

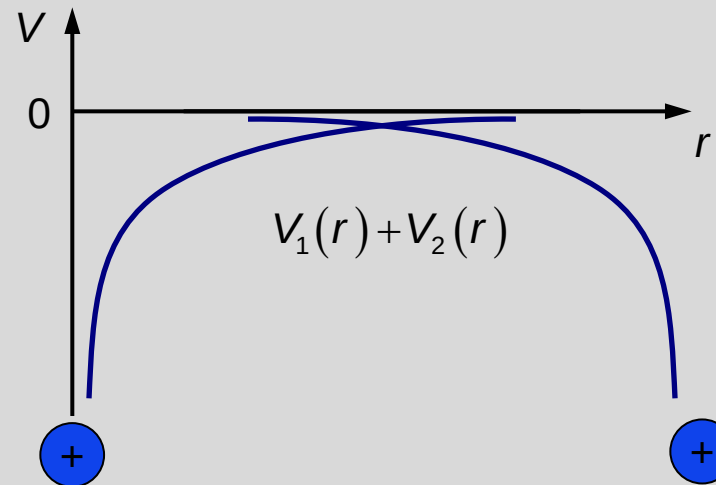
Übung 2

A1: Bändermodell

Das Bändermodell stellt eine Weiterentwicklung des Drude-Modells der Leitfähigkeit, basierend auf Effekten der Quantenmechanik dar. Während das Drude-Modell beispielsweise den Effekt von Dotierungen auf die Leitfähigkeit von Halbleitern nicht vorhersagen kann, wird dies vom Bändermodell geleistet.

a) Was ist ein Band? Geben Sie eine prägnante und zugleich anschauliche Definition in wenigen Worten.

Erinnerung: Kovalente Bindung zweier Atome

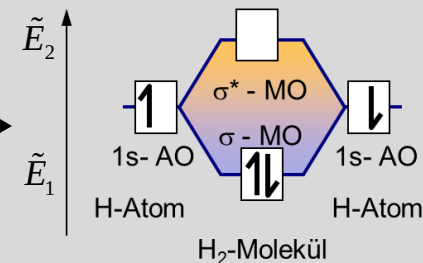


Überlagerung der
Potentialfelder von zwei
Atomen: 2 Lösungen mit
insgesamt 2 unterschiedlichen
Energieniveaus

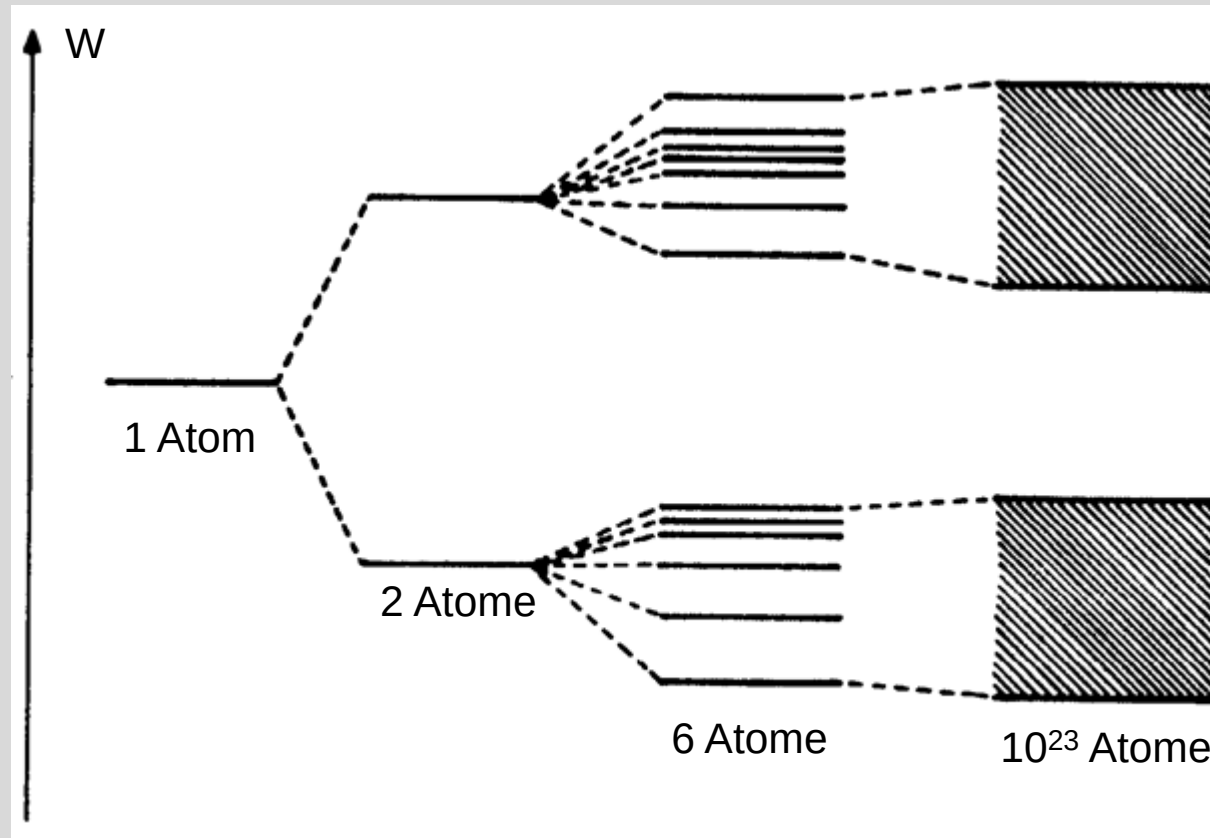
$$-\left(\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V_1(r) + V_2(r)\right)\psi(r, \Theta, \Phi) = E\psi(r, \Theta, \Phi)$$

Lösung: →

$$\{\tilde{\psi}_1, \tilde{E}_1\}, \{\tilde{\psi}_2, \tilde{E}_2\} \rightarrow$$



Jetzt: Festkörper (10^{23} Atome)



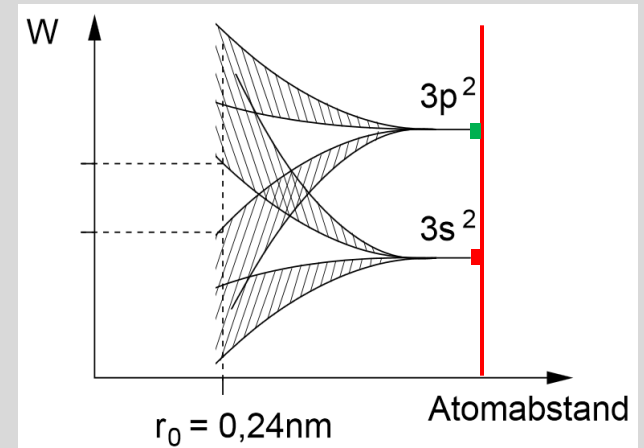
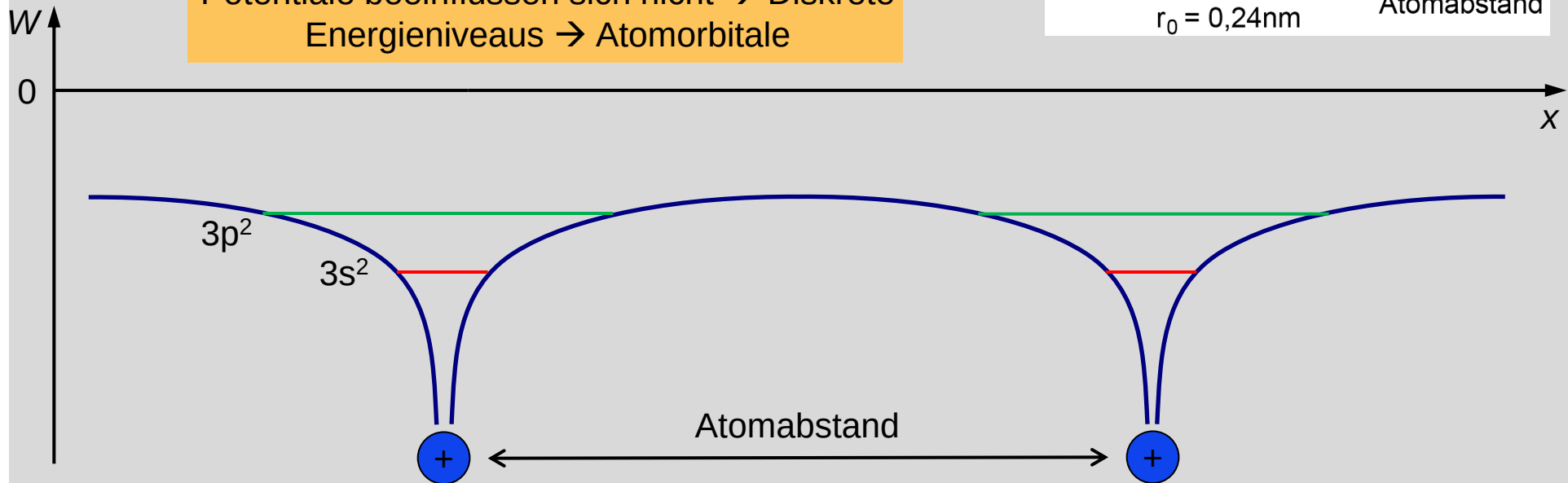
Überlagerung der
Potentialfelder von N Atomen:
 N Lösungen mit insgesamt N
unterschiedlichen
Energieniveaus
→ Für große N
quasikontinuierliche
Energiebereiche erlaubter
Energien

Jetzt: Festkörper (10^{23} Atome)

Bsp: Si $\rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 \underline{3s^2 3p^2}$

↑
Valenzelektronen

Potentiale beeinflussen sich nicht $\rightarrow$ Diskrete
Energieniveaus $\rightarrow$ Atomorbitale

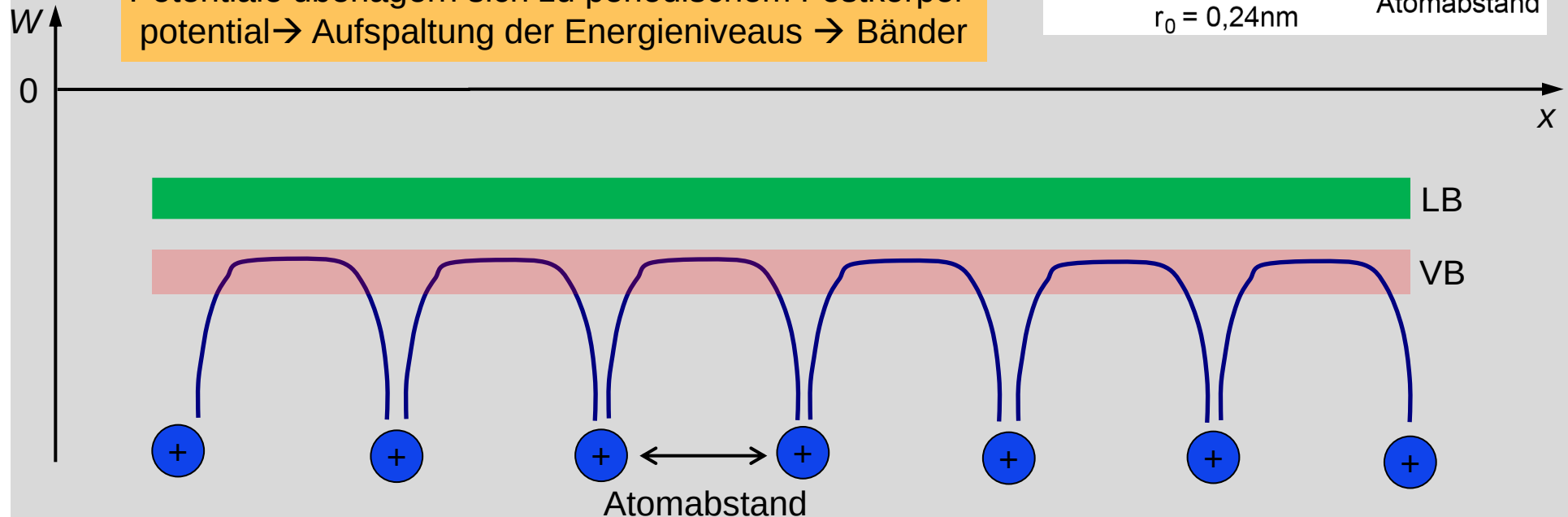
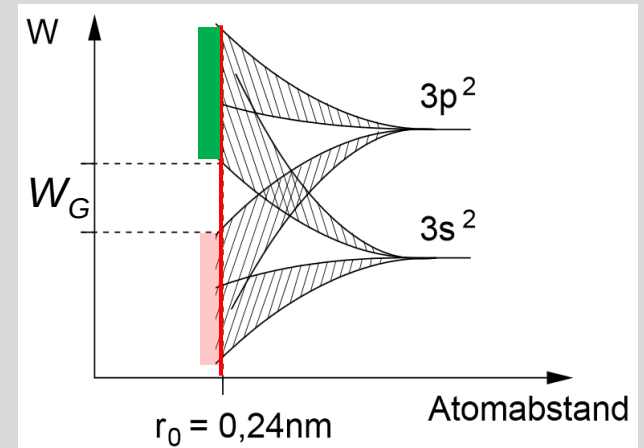


Jetzt: Festkörper (10^{23} Atome)

