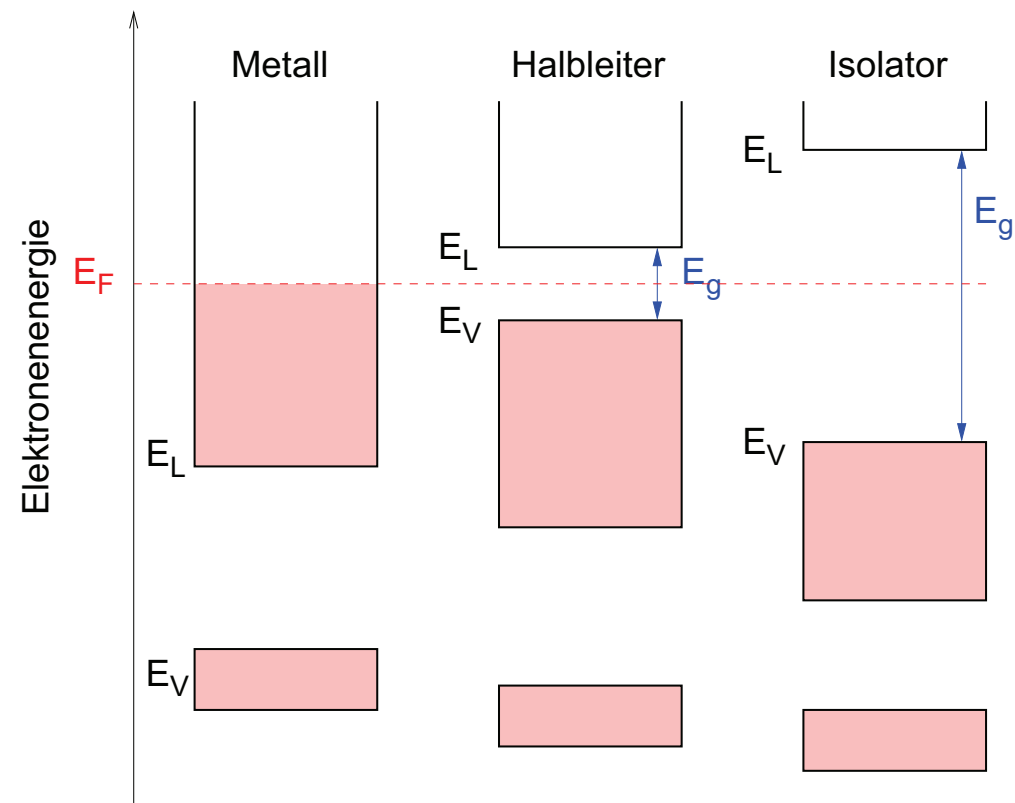


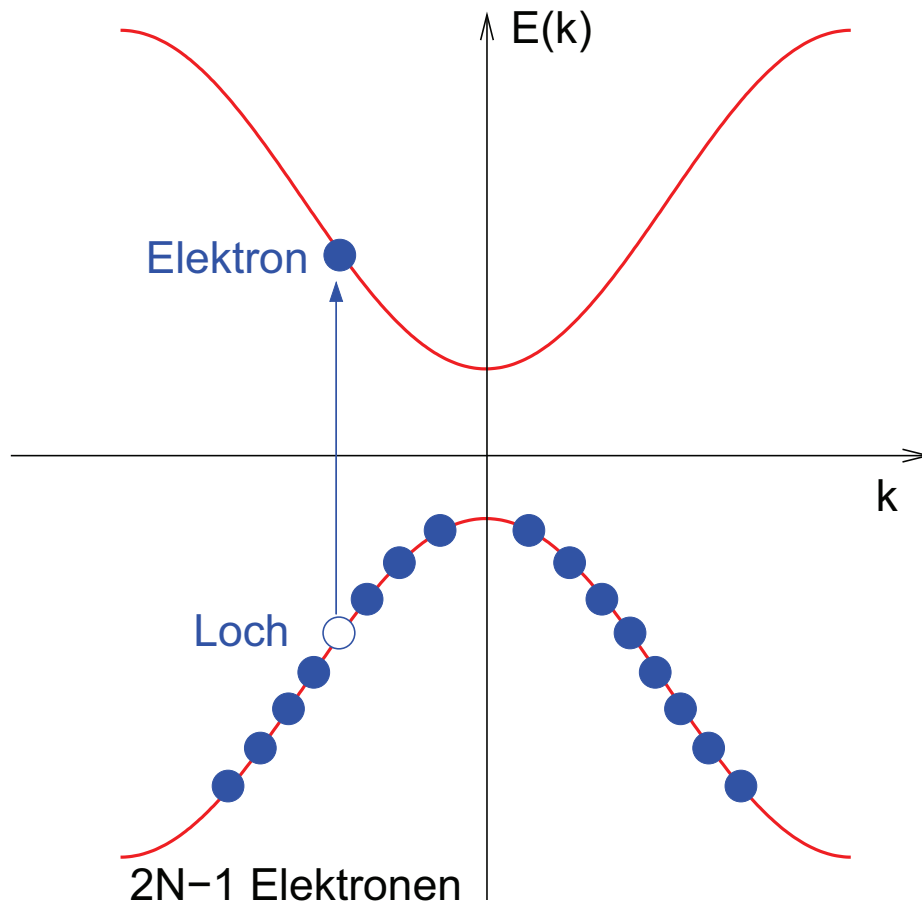
Halbleiter

Halbleiter

- Wie unterscheiden sich Halbleiter von anderen Materialien wie Metallen und Isolatoren ?



- Ladungstransport in reinen Halbleitern
intrinsische Leitung durch Elektronen im Leitungsband und
Löchern im Valenzband
- Löcher ?



- Leitungsband

$$E(k) = E_L + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}$$

$$m_e^* > 0$$

- Valenzband

$$E(k) = E_V + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}$$

$$m_e^* < 0$$

- Um das Zentrum der 1. BZ (Γ -Punkt) Bänder durch Parabeln genähert
- Beschreibung der Bewegung der $2N - 1$ Elektronen im Valenzband durch Beschreibung der Bewegung des **Loches**
- Erzeugung des Elektron-Loch-Paar durch Photoabsorption
Impuls des Photons $\ll \hbar \frac{\pi}{a} \Rightarrow$ Übergang \approx senkrecht im k-Raum
- Volles Band: Gesamtimpuls des vollen Bandes verschwindet

$$\sum_1^{2N} \vec{k}_e = 0$$

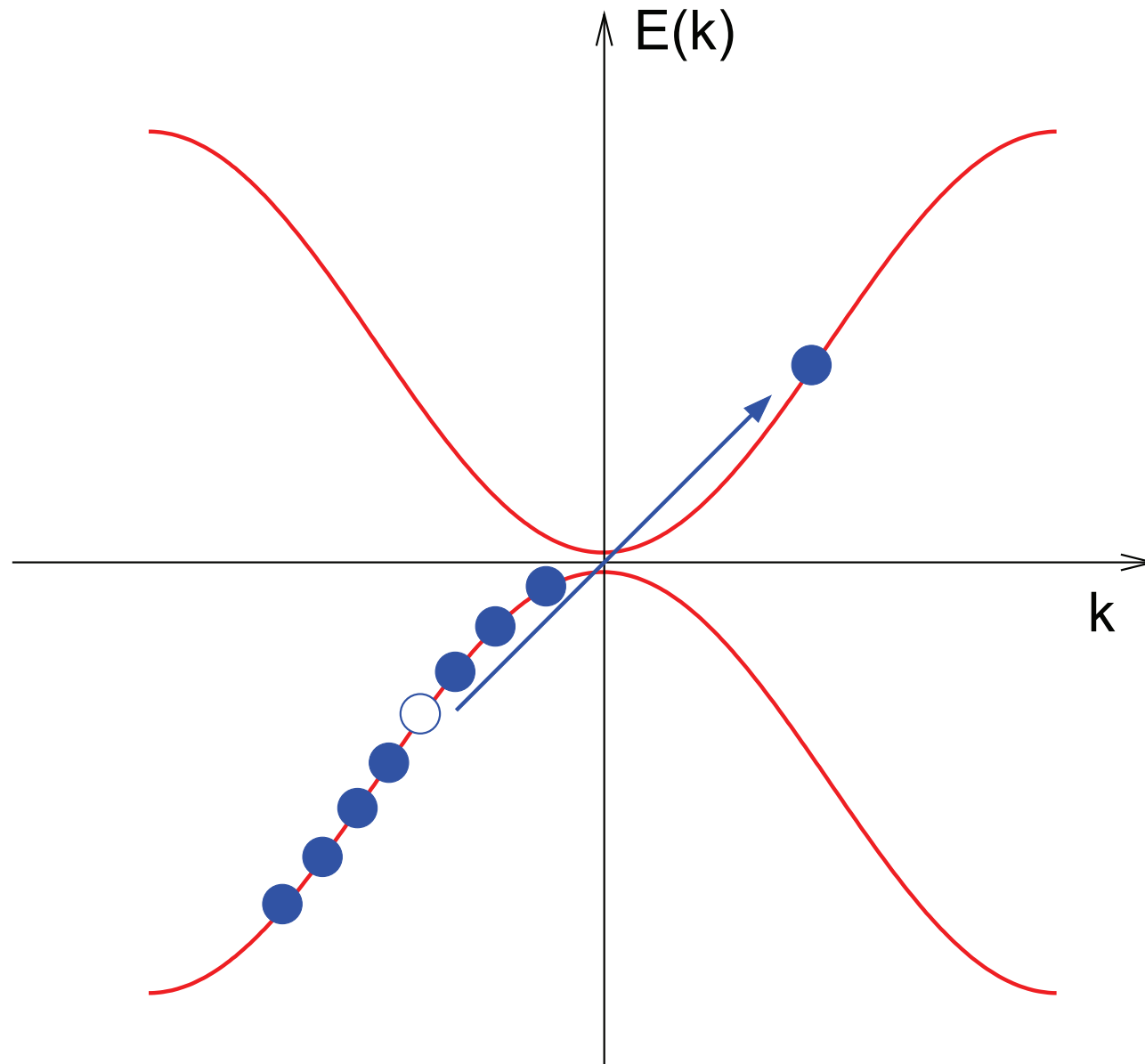
- Band mit einem Loch

$$\sum_1^{2N-1} \vec{k}_e + \vec{k}_e = 0$$

Effektive Masse des Lochs $m_e^* < 0$

\Rightarrow Für die Impulserhaltung muß somit $\vec{k}_e \rightarrow -\vec{k}_L$ überführt werden.

Löcher



- Eigenschaften von Löchern

$$m_L^* = -m_e^* \quad (160)$$

$$\vec{k}_L^* = -\vec{k}_e^* \quad (161)$$

- Wie bewegt sich ein Loch unter dem Einfluß eines äußeren Feldes ?

Fehlendes Elektron durch ein Wellenpaket beschreiben, das sich mit der Gruppengeschwindigkeit

$$m_e^* < 0 \quad v_{g_e} = \frac{1}{\hbar} \frac{dE_e(k)}{dk} = -\frac{\hbar k}{m_e^*} = \frac{\hbar k}{|m_e^*|}$$

$$m_L^* = -m_e^* \quad v_{g_L} = \frac{1}{\hbar} \frac{dE_L(k)}{dk} = \frac{\hbar k}{m_L^*} = \frac{\hbar k}{m_L^*}$$

bewegt. Damit ist

$$\vec{v}_L^* = \vec{v}_e^* \quad (162)$$

- Unter Einfluß eines elektrischen Feldes würde sich das Elektron wegen der negativen effektiven Masse in Richtung von E bewegen. Das Loch bewegt sich in Richtung von E , da $m_L^* < 0$

$$E_L = -E_e \quad (163)$$

- Typische Bandlücken von Halbleitern

Material	$E_{gap}(eV)$	
Si	1.12	Elementarhalbleiter
Ge	0.67	
GaAs	1.43	III-V Halbleiter
InSb	0.18	
CdS	2.42	II-VI Halbleiter
PbSe	0.27	

Eigenleitung

- Bei $T = 0$ sind Halbleiter Isolatoren
- Für $T > 0$ werden aber aufgrund der Fermi-Verteilung einige Valenzelektronen auch im Leitungsband sein
- Fermi Verteilung

