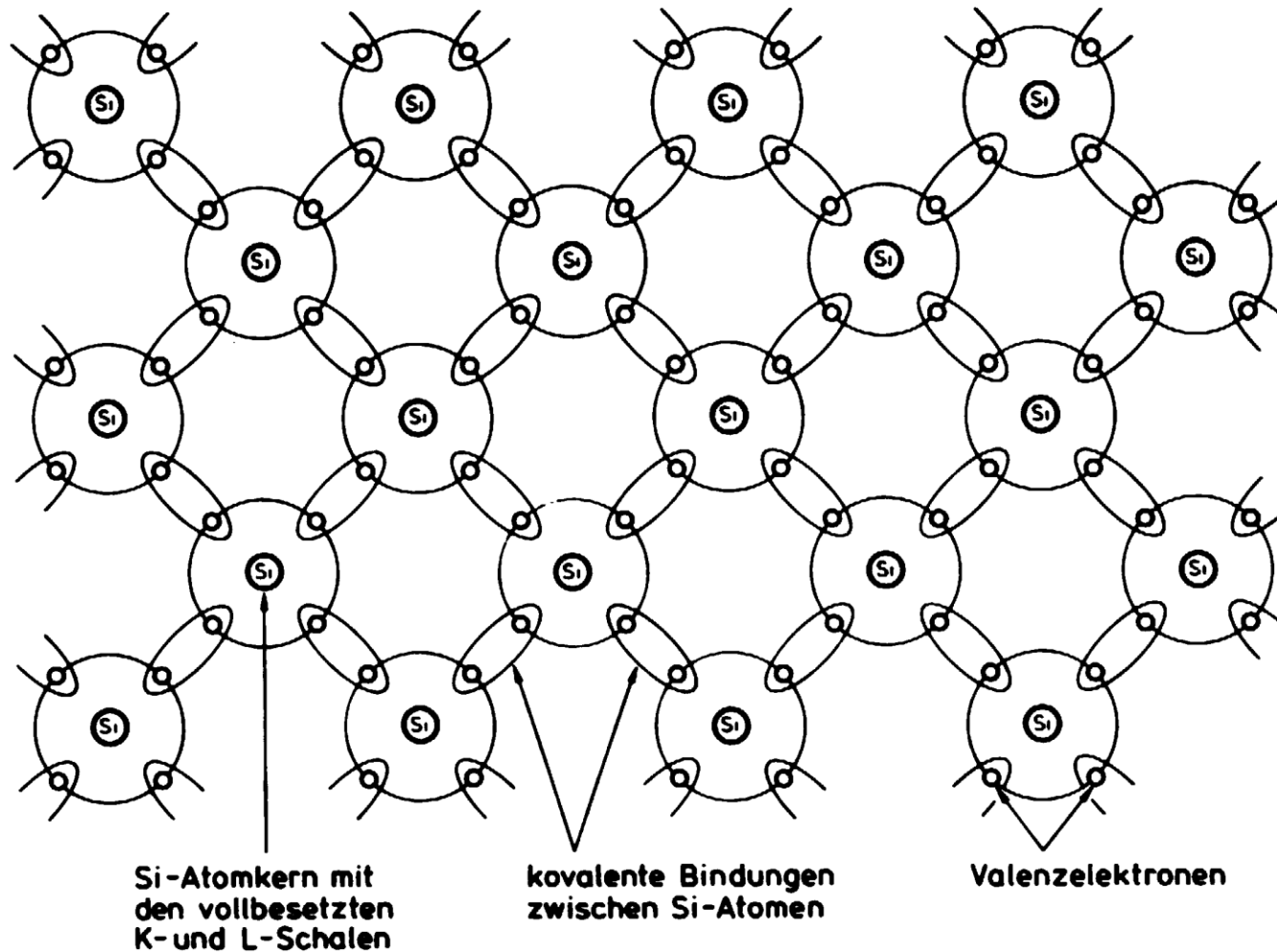
Aufbau von Halbleitern

Halbleiter wie z. B. Silizium (Si) oder Germanium (Ge) haben gegenüber Metallen einen deutlich höheren spezifischen Widerstand. Reines Silizium kristallisiert im Diamantgitter und bei tiefen Temperaturen sind alle 4 Valenzelektronen in kovalenten Bindungen lokalisiert.



Si-Atom mit 4 Valenzelektronen, kovalente Bindungen zu den nächsten Nachbarn, 3-dimensionaler Aufbau des Kristallgitters

2-dimensionale Projektion des Kristallgitters



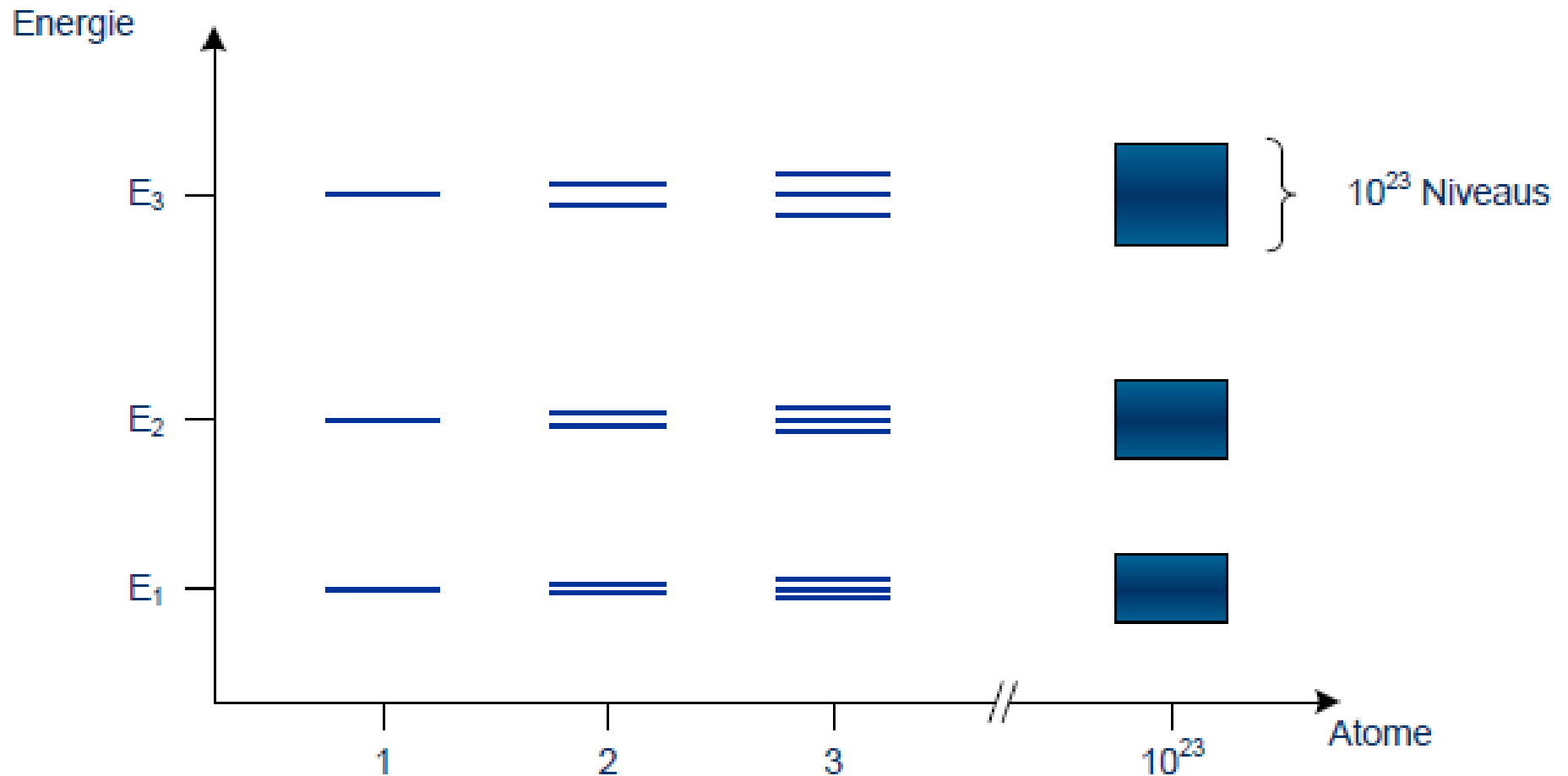
Das Bändermodell

Das Bändermodell ist ein Energieschema, mit Hilfe dessen man die Leitfähigkeit von Leitern, Isolatoren und Halbleitern beschreiben kann. Das Modell besteht aus zwei Energiebändern (Valenz- und Leitungsband) und der Bandlücke. Die Valenzelektronen - die als Ladungsträger dienen - befinden sich im Valenzband; das Leitungsband ist im Grundzustand nicht mit Elektronen besetzt. Zwischen den beiden Energiebändern befindet sich die Bandlücke, ihre Breite beeinflusst u.a. die Leitfähigkeit von Stoffen.