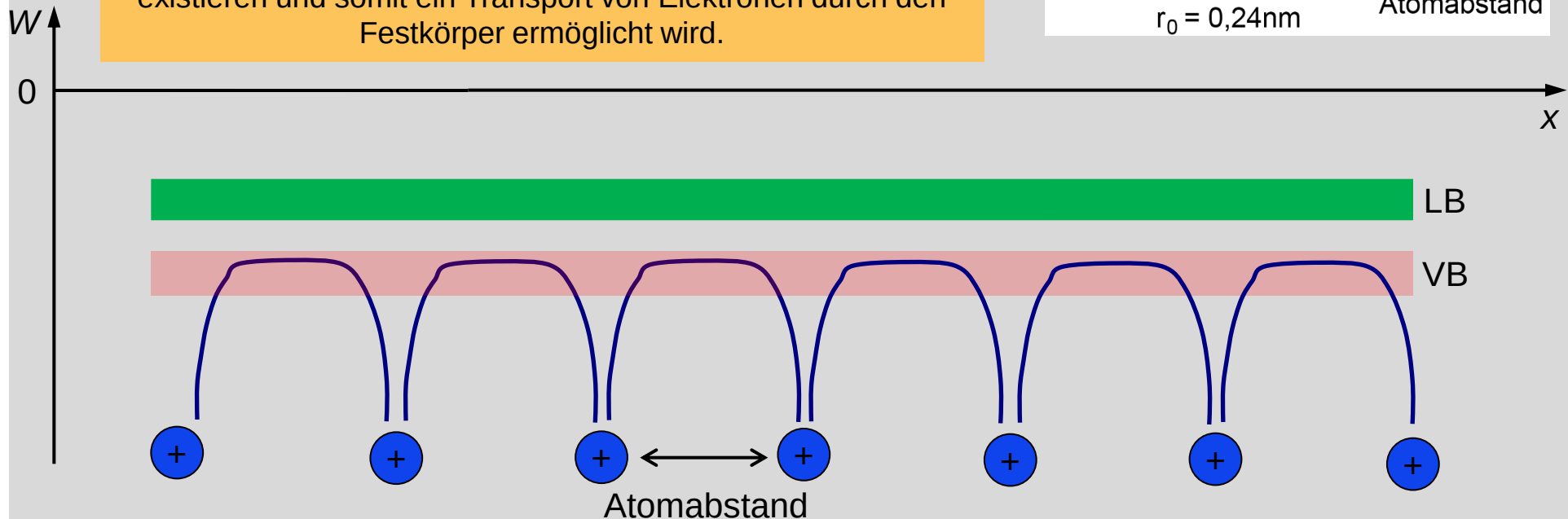
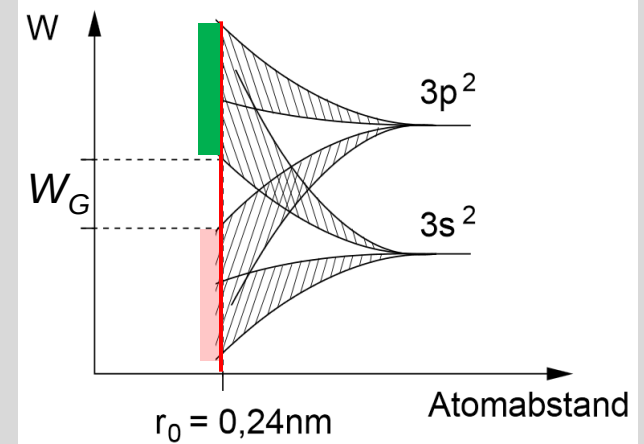
Bsp: Si $\rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 \underline{3s^2 3p^2}$

↑
Valenzelektronen

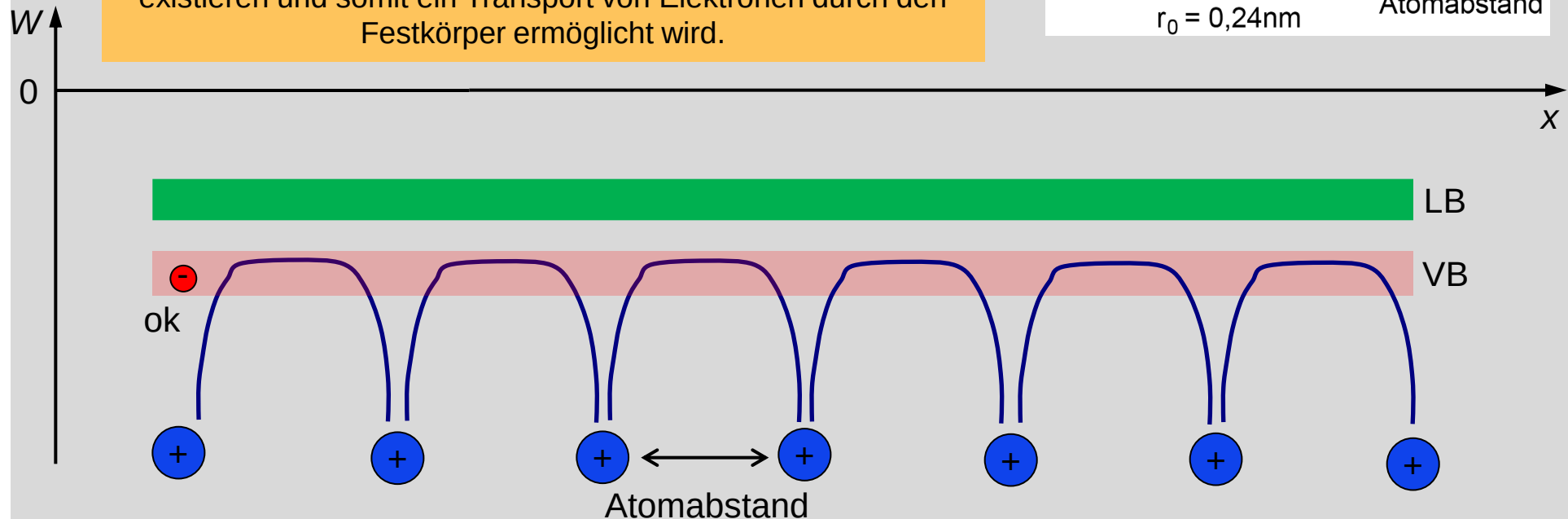
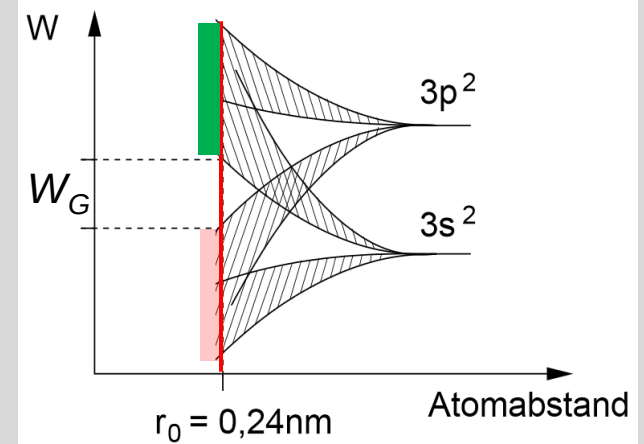
Potentiale überlagern sich zu periodischem Festkörperpotential $\rightarrow$ Aufspaltung der Energieniveaus $\rightarrow$ Bänder



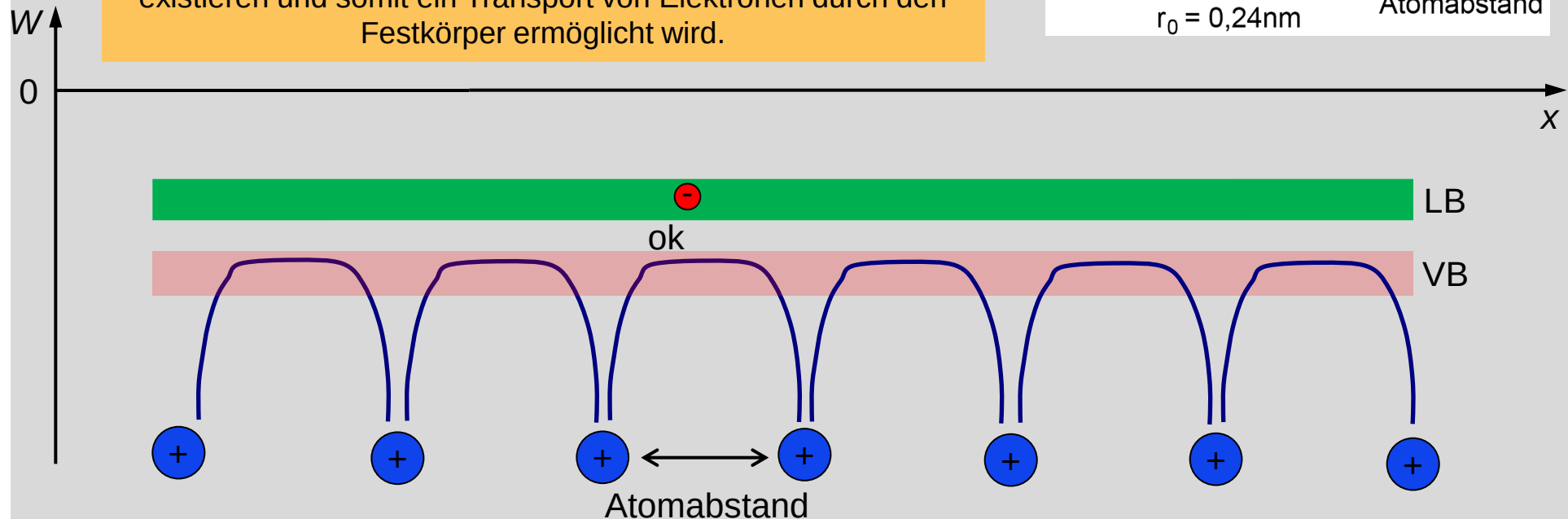
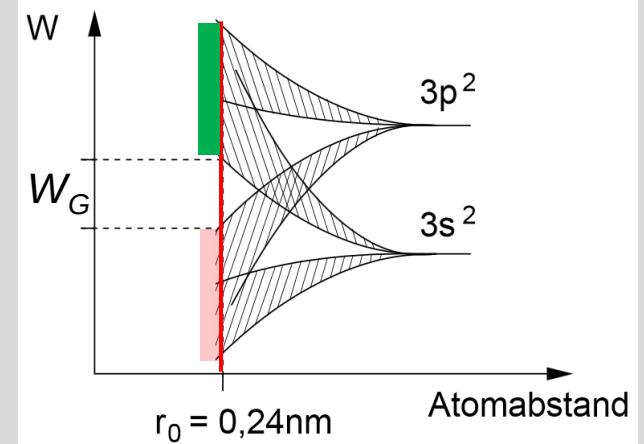
Als „Band“ wird ein Energiebereich bezeichnet, in dem sich quasikontinuierlich verteilte Energieniveaus von erlaubten Elektronenzuständen befinden. Das Band kann räumlich als überall dort gedacht werden, wo die zugehörige Psi-Fkt. eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit größer 0 vorhersagt (was in der Regel für den gesamten Festkörper gilt). Dies bedeutet nichts anderes, als das Elektronen mit einer im Band befindlichen Energie im gesamten Festkörper die Möglichkeit haben zu existieren und somit ein Transport von Elektronen durch den Festkörper ermöglicht wird.



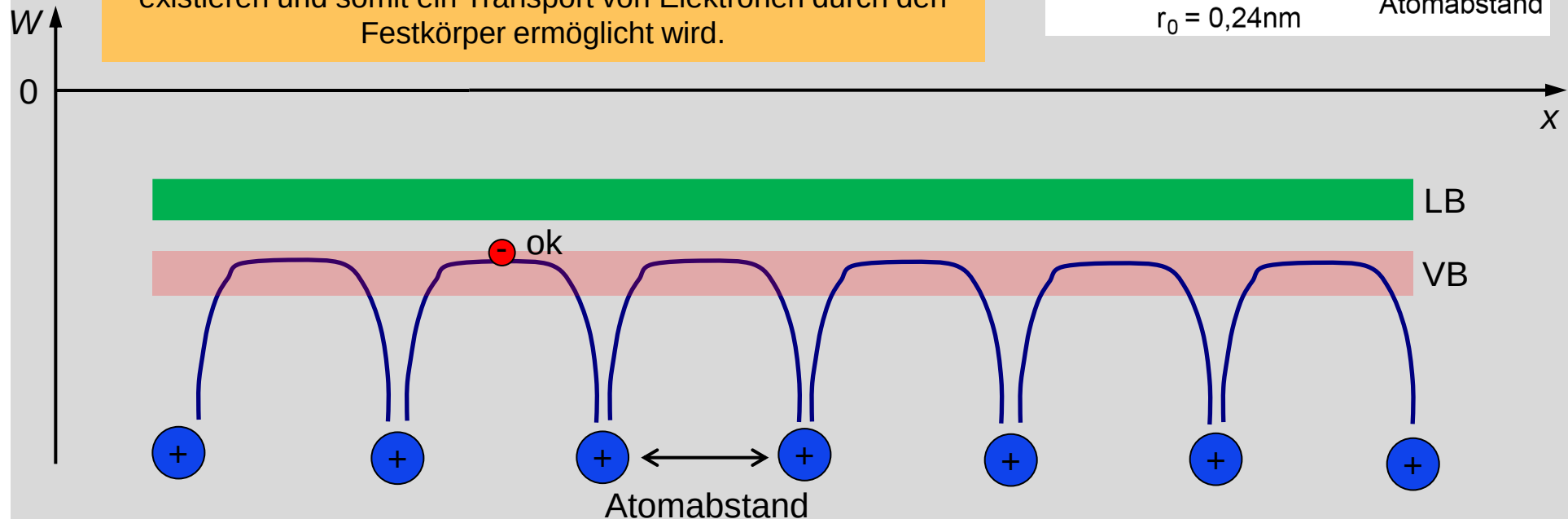
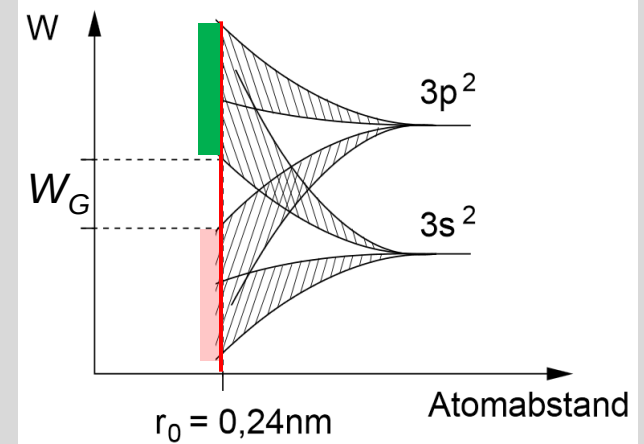
Als „Band“ wird ein Energiebereich bezeichnet, in dem sich quasikontinuierlich verteilte Energieniveaus von erlaubten Elektronenzuständen befinden. Das Band kann räumlich als überall dort gedacht werden, wo die zugehörige Psi-Fkt. eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit größer 0 vorhersagt (was in der Regel für den gesamten Festkörper gilt). Dies bedeutet nichts anderes, als das Elektronen mit einer im Band befindlichen Energie im gesamten Festkörper die Möglichkeit haben zu existieren und somit ein Transport von Elektronen durch den Festkörper ermöglicht wird.