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} \quad (164)$$

- Für $E_g \gg k_B T$ ist

$$f(E) \approx e^{-(E-E_F)/k_B T}$$

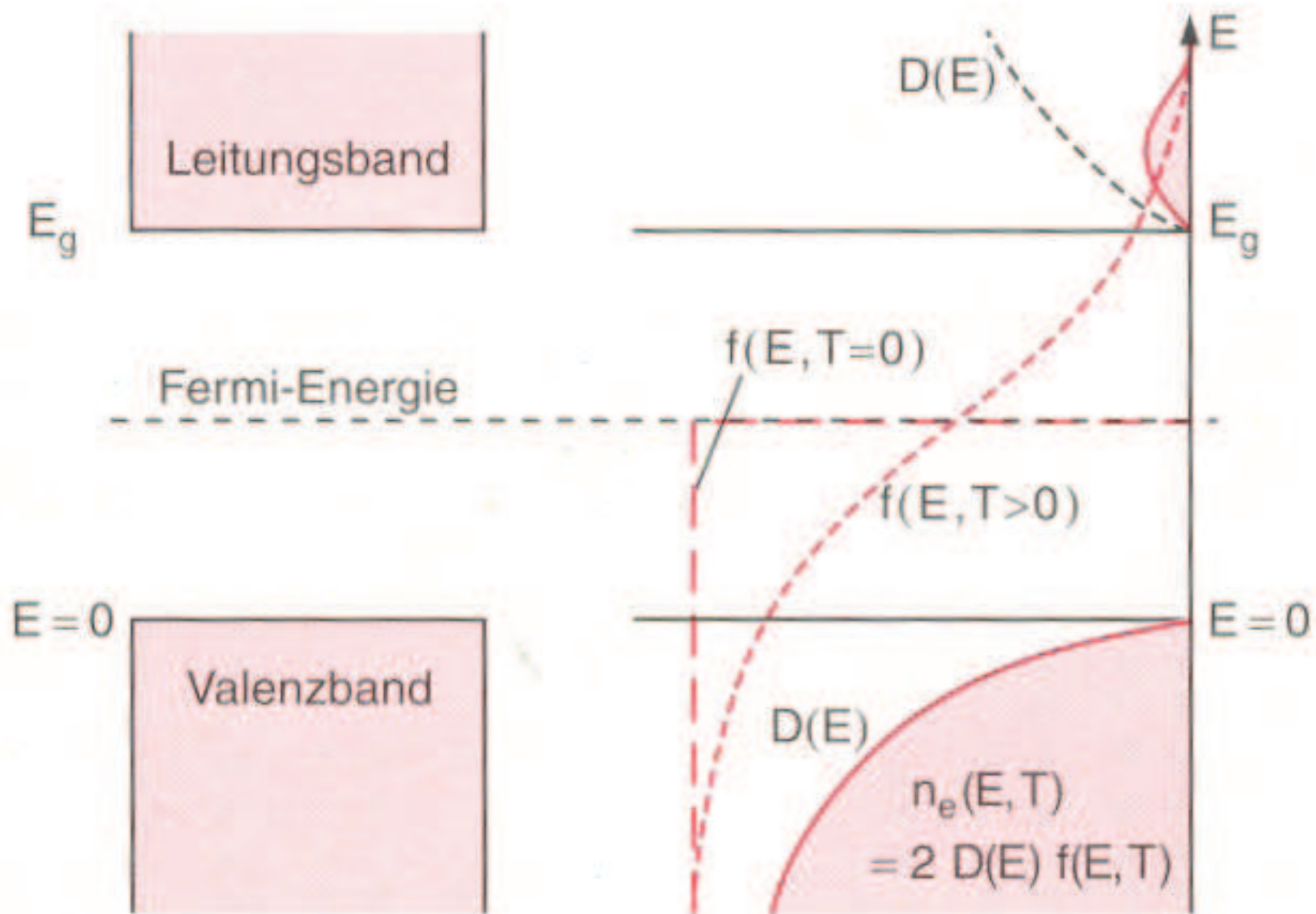
- Effektive Massen Näherung

$$E = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \text{ um den } \Gamma \text{ Punkt im Leitungsband}$$

Damit gilt

$$g(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} \quad (165)$$

- Modifizierte Zustandsdichte des freien Elektronengases, bei der m durch m_e^* ersetzt wird.
- Massenwirkungsgesetz
- Voraussetzung $E_g \gg k_B T$
thermische Erzeugung von Elektron-Loch Paaren
Halbleiter nicht entartet und undotiert



- Konzentration der Elektronen im Leitungsband (intrinsisch)

$$n_{int} = \int_{E_g}^{\infty} g(E) f(E) dE \quad (166)$$

$$= 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E-E_F)/k_B T} \quad (167)$$

Dazu benutzt

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{\Gamma(n+1)}{a^{n+1}}; \Gamma(3/2) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

- Analoges Vorgehen bei der Bestimmung der Löcher

$$f_L(E) = 1 - f_e(E) \approx e^{-(E-E_F)/k_B T} \quad (168)$$

da

$$f_L(E) = 1 - \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} \approx 1 - 1 + e^{-(E-E_F)/k_B T} + \dots$$

Störstellen

- Achtung $E < 0$ im Valenzband

$$g_L(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_L^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (-E)^{1/2} \quad (169)$$

- Lochkonzentration ist damit

$$p_{int} = \int_{-\infty}^{E=0} g_L(E) f_L(E) dE \quad (170)$$

$$= 2 \left(\frac{m_L^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_F/k_B T} \quad (171)$$

- Gleichgewichtsbedingung

$$n_{int} \cdot p_{int} = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^3 (m_e^* m_L^*)^{3/2} e^{-E_g/k_B T} \quad (172)$$

- Massenwirkungsgesetz ist somit unabhängig von E_F und gilt somit auch für dotierte Halbleiter

- n - Dotierung
- p - Dotierung

Unterdrückung der jeweils anderen Teilchensorte

- Ladungsträgerdichten

$$\begin{array}{ll} 300 \text{ K} & \text{Si} \quad n_i \cdot p_i = 4.6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-6} \\ & \text{Ge} \quad n_i \cdot p_i = 3.6 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-6} \end{array} \quad m_e^* = m_L^*$$

- Eigenleitung $n_i = p_i$ eingesetzt

$$E_f \approx \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_L^*}{m_e^*} \quad (173)$$

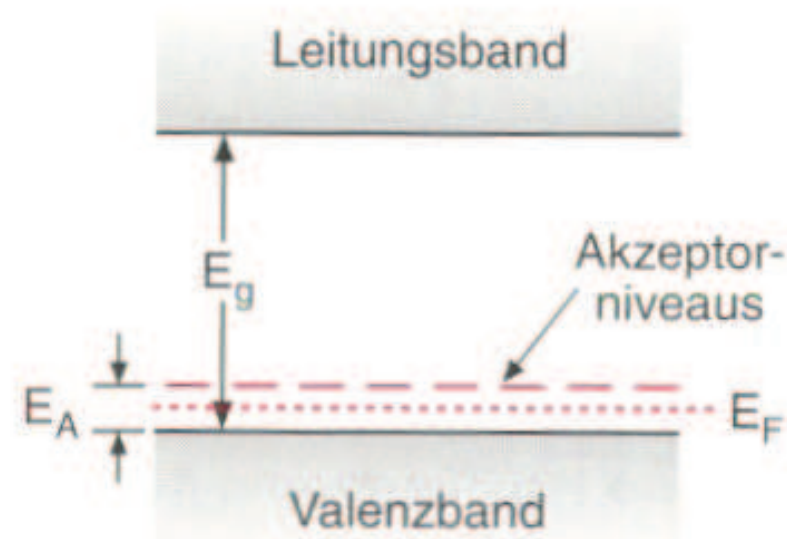
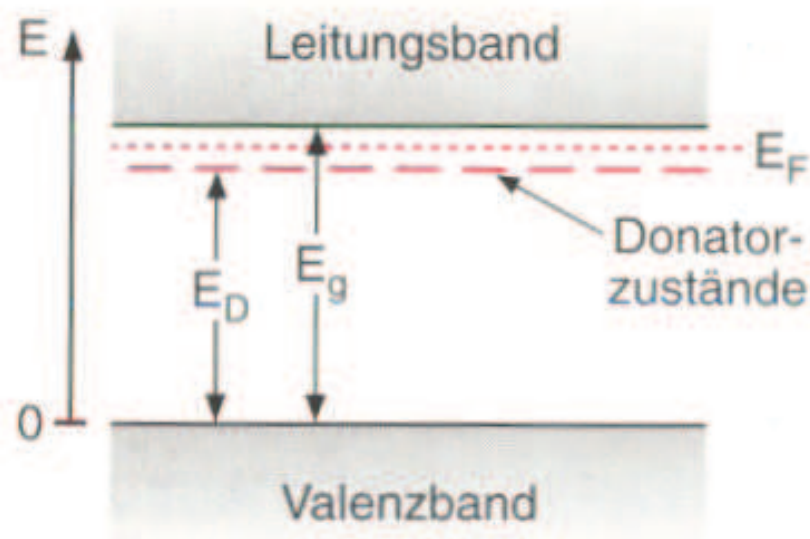
und

$$n_i = p_i = \text{const} \cdot T^{3/2} \cdot e^{-E_g/2k_B T} \quad (174)$$

Ladungsträgerkonzentration wächst exponentiell mit T an

- Einbau von Donatoren und Akzeptoren → Störstellenleitung
- **Donatoren** : überzähliges Elektron e^- wird an das Leitungsband abgegeben

Akzeptoren		Donatoren
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In		Sb



- Ionisierungsenergien von Donatoren (in meV)

	P	As	Sb
Si	45	49	39
Ge	12	12.7	9.6

- Ionisierungsenergien von Akzeptoren

	B	Al	Ga	In
Si	45	57	65	16
Ge	10.4	10.2	10-8	11.2

- Verunreinigungen: $\approx 2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- Massenwirkungsgesetz gilt auch für dotierte Halbleiter, da E_F nicht darin auftaucht

pn – Übergang

- Neutralitätsbedingung

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

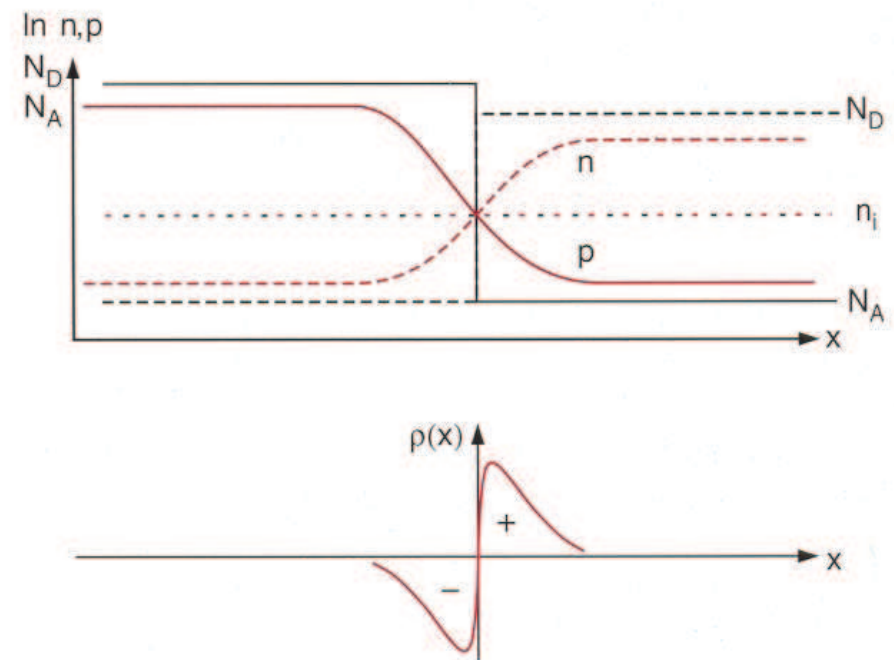
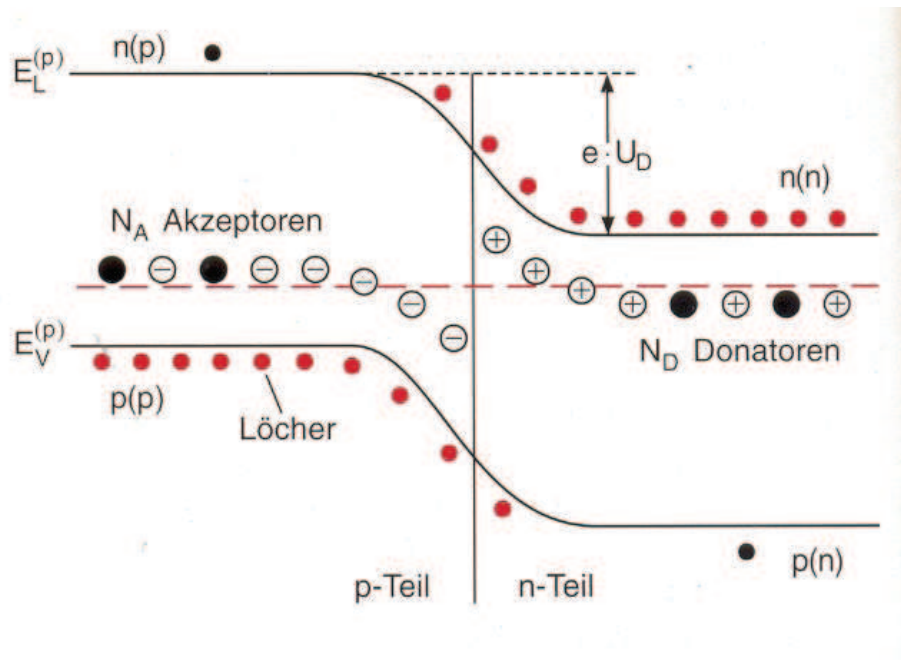
N_A^- Dichte der ionisierten Akzeptoren