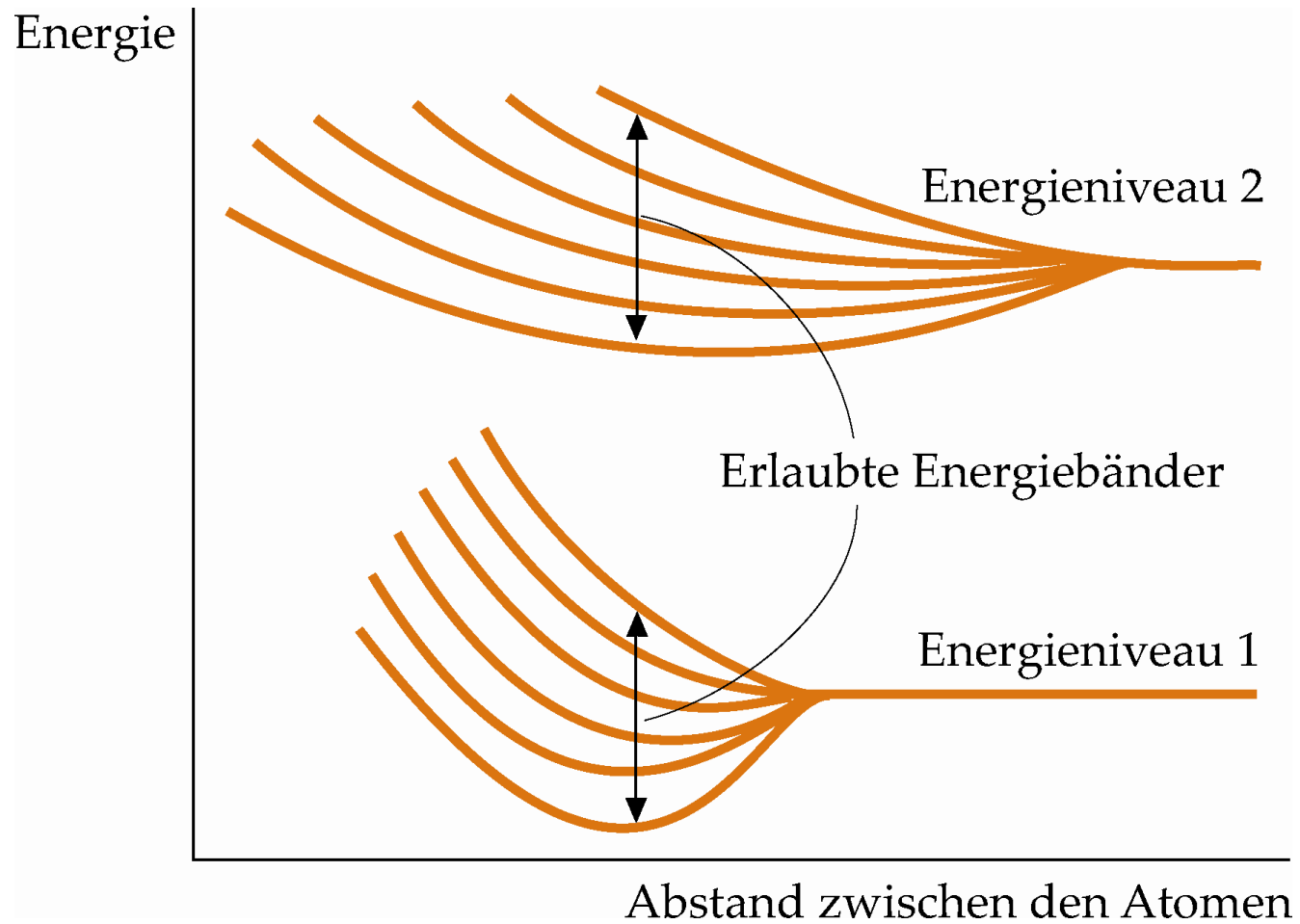
Die entscheidende Größe für die Leitfähigkeit ist die Dichte an beweglichen Ladungsträgern im Valenz- und Leitungsband.

Betrachtet man ein einzelnes Atom, so gibt es nach dem Bohrschen Atommodell scharf voneinander getrennte Energieniveaus, die von Elektronen besetzt werden können. Befinden sich mehrere Atome nebeneinander, so stehen diese miteinander in Wechselwirkung und die diskreten Energieniveaus werden aufgefächert, sie verschieben sich nach oben und unten. In einem Siliziumkristall gibt es ca. 10^{23} Atome pro Kubikzentimeter, so dass die einzelnen Energieniveaus nicht mehr voneinander unterscheidbar sind und breite Energiebereiche bilden.

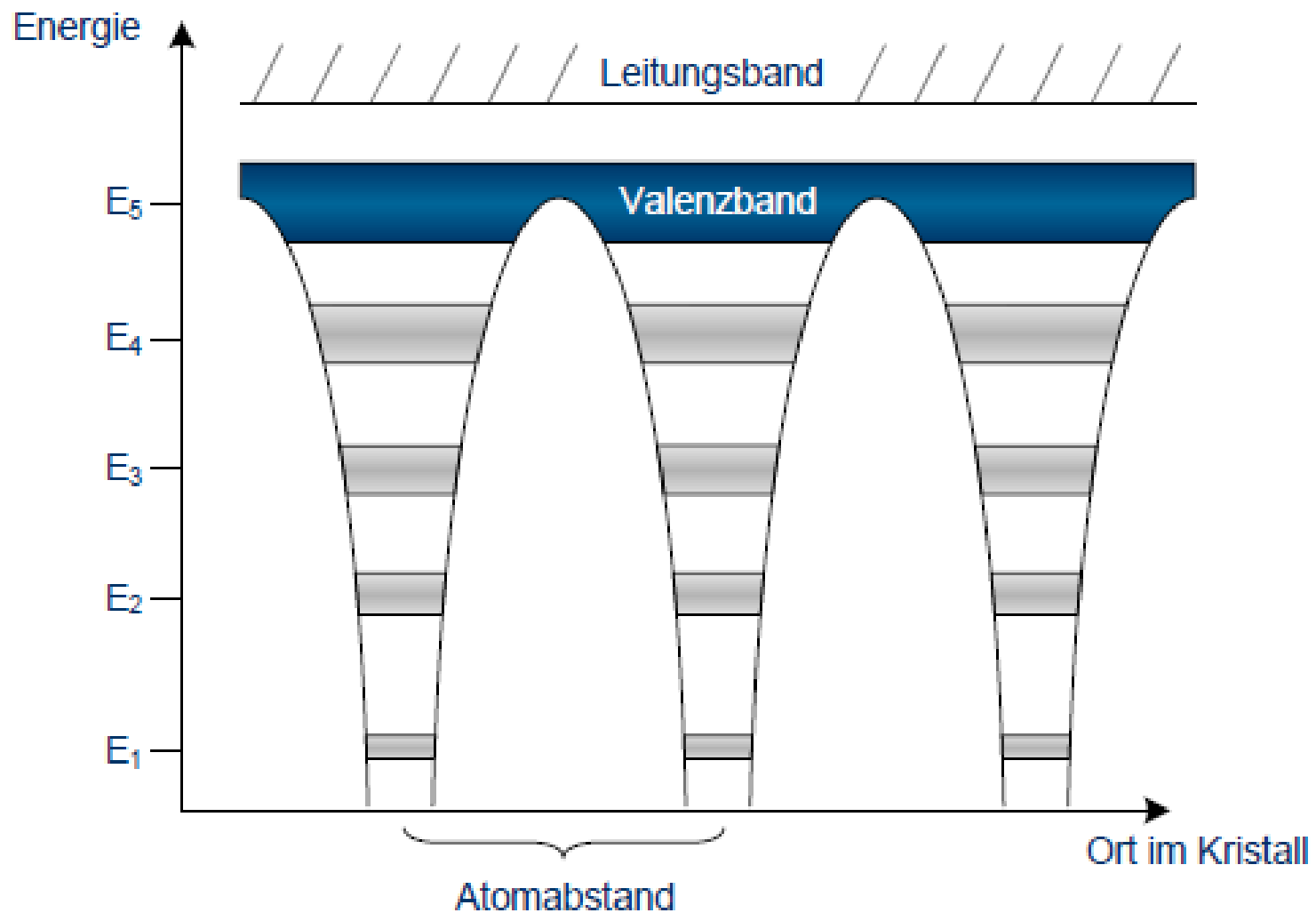
Aufspaltung der Energieniveaus durch Wechselwirkung von Atomen



Aufspaltung der Energieniveaus



Energiebänder durch in Wechselwirkung stehende Atome



Die Bandlücke

Als Bandlücke (engl.: band gap), auch Bandabstand bzw. verbotene Zone genannt, wird der energetische Abstand zwischen Valenzband (dem höchsten noch vollständig mit Elektronen besetzten Band) und Leitungsband (dem nächsthöheren Band) eines Festkörpers bezeichnet. Dessen elektrische und optische Eigenschaften werden wesentlich durch die Größe der Bandlücke bestimmt.