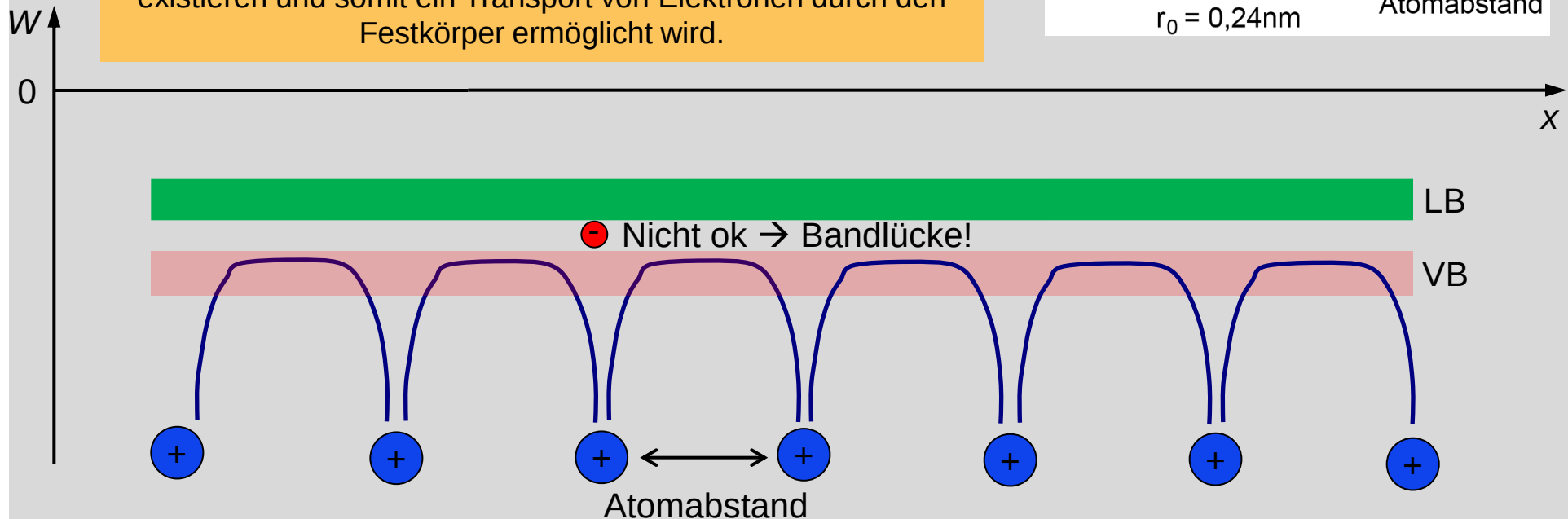
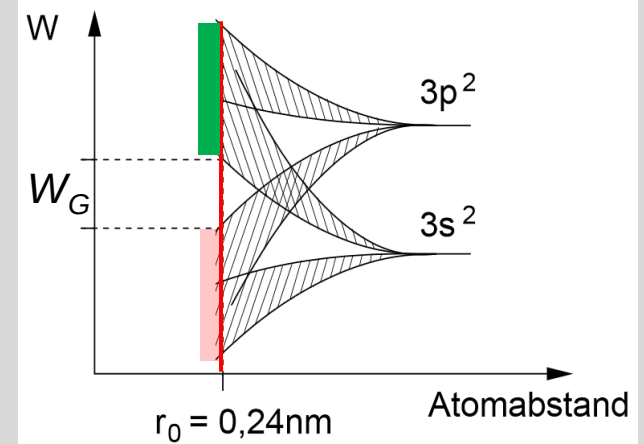
Als „Band“ wird ein Energiebereich bezeichnet, in dem sich quasikontinuierlich verteilte Energieniveaus von erlaubten Elektronenzuständen befinden. Das Band kann räumlich als überall dort gedacht werden, wo die zugehörige Psi-Fkt. eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit größer 0 vorhersagt (was in der Regel für den gesamten Festkörper gilt). Dies bedeutet nichts anderes, als das Elektronen mit einer im Band befindlichen Energie im gesamten Festkörper die Möglichkeit haben zu existieren und somit ein Transport von Elektronen durch den Festkörper ermöglicht wird.



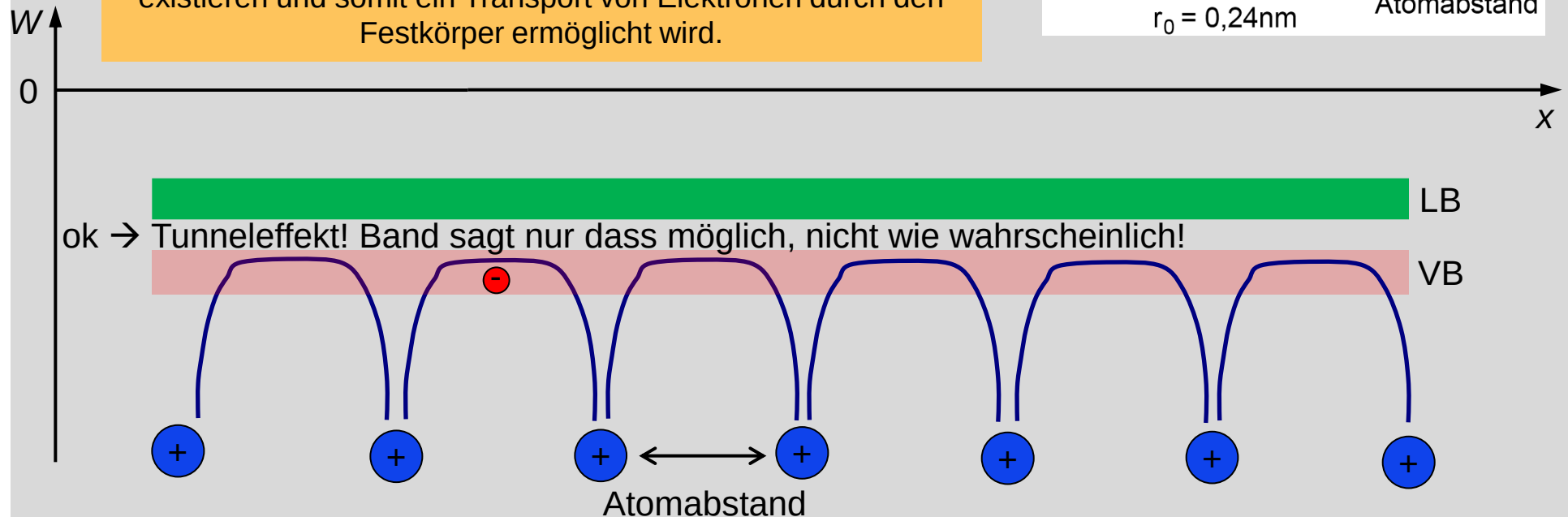
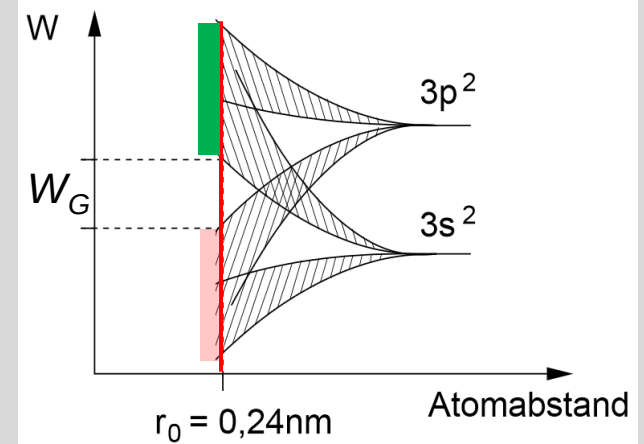
Als „Band“ wird ein Energiebereich bezeichnet, in dem sich quasikontinuierlich verteilte Energieniveaus von erlaubten Elektronenzuständen befinden. Das Band kann räumlich als überall dort gedacht werden, wo die zugehörige Psi-Fkt. eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit größer 0 vorhersagt (was in der Regel für den gesamten Festkörper gilt). Dies bedeutet nichts anderes, als das Elektronen mit einer im Band befindlichen Energie im gesamten Festkörper die Möglichkeit haben zu existieren und somit ein Transport von Elektronen durch den Festkörper ermöglicht wird.



Als „Band“ wird ein Energiebereich bezeichnet, in dem sich quasikontinuierlich verteilte Energieniveaus von erlaubten Elektronenzuständen befinden. Das Band kann räumlich als überall dort gedacht werden, wo die zugehörige Psi-Fkt. eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit größer 0 vorhersagt (was in der Regel für den gesamten Festkörper gilt). Dies bedeutet nichts anderes, als das Elektronen mit einer im Band befindlichen Energie im gesamten Festkörper die Möglichkeit haben zu existieren und somit ein Transport von Elektronen durch den Festkörper ermöglicht wird.



Als „Band“ wird ein Energiebereich bezeichnet, in dem sich quasikontinuierlich verteilte Energieniveaus von erlaubten Elektronenzuständen befinden. Das Band kann räumlich als überall dort gedacht werden, wo die zugehörige Psi-Fkt. eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit größer 0 vorhersagt (was in der Regel für den gesamten Festkörper gilt). Dies bedeutet nichts anderes, als das Elektronen mit einer im Band befindlichen Energie im gesamten Festkörper die Möglichkeit haben zu existieren und somit ein Transport von Elektronen durch den Festkörper ermöglicht wird.

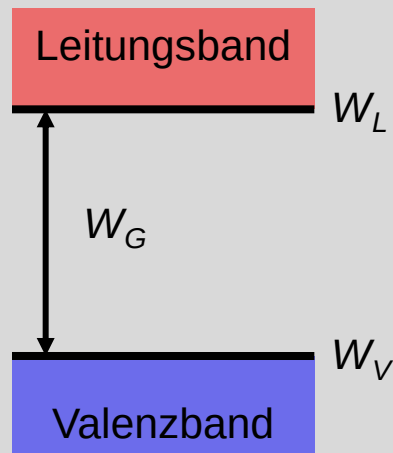


b) Zeichnen Sie die typischen Anordnungen von Valenz- und Leitungsband jeweils für Metalle, Halbleiter und Isolatoren. Kennzeichnen Sie zudem ob die jeweiligen Bänder bei $T=0K$ leer, halb oder voll gefüllt sind.

Als Valenzband wird das oberste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ teil- oder vollbesetzt ist.
Als Leitungsband wird das unterste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ leer ist.

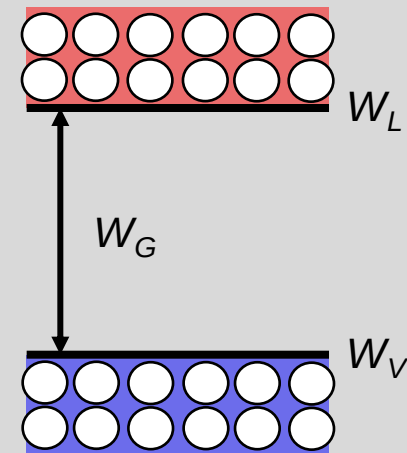
Halbleiter

Bsp. Silizium



Weist echte Bandlücke auf!

Beobachtung: Keine Leitfähigkeit bei $T=0K$

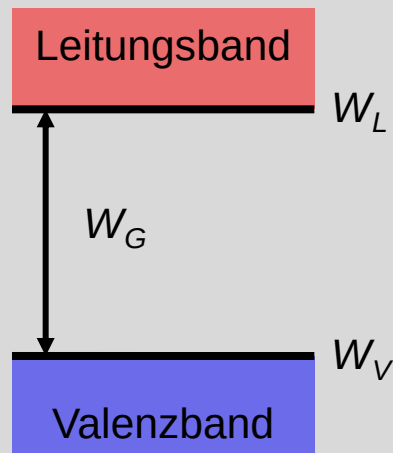


Warum? Wir haben doch erlaubte Zustände im ganzen Festkörper?

Als Valenzband wird das oberste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ teil- oder vollbesetzt ist.
Als Leitungsband wird das unterste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ leer ist.

Halbleiter

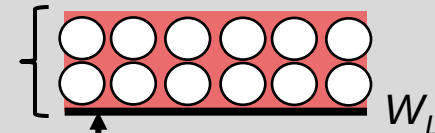
Bsp. Silizium



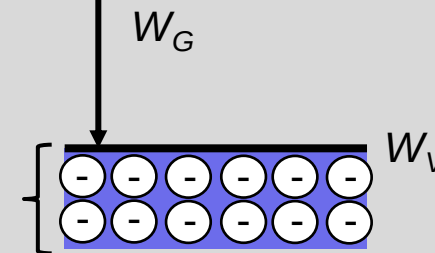
Weist echte Bandlücke auf!

Einzig Erklärung:

Hier gibt es
keine Elektronen



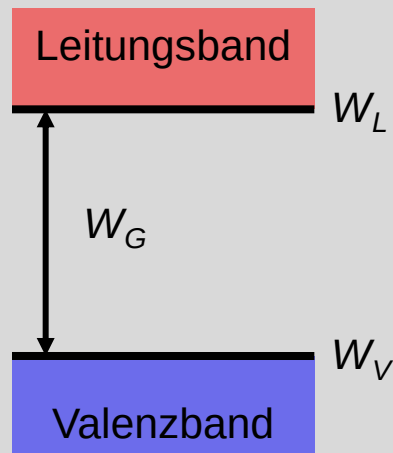
Hier gibt's
welche, aber sie können
sich nicht bewegen



Als Valenzband wird das oberste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ teil- oder vollbesetzt ist.
Als Leitungsband wird das unterste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ leer ist.

Halbleiter

Bsp. Silizium



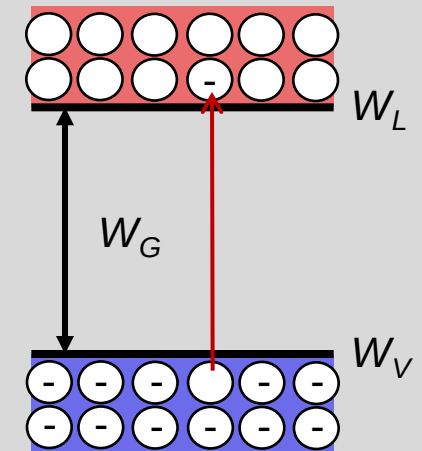
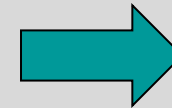
Weist echte Bandlücke auf!