N_D^+ Dichte der ionisierten Donatoren

- n-Leiter: $N_A = 0 \Rightarrow n \propto e^{-E_d/2k_B T}$
- n-Dotierung:
 - $k_B T \ll E_d; n \propto e^{-E_d/2k_B T}$
 - $k_B T \approx E_d; n \propto N_D$
 - $k_B T \gg E_d; n \propto e^{-E_g/2k_B T}$
- Analog für p-dotierte Halbleiter

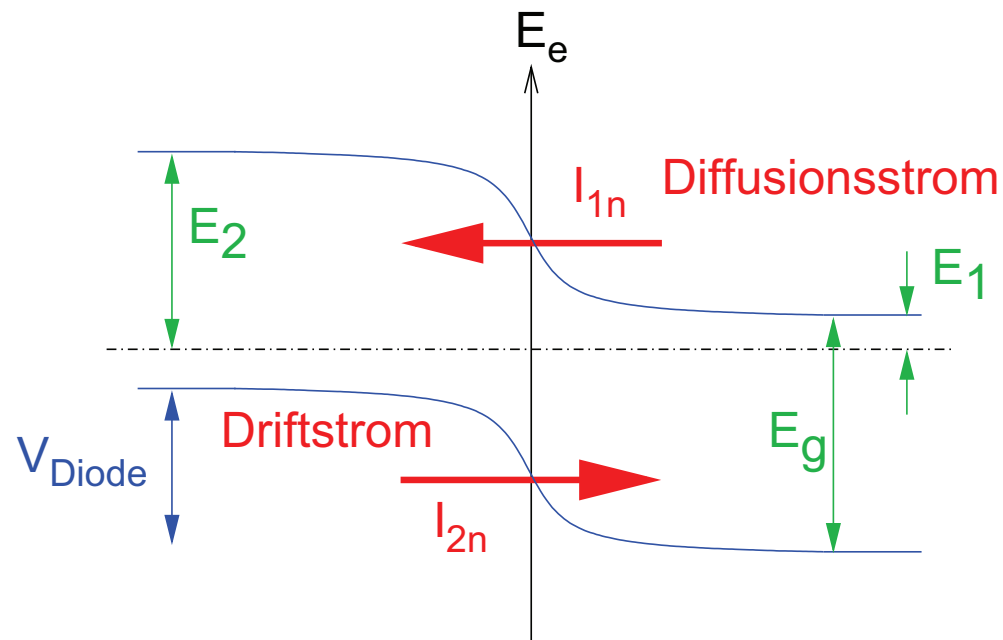
Halbleiter – pn-Übergang

- Kontakt zwischen einem n- und einem p-dotierten Halbleiter



pn-Übergang

- Gleichgewichtszustand
Ströme über die Grenzschicht heben sich auf
Betrachten den Elektronenstrom; Lochstrom analog



- Diffusionsstrom von $n \rightarrow p$
Driftstrom von $p \rightarrow n$

Halbleiter – pn-Übergang

- Diffusionsstrom I_{1n} ist proportional zur Zahl der Elektronen mit Energien über dem Leitungsbandboden

$$I_{1n}^{(0)} \propto e^{-E_1/k_B T}$$

- Driftstrom I_{2n} ist proportional zur Zahl der Elektronen im p-Leiter

$$I_{2n}^{(0)} \propto e^{-E_2/k_B T}$$

- Gleichgewicht

$$I_n^{(0)} = I_{2n}^{(0)} = I_{1n}^{(0)}$$

Keine äußere Spannung für E_F konstant über Verarmungszone

- Thermodynamisches Gleichgewicht

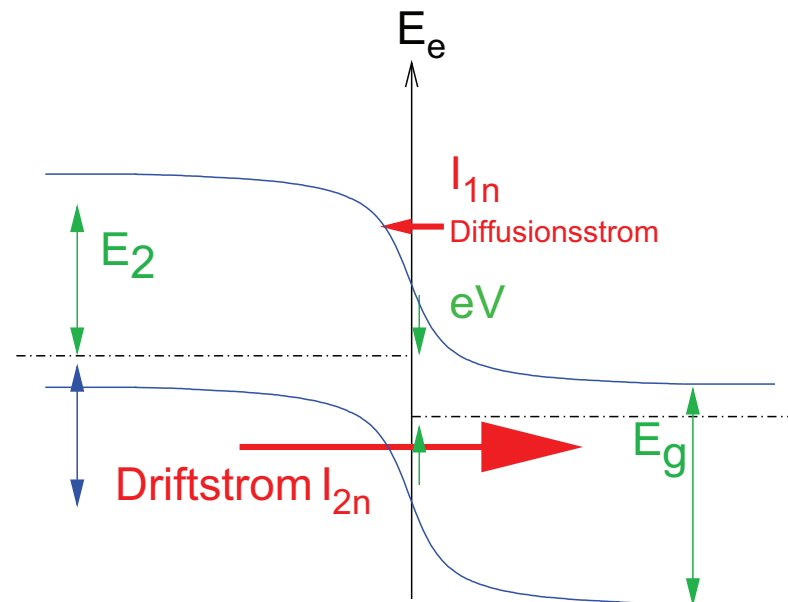
Halbleiter – pn-Übergang

- Für den Spannungsabfall über der Sperrschicht ergibt sich

$$e \cdot V_{Diode} = E_2 \leq E_g \Leftrightarrow V_{Diode} \leq E_g/e \quad (175)$$

- Anlegen einer Sperrspannung**

Anheben der Fermienergie im p-Leiter durch Anlegen einer negativen Spannung



Halbleiter – pn-Übergang

- Sperrstrom:

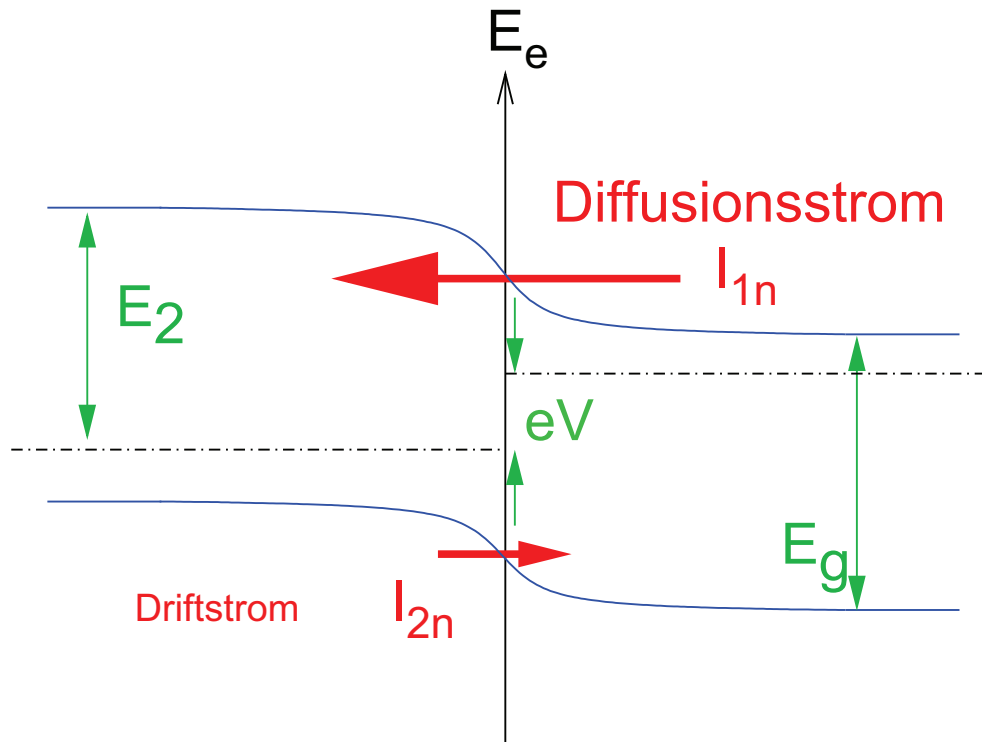
$$I_{n,Sperr} = I_{2n}^{(0)} - \underbrace{I_{1n}^{(0)} \cdot e^{-eV/k_B T}}_{\text{geht gegen Null}} \quad (176)$$

$$= I_n^{(0)} (1 - e^{-eV/k_B T}) \quad (177)$$

pn-Übergang sperrt. Nur die Driftströme bleiben übrig. Diese Driftströme sind proportional zur Zahl der Elektronen im Leitungsband des p-Bereiches und der Zahl der Löcher im Valenzband des n-Bereiches.

- Driftstrom wird durch die Minoritätsladungsträger bestimmt

pn-Übergang



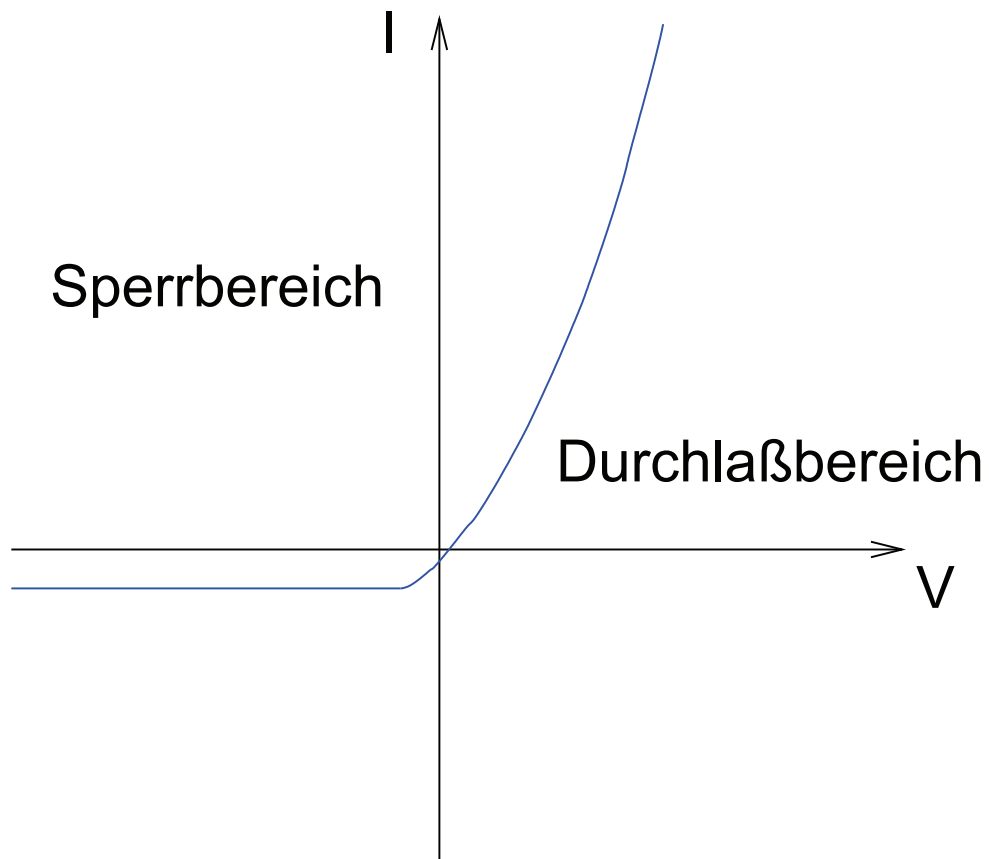
- Anlegen einer Spannung in Durchgangsrichtung

$$I_n(V) = I_n(0) \left(e^{eV/k_B T} - 1 \right) = I_{Sperr} \left(e^{eV/k_B T} - 1 \right) \quad (178)$$

- Zusammenfassen der Ergebnisse zu Elektronen- und Löcherströmen

Halbleiter – pn-Übergang

- Kennlinie des pn-Überganges (pn-Diode)