Die Größe der Bandlücke wird üblicherweise in Elektronenvolt (eV) angegeben. Falls das Valenzband mit dem Leitungsband überlappt, tritt keine Bandlücke auf. Ist das Valenzband nicht vollständig mit Elektronen besetzt, so übernimmt der obere nicht gefüllte Bereich die Funktion des Leitungsbandes, folglich hat man auch hier keine Bandlücke. In diesen Fällen reichen kleinste Energiebeträge zur Anregung eines Elektrons aus.

- Leiter haben keine Bandlücke.
- Halbleiter haben eine Bandlücke im Bereich von 0 bis ≈ 3 eV.
- Nichtleiter haben eine Bandlücke größer als 3 eV.

Bändermodell bei Leitern und bei Nichtleitern

Das Bändermodell bei Leitern:

Bei Leitern ist das Valenzband entweder nicht voll mit Elektronen besetzt, oder das gefüllte Valenzband überlappt sich mit dem leeren Leitungsband. In der Regel treffen beide Zustände gleichzeitig zu, die Elektronen können sich also im nur teilweise besetzten Valenzband oder in den zwei sich überlappenden Bändern bewegen. Die Bandlücke, die sich zwischen Valenz- und Leitungsband befindet, existiert dann nicht.

Das Bändermodell bei Nichtleitern:

Bei Isolatoren ist das Valenzband durch die Bindungen der Atome **voll** mit Elektronen besetzt. Sie können sich darin nicht bewegen, da sie zwischen den Atomen „eingesperrt“ sind. Um leiten zu können müssten sich die Elektronen aus dem voll besetzten Valenzband in das Leitungsband bewegen. Das verhindert die Bandlücke, die zwischen Valenz- und Leitungsband liegt.

Nur mit sehr großem Energieaufwand (falls überhaupt möglich) kann diese Lücke überwunden werden. In der Bandlücke darf sich nach den Gesetzen der Quantenphysik kein Elektron aufhalten.

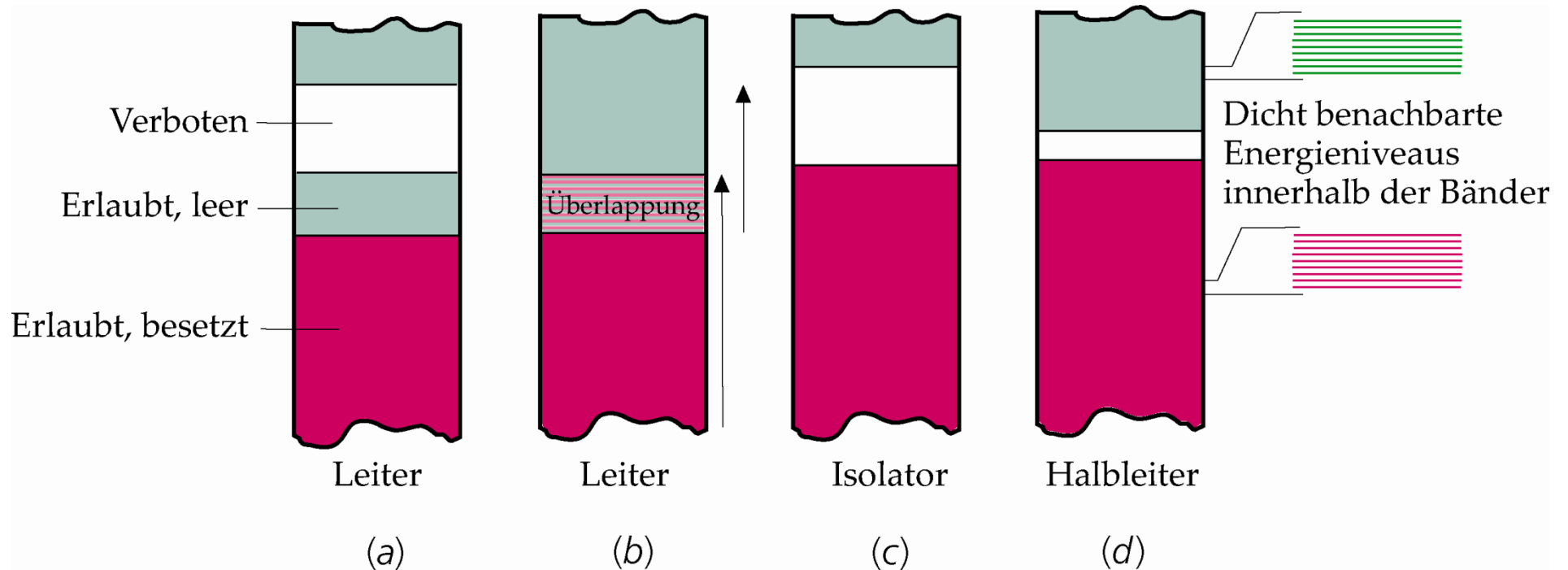
Bändermodell bei Halbleitern

Auch bei Halbleitern gibt es die Bandlücke, diese ist im Vergleich zu Isolatoren aber so klein, dass bereits bei Raumtemperatur Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen. Die Elektronen können sich hier nun frei bewegen und stehen als Ladungsträger zur Verfügung. Jedes Elektron hinterlässt außerdem ein Loch im Valenzband, welches von anderen Elektronen im Valenzband besetzt werden kann. Somit erhält man wandernde Löcher im Valenzband, die als positive Ladungsträger angesehen werden können.

Es treten immer Elektronen-Loch-Paare auf, es gibt also ebenso viele negative wie positive Ladungen, der Halbleiterkristall ist insgesamt neutral. Ein reiner, undotierter Halbleiter wird als intrinsischer Halbleiter bezeichnet, pro Kubikzentimeter gibt es in etwa 10^{10} freie Elektronen und Löcher (bei Raumtemperatur).

Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Anzahl der Elektronen, die die Bandlücke überspringen können. Mit steigender Temperatur nimmt also die Leitfähigkeit von Halbleitern zu.

Bändermodell bei Leitern, Nichtleitern und Halbleitern



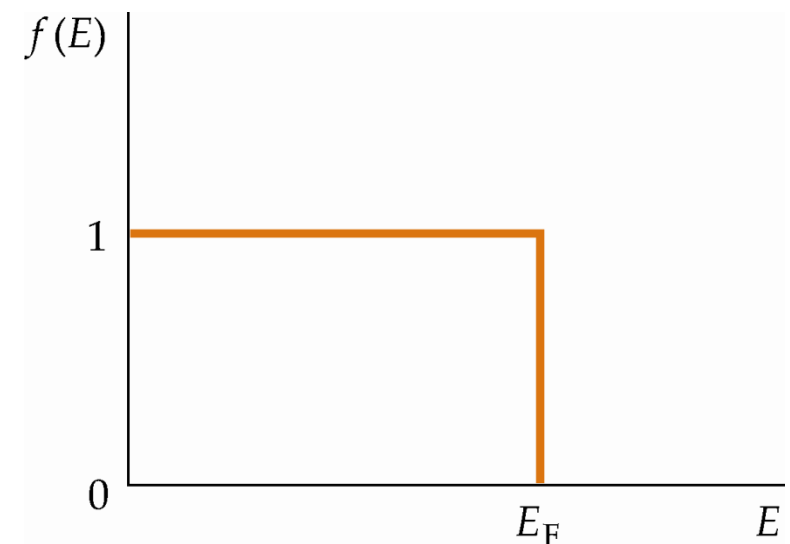
Die Fermi-Verteilung bei $T = 0 \text{ K}$

Die Fermi-Verteilung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Fermion eine Energie E zu gegebener Temperatur T hat.

Für die Temperatur Null Kelvin ($T = 0 \text{ K}$) gilt eine scharfe Grenze:

Alle Zustände unter der Fermi-Energie E_f sind mit Fermionen besetzt, da für $E < E_f$ gilt: $W(E) = 1$, d. h. Wahrscheinlichkeit, ein Fermion anzutreffen ist Eins.

Zustände oberhalb der Fermi-Energie sind nicht von Fermionen besetzt, da für $E > E_f$ gilt: $W(E) = 0$, die Wahrscheinlichkeit ein Fermion anzutreffen also Null ist.