Bei HL ist bei $T=0K$
keine Leitfähigkeit
vorhanden



VB ist voll, LB ist leer!

$T > 0K$



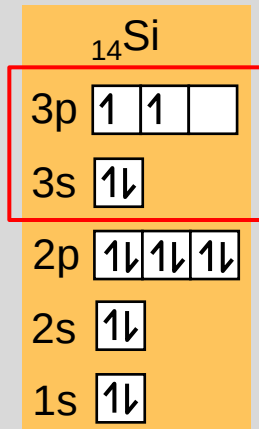
Durch thermische
Anregung entsteht
Leitfähigkeit

Als Valenzband wird das oberste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ teil- oder vollbesetzt ist.

Als Leitungsband wird das unterste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ leer ist.

Zusatz: Detaillierte Erklärung
am Bsp. von Silizium

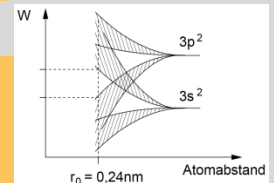
Relevant sind schwach gebundene Elektronen der
äußersten Schale $\rightarrow$ 4 relevante Orbitale pro
Atom $\rightarrow$ Gebildete Bänder repräsentieren die
Energien von $4 \cdot N$ Festkörperorbitalen



Aus Symmetriegründen:

Je $\frac{3 \cdot N}{2} + \frac{1 \cdot N}{2}$ Orbitale haben Energieniveaus im LB bzw. VB

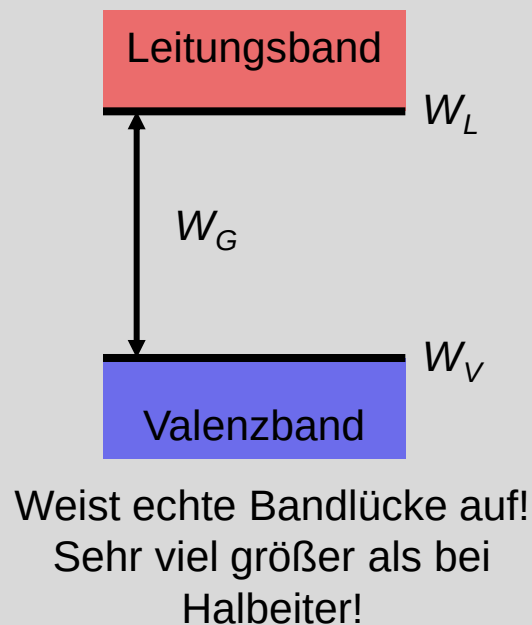
$2 \cdot N$ Elektronen aus 3p und $2 \cdot N$ Elektronen aus 3s
müssen untergebracht werden $\rightarrow$ 2 Elektronen pro
Orbital (Spin!) $\rightarrow$ Bei $T=0K$ passen alle Elektronen
gerade in die Orbitale des VB $\rightarrow$ VB voll, LB leer



Als Valenzband wird das oberste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ teil- oder vollbesetzt ist.
Als Leitungsband wird das unterste Band bezeichnet, dass bei $T=0K$ leer ist.

Isolator

Bsp. Diamant

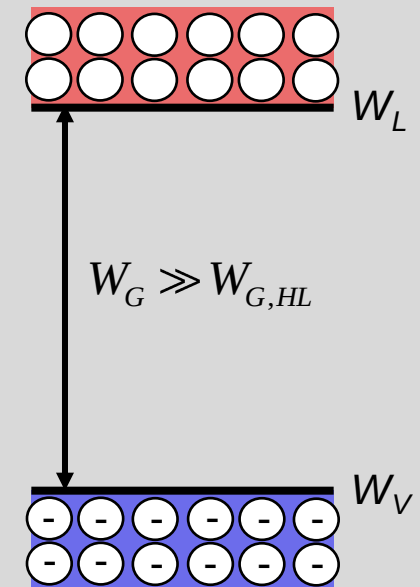
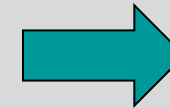


Bei Isolatoren ist bei $T=0K$ keine Leitfähigkeit vorhanden



VB ist voll, LB ist leer!

$T > 0K$



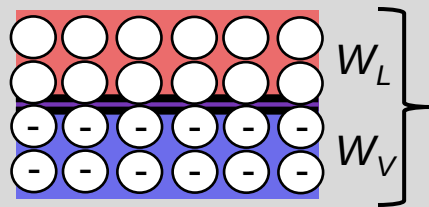
Bandlücke so groß, dass bei realistischen Temperaturen keine Leitfähigkeit entsteht

Als Valenzband wird das oberste Band bezeichnet, dass bei $T=0\text{K}$ teil- oder vollbesetzt ist.
Als Leitungsband wird das unterste Band bezeichnet, dass bei $T=0\text{K}$ leer ist.

Metalle

Bei Metallen ist bei
 $T=0\text{K}$ Leitfähigkeit
vorhanden

Bsp. 2-wertige Metalle wie Magnesium

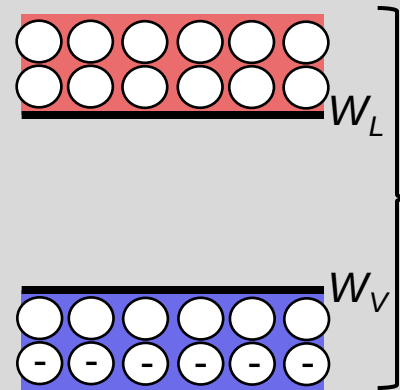


LB und VB überlappen



Trotz vollem VB kann
Leitung mit minimalem
Energieaufwand über die
Zustände des LB
stattfinden

Bsp. 1-wertige Metalle wie Natrium



LB und VB können
getrennt sein



VB darf höchstens
teilbesetzt sein

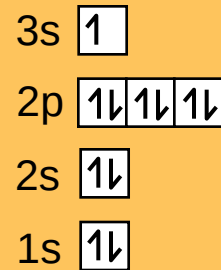
c) Im Festkörperverbund des Elements Natrium trägt pro Natriumatom im Mittel ein Elektron zur Leitfähigkeit bei.

- i. Warum ist dies so?
- ii. Zu welchem Anteil ist das Leitungsband bei $T=0\text{K}$ gefüllt?

i.

Elektronenkonfiguration

$_{11}\text{Na}$



Elektronen der äußersten Schale sind am schwächsten gebunden und tragen folglich dominant zur Leitfähigkeit bei

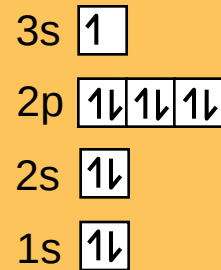
c) Im Festkörperverbund des Elements Natrium trägt pro Natriumatom im Mittel ein Elektron zur Leitfähigkeit bei.

- i. Warum ist dies so?
- ii. Zu welchem Anteil ist das Leitungsband bei $T=0\text{K}$ gefüllt?

i.

Elektronenkonfiguration

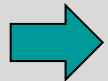
$_{11}\text{Na}$



Elektronen der äußersten Schale sind am schwächsten gebunden und tragen folglich dominant zur Leitfähigkeit bei

ii.

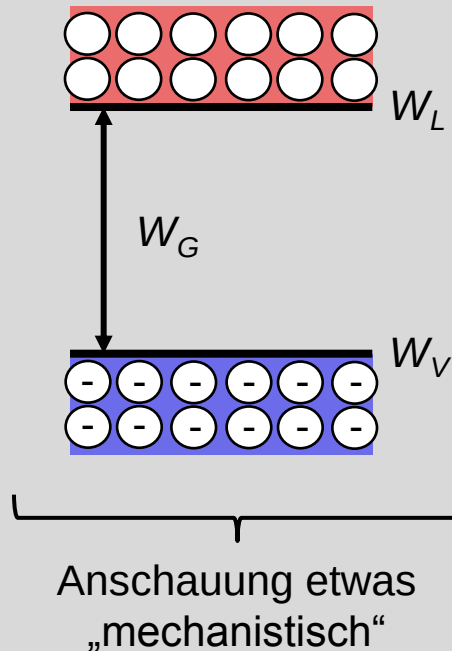
Als Valenzband wird das oberste Band bezeichnet, dass bei $T=0\text{K}$ teil- oder vollbesetzt ist.
Als Leitungsband wird das unterste Band bezeichnet, dass bei $T=0\text{K}$ leer ist.



Das Leitungsband ist per Definition leer!

d) Welches quantenmechanische Prinzip ist dafür verantwortlich, dass in vollen Bändern keine Leitung stattfinden kann?

d) Welches quantenmechanische Prinzip ist dafür verantwortlich, dass in vollen Bändern keine Leitung stattfinden kann?



Formal korrekter

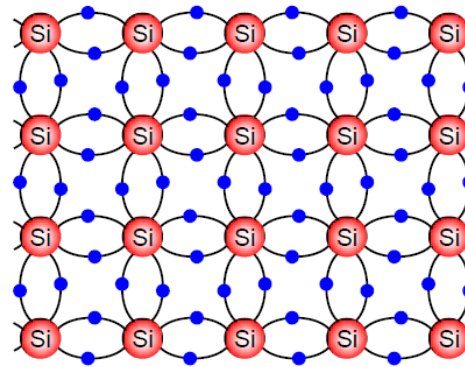
Pauli-Prinzip:

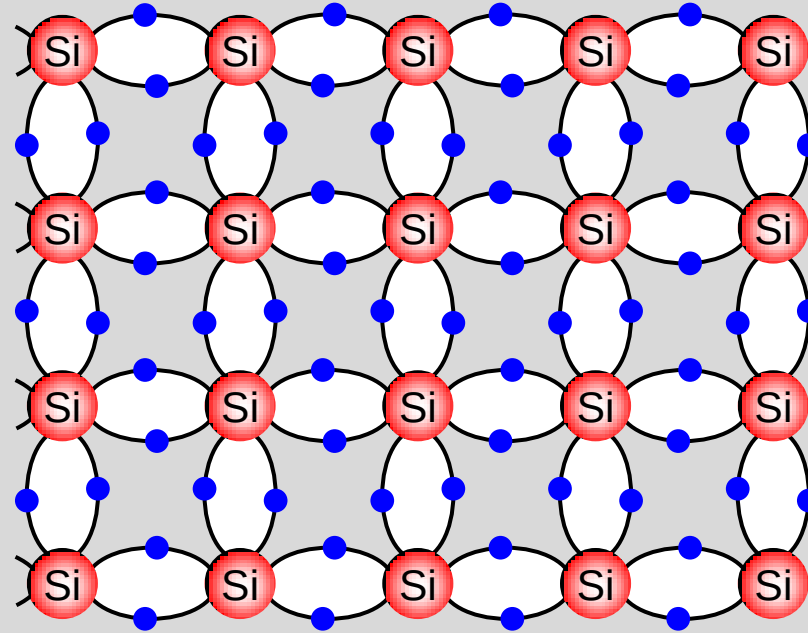
In einem Atom dürfen die Elektronenzustände nicht in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen.

A2: Leitfähigkeit in Halbleitern

Halbleiter stellen eine wichtige Klasse von Werkstoffen dar. Durch sie können elektrotechnische Bauteile wie Dioden und Transistoren hergestellt werden, ohne die moderne Elektronik nicht denkbar wäre.

a) Gegeben sei die Bindungsstruktur von Silizium bei $T=0\text{K}$. In welchem Band befinden sich die dargestellten kovalenten Bindungselektronen?

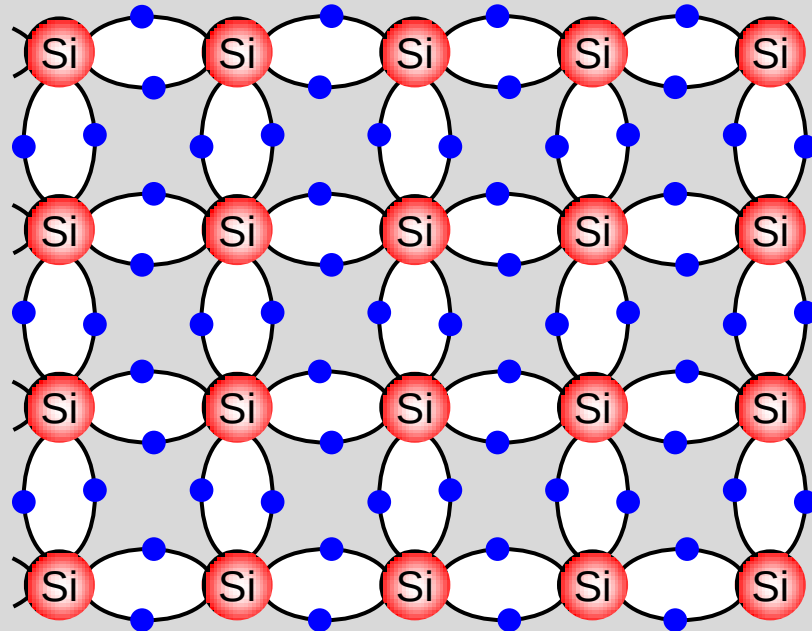




Bei der Temperatur $T=0\text{K}$ nehmen alle Elektronen die energetisch niedrigsten verfügbaren Zustände ein. Die für die Bindung, aber auch für die Leitfähigkeit zuständigen Valenzelektronen nehmen daher Zustände im Valenzband ein.