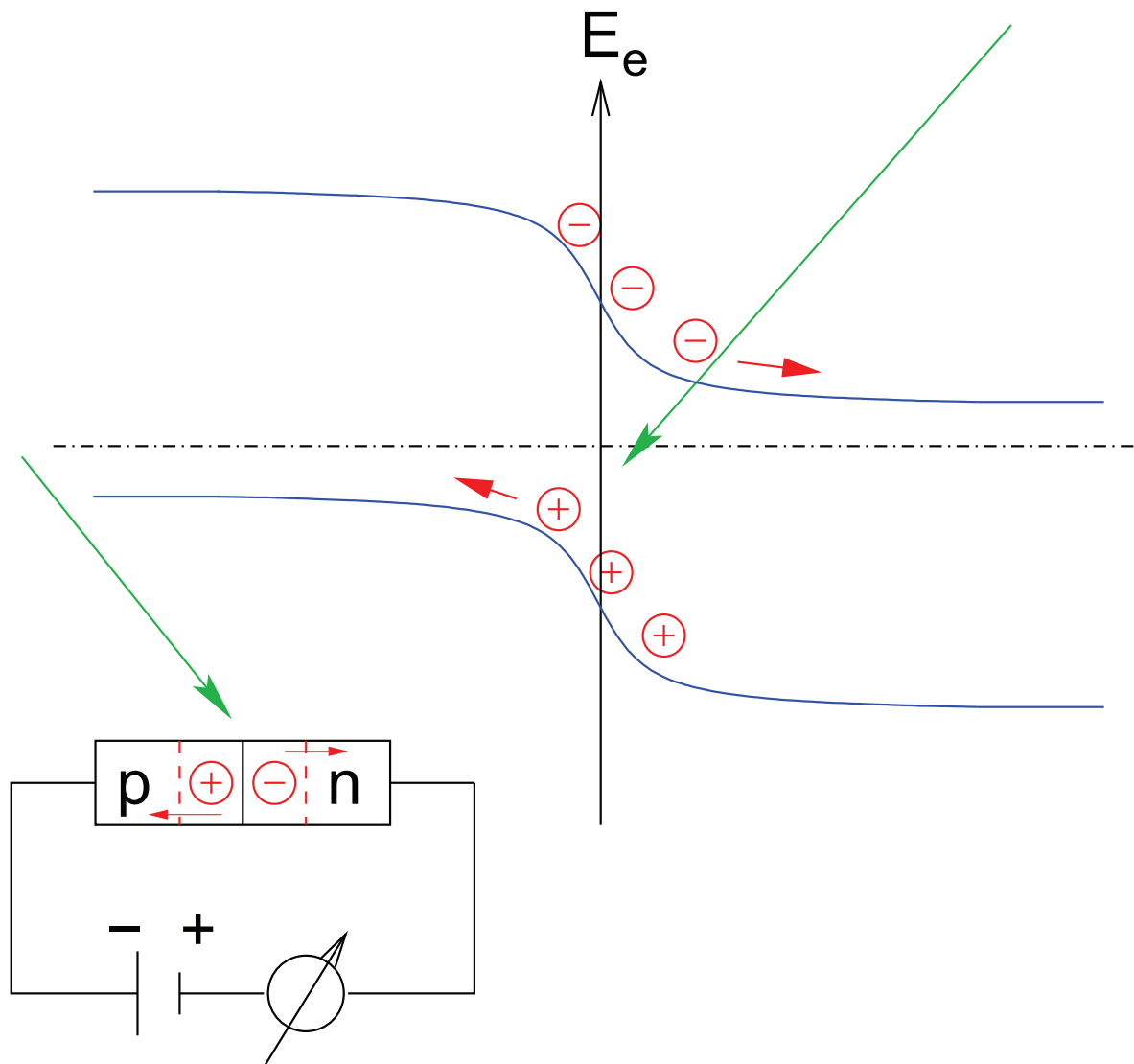
pn-Übergang

- Anwendungen des pn-Überganges
 - Photodetektoren
 - Solarzelle, Photozelle
 - Licht-emittierende Dioden (Diodenlaser)

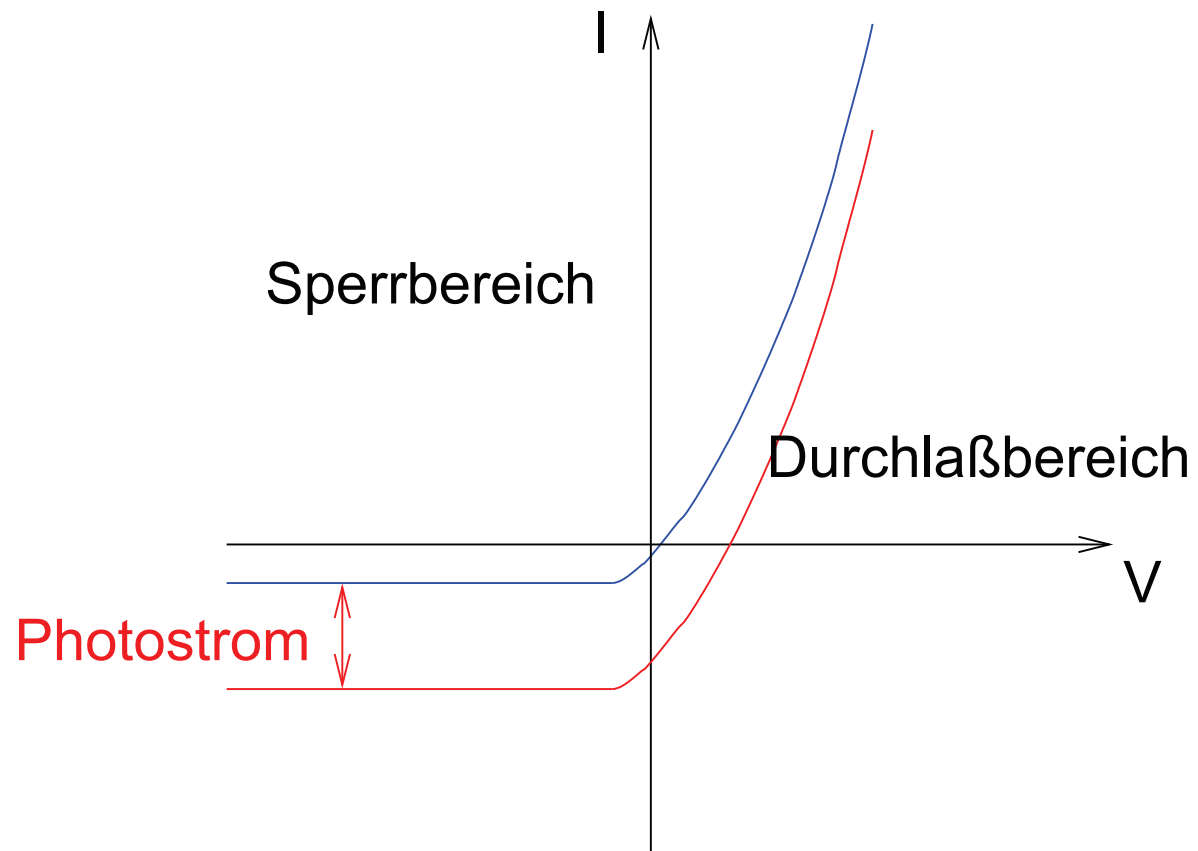
Photodetektoren

- Photonen oder auch geladene Teilchen erzeugen in der Verarmungszone Elektronen-Loch Paare, die vom elektrischen Feld getrennt werden
- Dadurch fließt ein Strom, der als Signal detektiert werden kann
- Problem: Verstärkung \rightarrow Avalanche Photodioden – Lawinendiode
- Zahl der Elektronen-Loch-Paare \propto absorbierte Energie \Rightarrow möglichst vollständige Absorption anstreben
Problem: Dicke der Verarmungszone
- pn-Übergang ist Grundlage vieler Anwendungen in der Photoelektronik: digitale Kameras, Dioden-Arrays, CCD Chips ...

Photodiode



Photodiode – Kennlinie



Photodetektoren

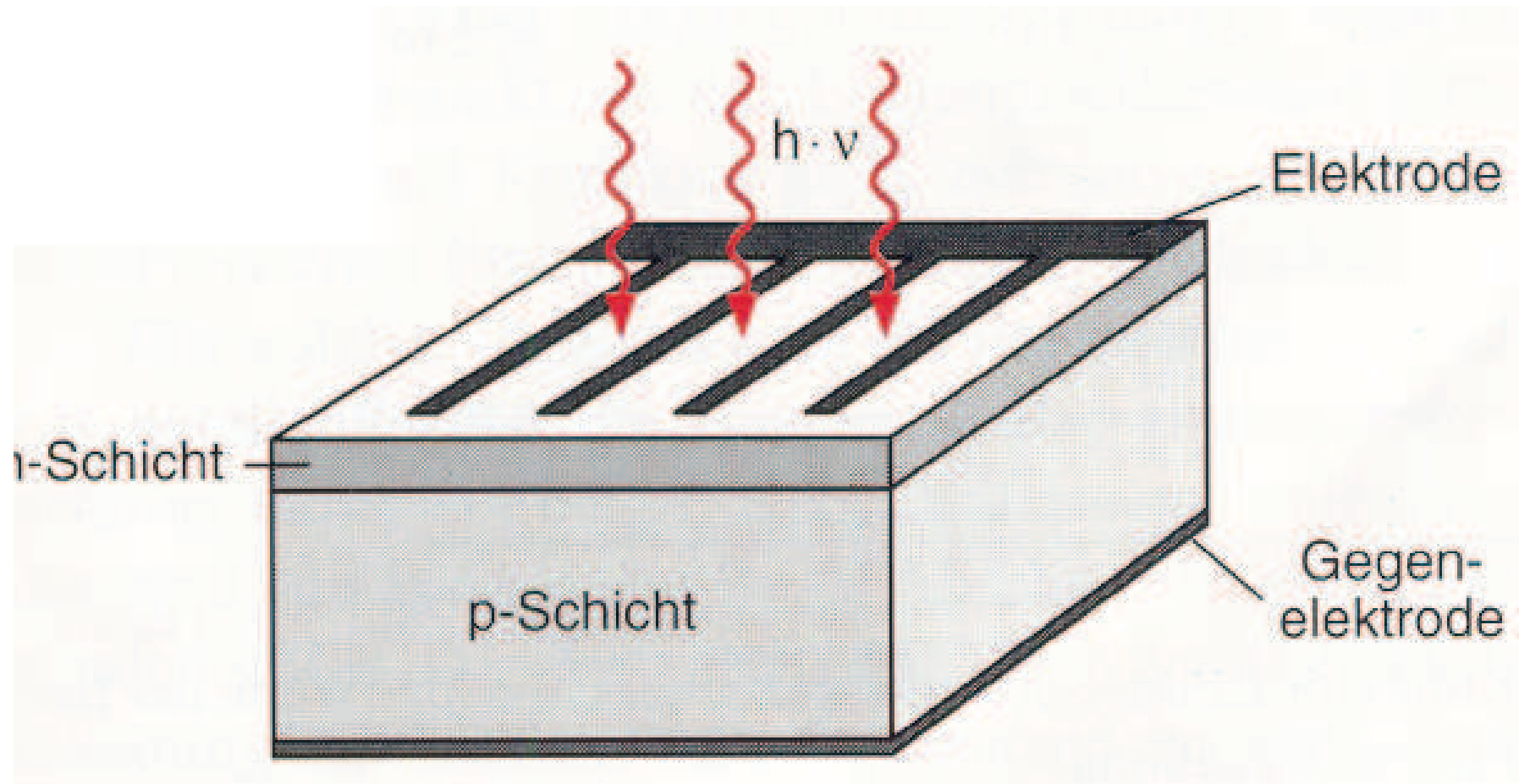
- Solarzelle, Photozelle
Es wird keine äußere Spannung an die Diode angelegt
- Einfallende Photonen erzeugen Elektron-Loch-Paare in der Verarmungszone
- Ladungstrennung durch das Feld resultiert in einem Photostrom \propto zur absorbierten Energie
- Keine Verbindung – offene Pole $\Rightarrow I = 0$