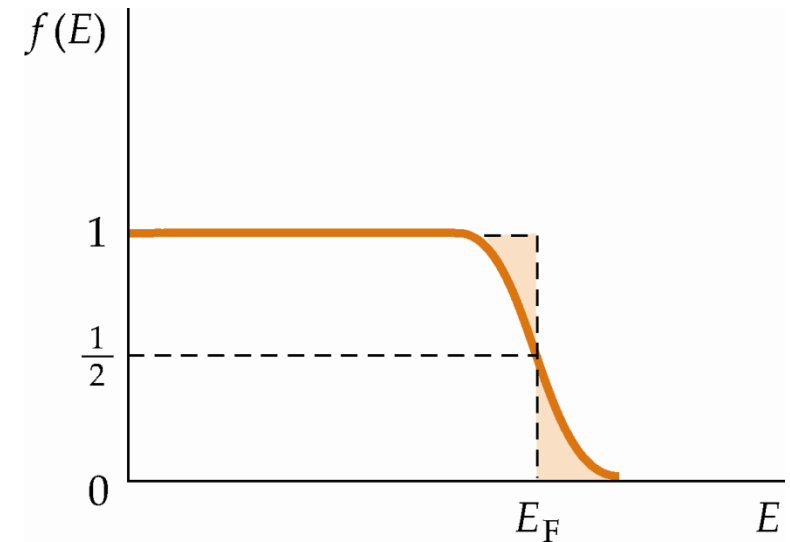
Die Fermi-Verteilung bei $T > 0$ K

Bei endlichen Temperaturen ($T > 0$ K), die klein gegenüber der sogenannten Fermi-Temperatur T_f sind werden auch Zustände oberhalb der Fermi-Energie E_f mit Fermionen besetzt, dafür bleiben gleich viele Zustände unterhalb der Fermi-Energie leer.

Das intrinsische Fermi-niveau ist das Fermi-niveau eines intrinsischen (keine Störstellen enthaltenden) Halbleiters.

Es liegt ungefähr in der Mitte der Bandlücke.

Daraus ergibt sich die Definition der Fermi-Energie: es ist die Energie, bei der die Besetzungswahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ beträgt.



Eigenhalbleiter und Störstellenhalbleiter

Die Dichte freier Elektronen und Löcher in reinen, das heißt undotierten, Halbleitern nennt man intrinsische Ladungsträgerdichte oder Eigenleitungsdichte – ein Eigenhalbleiter wird deshalb auch intrinsischer Halbleiter genannt, der dominierende Leitungsmechanismus ist die Eigenleitung.

Bei endlichen Temperaturen wird die thermische Energie ausreichen, um einige Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband zu befördern. Diese werden zwar nach Ablauf der Lebensdauer wieder rekombinieren, aber die thermische Generation erzeugt ja auch ständig wieder neue Elektron-Loch Paare. Zwischen Generation und Rekombination wird sich ein thermisches Gleichgewicht einstellen, mit (im Mittel) konstanter Konzentration an Elektron-Loch Paaren.

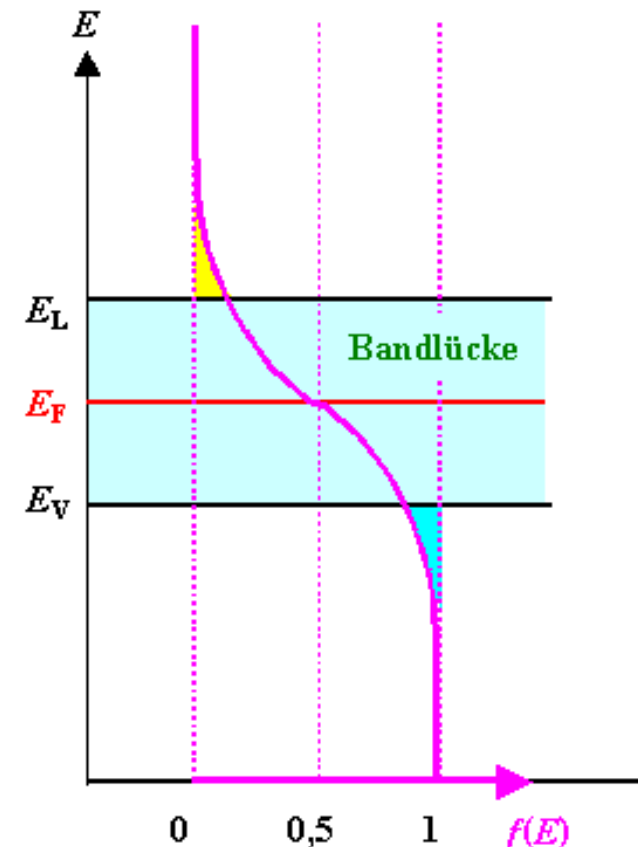
Wird dagegen die Konzentration der Ladungsträger im Leitungsband (Elektronen) bzw. im Valenzband (Löcher) durch den Dotierstoff bestimmt, spricht man von einem Störstellenhalbleiter oder extrinsischen Halbleiter – hier ist der dominierende Leitungsmechanismus die Störstellenleitung.

Fermi-Energie beim intrinsischen Halbleiter

Falls wir n_L Elektronen ins Leitungsband befördern, haben wir jetzt eine Ladungsdichte $e \cdot n_L$ an negativen Ladungen im Leitungsband. Die Neutralitätsbedingung fordert dann, dass wir genauso viele positive Ladungen im Valenzband haben müssen.

Da das vollbesetzte Valenzband elektrisch neutral ist, wird jedes Elektron, das das Valenzband verlässt, dort eine unkompensierte positive Ladung zurücklassen. Die Forderung nach Ladungsneutralität in intrinsischen Halbleitern bedeutet deshalb nicht mehr oder weniger, als dass die Dichte der Elektronen im Leitungsband identisch ist zur Dichte der Löcher im Valenzband.

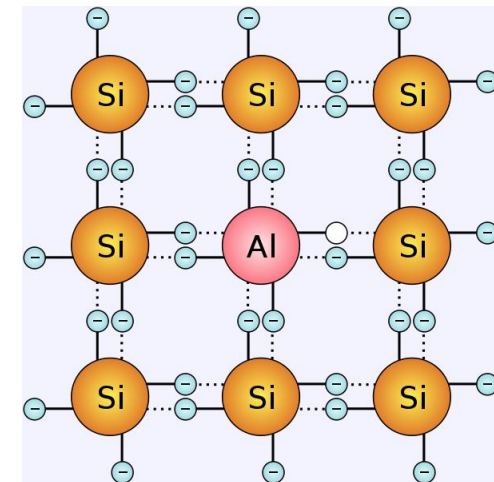
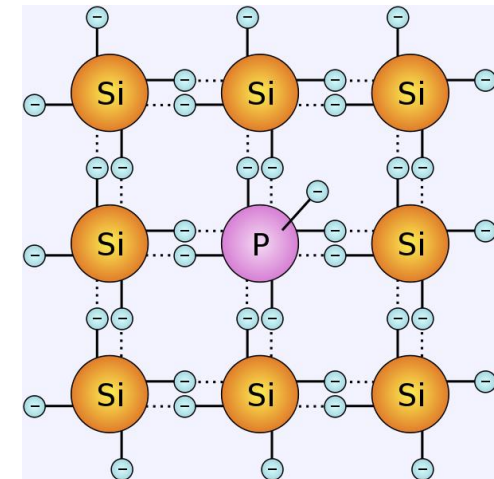
Damit liegt wegen der Symmetrie der Fermi-Verteilung die Fermi-Energie fest: Sie muss in der Mitte des verbotenen Bandes liegen



Dotierung

Eine Dotierung oder das Dotieren (v. lat. dotare „ausstatten“) bezeichnet in der Halbleitertechnik das Einbringen von Fremdatomen in eine Schicht oder ins Grundmaterial eines integrierten Schaltkreises. Die dabei eingebrachten Mengen sind in der Regel sehr gering (zwischen 0,1 ppb und 100 ppm).

Die Fremdatome sind Störstellen im Halbleitermaterial und verändern gezielt die Eigenschaften des Ausgangsmaterials, meistens die Leitfähigkeit oder die Kristallstruktur. Es gibt verschiedene Dotierungsverfahren, z. B. Diffusion, Elektrophorese, Sublimation aus der Gasphase oder Beschuss mittels hochenergetischen Teilchenkanonen unter Vakuum (Ionenimplantation).



