

Elektrische Leiteigenschaften, Leitermaterialien



Teilchen, die (bewegungsfähige)
Ladungsträger im elektrischen
Leitungsprozess sind:



Leiter	Metalle	freie Elektronen
	Legierungen	freie Elektronen
	Elektrolyte	+ und - Ionen
	Gase im Plasma Zust.	+ und - Ionen
Halbleiter	elementare HL.	freie Elektronen, Löcher
	Verbindungs-HL.	freie Elektronen, Löcher
Isolatoren	kovalente Kristalle	freie Elektronen, Löcher
	Ionkristalle	freie Elektronen, Löcher
	Flüssigkeiten	+ und - Ionen
	Gase	+ und - Ionen

σ (spezifische elektrischer Leitfähigkeit)
Siemens/m, 1/Ohm m

$< 10^{-8}$ S/m

$10^{-8} - 10^6$ S/m

$> 10^6$ S/m

Isolator

Halbleiter

metallische Leiter

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

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

$$\rho \text{ (}\Omega \text{ m)}$$

$$\sigma \left(\frac{\text{S}}{\text{m}} \right)$$

Isotrop: (Einkristalle mit kubischen Zellen,
Polykristalle)

Anisotrop: (andere Kristalle mit weniger
Symmetrie: hex., tetragonal ...)

zB: Cd, Mg, Zn, C (Graphit)

$$\frac{\rho_{parallel}}{\rho_{senkrecht}} \approx 1000$$

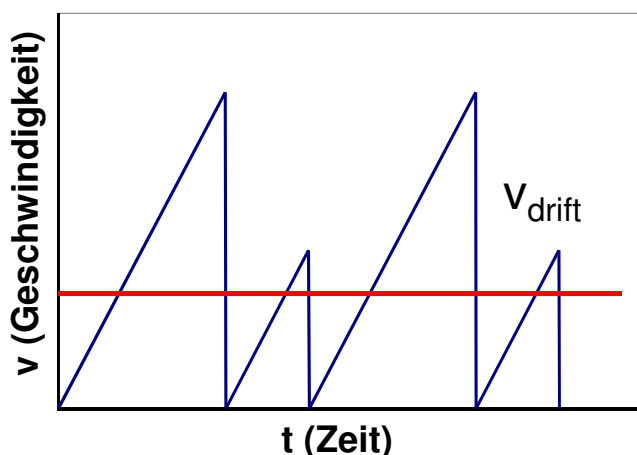
Klassisch (Sommerfeldsche, freies Elektron Modell)

Annahme: Zwischen Elektronen gibt es keine Wechselwirkung (Idealgas)

Elektronenbewegung:
Ungeordnete thermische Bewegung + Abdrift

Kvantummechanisch

Bewegung der Ebene Welle der Elektronen im Gitterperiodischen Potentialraum. Leitender Körper: Potentialgruben.



Die Elektronen beschleunigen sich kontinuierlich wegen der elektrische Feldstärke wenn sie auf ein Atomrümpf stoßen bleiben sie stehen, und beschleunigen sich weiter.

$$v_d = \mu \cdot E$$

v_d : Driftgeschwindigkeit
 q : Ladung der Elektron
 n : Anzahl der freie Elektronen
 τ : durchschnittliche Flugzeit zwischen zwei Zusammenstöße
 a : Beschleunigung
 F : Krafteinwirkung auf die Elektronen
 m : Masse der Elektronen
 E : elektrische Feldstärke
 s : spezifische Leitfähigkeit
 μ_n : Elektronenbeweglichkeit
 μ_p : Löcherbeweglichkeit

$$j = q \cdot n \cdot v_d$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{q \cdot E}{m} \Rightarrow v_d = \frac{q \cdot E}{2 \cdot m} \tau$$

$$j = \frac{n \cdot q^2 \cdot \tau}{2 \cdot m} E = \sigma \cdot E$$

Ergebnisse der Theorie:

- differentiale *Ohmsche-Gesetz* $j = \sigma \cdot \text{grad}U$
- Metalle mit 1-2 Valenzen haben gute spezifische Widerstandswerte

Problemen:

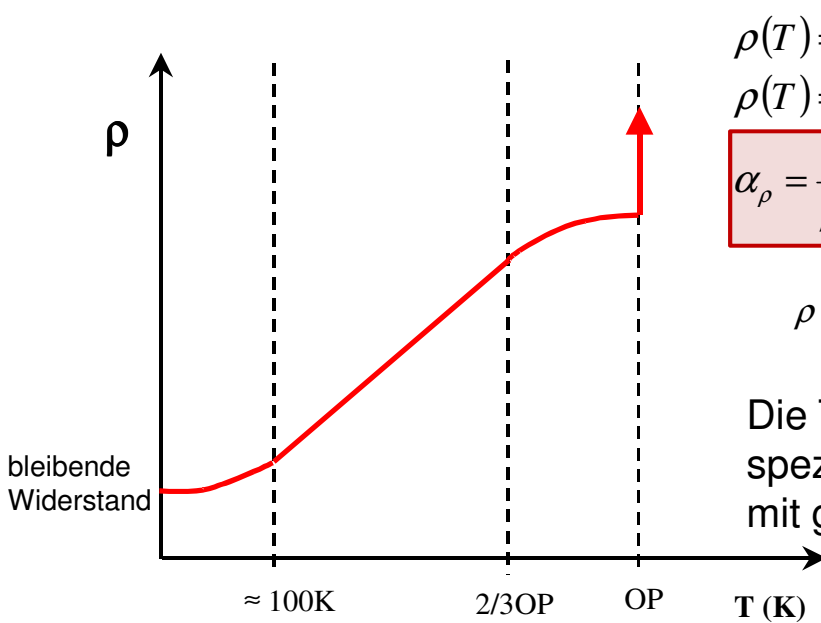
- differente Leiteigenschaften der allotrope Modifikationen nicht erklärt
- Metalle mit mehreren Valenzen (spezifische el. Widerstand falsch)
- Temperaturabhängigkeit der Halbleiter, Isolatoren ist nicht erklärt
- σ (T, Licht, äußere E, Bestrahlung...) nicht definiert

Gitterunordnungen (Deformation des periodischen Potentialraum)
 $\Rightarrow \rho$ wächst:

- thermische Gitterschwingungen
- thermisch aktivierte Punktfehler
- Versetzungen (Verformung)
- Oberflächenfehler (Korngröße)
- Volumenfehler (Ausscheidungen, neue Phasen)
- Gitterdeformation (Mischkristallbildung)

Matthiesensche-Regel (die einzelnen Faktoren sind abtrennbare Funktionen)

$$\rho(T, c, \varepsilon) = \rho_1(T) + \rho_2(c) + \rho_3(\varepsilon) + \dots$$



$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2 + \dots + \mu\Delta T^n)$$

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T}$$

$$\rho = \frac{m^*}{nq^2\tau} = \frac{m^*}{nq^2} \left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_T} \right) = \rho_R + \rho_T$$

Die Temperaturabhängigkeit der spez. el. Widerstand ist über 100 K mit gute Annäherung linear.

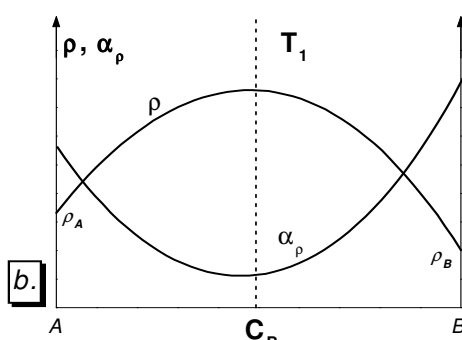
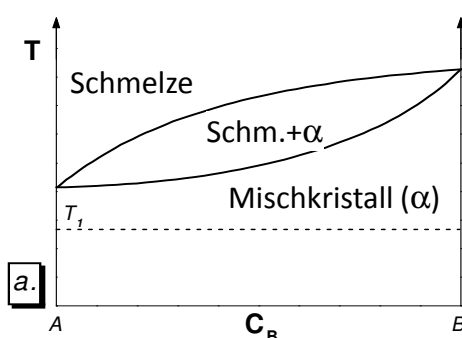
Kr. Fehler \Rightarrow bleibender Widerstand

Supraleiter:

bleibender Widerstand ist null.