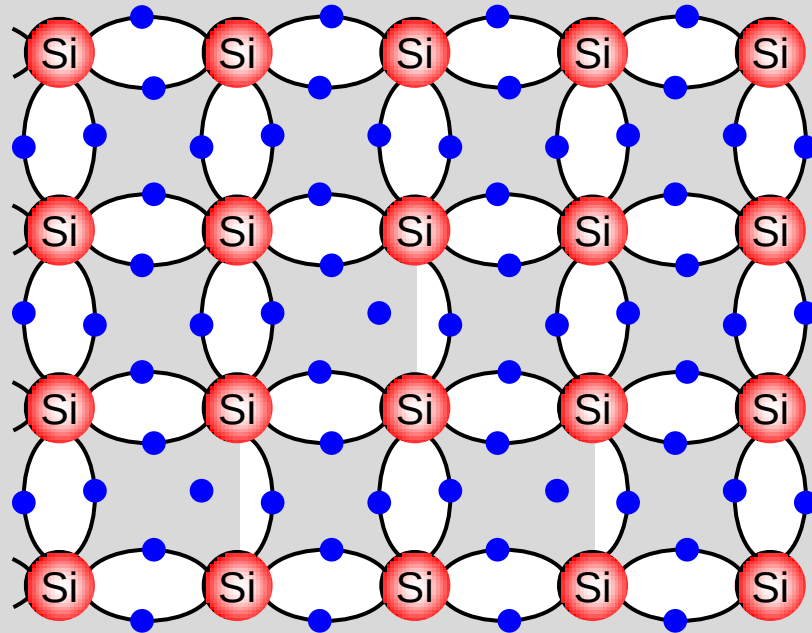
b) Die Temperatur werde nun auf $T > 0\text{K}$ erhöht. Einige Elektronen werden dadurch in Energiezustände des Leitungsbandes angehoben. Wodurch könnte man dies im Bild aus Teilaufgabe a) kenntlich machen?

Möglichkeit 1



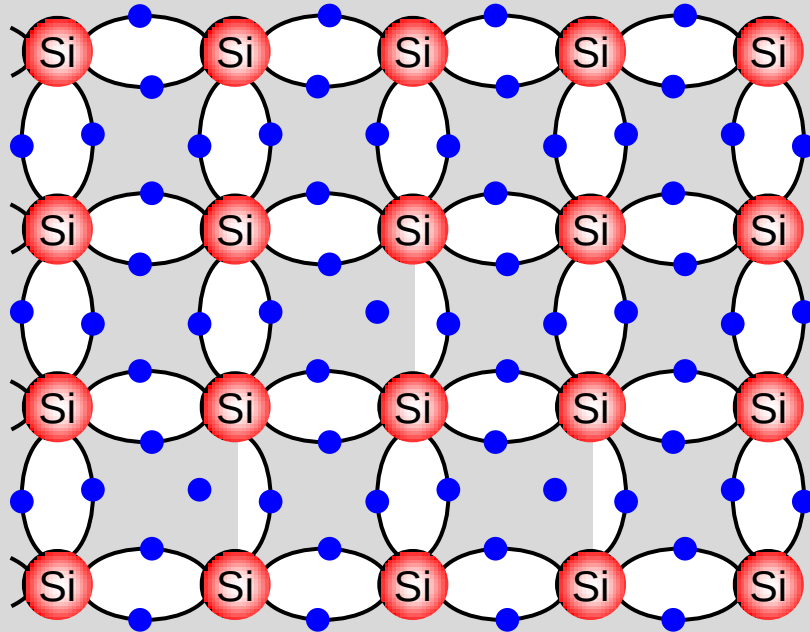
Lockerung von Bindungen

Möglichkeit 1



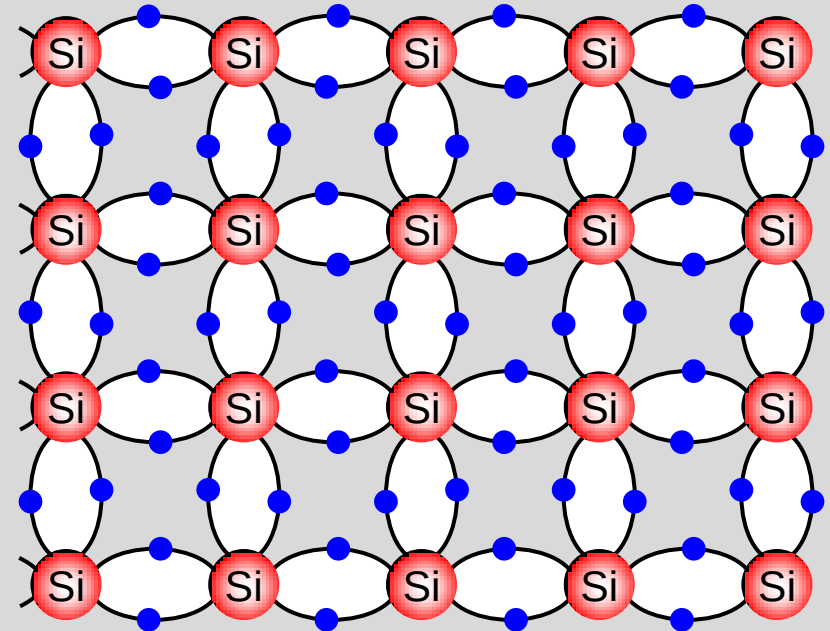
Lockerung von Bindungen

Möglichkeit 1



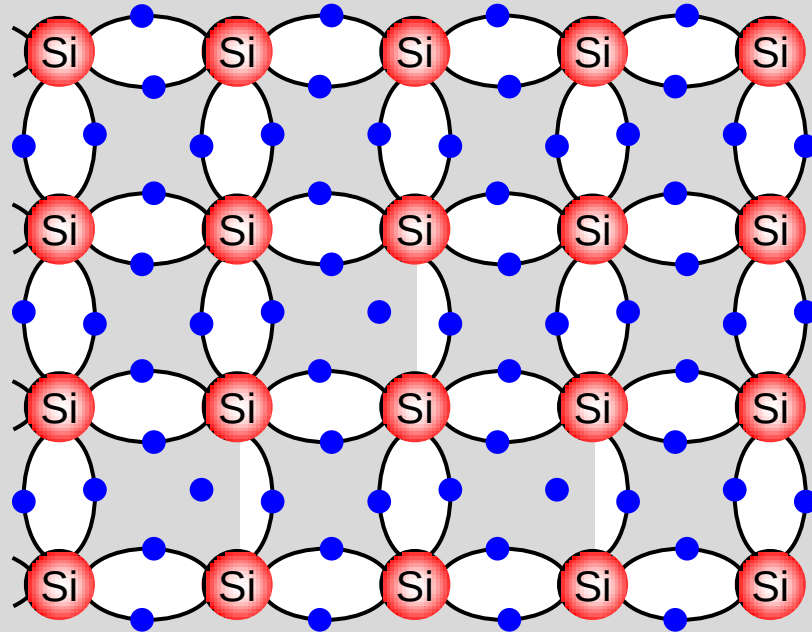
Lockerung von Bindungen

Möglichkeit 2



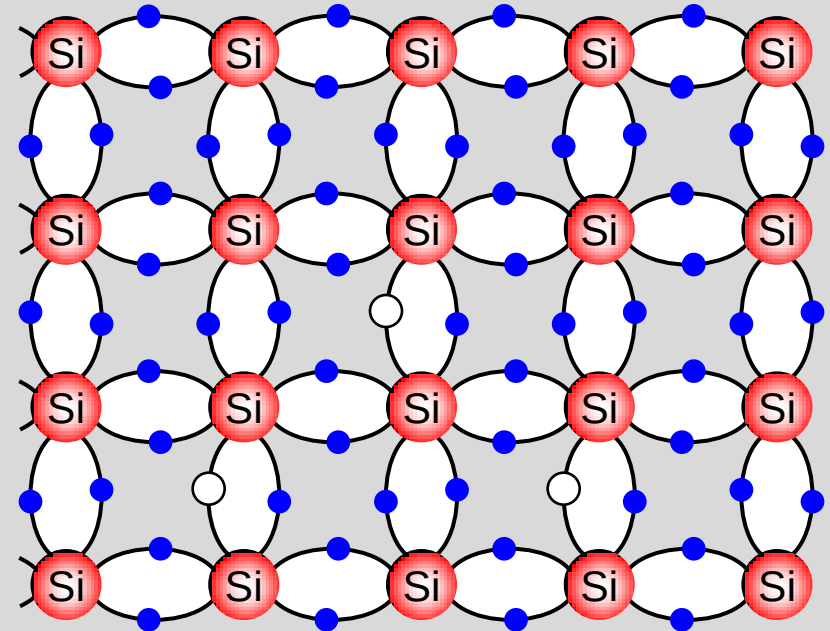
Valenzbandebene / Leitungsbandebene

Möglichkeit 1



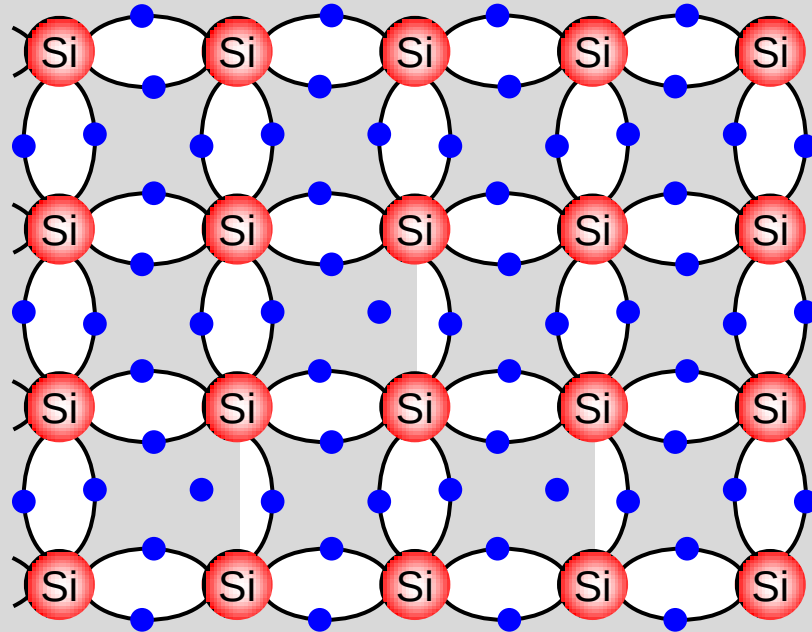
Lockerung von Bindungen

Möglichkeit 2



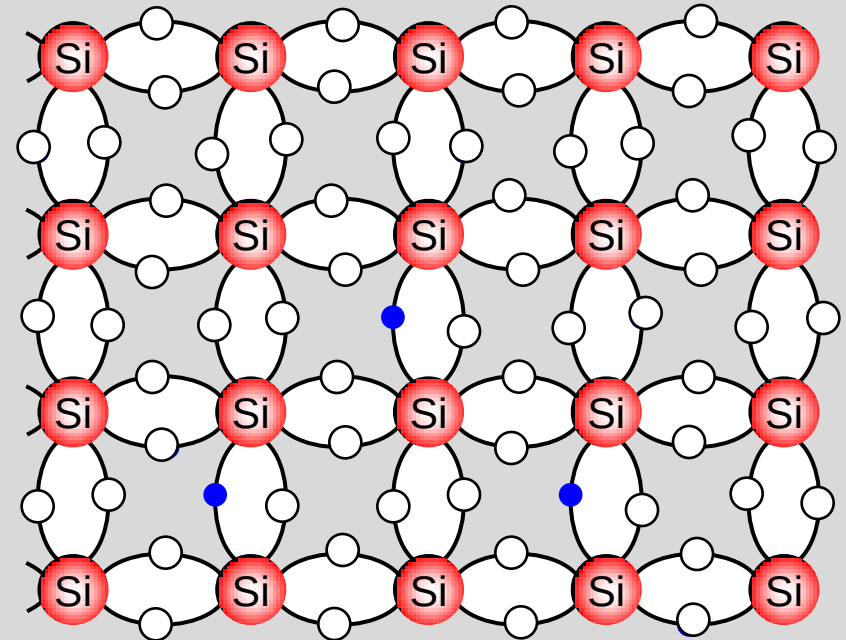
Valenzbandebene / Leitungsbanebene

Möglichkeit 1



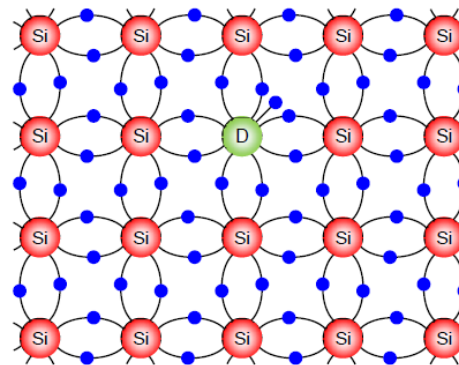
Lockerung von Bindungen

Möglichkeit 2



Valenzbandebene / Leitungsbandebene

c) Silizium werde nun mit einem Fremdstoff dotiert. Dargestellt ist die resultierende Bindungsstruktur, wiederum bei $T=0\text{K}$.



- Um welchen Fremdstoff könnte es sich handeln?
- Wirkt der Fremdstoff als Donator oder Akzeptor?
- Wo im Bänderschema vermuten Sie die energetische Lage des nicht in Bindungen mit Silizium-Atomen involvierten Elektrons und warum?

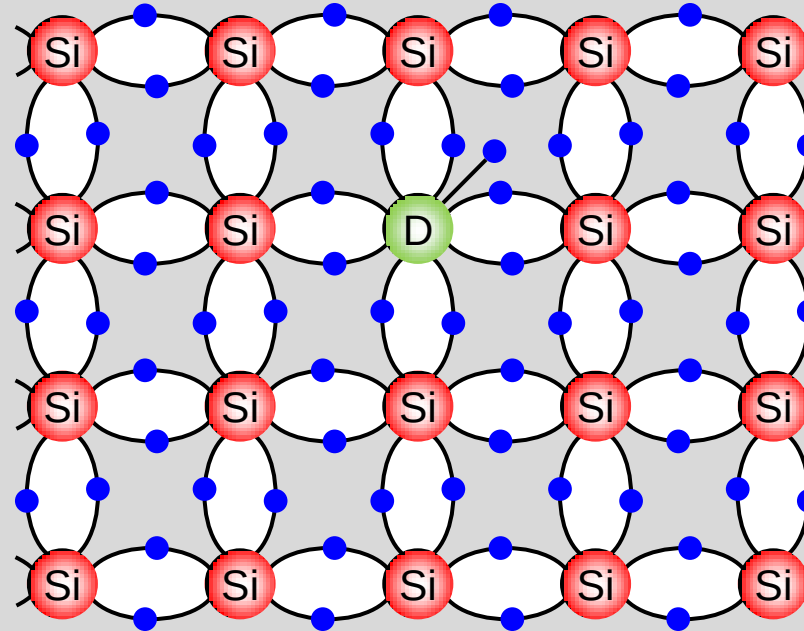
i.