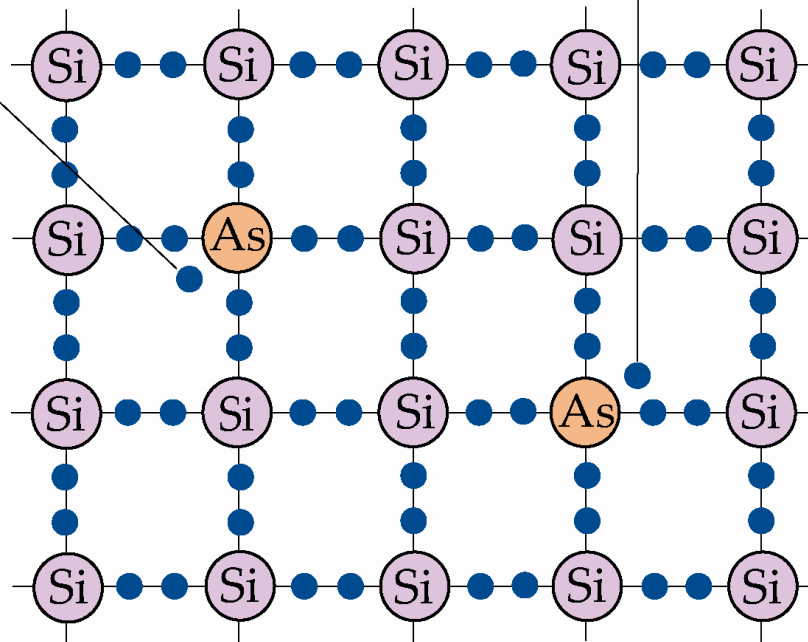
n-Dotierung von Störstellenhalbleitern

Das 5-wertige Dotierelement besitzt ein Außenelektron mehr als die Siliziumatome. Vier Außenelektronen verbinden sich mit je einem Siliziumatom, das fünfte ist frei beweglich und dient als Ladungsträger. Dieses freie Elektron benötigt sehr viel weniger Energie um vom Valenzband in das Leitungsband gehoben zu werden, als die Elektronen, die die Eigenleitfähigkeit des Siliziums verursachen. Das Dotierelement, welches ein Elektron abgibt, wird als Elektronendonator (donare, lat. = geben) bezeichnet.

Die Dotierelemente werden durch die Abgabe negativer Ladungsträger positiv geladen und sind fest im Gitter eingebaut, es bewegen sich nur die Elektronen. Dotierte Halbmatalle, deren Leitfähigkeit auf freien (negativen) Elektronen beruht sind n-leitend bzw. n-dotiert. Auf Grund der höheren Anzahl der freien Elektronen werden diese auch als Majoritätsladungsträger bezeichnet, freie bewegliche Löcher dagegen als Minoritätsladungsträger.

n-Dotierung von Störstellenhalbleitern

(a) Überzähliges Elektron



(b) Leeres Leitungsband



Donator-niveaus

Gefülltes Valenzband

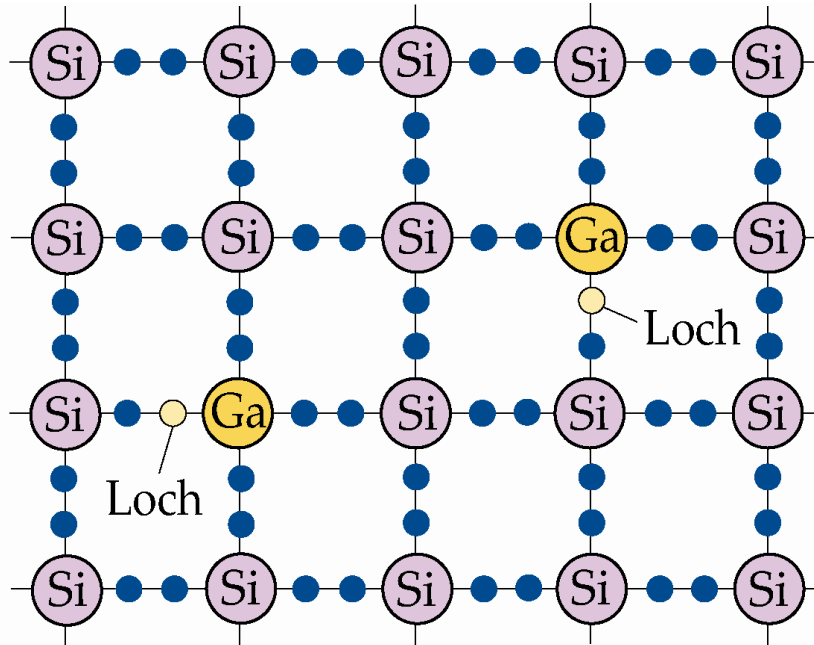
p-Dotierung von Störstellenhalbleitern

Im Gegensatz zum freien Elektron bei der Dotierung mit Phosphor bewirken 3-wertige Dotierelemente genau das Gegenteil. Sie können ein zusätzliches Außenelektron aufnehmen und hinterlassen so ein Loch im Valenzband der Siliziumatome. Dadurch werden die Elektronen im Valenzband beweglich. Die Löcher bewegen sich in entgegengesetzter Richtung zur Elektronenbewegung. Die dazu nötige Energie beträgt bei Indium als Dotierelement nur 1 % der Energie die nötig ist, um die Valenzelektronen der Siliziumatome in das Leitungsband zu heben.

Durch die Aufnahme eines Elektrons wird das Dotierelement einfach negativ geladen; solche Dotieratome nennt man Elektronenakzeptor (acceptare, lat. = aufnehmen). Auch hier ist das Dotierelement fest im Kristallgitter eingebaut, es bewegt sich nur die positive Ladung. P-leitend oder p-dotiert nennt man diese Halbleiter weil die Leitfähigkeit auf positiven Löchern beruht. Analog zu n-dotierten Halbleitern, sind hier die Löcher die Majoritätsladungsträger, freie Elektronen die Minoritätsladungsträger.

p-Dotierung von Störstellenhalbleitern

(a)

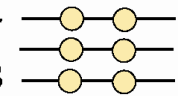


(b)

Leeres Leitungsband



Akzeptor-niveaus



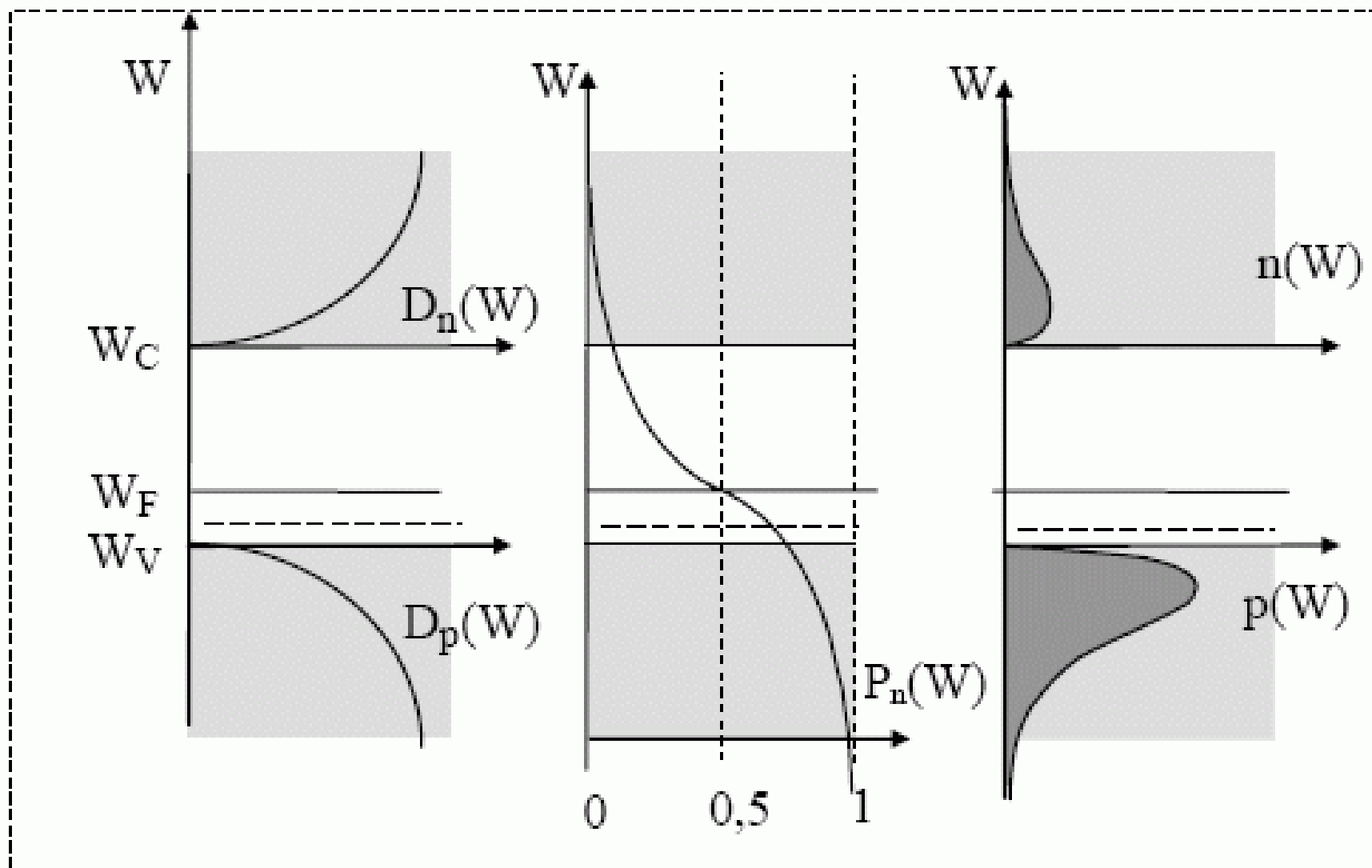
Gefülltes Valenzband

Bänderschema bei dotierten Halbleitern

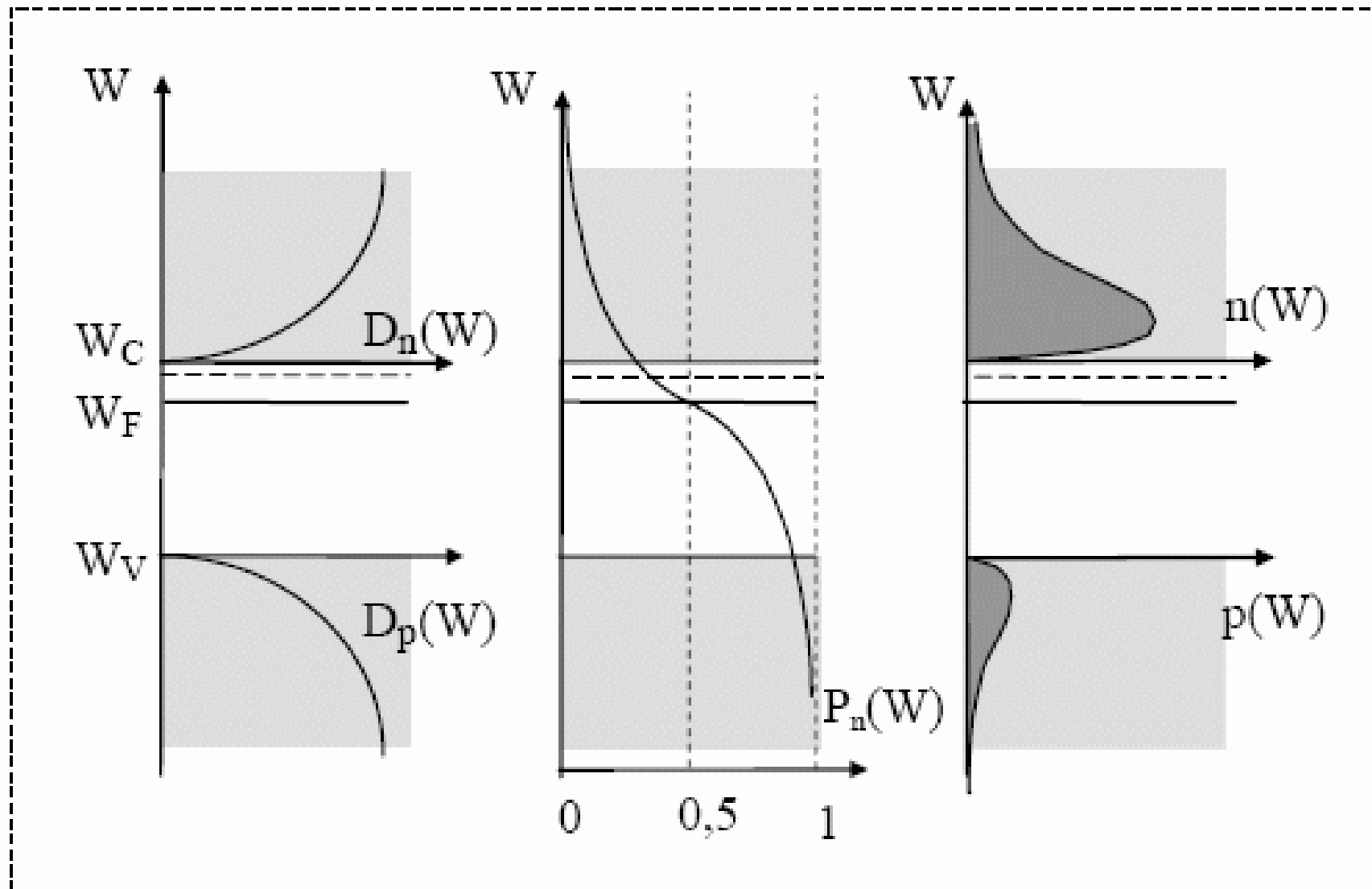
Bei n-dotierten Halbleitern steht durch das Einbringen eines Dotierelements mit fünf Außenelektronen ein Elektron im Kristall zur Verfügung das nicht gebunden ist, und so mit vergleichsweise geringer Energie in das Leitungsband gehoben werden kann. Somit findet man in n-dotierten Halbleitern ein Donatorniveau nahe der Leitungsbandkante, die zu überwindende Bandlücke ist sehr klein.

Durch das Einbringen eines 3-wertigen Dotierelements steht bei p-dotierten Halbleitern eine Leerstelle zur Verfügung, die schon mit geringer Energie von einem Elektron aus dem Valenzband besetzt werden kann. Bei p-dotierten Halbleitern befindet sich somit ein Akzeptorniveau nahe der Valenzbandkante.

Energie-Verteilung der Ladungsträger im p-Halbleiter



Energieverteilung der Ladungsträger im n-Halbleiter

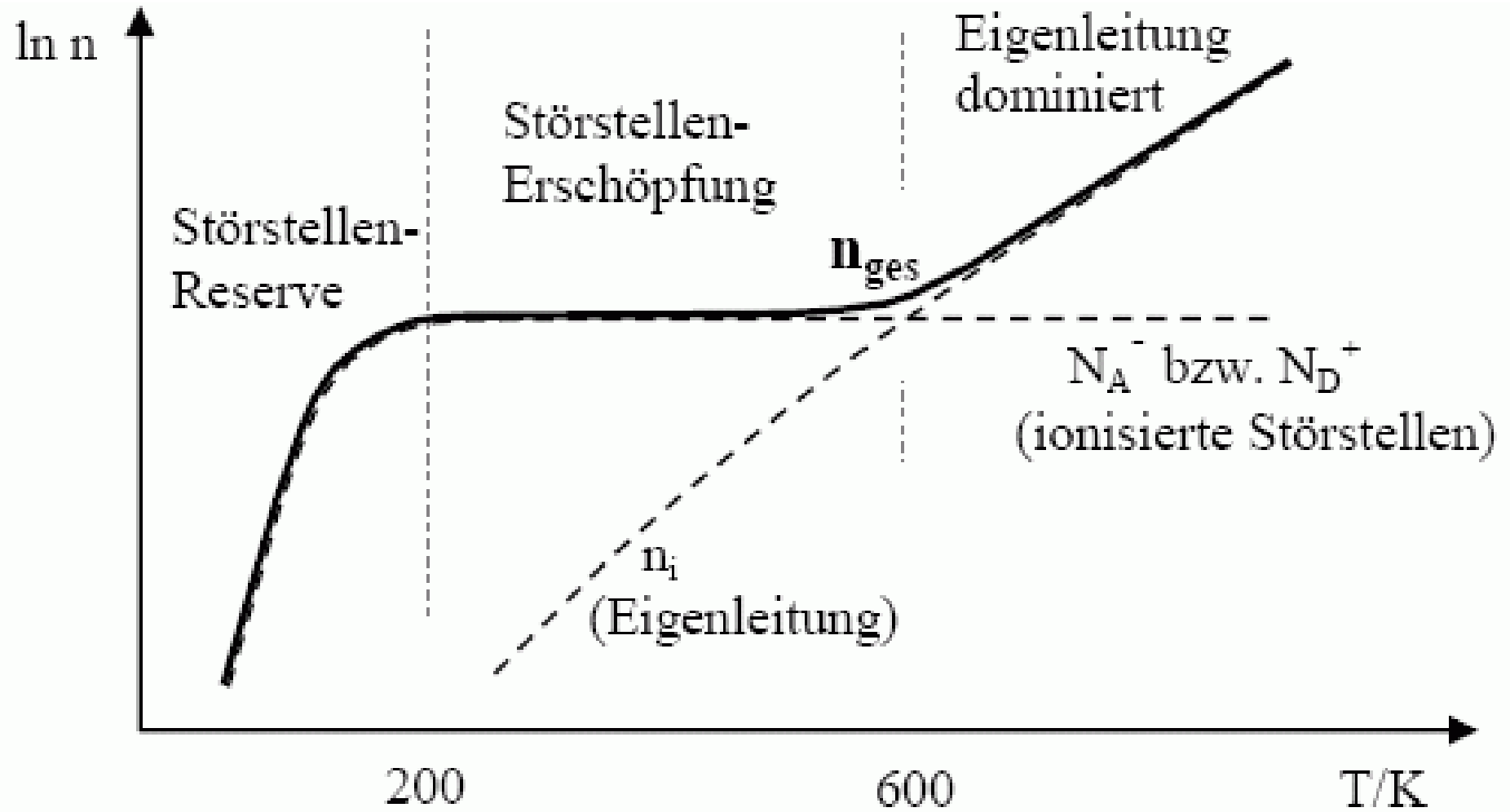


Störstellenleitung und Eigenleitung

Die elektrische Leitfähigkeit von Materialien ist hauptsächlich durch die Verfügbarkeit von Ladungsträgern und freien Energieniveaus in den Energiebändern bestimmt, das heißt leere sowie volle Energiebänder ermöglichen keinen Ladungstransport. Am absoluten Nullpunkt ($T = 0 \text{ K}$) steht nicht ausreichend Energie zur Verfügung um Elektronen in das Leitungsband oder auf Störstellenniveaus anzuregen, daher unterscheiden sich dotierte und undotierte Halbleiter hinsichtlich der Ladungsträgerdichte nicht.