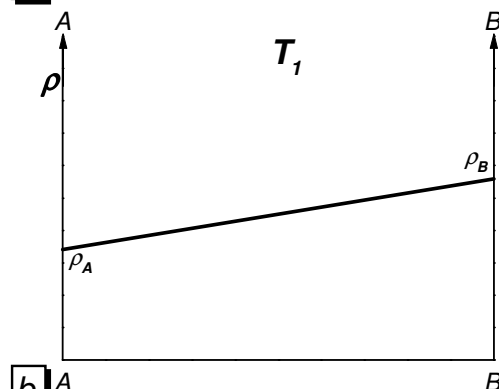
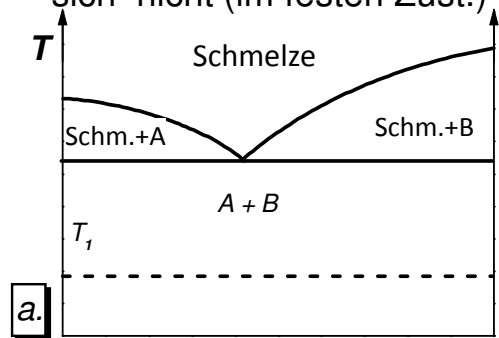
Nicht lineares Verhalten, wenn:
ferro-paramagnetische Übergang
allotrope Umwandlung
Phasenumwandlung (fest-flüssig)

Die zwei Komponenten lösen sich unbeschränkt



$$\Delta\rho_{\text{Legierung}} = Ac(1-c)$$

Die zwei Komponenten lösen sich nicht (im festen Zust.)



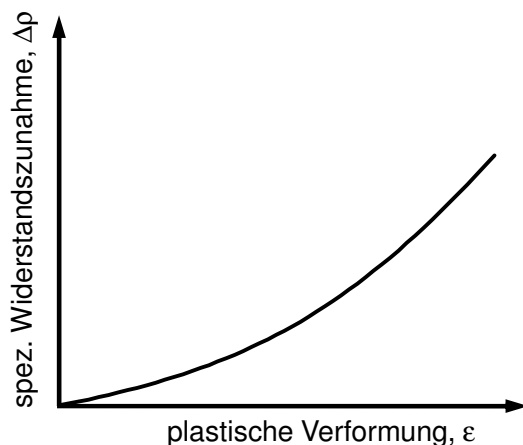
$$\rho_{\text{Legierung}} = \rho_A c_A + \rho_B c_B$$

Nordheimsche-Regel: wenn die Komponenten sowohl Mischkristall als auch zweite Phase bilden der spez. el. Widerstand ist:

$$\rho = \rho_A + (\rho_A - \rho_B)c_B + Ac_B(1 - c_B)$$

Mottsche-Regel: bei Mischkristallen bei kleine Legierungselementkonzentrationen die $(1-c)$ wird ungefähr 1, also der in eine (z.B.: A) Komponenten reiche Legierung wird die Widerstandszunahme durch Komponente B verursacht gleich mit der Widerstandszunahme sein was Komponente A in einer Legierung reich an Komponente B verursacht.

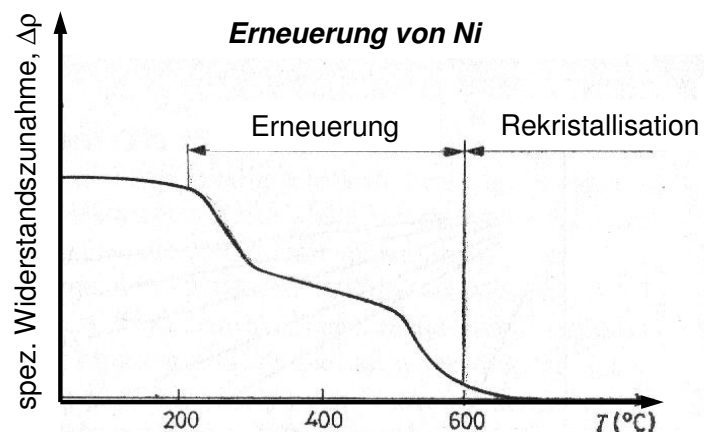
$$\Delta\rho = Ac \Rightarrow \Delta\rho_{AB} = \Delta\rho_{BA}$$



Plastische Verformung \Rightarrow
Leerstellen, Versetzungen

$$\Delta\rho_\epsilon = k \cdot \epsilon^n$$

$$\ln \Delta\rho_\epsilon = n \ln \epsilon + \ln k$$



Durch Rekristallisation das System geht zum Gleichgewicht $\Rightarrow \rho$ sinkt.