Gruppen

13	14	15
5 10,81 B Bor	6 12,01 C Kohlenstoff	7 14,01 N Stickstoff
13 26,98 Al Aluminium	14 28,09 Si Silicium	15 30,97 P Phosphor
31 69,72 Ga Gallium	32 72,64 Ge Germanium	33 74,92 As Arsen
49 114,8 In Indium	50 118,7 Sn Zinn	51 121,8 Sb Antimon
81 204,4 Tl Thallium	82 207,2 Pb Blei	83 209,0 Bi Bismut

Perioden

Dotierstoff hat 5 Valenzelektronen

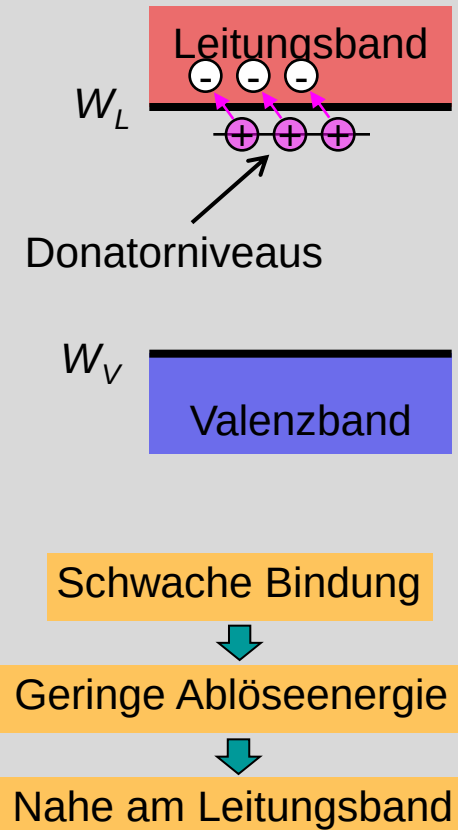


ii.

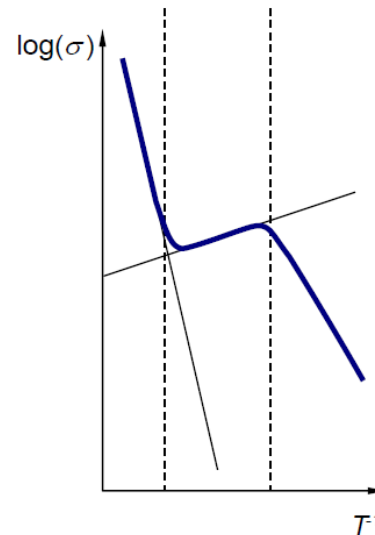
1 zusätzliches, schwach gebundenes Elektron wird eingebracht

Donator

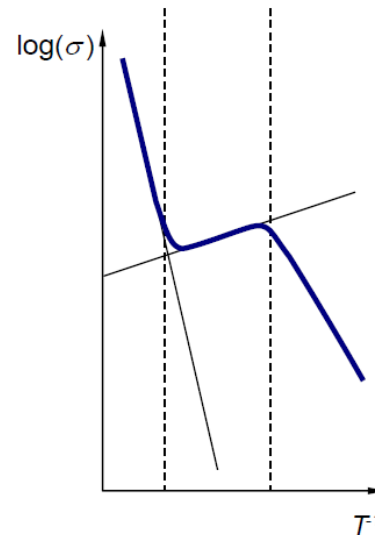
iii.



d) Die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit eines n-dotierten Halbleiters ist in nachfolgender Abbildung schematisch skizziert. Ändert sich der qualitative Verlauf bei einem p-dotierten Halbleiter und wenn ja, wie?



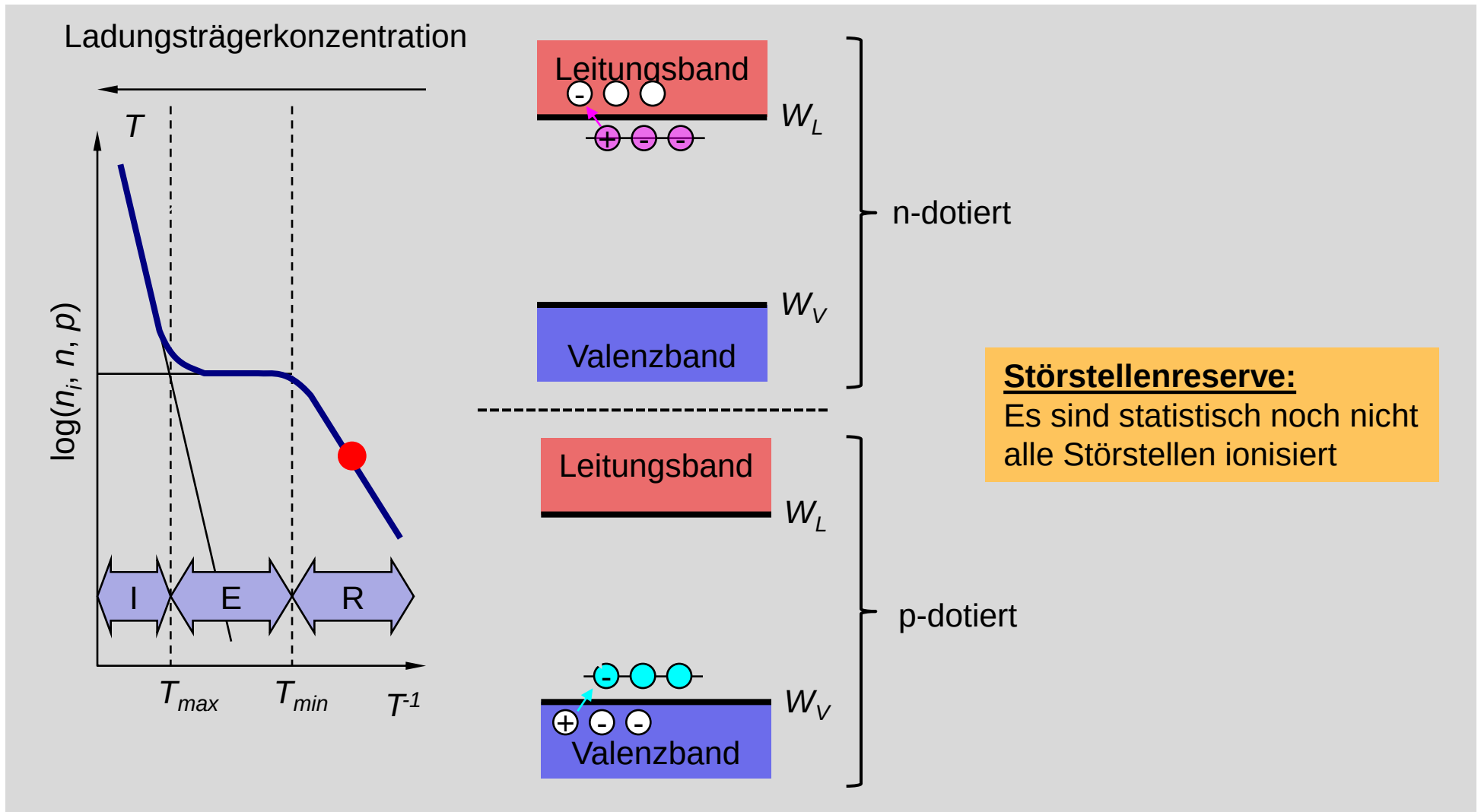
d) Die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit eines n-dotierten Halbleiters ist in nachfolgender Abbildung schematisch skizziert. Ändert sich der qualitative Verlauf bei einem p-dotierten Halbleiter und wenn ja, wie?

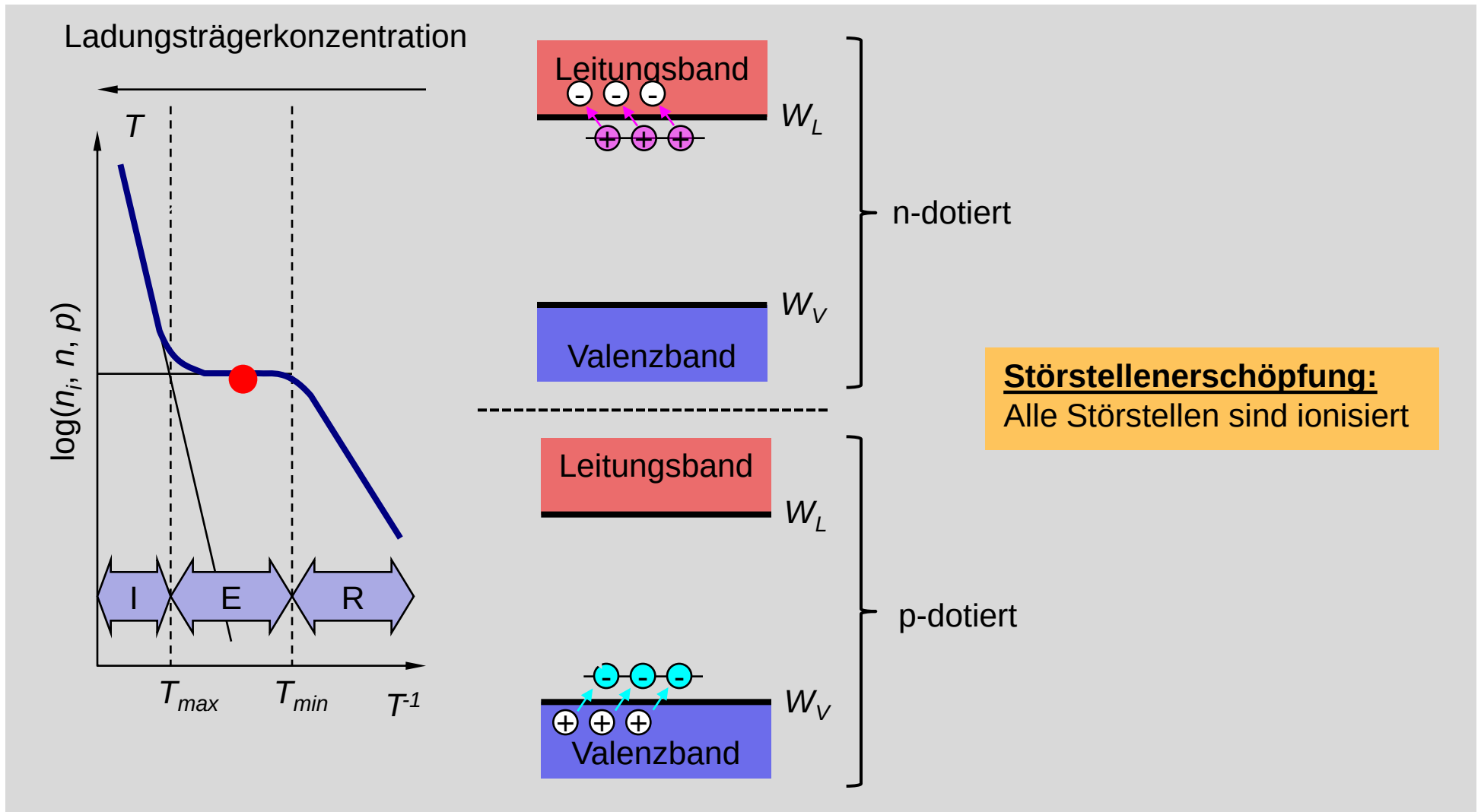


$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n$$

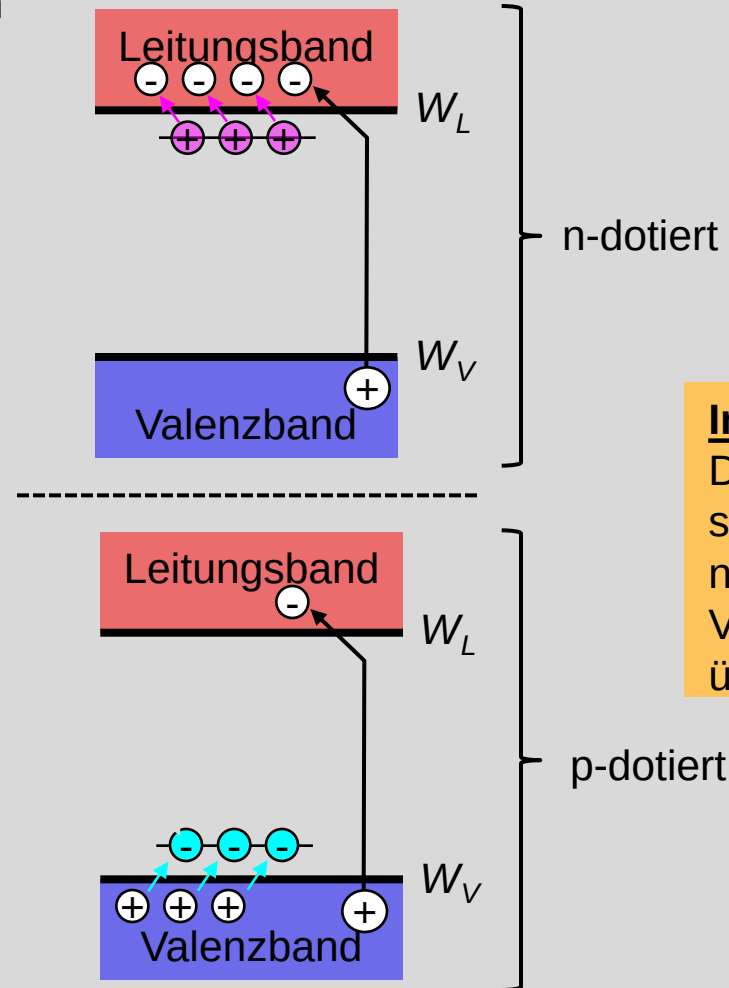
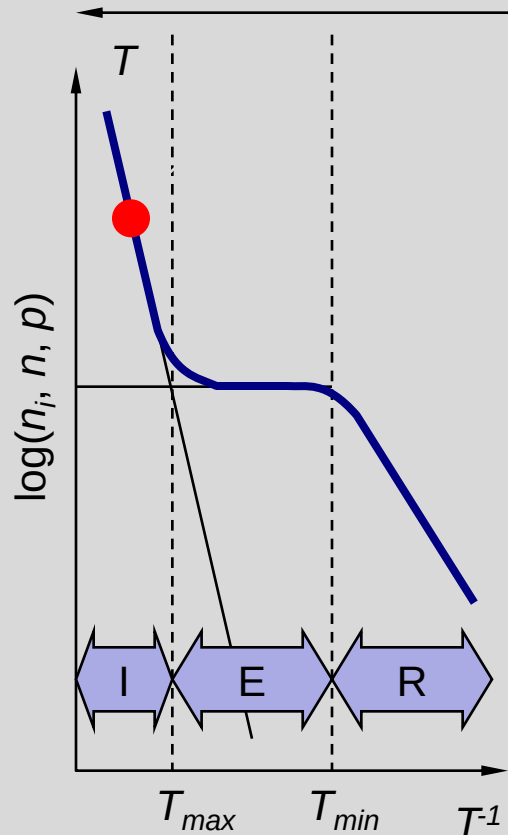