Mit zunehmender Temperatur steigt die zur Verfügung stehende Energie (z. B. der Phononen), so dass sich auch die Wahrscheinlichkeit der thermische Anregung eines Elektrons vom Valenzband in das Leitungsband erhöht. Die Bandabstandenergie liegt bei typischen Halbleitern, wie Germanium oder Silizium, im Bereich von 0,5 bis 3,5 eV und somit meist deutlich niedriger als der Abstand von Valenz- oder Leitungsband zu den Störstellenniveaus (10 bis 500 meV) in dotierten Halbleitern. Somit steigt die elektrische Leitfähigkeit durch Eigenleitung erst bei deutlich höheren Temperaturen als bei Störstellenleitung.

Störstellenleitung und Eigenleitung



Eigenleitungsdichte

Die Eigenleitungsdichte (auch intrinsische Ladungsträgerdichte) ist die charakteristische Ladungsträgerdichte eines Stoffes in Abhängigkeit der Temperatur.

Bei Halbleitern sind im absoluten Nullpunkt sämtliche Elektronen an ein Atom gebunden. Erst ab einer bestimmten Temperatur steht eine ausreichende thermische Energie zur Verfügung, um Elektronen in das Leitungsband anzuheben. Die so frei gewordenen Elektronen und zurückbleibenden Defektelektronen (Löcher) stehen dadurch zum Ladungstransport zur Verfügung (Generation von Elektron-Loch-Paaren); diesem Effekt entgegengerichtet ist die Rekombination von Elektron-Loch-Paaren unter Freiwerdung von Energie.

Eigenleitungsdichte für einige wichtige Halbleiter bei $T = 300 \text{ K}$

Halbleiter	$n_i \text{ in cm}^{-3}$
Ge	$2,4 \cdot 10^{13}$
Si	$1,5 \cdot 10^{10}$
GaAs	$1,79 \cdot 10^6$

Halbleitermaterialien

Elementehalbleiter:

Si - Elektronenkonfiguration: $3s^2 3p^2$, Bandlücke bei 300 Kelvin: 1,107 eV

Ge - Elektronenkonfiguration $3d^{10} 4s^2 4p^2$, Bandlücke bei 300 Kelvin: 0,67 eV

Verbindungshalbleiter:

GaAs - Bandlücke bei 300 Kelvin: 1,424 eV

InP - Bandlücke bei 300 Kelvin: 1,34 eV

GaN - Bandlücke bei 300 Kelvin: 3,39 eV

ZnSe - CO₂-Laser

CdS - photoleitend, Belichtungsmesser

CuInSe₂ -

CuInGaSe₂ -

SiC - Varistoren, blaue Leuchtdioden, ultraschnelle Schottky-Dioden

SiGe - Hochfrequenz-Elektronik und schnelle Logikschaltungen

Silizium - Silicium

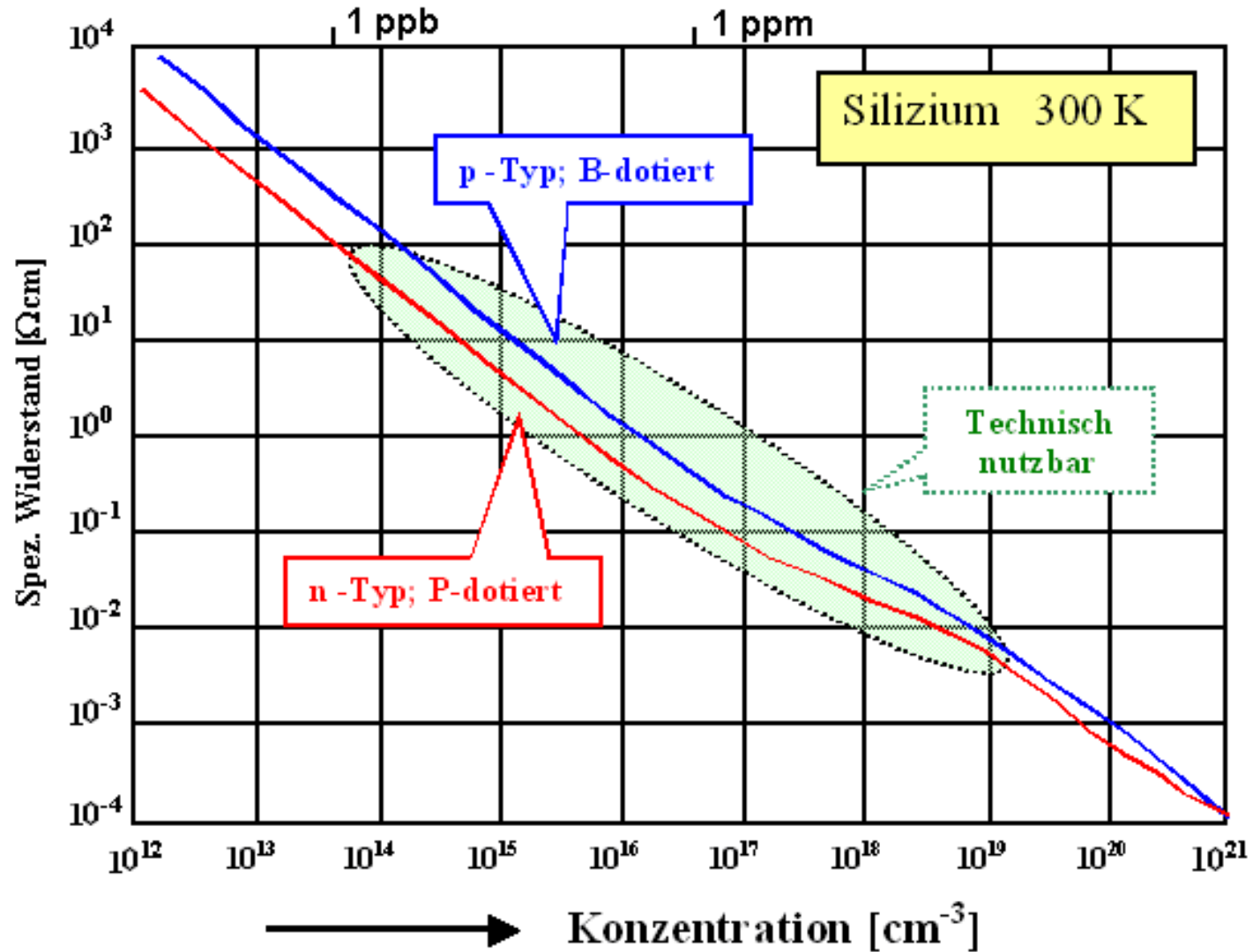
Massenanteil an der Erdhülle: 25,8 %

Silizium ist wie die im Periodensystem benachbarten Germanium, Gallium, Phosphor und Antimon ein **Elementhalbleiter**.

Der gemäß dem Bändermodell geltende energetische Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband beträgt 1,107 eV (bei Raumtemperatur). Durch Dotierung mit geeigneten Dotierelementen wie beispielsweise Bor oder Arsen kann die Leitfähigkeit um einen Faktor 10^6 gesteigert werden.

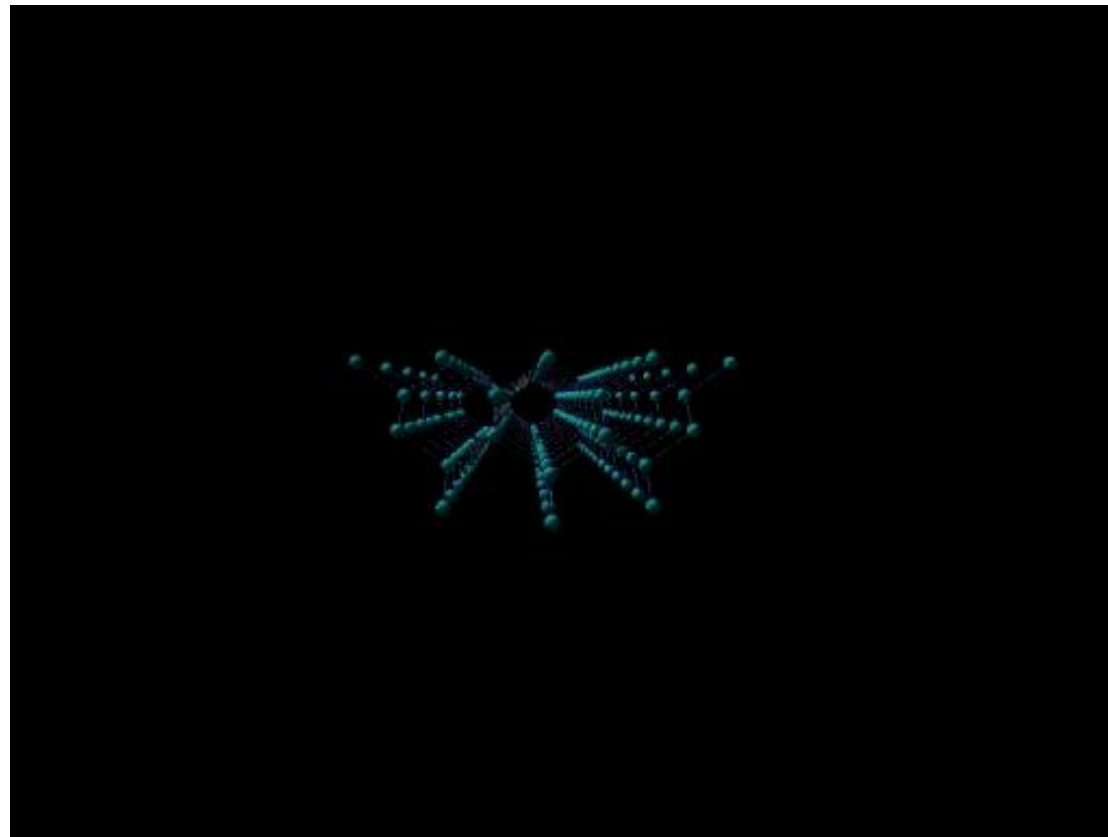
In solchermaßen dotiertem Silizium ist die durch die von Fremdatomen und Gitterdefekten verursachte Störstellenleitung deutlich größer als die der Eigenleitung, weshalb derartige Materialien als **Störstellenhalbleiter** bezeichnet werden.

Leitfähigkeit von dotiertem Silizium



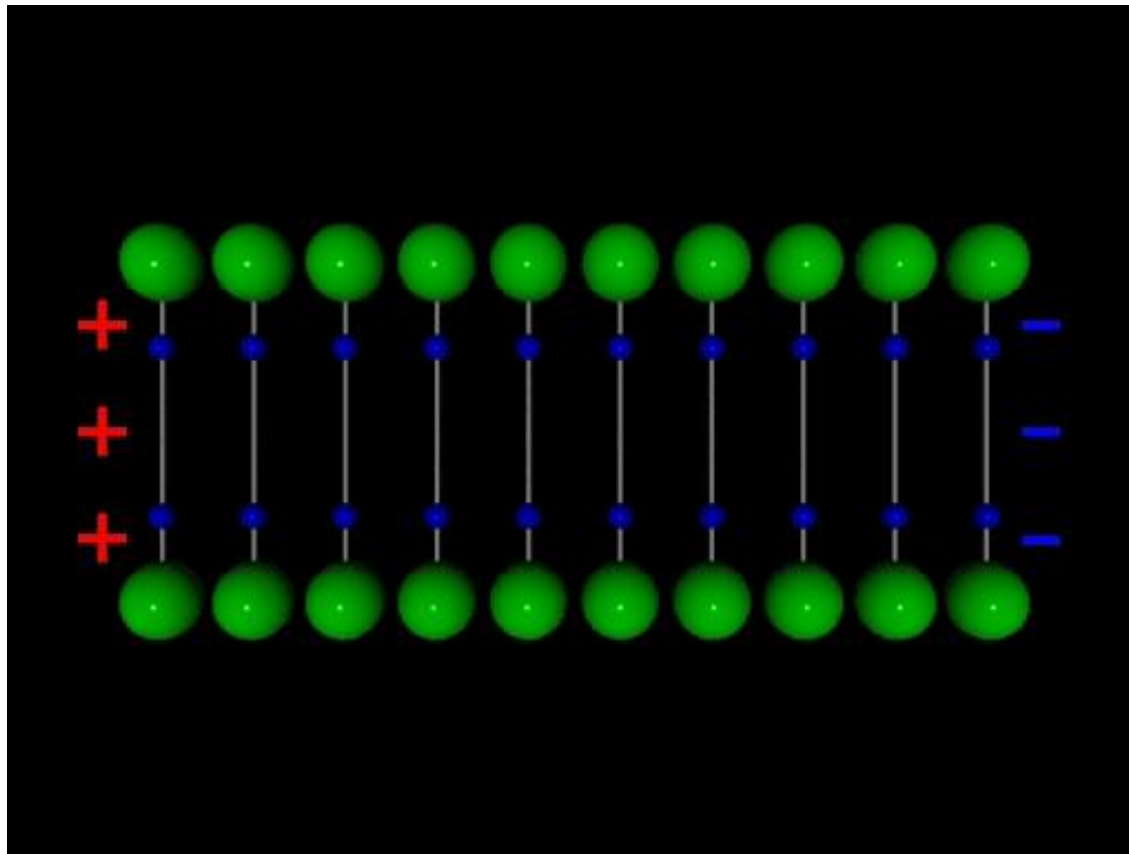
Aufbau eines Halbleiters

Übergang vom dreidimensionalen Gittermodell eines Siliziumkristalles zum zweidimensionalen Modell der Valenzbänder und des Leitungsbandes.



Leitungsvorgang in einem Halbleiter

Fehl- und Störstellenleitung bei der Aktivierung eines Elektrons im Halbleiter.



Aufgaben

1. Die Teilchenzahldichte freier Elektronen im reinen Silizium beträgt bei Raumtemperatur ungefähr 10^{10} Elektronen/cm³. Wie ändert sich die Teilchenzahldichte der freien Elektronen, wenn man jeweils eines von 10^6 Siliziumatomen durch ein Arsenatom ersetzt? (die Massedichte von Silizium beträgt 2,33 g/cm³, die molare Masse 28,1 g/mol).
2. Ein Photon der Wellenlänge 3,35 μm hat gerade genügend Energie, um ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband einer Probe aus Bleisulfid anzuregen. a) Berechnen Sie die Energielücke zwischen den beiden Bändern. b) Berechnen Sie die Temperatur T, für die der Wert von $k_B \cdot T$ gerade der Energielücke entspricht.
3. Im Leitungsband einer Probe aus dotiertem n-Silizium befinden sich 10^{16} Elektronen / cm³. Die Temperatur beträgt 300 K, der spezifische Widerstand beträgt $5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$. Berechnen Sie die mittlere freie Weglänge der Elektronen. Verwenden Sie als Masse des Elektrons die effektive Masse von $0,2 m_e$. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der mittleren freien Weglänge von Leitungsbandelektronen in Kupfer bei 300 K.

Fragen (1)

1. Was machen i.d.R. alle Kristallbaufehler (= Defekte) in einem Halbleiterkristall?
 - a) Ändern massiv die Zustandsdichten in den Bändern.
 - b) Schaffen zusätzliche Zustände in der Bandlücke.
 - c) Verändern die Lage der Fermi-Energie.

2. Mit welchem Elementen dotiert man Si?
 - a) Gruppe III.
 - b) Gruppe IV.
 - c) Gruppe V.
 - d) Na, K,..., Cl, F,....
 - e) As, B, P.
 - f) Mit allen, die flache Zustände in der Bandlücke haben.
 - g) Mit allen, die Zustände in der Bandlücke haben.
 - h) Mit allen, die tiefe Zustände in der Bandlücke haben.

Fragen (2)

3. Was ist ein Donator?

- a) Ein Defekt, der bei RT leicht Elektronen ans Leitungsband abgeben kann.
- b) Ein Defekt, der bei RT leicht Löcher ans Valenzband abgeben kann.
- c) Ein Zustand in der Bandlücke, der immer mit Elektronen besetzt ist.
- d) Gruppe III Elemente wie B.
- e) Gruppe V Elemente wie P.
- f) Ein Dotierstoff, der einen Halbleiter p-leitend macht.
- g) Ein Dotierstoff, der einen Halbleiter n-leitend macht.

4. Was ist ein Akzeptor?

- a) Ein Defekt, der bei RT leicht Elektronen ans Leitungsband abgeben kann.
- b) Ein Defekt, der bei RT leicht Löcher ans Valenzband abgeben kann.
- c) Ein Zustand in der Bandlücke, der immer mit Elektronen besetzt ist.
- d) Gruppe III Elemente wie B.
- e) Gruppe V Elemente wie P.
- f) Ein Dotierstoff, der einen Halbleiter p-leitend macht.
- g) Ein Dotierstoff, der einen Halbleiter n-leitend macht.

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