$$I = 0 = I_s(e^{eU_{ph}/k_B T} - 1) - I_{ph}$$

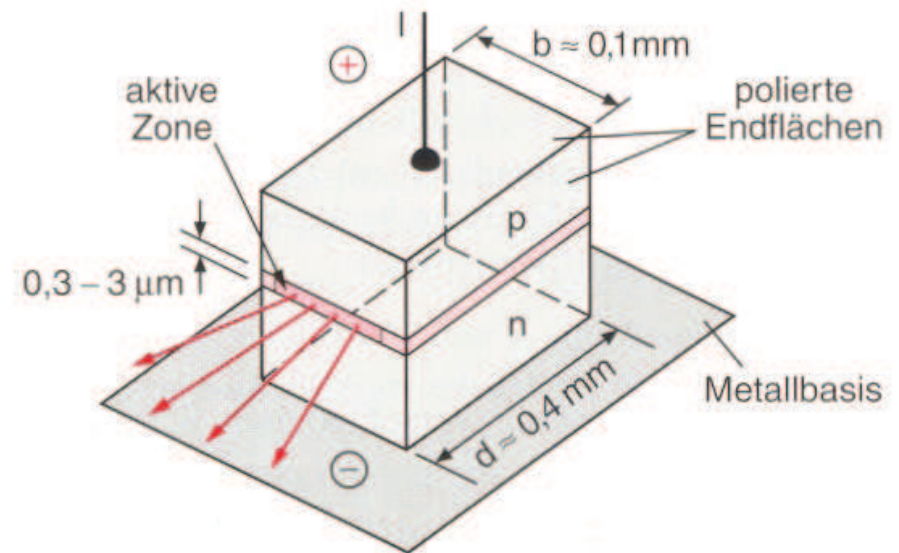
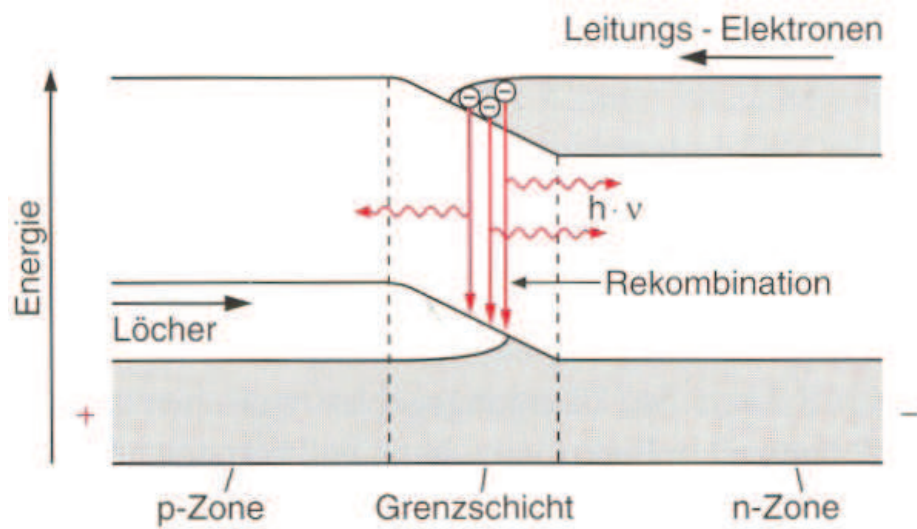
Daraus folgt

$$U_{ph} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sperr}} + 1 \right) \quad (179)$$

pn-Übergang – Solarzelle

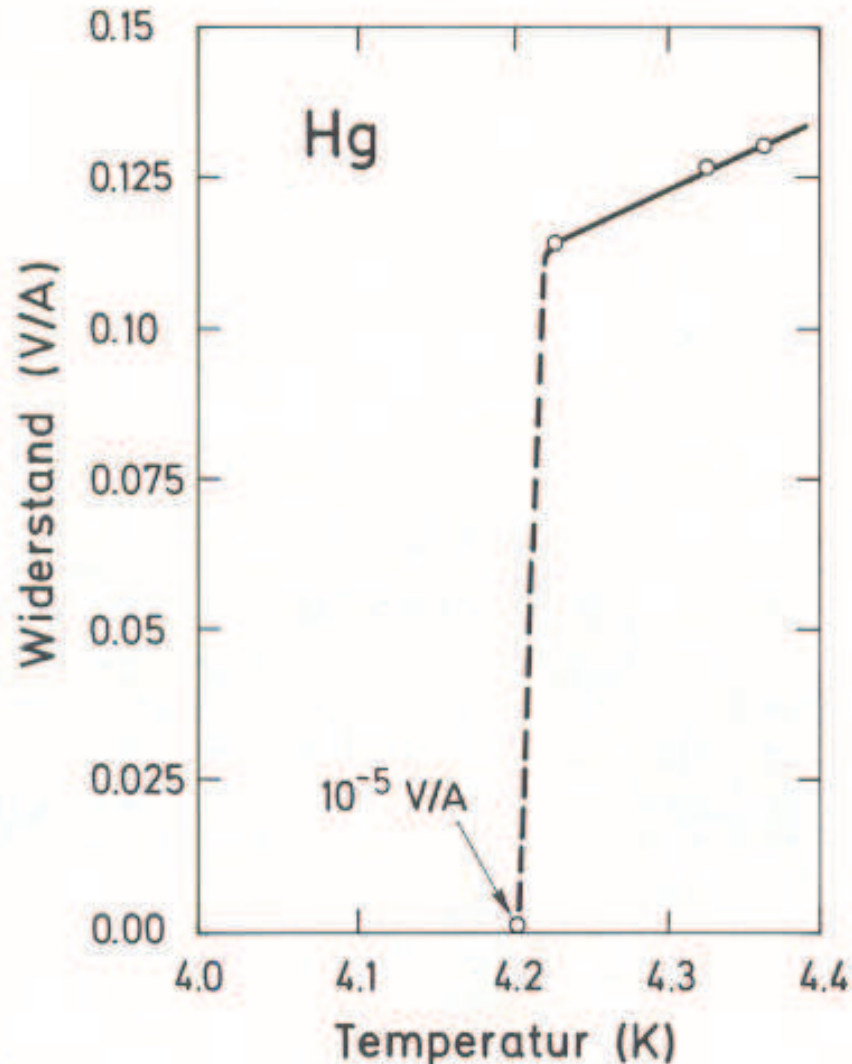


Laserdioden



Supraleitung

- Die **Supraleitung** findet heute in weiten Bereichen Anwendung.



- Entdeckt wurde sie 1911 von Onnes, der den Widerstand von Metallen in Abhängigkeit von der Temperatur untersuchte. Für diese Entdeckung erhielt er 1913 den Nobel Preis für Physik
- Verschwinden des elektrischen Widerstandes unterhalb einer kritischen Temperatur T_c

Supraleitung

- Gemessen wird das Abklingen eines Stromes in einem geschlossenen Kreis

$$I(t) = I_0 e^{-Rt/L}$$

L : Selbstinduktivität

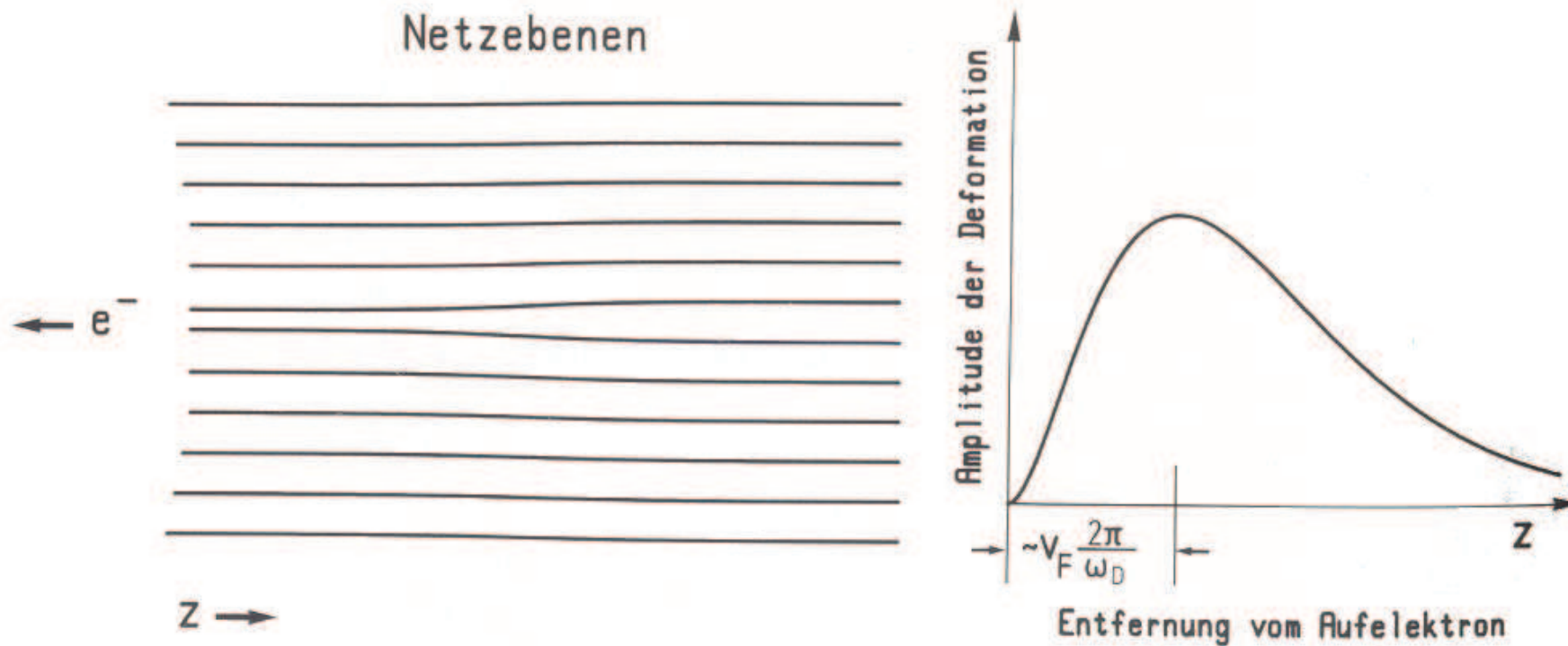
- Erste Messung: Abfall um mindestens 10^{-5}
Aktuelle Messungen: Abfall um mindestens 10^{-14}

Sprungtemperatur der Elemente des Periodensystems

H																	He	
Li	Be 0,03											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al 1,19	Si 5,7	P 4,5-6,1	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti 0,39	V 5,3	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn 0,9	Ga 1,09	Ge 5,4	As 0,5	Se 6,9	Br	Kr	
Rb	Sr	Y 0,5-2,7	Zr 0,55	Nb 9,2	Mo 0,92	Tc 7,8	Ru 0,5	Rh 325 μ	Pd	Ag	Cd 0,55	In 3,4	Sn 3,7;5,3	Sb 3,6	Te 4,5	J	Xe	
Cs 1,5	Ba 1,8;5,1	La 4,8;5,9	Hf	Ta 4,4	W 0,01	Re 1,7	Os 0,65	Ir 0,14	Pt	Au	Hg 4,15 3,95	Tl 2,39 1,45	Pb 7,2	Bi 3,9 7,2;8,5	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac																
			Ce 1,7	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu 0,1-0,7		
			Th 1,37	Pa 1,3	U 0,2	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw		

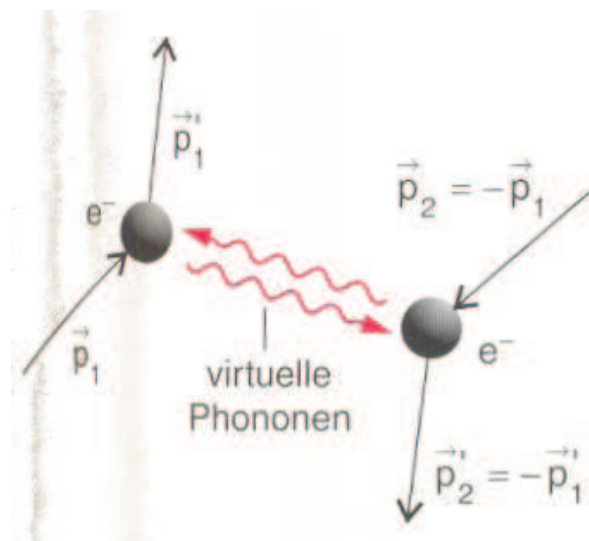
- Was ist die Ursache der Supraleitung ?
- Elektron-Elektron-Wechselwirkung wird wichtig
- Was würde passieren, wenn es eine sehr schwache attraktive Kraft zwischen den Elektronen im Festkörper gäbe ?
 - Instabilität des Fermi-See' s
 - Woher könnte diese Kraft kommen ?
- Betrachte den Weg eines Elektrons durch das Kristallgitter
- Rückwirkung auf das Kristallgitter durch die attraktive Kraft des Elektrons → Spur des Elektrons im Gitter
- Kristallgitterionen sind sehr viel schwerer und langsamer als das Elektron, so daß die Spur des Elektrons für eine endliche Zeit erhalten bleibt
- Ein zweites Elektron sieht dieses modifizierte Potential und kann daran gebunden werden → Dynamische Polarisation

- Großer mittlere Abstand der Elektronen ($\approx 1000 \text{ \AA}$), da die elektrostatische Wechselwirkung dem kleinen anziehenden Effekt entgegen wirkt



- BCS Theorie (J. Bardeen, L. Cooper, R. Schrieffer) 1957 – fast 50 Jahre später
- Bindung von zwei Elektronen zu einem **Cooper-Paar** durch virtuelle Phononen (Gitterschwingungen)
- Quasi-Partikel
- Vergleich mit chemischer Bindung
 - Chemische Bindung → Elektronenkit
 - Supraleitung → Phononenkit