Leitfähigkeit setzt sich zusammen aus Konzentration der Ladungsträger sowie deren Beweglichkeit



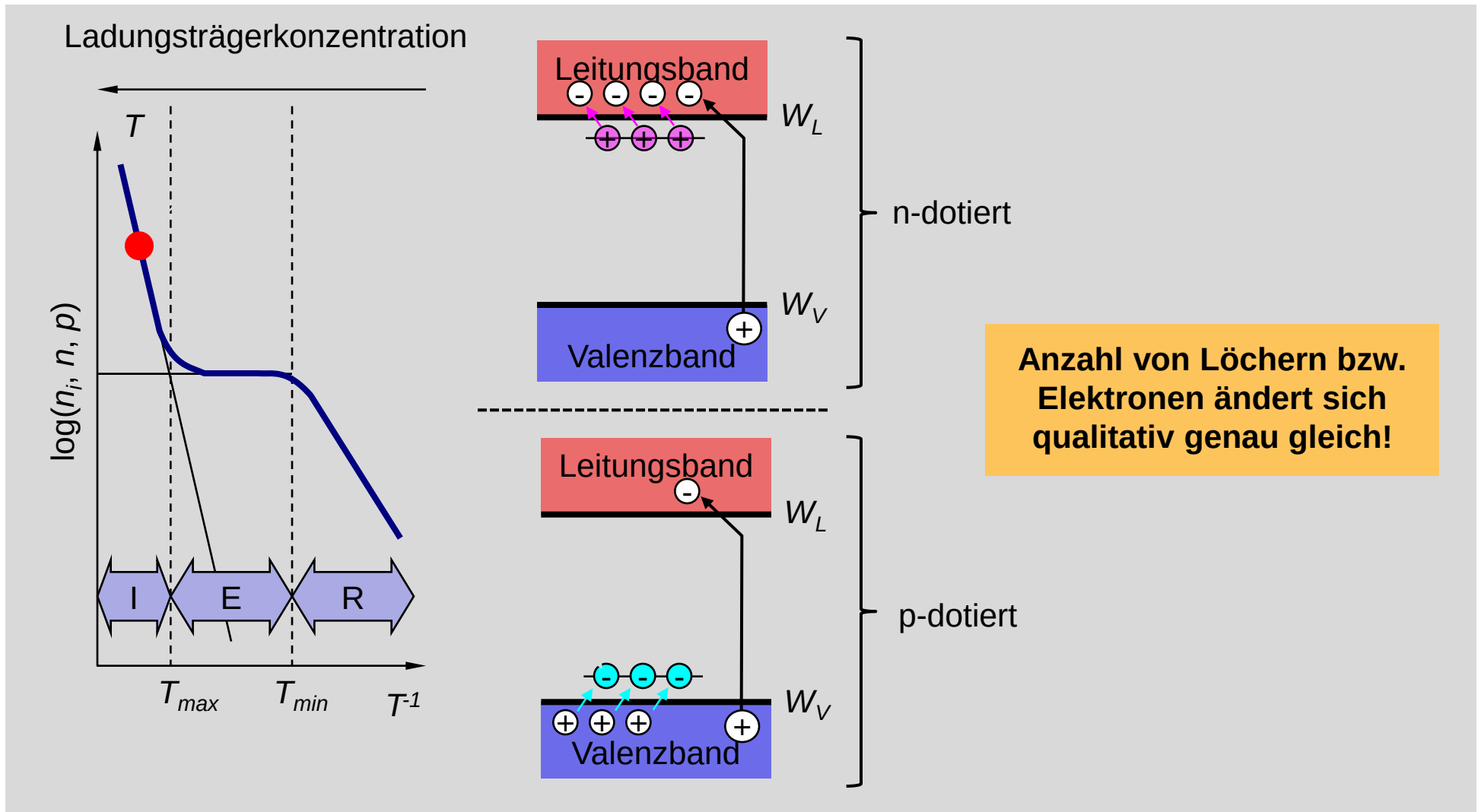


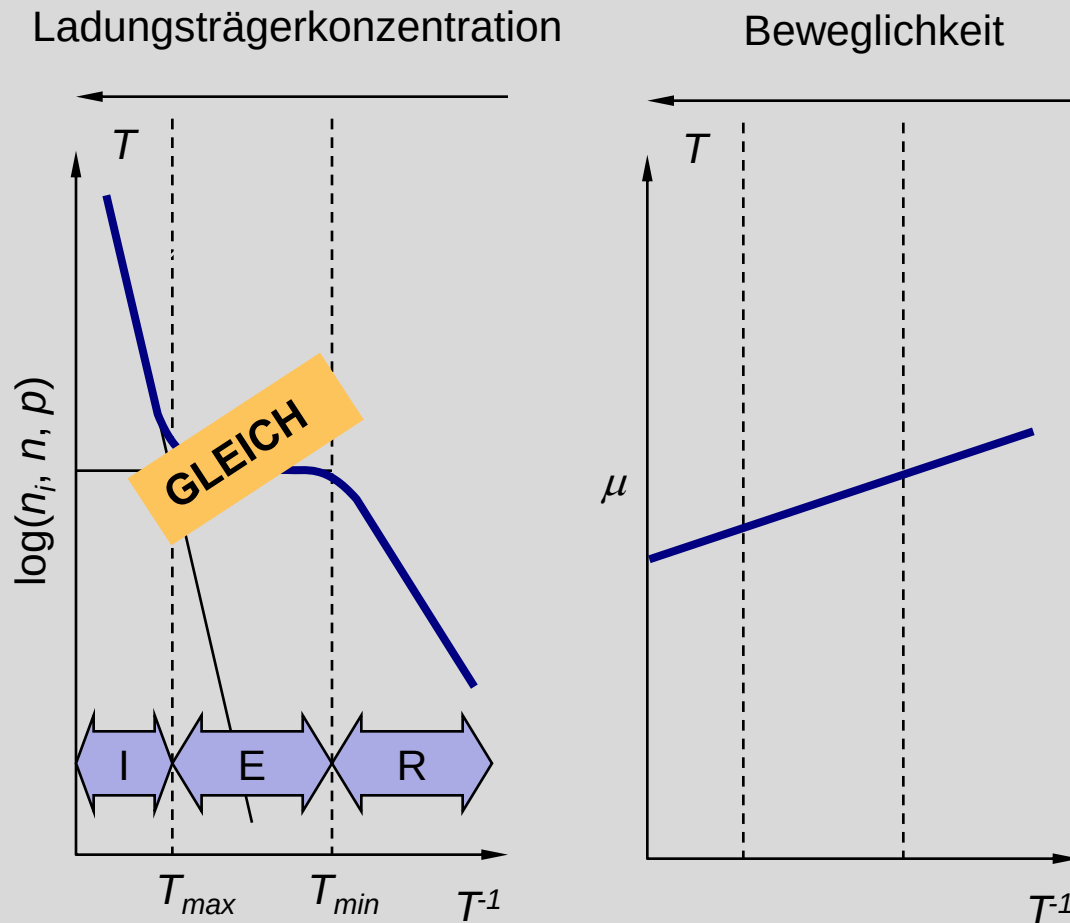
Ladungsträgerkonzentration



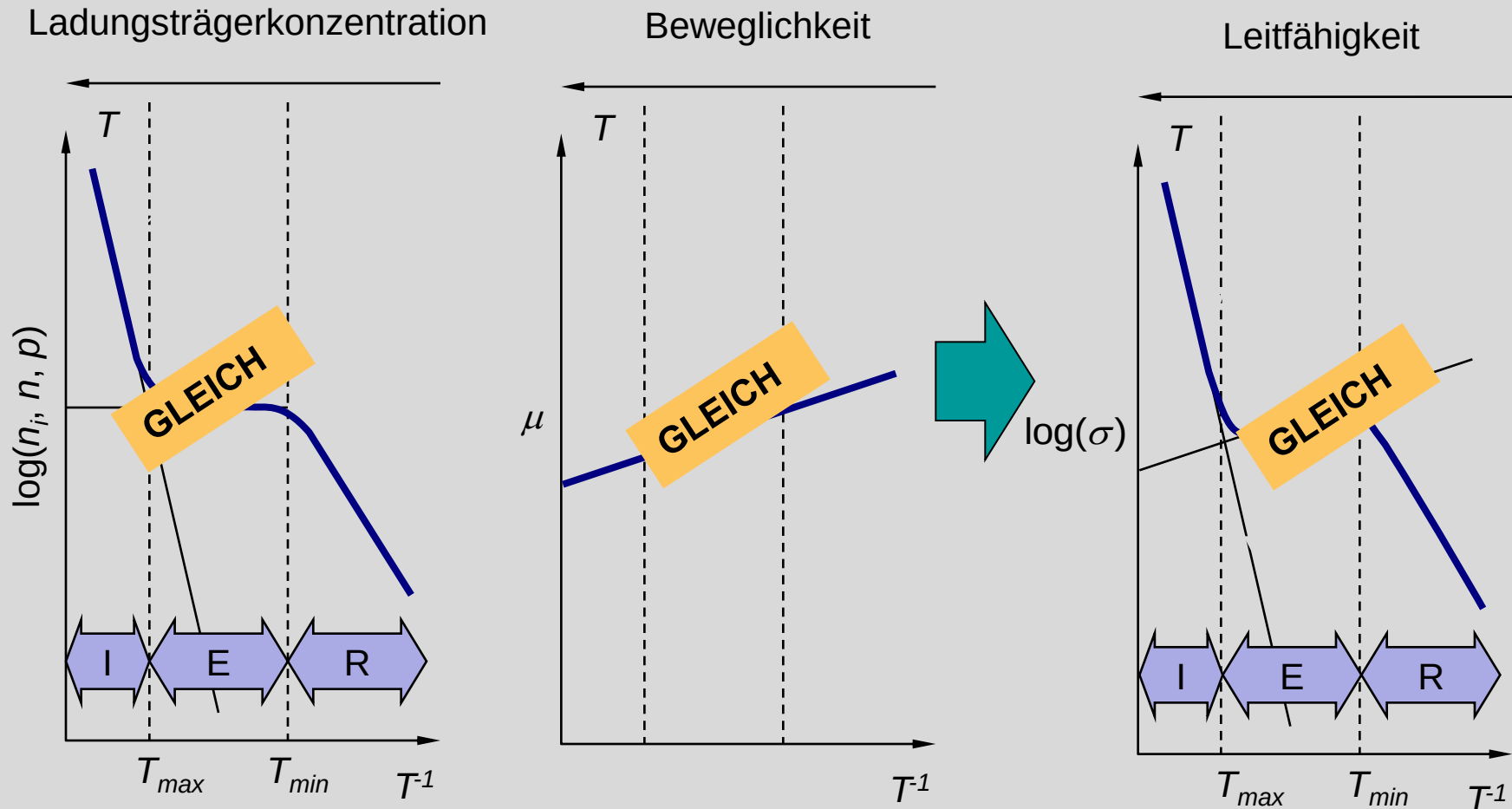
Intrinsischer Bereich:

Die thermische Anregung ist so groß, dass die Elektronen nun auch direkt vom Valenzband ins Leitungsband übertreten können.





Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit ist für Elektronen und Löcher qualitativ gleich

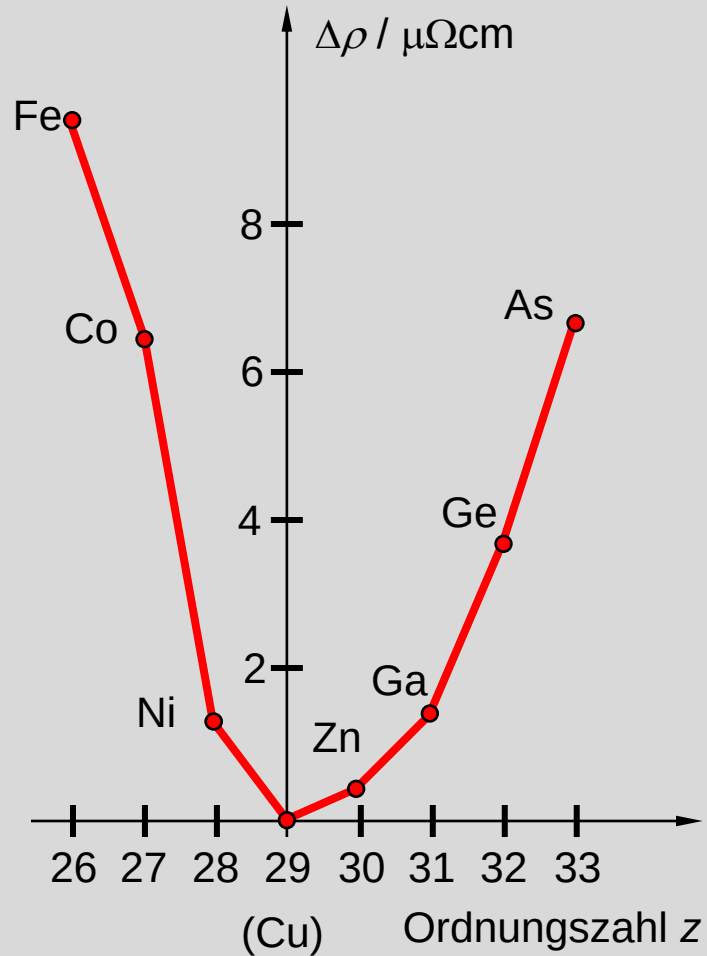


Der qualitative Verlauf der Leitfähigkeit über der Temperatur ist unabhängig davon, ob es sich um einen p- oder n-dotierten Halbleiter handelt.