Einfluss des Druckes (hydrostatisch): ρ wächst

Einfluss der Schichtdicke

Wenn der freie Laufweg von e- vergleichbar mit der Schichtdicke wird

k: Oberflächenqualität

a: Form (Draht, Blech)

d: Dicke, Durchmesser

λ : freie Laufweg der e-

$$+ \Delta\rho = k \cdot a \cdot \rho \cdot \frac{\lambda}{d}$$

$$\lambda = v_{drift} \cdot \tau$$

Mat. für Stromleitungen:
Cu und Cu-Legierungen
Al und Al-Legierungen
Fe und Fe-Legierungen

Aktive Komp. der Thermoelemente

Cu - Konstantan
Fe – Konstantan
Ni – CrNi, Pt – PtRh

Mat. für el. Kontakte
kleine Übergangswiderstand
gute Wärmeleitfähigkeit
gute Lichtbogenfestigkeit
große Festigkeit
Verschleißfestigkeit
z.B.: Au, Ag, W, Pt,
Cu-Ag, Cu-Ag-Au,
Verbundwerkstoffe
z.B.: Ag-CdO

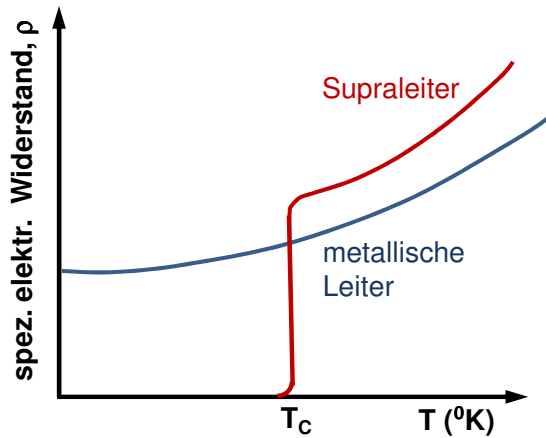
Glas- und Keramische Leiter

kleine Wärmeausdehnungskoeffizient
z.B.: Fe – Ni Legierung
36-42% Ni

Bimetalle

zwei Materialien mit
verschiedene Wärmeausdehnungskoeffizienten
zusammengewalzt

Lötmittel



Kamerlingh Onnes 1911 (Hg)
28 Element und mehr
als 1000 Verbindungen

Nb ₃ Sn	18,5°K	βW
Nb ₃ Al	18,0°K	βW
V ₃ Si	17,0°K	βW
V ₃ Ga	16,8°K	βW
Nb	9,5°K	Krz

Supraleiter verlieren unter eine kritische Temperatur ihre elektrischer Widerstand

Ein Element kann nicht Supraleiter sein wenn:

- einwertig ist
- geordnete magnetische Struktur hat.

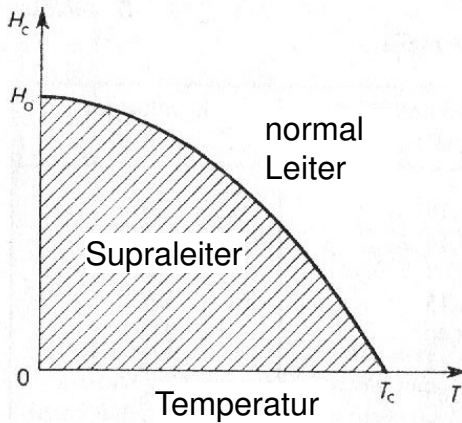
Siedepunkte:

Sauerstoff	90,2°K
Stickstoff	77,5°K
Wasserstoff	20,3°K
Helium	4,25°K

Supraleiter Elemente im Periodensystem

H																	He					
<i>Li</i>	<i>Be</i>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: small;">wird auf Umgebungsdruck Supraleiter</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: small;">wird nur auf hohem Druck Supraleiter</div> </div>														<i>B</i>	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	Ne	
Na	Mg															<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	Cl	Ar	
K	<i>Ca</i>	<i>Sc</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	Cr	Mn	<i>Fe</i>	Co	Ni	Cu	<i>Zn</i>	<i>Ga</i>	<i>Ge</i>	<i>As</i>	<i>Se</i>	<i>Br</i>	Kr					
Rb	<i>Sr</i>	<i>Y</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	Mo	<i>Tc</i>	<i>Ru</i>	<i>Rh</i>	Pd	Ag	<i>Cd</i>	<i>In</i>	<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Te</i>	<i>I</i>	Xe					
<i>Cs</i>	<i>Ba</i>	<i>La</i>	<i>Hf</i>	<i>Ta</i>	W	<i>Re</i>	<i>Os</i>	<i>Ir</i>	Pt	Au	<i>Hg</i>	<i>Tl</i>	<i>Pb</i>	<i>Bi</i>	Po	At	Rn					
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt														

<i>Ce</i>	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	<i>Lu</i>
<i>Th</i>	<i>Pa</i>	<i>U</i>	Np	Pu	<i>Am</i>	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



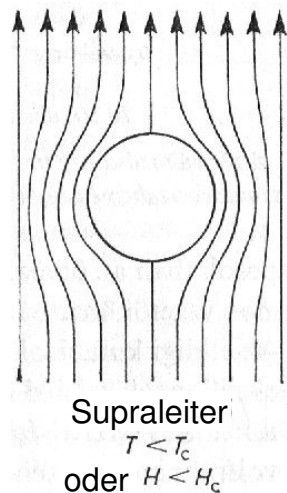
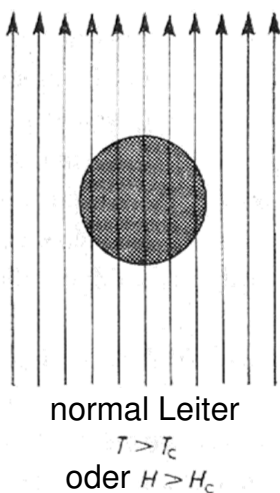
$$H = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \quad H = \frac{j}{2r\pi}$$

- H: magnetische Feldstärke
- H_0 : kritische magnetische Feld
- T: Temperatur
- T_C : kritische Temperatur
- j: Stromdichte
- r: Radius der

Der Supraleiter Zustand kann nicht nur durch eine kritische Temperatur sondern auch durch eine kritische magnetische Feldstärke auch verloren werden. Diese Feldstärke kann auch durch die Stromstärke im Supraleiterleitung erreicht werden, deswegen können Supraleiter nicht für beliebig große stromdichten gebraucht werden.

Feldlinie des magnetischen Feldes sind ausgeschoben

Supraleiter: ideales Diamagnet (I. Art)

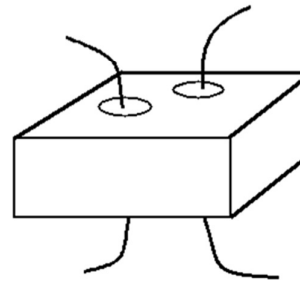
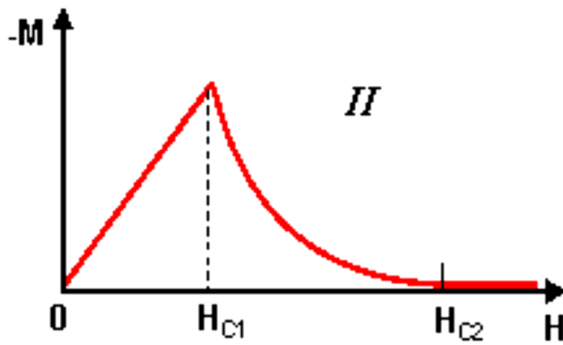
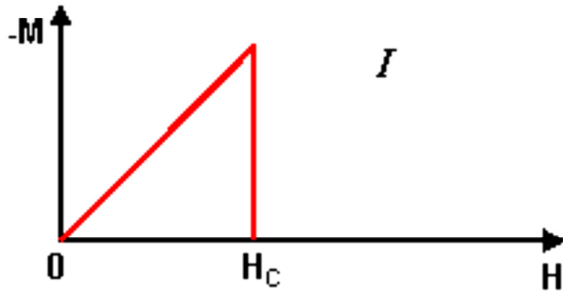