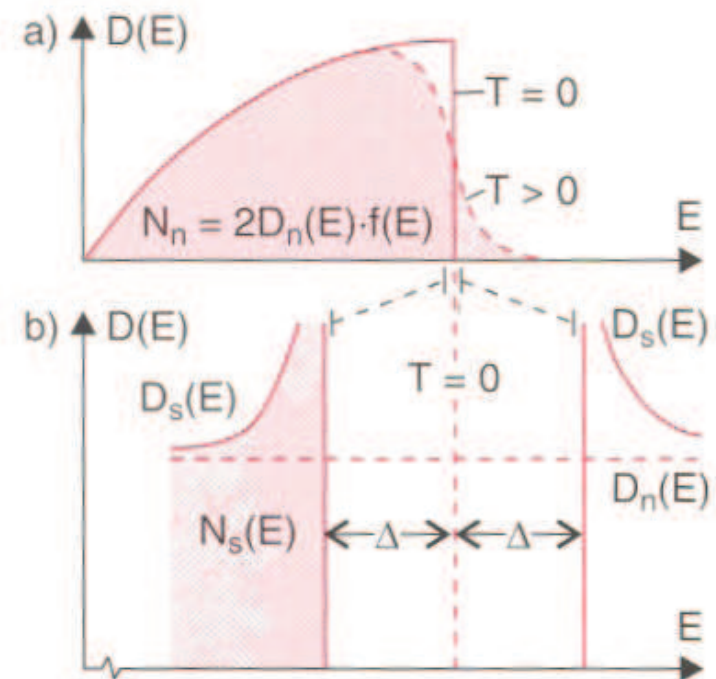
Unterschied: Die Phononen sind virtuell



- Was bewirkt diese Bindung zu Cooper-Paaren und welche Eigenschaften haben sie ?
- BCS Zustandsdichte $D_S(E)$

$$D_S(E) = D_N(E) \frac{E - E_F}{\sqrt{(E - E_F)^2 - \Delta^2}} \quad (180)$$

- $D_N(E)$ Normale Zustandsdichte
- Bildung eines Gap's Δ an der Fermi-Kante



- Für $|E - E_F| < \Delta$ gibt es keine reellen Zustände
- Spins und k -Vektoren der Elektronen in einem Cooper-Paar sind antiparallel ($\vec{k} \uparrow, -\vec{k} \downarrow$) – Cooper Paare sind Bosonen \rightarrow andere Quantenstatistik !
- Nicht Supraleitender Zustand
Alle Zustände unterhalb E_F sind besetzt
- Supraleitender Zustand
 - Elektronen gewinnen Energie durch die Bildung eines Cooper-Paares
 - Energie liegt unterhalb von $E_F \rightarrow$ Unterkante des Supraleitenden Gap's Δ
 - Fermi-See wird instabil
 - Elektronen kondensieren nach und nach zu Cooper-Paaren
- Messung der Zustandsdichte z.B. mit Photoelektronenspektroskopie \rightarrow Erhöhte Dichte im Bereich der Fermi-Kante

- Warum fließt aber ein Suprastrom j_s widerstandslos ?
- Stromleitung: Änderung des Elektronen k Vektors um

$$\frac{1}{2}\vec{K} = -\frac{m}{n_s e \hbar} \vec{j}_s \quad (181)$$

Ein Cooper-Paar $(\vec{k} \uparrow, -\vec{k} \downarrow)$ verändert sich damit um

$$(\vec{k}_1 \uparrow, -\vec{k}_2 \downarrow) = (\vec{k} + \frac{1}{2}\vec{K} \uparrow, -\vec{k} + \frac{1}{2}\vec{K} \downarrow)$$

- Wellenfunktion eines Cooper-Paares $R = (r_1 + r_2)/2$

$$\begin{aligned} \Psi(r_1, r_2) &= \frac{1}{L^3} \sum_k g(k) e^{ik_1 \cdot r_1 + ik_2 \cdot r_2} \\ &= \frac{1}{L^3} \sum_k g(k) e^{iK \cdot (r_1 + r_2)/2 + ik \cdot (r_1 - r_2)} \\ &= e^{iK \cdot R} \frac{1}{L^3} \sum_k g(k) e^{ik \cdot r} = e^{iK \cdot R} \cdot \Psi(K = 0, r_1 - r_2) \end{aligned}$$

- Der Stromfluß bewirkt nur eine Phasenänderung

$$|\Psi(K \neq 0, r)|^2 = |\Psi(K = 0, r)|^2$$

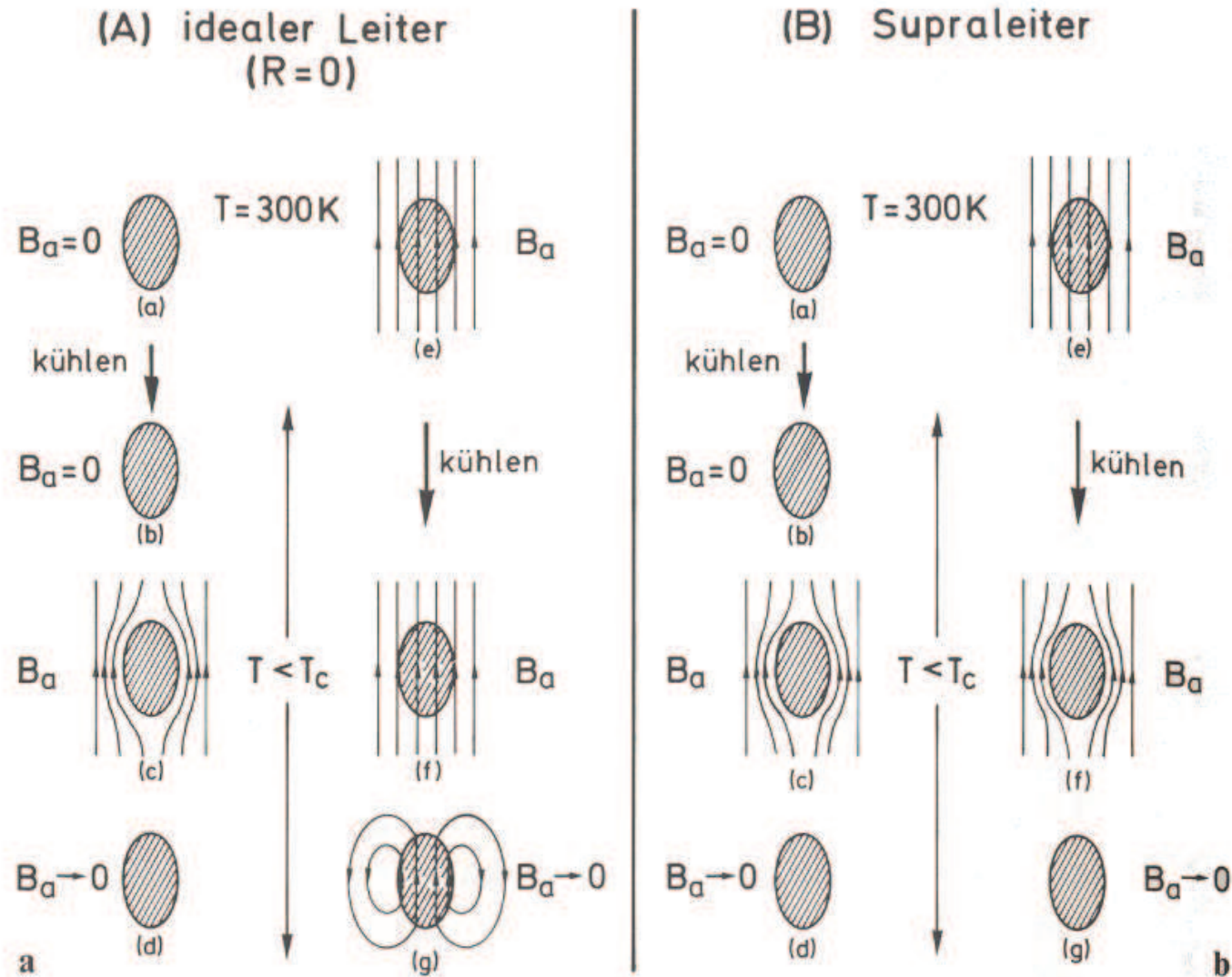
- Verschiebung des Koordinatensystems im k-Raum
- Was verursacht den Widerstand in einem Normalleiter
elastische und inelastische Streuung z.B. durch Phononen
- Im Falle eines Supraleiters muß aber erst das Paar aufgebrochen werden, d.h. es muß eine Energie 2Δ aufgebracht werden
- Aufbrechen eines Cooper-Paares
 - Impulszunahme P muß die Energie um 2Δ erhöhen

- Kritische Stromdichte

$$j_c = \frac{e \cdot n_s \cdot \Delta}{\hbar k_F}$$

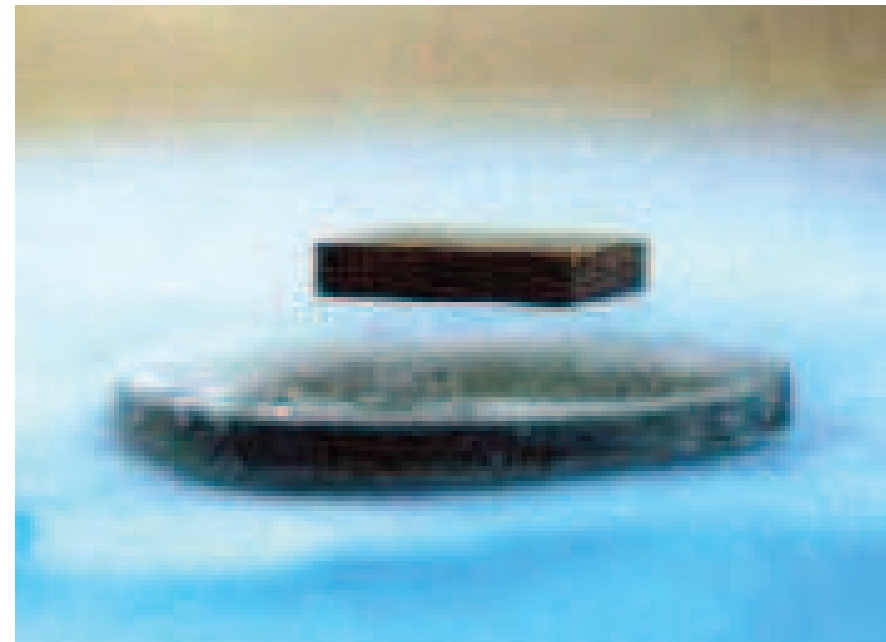
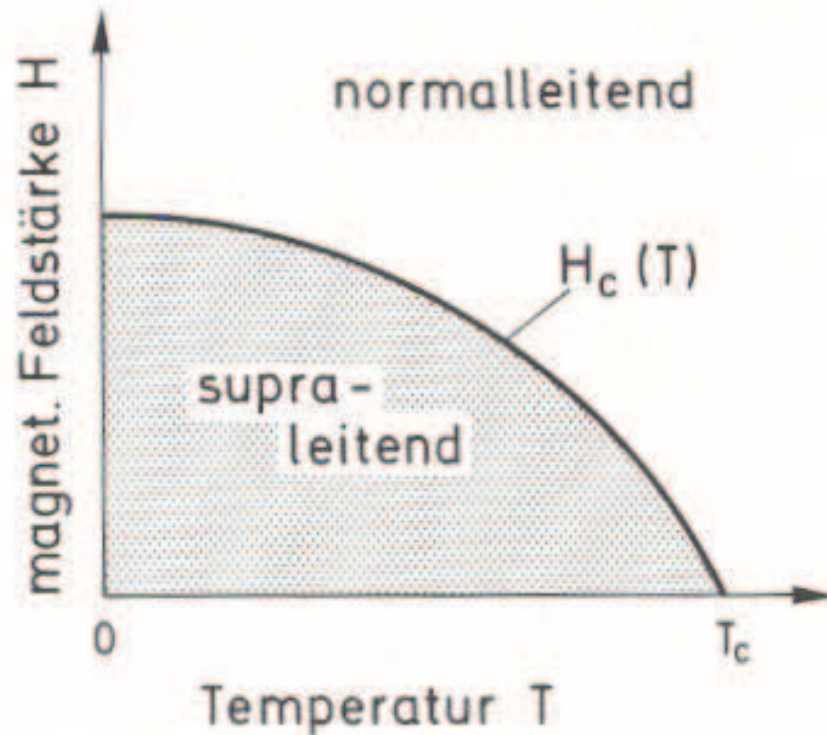
Für Sn beträgt diese z.B. $j_c = 2 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$!