A3: Leitfähigkeit in Metallen

Zwar kann die Leitfähigkeit von Metallen durch das Bändermodell physikalisch korrekter beschrieben werden, jedoch hat in vielen Fällen die Modellvorstellung nach Drude immer noch ihre Daseinsberechtigung: Gerade für qualitative Aussagen liefert sie meist korrekte Ergebnisse und ist aufgrund ihres mechanistischen Ursprungs deutlich einfacher zu verstehen.

a) Zwei Kupferproben aus dem gleichen Herstellungsprozess sind mit 1 % Fremdatomen Eisen (Fe) bzw. Nickel (Ni) verunreinigt. Welche der beiden Proben weist bei gleicher Temperatur den höheren spezifischen Widerstand auf und warum?



Die mit Eisen verunreinigte Probe weist den höheren Widerstand auf

		Gruppen																																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																		
Perioden	1	1 1,008 H Wasserstoff																		2 4,003 He Helium																	
	2	3 6,941 Li Lithium		4 9,012 Be Beryllium														5 10,81 B Bor		6 12,01 C Kohlenstoff		7 14,01 N Stickstoff		8 16,00 O Sauerstoff		9 19,00 F Fluor		10 20,18 Ne Neon									
	3	11 22,99 Na Natrium		12 24,31 Mg Magnesium														13 26,98 Al Aluminium		14 28,09 Si Silicium		15 30,97 P Phosphor		16 32,06 S Schwefel		17 35,45 Cl Chlor		18 39,95 Ar Argon									
	4	19 39,10 K Kalium		20 40,08 Ca Calcium		21 44,96 Sc Scandium		22 47,87 Ti Titan		23 50,94 V Vanadium		24 52,00 Cr Chrom		25 54,94 Mn Mangan		26 55,85 Fe Eisen		27 58,93 Co Cobalt		28 58,69 Ni Nickel		29 63,55 Cu Kupfer		30 65,41 Zn Zink		31 69,72 Ga Gallium		32 72,64 Ge Germanium		33 74,92 As Arsen		34 78,96 Se Selen		35 79,90 Br Brom		36 83,80 Kr Krypton	
	5	37 85,47 Rb Rubidium		38 87,62 Sr Strontium		39 88,91 Y Yttrium		40 91,22 Zr Zirkonium		41 92,91 Nb Niob		42 95,94 Mo Molybdän		43 (98) Tc Technetium		44 101,1 Ru Ruthenium		45 102,9 Rh Rhodium		46 106,4 Pd Palladium		47 107,9 Ag Silber		48 112,4 Cd Cadmium		49 114,8 In Indium		50 118,7 Sn Zinn		51 121,8 Sb Antimon		52 127,6 Te Tellur		53 126,9 I Iod		54 131,3 Xe Xenon	
	6	55 132,9 Cs Cäsium		56 137,3 Ba Barium		57 - 71 La-Lu		72 178,5 Hf Hafnium		73 180,9 Ta Tantal		74 183,8 W Wolfram		75 186,2 Re Rhenium		76 190,2 Os Osmium		77 192,2 Ir Iridium		78 195,1 Pt Platin		79 197,0 Au Gold		80 200,6 Hg Quecksilber		81 204,4 Tl Thallium		82 207,2 Pb Blei		83 209,0 Bi Bismut		84 (209) Po Polonium		85 (210) At Astat		86 (222) Rn Radon	
	7	87 (223) Fr Francium		88 (226) Ra Radium		89 - 103 Ac-Lr																															

Die Widerstandsänderung ist umso größer, je stärker das Gitter durch den Einbau von Fremdatomen verzerrt wird



Je weiter die Ordnungszahl von der Ordnungszahl der Wirtsatome entfernt ist, desto größer ist der Größenunterschied der Atome und folglich desto stärker die Verzerrung des Gitters.



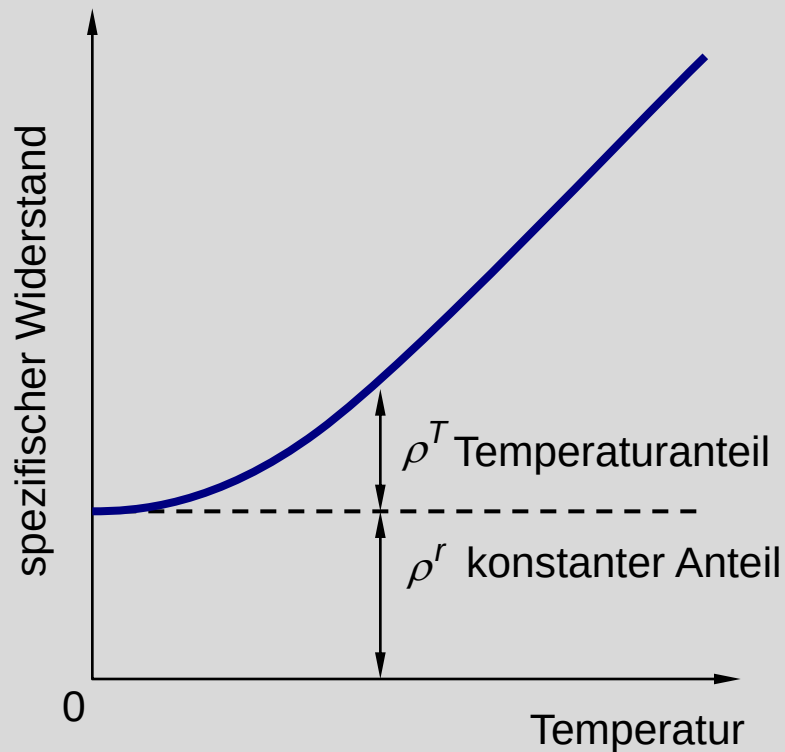
Die mit Eisen verunreinigte Probe weist den höheren Widerstand auf

b) Zwei Kupferchargen A und B aus dem gleichen Herstellungsprozess werden einer Qualitätskontrolle unterzogen. Dazu werden die spezifischen Widerstände beider Chargen bei $T=4K$ gemessen. Es ergibt sich:

$$\rho_A = 0.1 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

$$\rho_B = 1 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Welche der beiden Chargen hat eine kleinere Konzentration von Verunreinigungen und warum?



Matthiessensche Regel

$$\rho = \rho^T(T) + \rho^r$$

Wärmebewegung
des Gitters

- Fremdatome
- Versetzungen
- andere Defekte im Gitter
(Korngrenzen, Zweitphasen, ...)

Bei gleicher Messtemperatur unterscheiden sich die Proben lediglich in ihrem Konstantanteil des Widerstands. Da der Widerstand bei Probe A kleiner ist, ist Probe A weniger verunreinigt.

c) Ausgehend von $T=4\text{K}$ werde Probe A nun langsam auf $T=298\text{K}$ erwärmt. Bei $T=30\text{K}$ betrage ihr spezifischer Widerstand

$$\rho_A = 0.15 \cdot 10^{-5} \Omega \text{mm}$$

Bestimmen Sie den Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstands bei $T=30\text{K}$.

Hinweis: Es gelte die Regel von Grüneisen für $T \ll T_{\text{Debye}}$.

$$\rho \sim T^5 (\text{Grüneisen}) \quad \cap \quad \rho^r > 0 \quad \Rightarrow \quad \rho(T) \approx A \cdot T^5 + \rho^r$$

Zunächst A bestimmen:

$$\rho(T) = A \cdot T^5 + \rho^r \quad \Rightarrow \quad A = \frac{\rho(T) - \rho^r}{T^5}$$

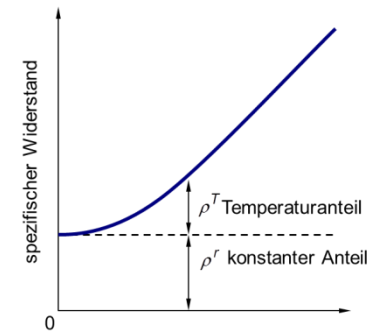
Als Werte sind bekannt:

$$\rho^r \approx \rho(T = 4K) = 0.1 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

$$\rho(T = 30K) = 0.15 \cdot 10^{-5} \Omega mm = 0.15 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-3} \Omega m = 0.15 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Einsetzen liefert:

$$A = \frac{\rho(T = 30K) - \rho(T = 4K)}{(30K)^5} = 2.058 \cdot 10^{-17} \frac{\Omega m}{K^5}$$



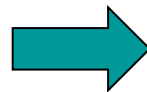
$$\rho(T) = A \cdot T^5 + \rho^r \Rightarrow TK(T) = \frac{1}{\rho(T)} \frac{\partial \rho(T)}{\partial T}$$

TK für unsere Funktion bestimmen:

$$TK(T) = \frac{1}{\rho(T)} \frac{\partial [A \cdot T^5 + \rho^r]}{\partial T} = \frac{5 \cdot A \cdot T^4}{\rho(T)}$$

Bei der Temperatur $T=30K$ beträgt der TK folglich

$$TK(T = 30K) = \frac{5 \cdot A \cdot (30K)^4}{\rho(T = 30K)} = 0.056 \frac{1}{K}$$



**Die linearisierte spezifische
Widerstandsänderung beträgt bei
 $T=30K$ 5.6% pro Kelvin**

Wichtig: Auftreten des Temperaturkoeffizienten im Rahmen einer Taylorreihenentwicklung

$$\rho(T) \approx \rho(T_0) + \left. \frac{\partial \rho(T)}{\partial T} \right|_{T_0} \cdot (T - T_0) = \rho(T_0) \cdot \left[1 + \underbrace{\frac{1}{\rho(T_0)} \left. \frac{\partial \rho(T)}{\partial T} \right|_{T=T_0}}_{TK(T=T_0)} \cdot (T - T_0) \right]$$



Bei vorgegebenem Temperaturkoeffizienten berechnet sich der Absolutwert nach folgender Formel.

$$\rho(T) \approx \rho(T_0) \cdot [1 + TK(T = T_0) \cdot (T - T_0)]$$

d) Bei $T=298\text{K}$ gelte für den spezifischen Widerstand von Probe A:

$$\rho_A = 1.68 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}$$

Wie groß ist bei dieser Temperatur die thermische Leitfähigkeit von Probe A?

Hinweis: Eventuell benötigte Konstanten können den Vorlesungsfolien entnommen werden.

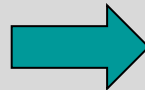
d) Bei $T=298\text{K}$ gelte für den spezifischen Widerstand von Probe A:

$$\rho_A = 1.68 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}$$

Wie groß ist bei dieser Temperatur die thermische Leitfähigkeit von Probe A?

Hinweis: Eventuell benötigte Konstanten können den Vorlesungsfolien entnommen werden.

Thermische sowie elektronische Leitfähigkeit findet in Metallen durch freie Elektronen statt



Beide Größen sind durch das Wiedemann-Franz-Gesetz verknüpft



$$\lambda_W = L \cdot \sigma \cdot T$$

2.2 Klassische Bandleiter

Übersicht Eigenschaften von Metallen

Metall	ρ $10^{-6} \Omega \text{ cm}$	μ^* $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	τ^* 10^{-14} s	L $10^{-8} \text{ V}^2 \text{K}^{-2}$
Ag	1,62	66	3,7	2,31
Cu	1,68	44	2,5	2,28
Au	2,22	48	2,7	2,38
Al	2,73	13	0,7	2,22
Na	4,74	50	2,8	2,23
W	5,39	9,2	0,5	2,39
Zn	6,12	7,8 (+)	0,4	2,37
Cd	7,72	8,7 (+)	0,5	2,54
Fe	9,71	3,8	0,2	2,39
Pt	10,5	8,9	0,3	2,57
Sn	12,2	3,5	0,4	2,62
Pb	20,8	2,0 (+)	0,3	2,49
	spezifischer Widerstand	Ladungsträger- beweglichkeit	Stoßzeit	Lorenz-Zahl

Werte bei Raumtemperatur

[Arlt 1989]

$$\lambda_W = L \cdot \sigma \cdot T \quad \rho = 1.68 \cdot 10^{-6} \Omega cm$$

Die Lorenzzahl L kann Vorlesung 4, Folie 12 entnommen werden:

$$L = 2.28 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2}$$

Für die Leitfähigkeit gilt:

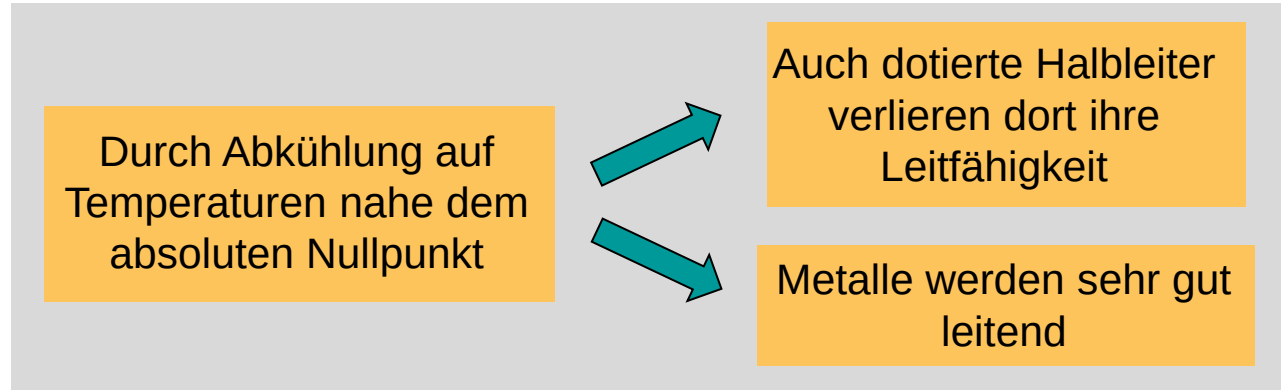
$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Einsetzen liefert:

$$\begin{aligned} \lambda_W &= L \cdot \frac{1}{\rho} \cdot T = 2.28 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2} \cdot \frac{1}{1.68 \cdot 10^{-6} \Omega cm} \cdot 298K \\ &= 2.28 \cdot 10^{-8} \frac{V^2}{K^2} \cdot \frac{1}{1.68 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-2} \Omega m} \cdot 298K = 404.43 \frac{V^2}{K \Omega m} = 404.43 \frac{W}{K \cdot m} \end{aligned}$$

e) Im Rahmen welches „einfachen“ Experiments könnte ein dotierter Halbleiter eindeutig von einem Metall unterschieden werden?

e) Im Rahmen welches „einfachen“ Experiments könnte ein dotierter Halbleiter eindeutig von einem Metall unterschieden werden?



Vielen Dank!