$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{H} + \bar{M}) = 0$$

$$\bar{M} = \kappa \bar{H}$$

$$B = 0 \Rightarrow \bar{H} = -\bar{M} \Rightarrow \kappa = -1$$

- B: magnetische Induktion
- μ_0 : magnetische Permeabilität
- M: Magnetisierung
- k: Suszeptibilität



Magnetisierung der Supraleiter I. und II. Art im abhängig der äußere Feldstärke

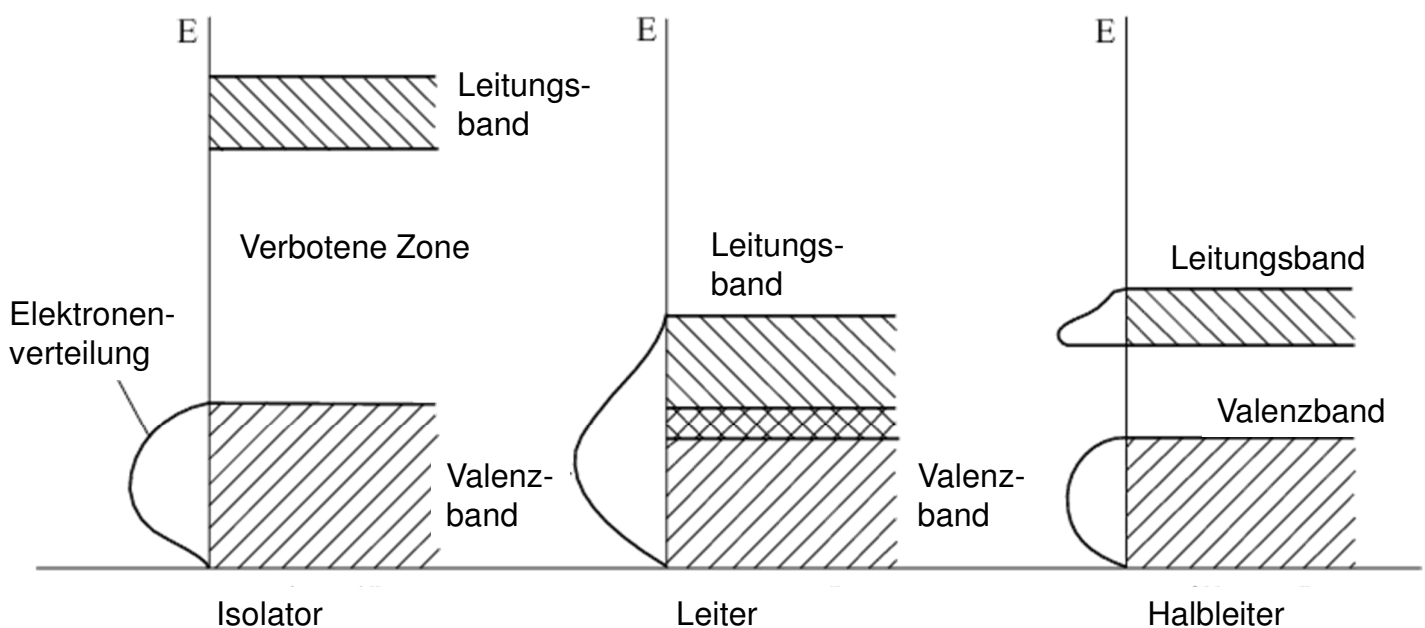
H_{c1} : untere kritische Feldstärke
 H_{c2} : obere kritische Feldstärke