Supraleitung im Magnetfeld



Meissner-Ochsenfeld-Effekt

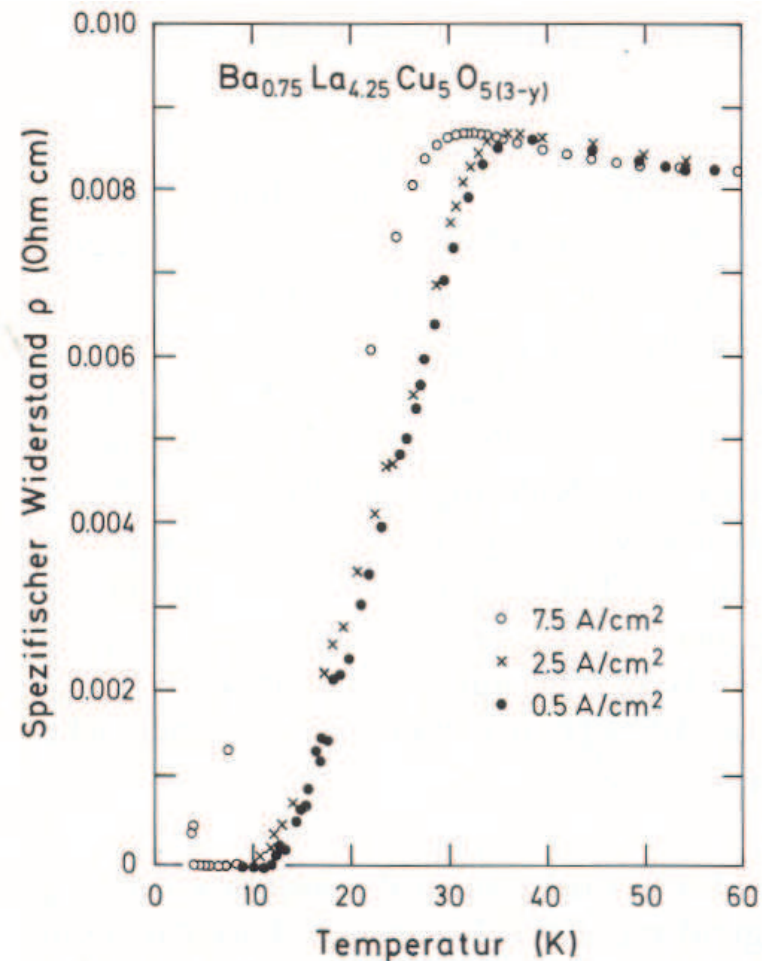
- Das Magnetfeld wird komplett aus dem inneren eines Supraleiters verdrängt
- Supraleitung kann nur bis zu einem kritischen Magnetfeld B_c aufrecht erhalten werden



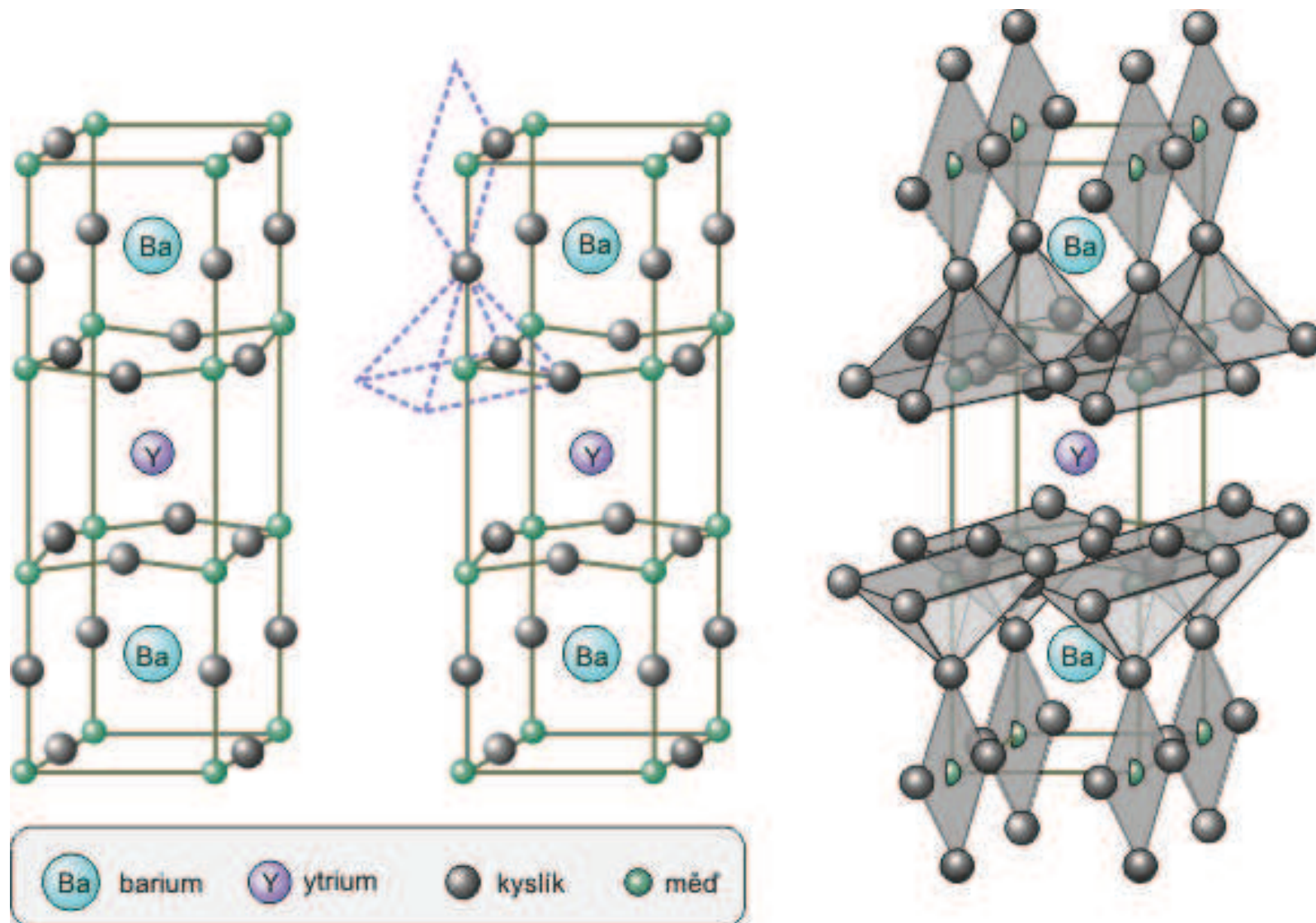
Hochtemperatur-Supraleiter

- bis 1986 waren nur Supraleiter mit $T_c < 20\text{ K}$ bekannt. Es gab aber schon lange Versuche Supraleiter mit höheren Sprungtemperaturen herzustellen

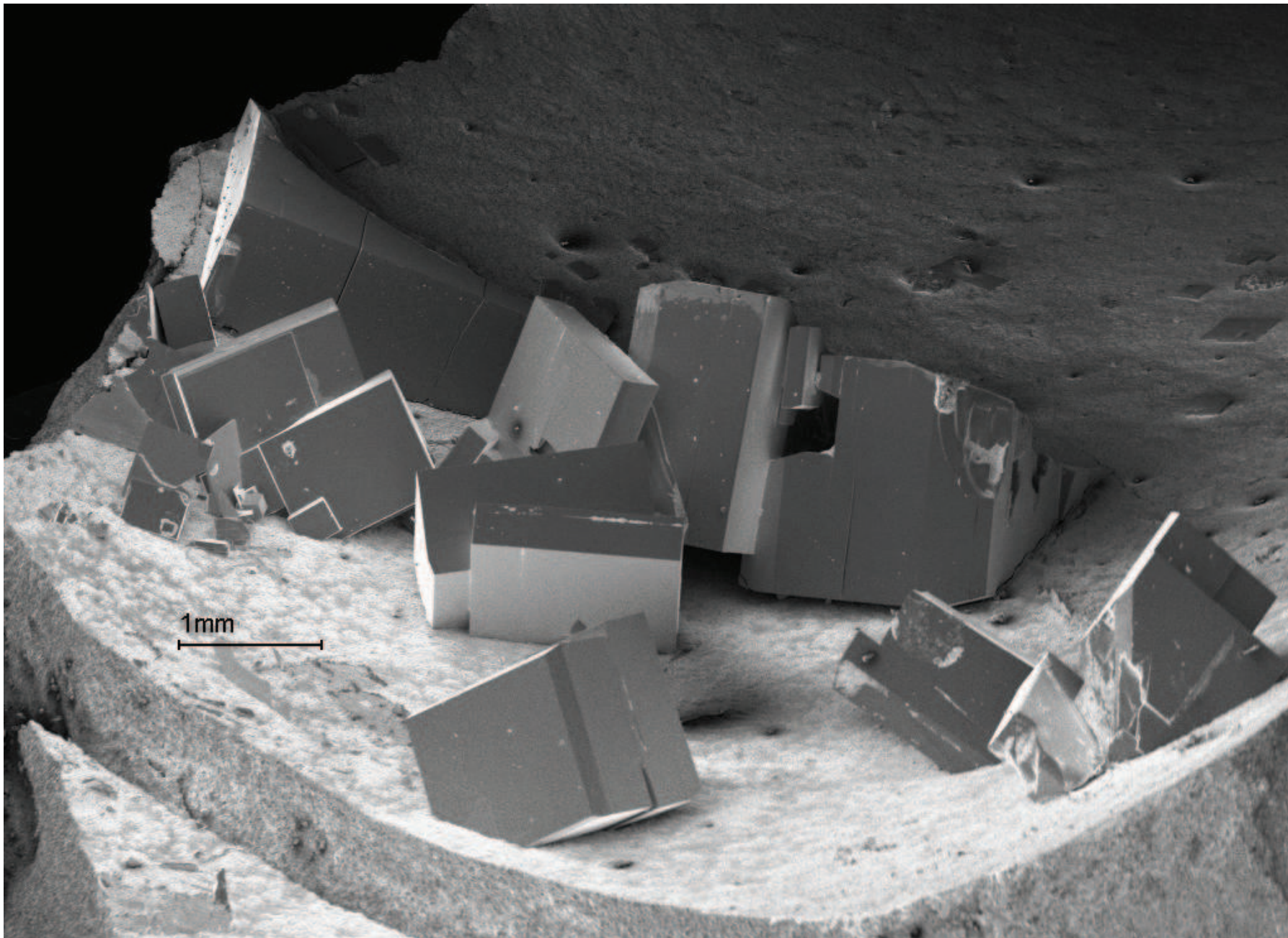
- Der Durchbruch gelang Bednorz und Müller 1986 an einem sehr komplizierten Material aus der Klasse der **Perowskite**
- Sprungtemperatur $T_c \approx 30\text{ K}$



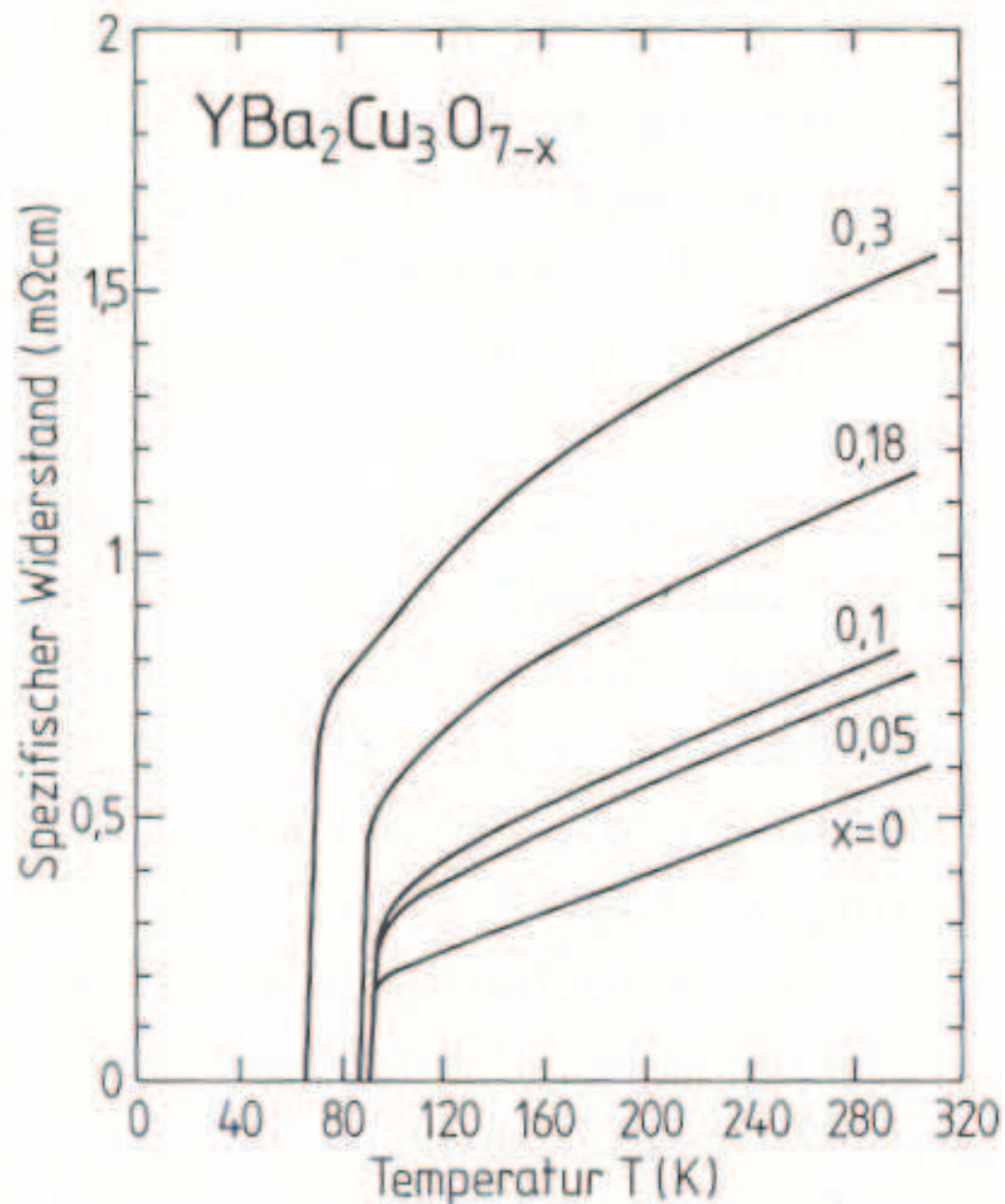
YBCO – Yttrium Barium Copper Oxid



YBCO

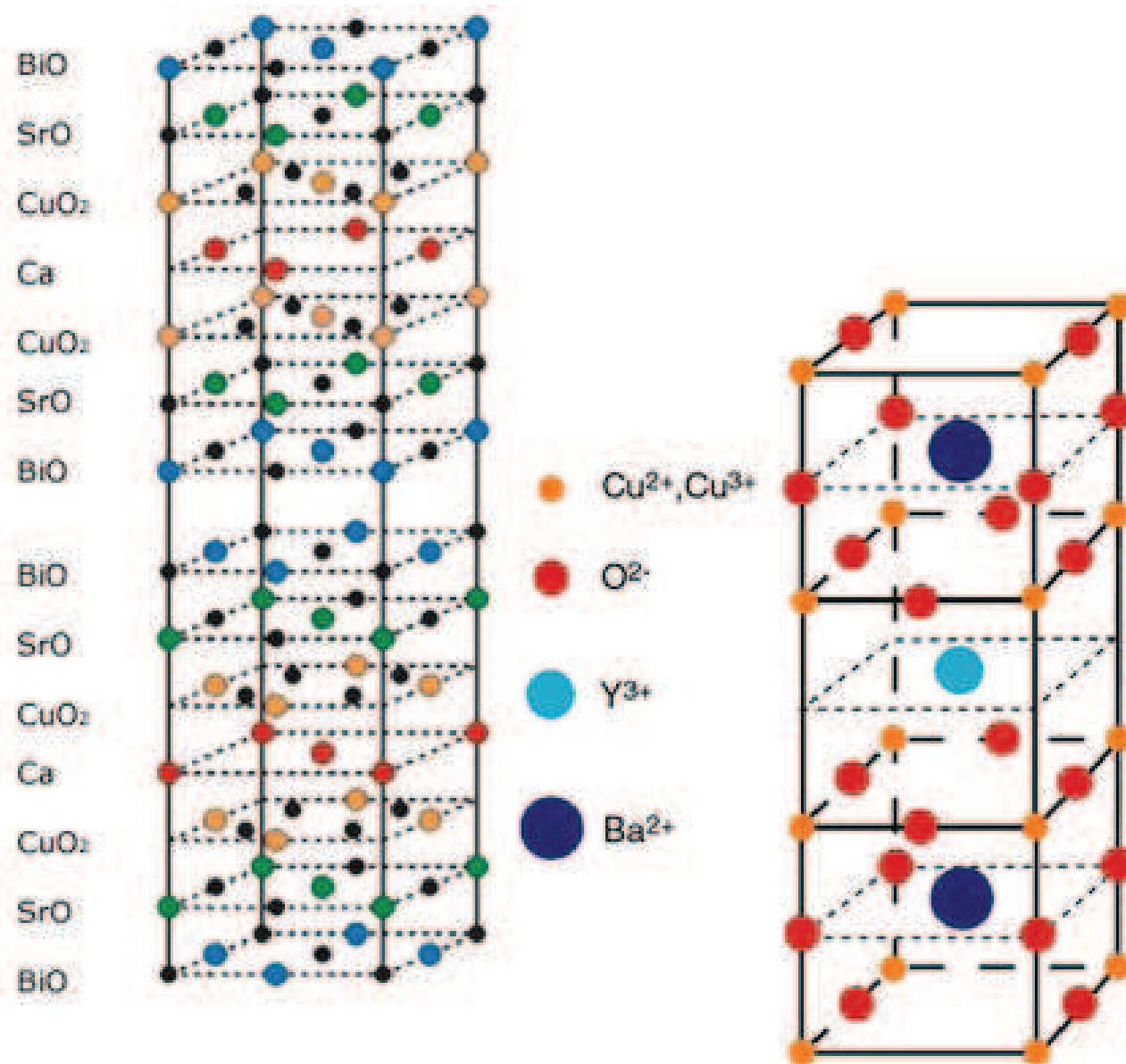


YBCO

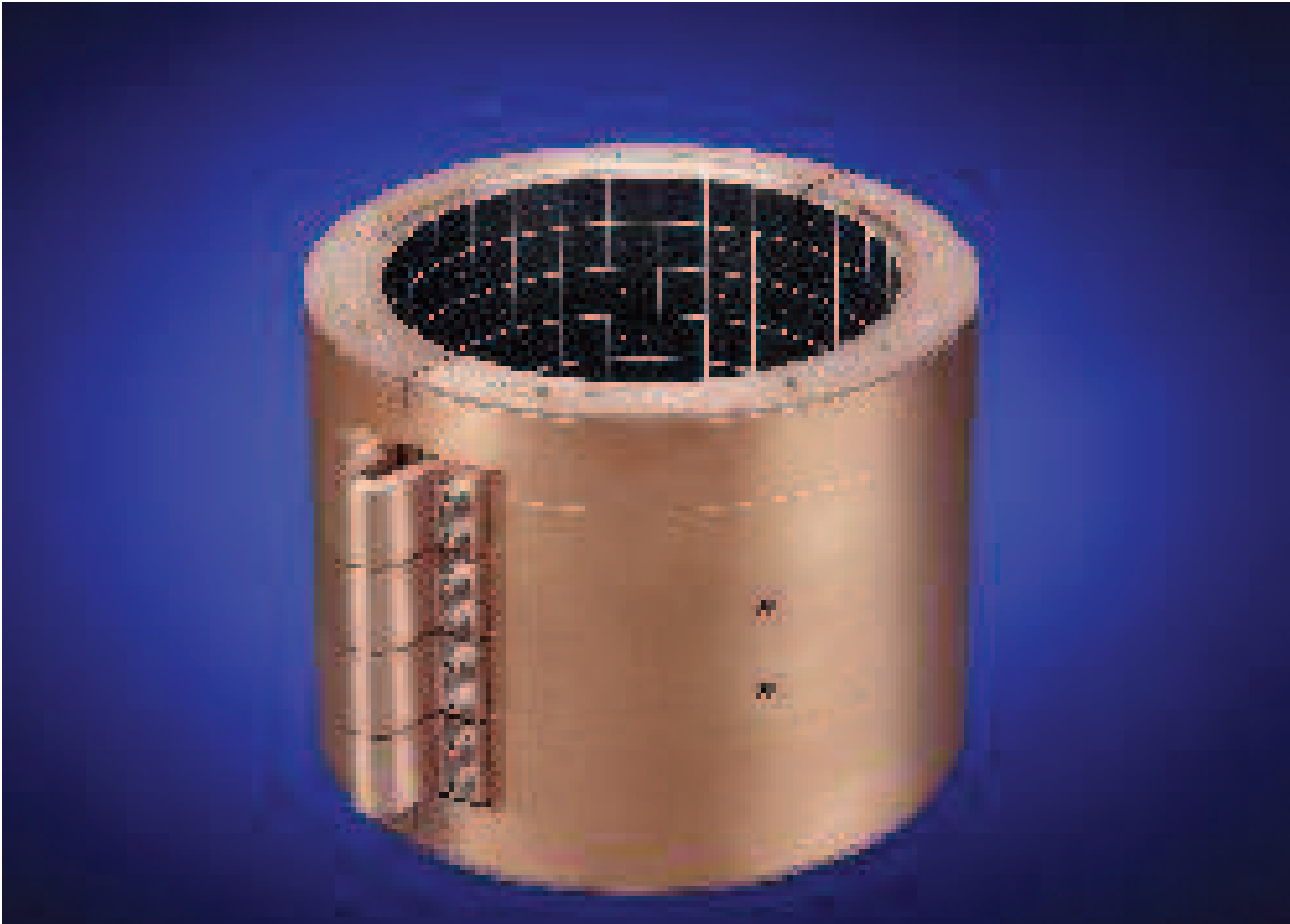


- Einfluß der Zusammensetzung auf die Sprungtemperatur T_c
- Noch keine Theorie kann die HiTCs erklären

BSCCO - YBCO



- Anwendung: Spezielle Lager für Turbinen . . .



PLANSEE

High performance products made of Mo, W, Ta, Nb, Cr, Composites, ODS

Goooooooooogole-Anzeigen

Shopsoftware OXID eShop

Die e-Commerce Standardsoftware

Auf dieser Site werben



Nexans lieferte das erste supraleitende Lager für eine industrielle Anwendung aus

Pressemitteilung von: [Nexans](#) >> [Archiv](#)

Veröffentlicht auf openPR am 21.09.2005 um 16:52 Uhr



drucken



PDF-Version



Email senden



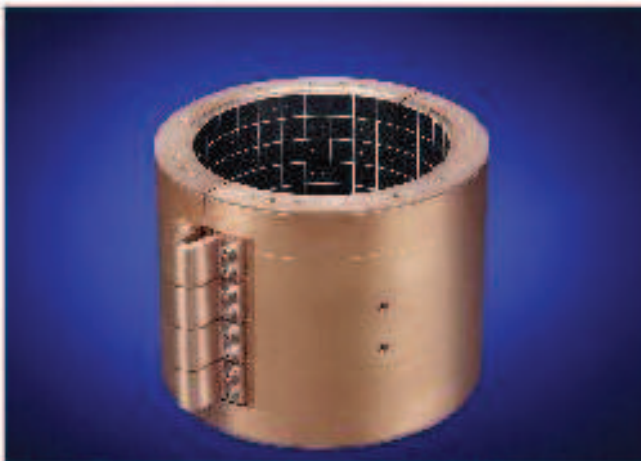
merken



kommentieren



Industrie,
Bau &
Immobilien



HTS-Zylinder bestehend aus 270 YBCO-Kristallen, eingebaut in zwei Halbschalen aus Kupfer



[Dieses Bild im Großformat speichern](#)

(openPR) - Ihren größten Einzelauftrag konnte die Nexans SuperConductors GmbH (NSC), Hürth, kürzlich abschließen, indem sie ein Lager auf Basis von Hochtemperatur-Supraleitern auslieferte.

Auftraggeber ist der Bereich Corporate Technology der Siemens AG, der diesen Prototyp derzeit im Hinblick auf die Verwendung in elektrischen Maschinen prüft. Siemens beschäftigt sich ebenfalls intensiv mit Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) und nahm kürzlich einen 4-MVA-Generator in Betrieb, der einen Rotor mit HTS-Wicklung beinhaltet und für den Schiffseinsatz konzipiert ist. Hochtemperatur-Supraleiter führen bei Motor- und Generatoranwendungen wegen der hohen Stromdichte zu kompakten Bauweisen. Auf Schiffen macht sich das doppelt bemerkbar: Geringes Gewicht und kleine Abmessungen gestatten eine effiziente Raumausnutzung und ermöglichen neue Schiffskonzepte, die mit konventionellen Antrieben nicht

realisierbar sind. Das berührungslose HTS-Lager profitiert ebenfalls von den hohen Stromdichten im HTS, die aber in diesem Fall dazu beitragen, eine rotierende Welle in einem Magnetfeld in der Schwebe zu halten. Die berührungs- und reibungslose Lagerung ermöglicht hohe Drehzahlen.

Das Lager wurde von NSC in Zusammenarbeit mit den Kältetechnikspezialisten der Nexans in Hannover entwickelt und gebaut und in Kooperation mit den Spezialisten vom IMAR-Institut der Technischen