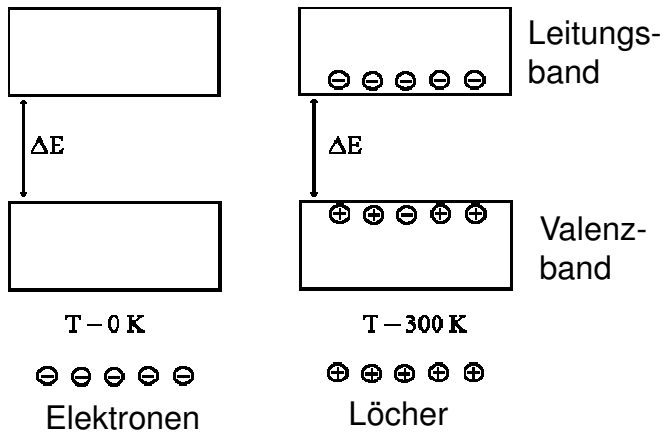
unter H_{c1} : ideales Diamagnet

H_{c1} - H_{c2} : H Feld dringt ins Material ein

				Al	
				1,18	
Ti	V		Zn	Ga	
0,39	5,03		0,86	1,09	
Zr	Nb	***	Cd	In	Sn
0,55	9,5		0,52	3,41	3,72
	Ta		Hg	Tl	Pb
	4,48		4,15	2,37	7,19

- Elementare Supraleiter
- Supraleiter Legierungen
- Verbindungen (intermetallisch)
- Keramiken (spröd, zerbrechlich, hohe T_c)





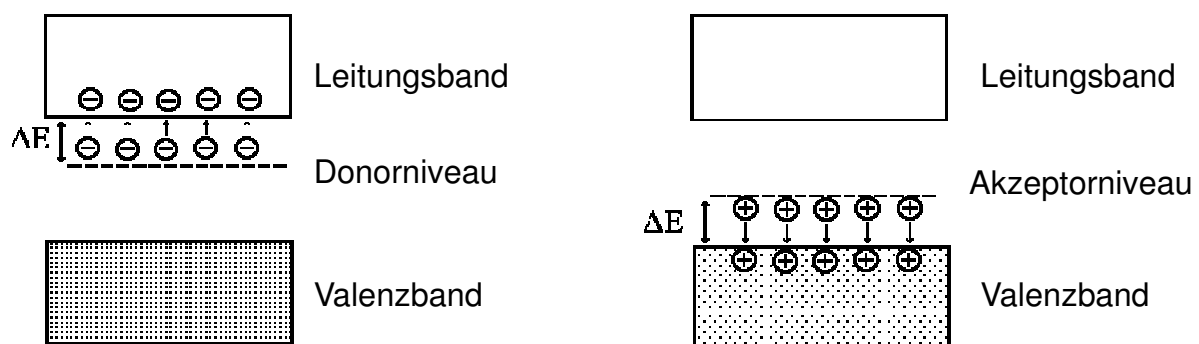
Durch Erregung (z.B.: Temperatur, oder elektromagnetische Bestrahlung (Licht, Röntgenstr.)) die Elektronen können vom Valenzband ins Leitungsband übergehen, damit wird das Material elektr. leitend. An Stellen der Elektronen im Valenzband werden fiktive Partikel mit positive Ladung "Löcher" entstehen.

Extrinsic (Störstellenhalbleiter, gedopt)

n-Typ, Donatoren, fünfwertig (P, As, Sb)

p-Typ, Akzeptoren, dreiwertig (B, Al, In, Ga)

Zusatz: Substitutionslegieren (unter der Lösungsgrenze) (normal Niveaus: $n \cdot 10^{14} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) Bei n-Typ die Elektronen, bei p-Typ die Lochzahl vervielfacht sich so werden Elektronen- und Lochleiter Zusatzniveaus in der verbotene Zone (entarte HL)



	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>
<i>II</i>	Be	B	C	N	O	
<i>III</i>	Mg	Al	Si	P	S	Cl
<i>IV</i>	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br
<i>V</i>	Zn	In	Sn	Sb	Te	I
<i>VI</i>	Sr		Pb	Bi	Po	At
<i>VII</i>	Cd					

Elementare Halbleiter (Si, Ge...)

Mischkristallhalbleiter: binär, ternär, katernär... ($A^{III} B^V$, $A^{II} B^{VI}$)

DANKE FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT !