

Supraleitung Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Bernhard Holzapfel, Karlsruhe Institute of Technology
ZIEHL VII, 5.3.2020

INSTITUTE FOR TECHNICAL PHYSICS



Supraleitung - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Historische Entwicklung, kritische Größen und klassische Anwendungen

Supraleiter im Magnetfeld

- Typ I/Typ II Supraleiter
- Stromtransport und Pinning
- Irreversibilitätsfeld

HTSL Anwendungsfelder

Entdeckung der Supraleitung

Heliumverflüssigung

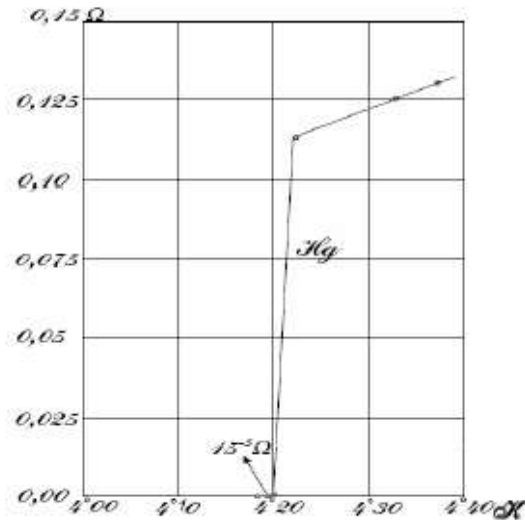
H. Kamerlingh Onnes, Leiden (1908)

Entdeckung der „Supraleitung“: ideale Leitfähigkeit

H. Kamerlingh Onnes, Leiden (1911)

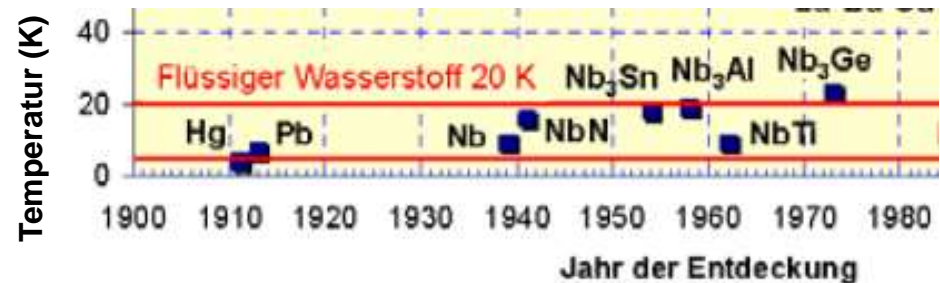


Kamerlingh Onnes



Sprung im elektrischen Widerstand von Hg: kritische Temperatur T_C

Viele Metalle werden supraleitend



Metalle & Legierungen

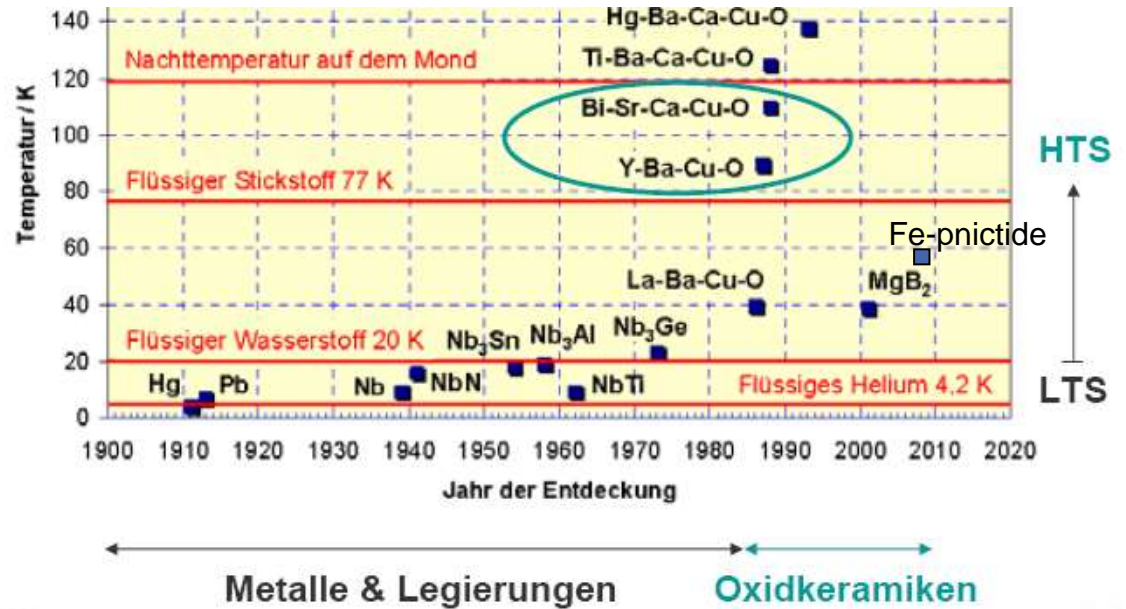
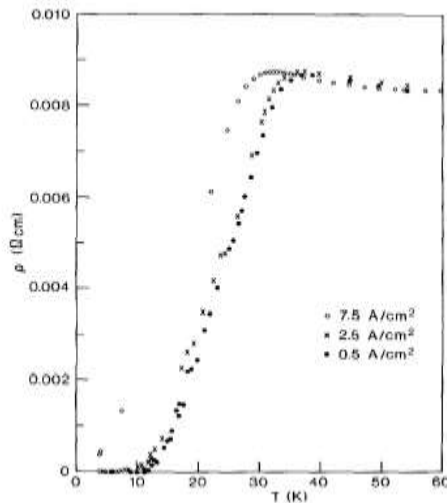
→ Verlustfreier Stromtransport möglich

Kühlung mit flüssigem Helium notwendig

Hochtemperatursupraleiter (HTSL)



Ba-La-Cu-O:
J. G. Bednorz, K. A. Müller, Z. Physik, B 64 (1986) 189



Kühlung mit flüssigem Stickstoff möglich

Für
 Anwendungen
 interessant

Verbindung		T_C (K)
$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	Y-123	92
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	Bi-2212	84
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	Bi-2223	110
$TlBa_2Ca_2Cu_3O_{10}$	Tl-1223	125
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{10}$	Hg-1223	133

Die kritische Stromtragfähigkeit $J_c(B,T)$

- Idealer Leiter, d.h. **keine ohmschen Verluste** für $T < T_c$
- $R=0$ begrenzt durch kritischen Strom $I_c(B,T)$

Kritische Stromdichte J_c :

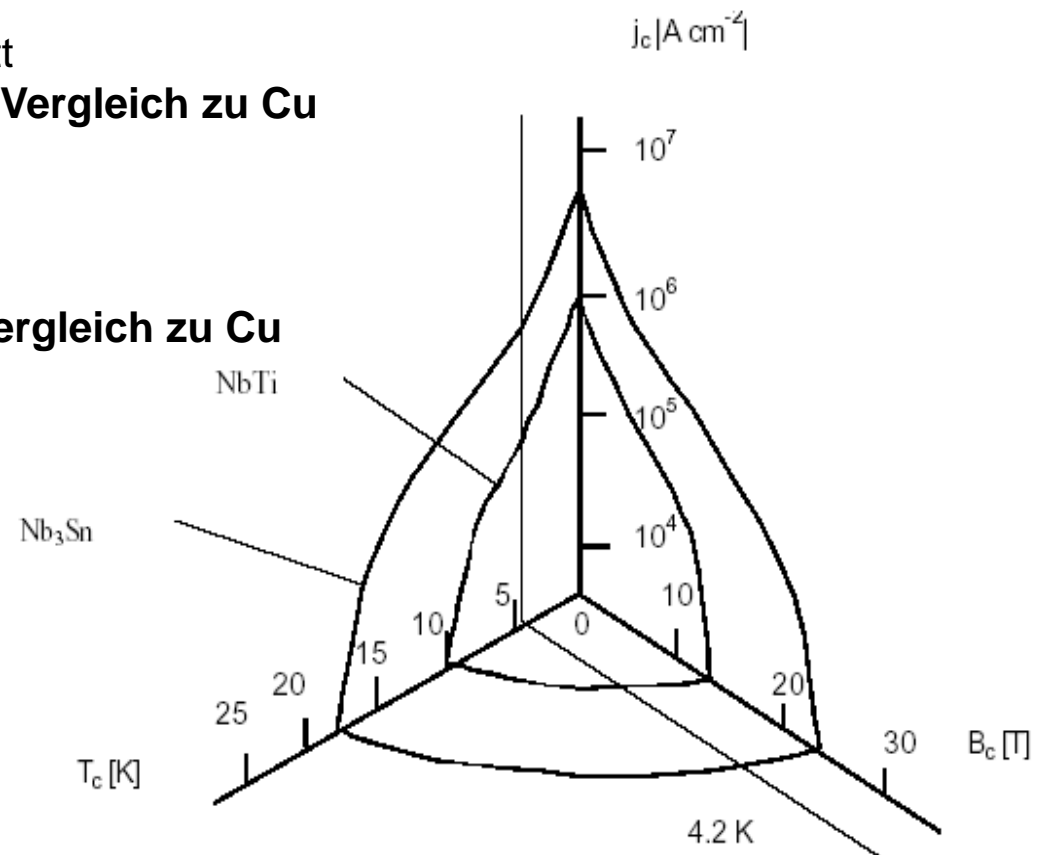
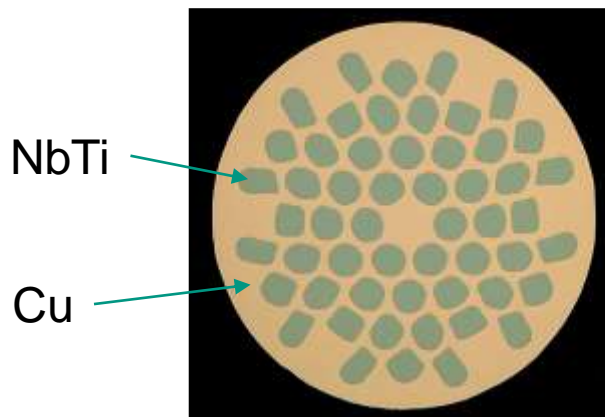
I_c bezogen auf den Supraleiterquerschnitt

ca. 1.000-fach höhere Stromdichte im Vergleich zu Cu

Gesamtstromdichte J_e :

I_c bezogen auf den Leiterquerschnitt

ca. 100-fach höhere Stromdichte im Vergleich zu Cu



Anwendungen klassischer Supraleiter

Medizintechnik

MRI Bildgebung

für weiches Gewebe

(Organe, Knorpel, Sehnen)

Weltmarkt > 3 Mrd € p.a.

> 3000 to NbTi p.a.



Analytik

NMR Spektroskopie

Weltmarkt > 500 M€ p.a.

> 500 to Nb₃Sn p.a.

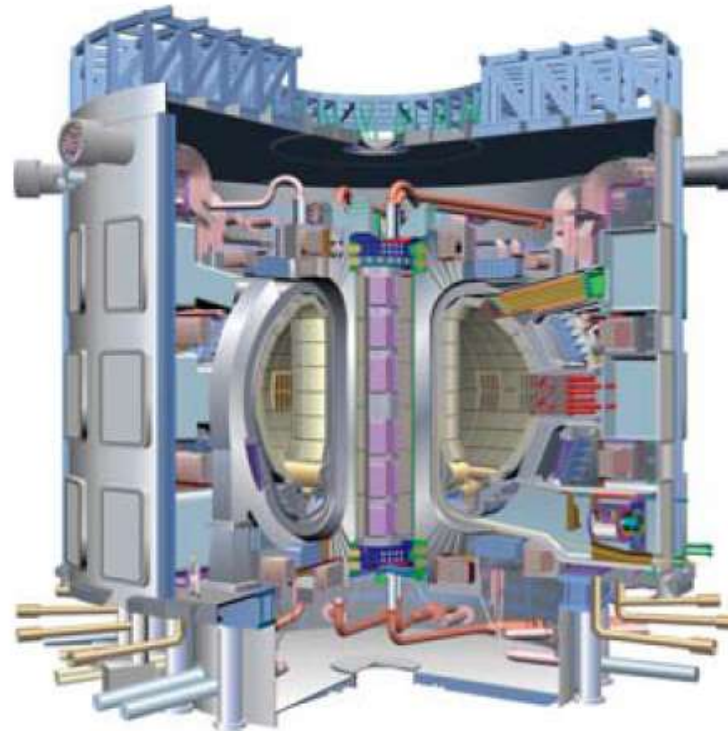


Anwendungen klassischer Supraleiter

Magnetbau für Großeinrichtungen

- Beschleuniger für die Teilchenphysik
- Kernfusionsreaktoren

Large Hadron Collider, LHC at CERN



International Thermonuclear
Experimental Reactor, ITER

> 500 to Nb_3Sn



ITER Kabel

Supraleitung - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Historische Entwicklung, kritische Größen und
klassische Anwendungen

Supraleiter im Magnetfeld

- Typ I/Typ II Supraleiter
- Stromtransport und Pinning
- Irreversibilitätsfeld

HTSL Anwendungsfelder

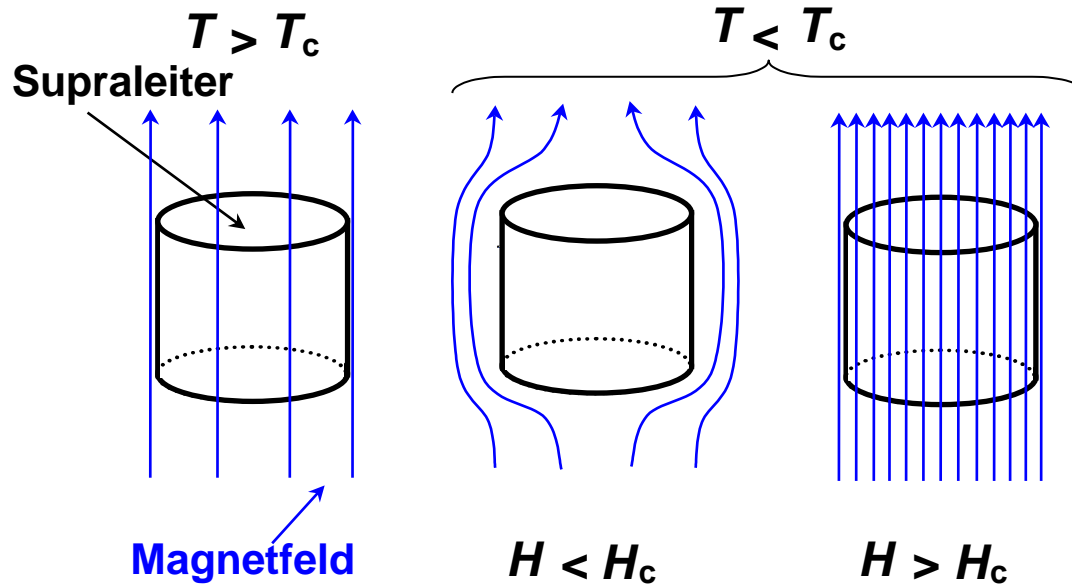
Supraleiter im Magnetfeld

Meissner-Ochsenfeld Effekt



Meissner

W. Meissner, R. Ochsenfeld,
Naturwissenschaften 21 (1933) 787

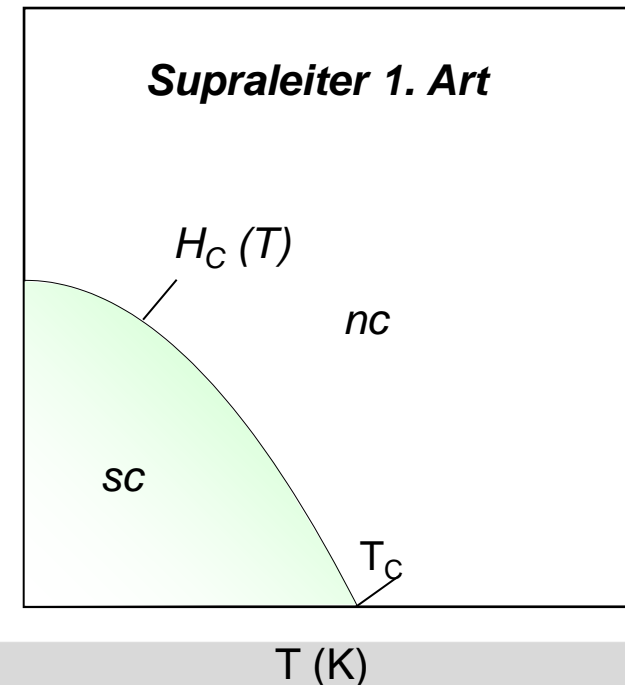


Das Magnetfeld dringt nicht in Supraleiter ein

Supraleiter sind ideale Diamagneten

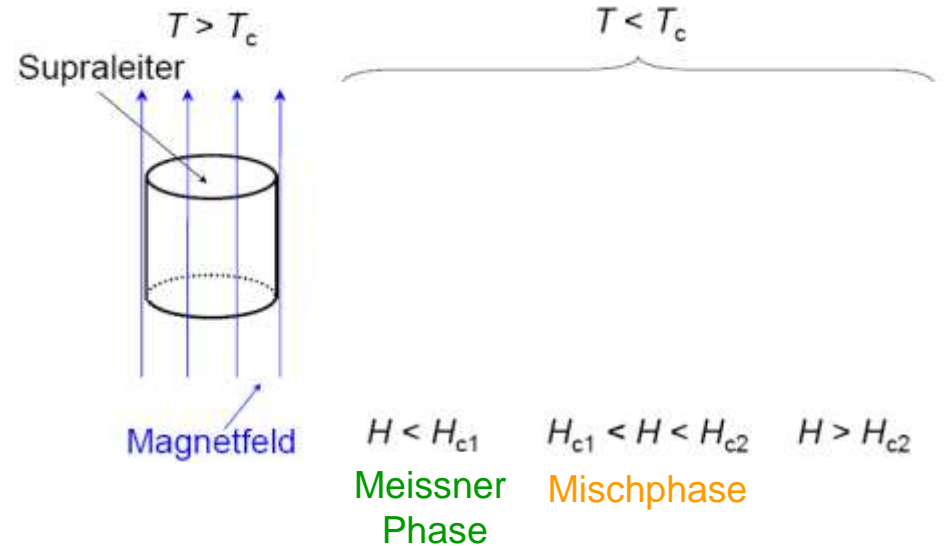
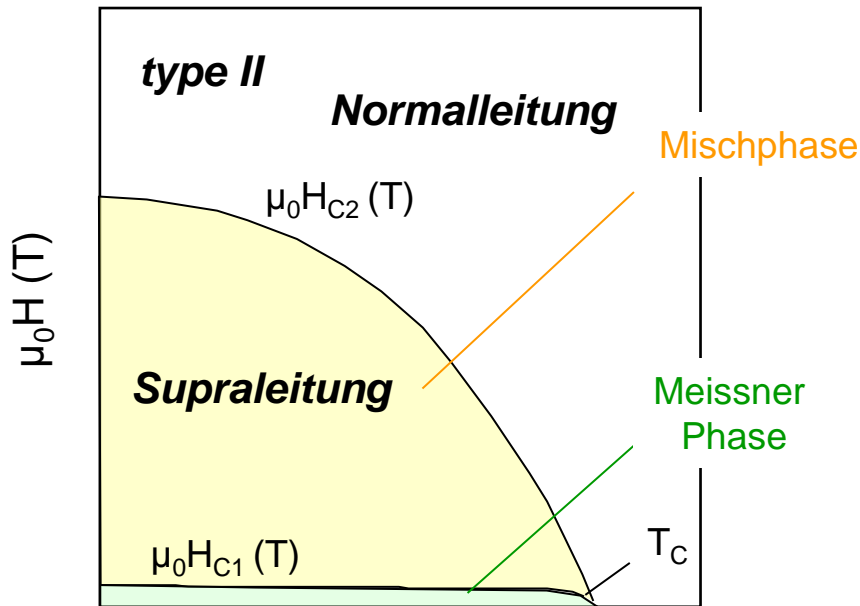


type I	T_c (K)	$\mu_0 H_c$ (mT)
Hg	4.15	41.1
Pb	7.20	80.3

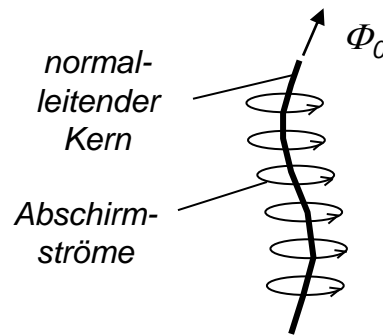


Anwendungsrelevante Typ II Supraleiter

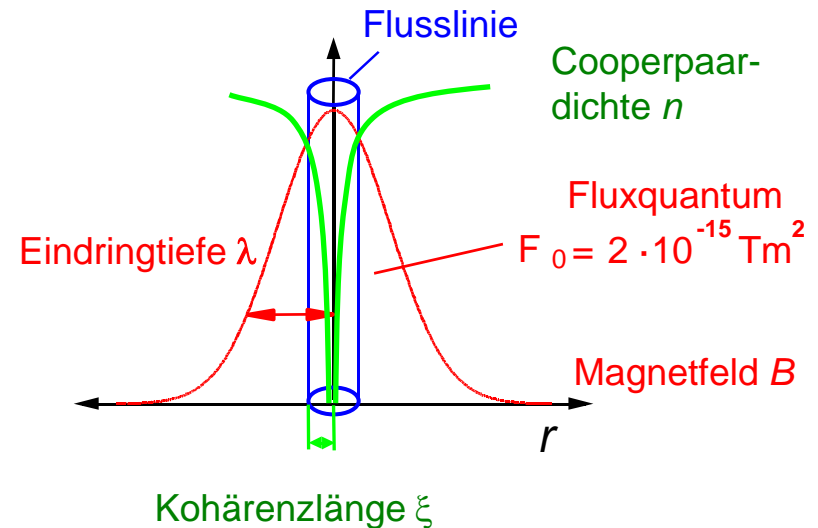
B(T) Phasendiagramm



type II	T_C (K)	$\mu_0 H_{C2}$ (T)
$Nb_{0.6}Ti_{0.4}$	9.8	11.5
Nb_3Sn	18.0	24.5
YBCO	92	> 80

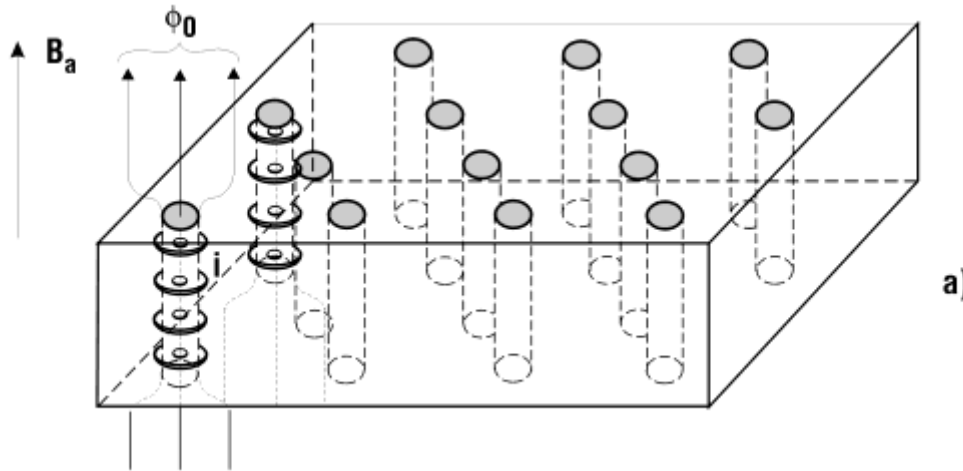


Vortex

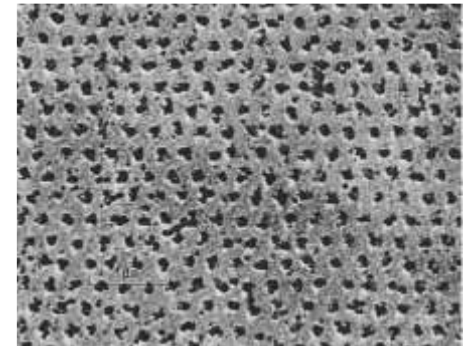


Die Misch- bzw. Shubnikovphase

Flussverteilung in Supraleitern II. Art für $B_{C1} < B_a < B_{C2}$



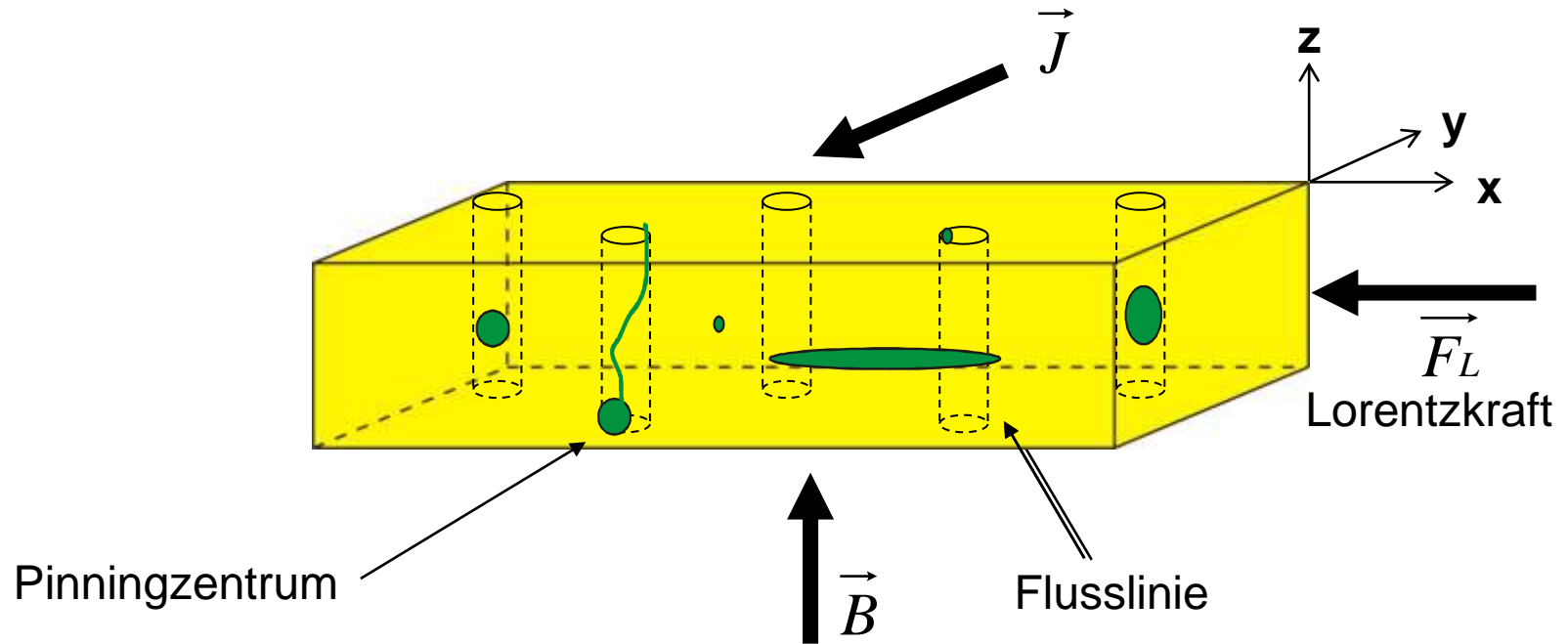
Rasterelektronenmikroskop-
aufnahme durch
Dekoration mit Fe-Dampf



Es entsteht ein symmetrisch verteiltes Flussliniengitter

Jede Flusslinie besitzt den quantisierten Fluss: $\Phi_0 = h/2e = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Tm}^2$

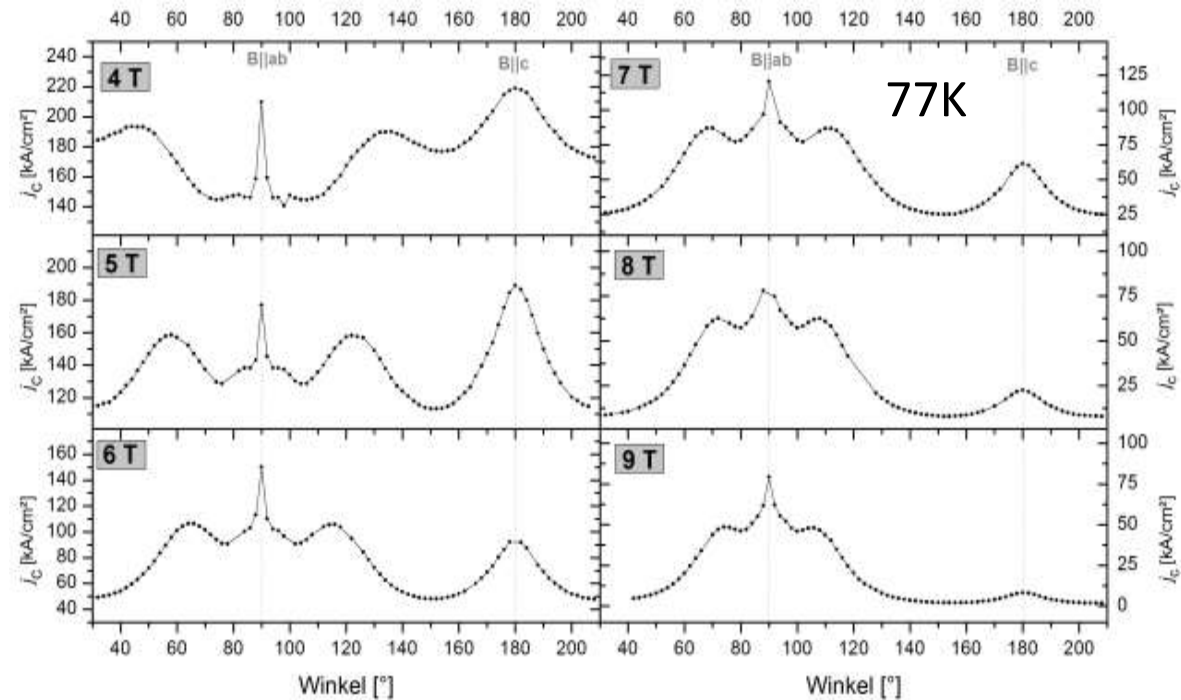
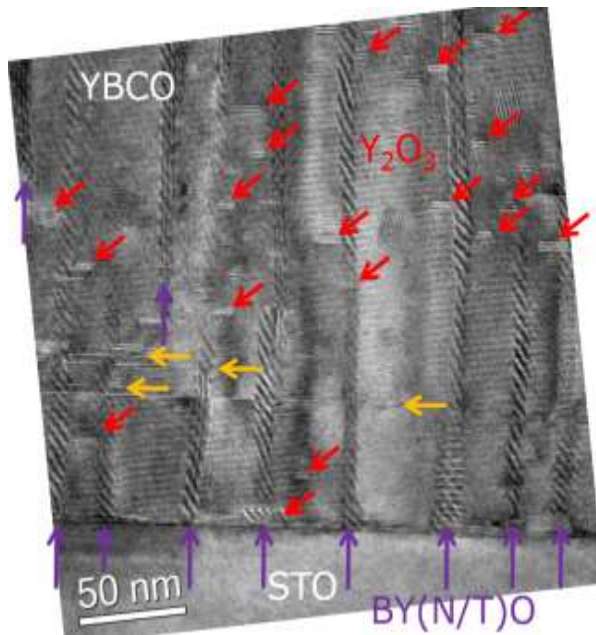
Stromtransport in Typ II SL im Magnetfeld



- Auf Flußlinien wirkt im Magnetfeld bei Stromfluss die Lorentzkraft
- Ohne Verankerung bewegen sich Flußlinien bei Stromfluss, d.h. elektrischer Widerstand tritt auf !!
- Flußlinien müssen durch „Pinningzentren“ verankert werden
- Kritische Stromstärke wird bestimmt durch die Nano-/Mikrostruktur
- Wechselströme/-felder erzeugen Flußlinienbewegung und damit Verluste!

Gezieltes Nanoengineering von HTSL

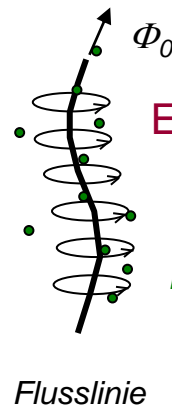
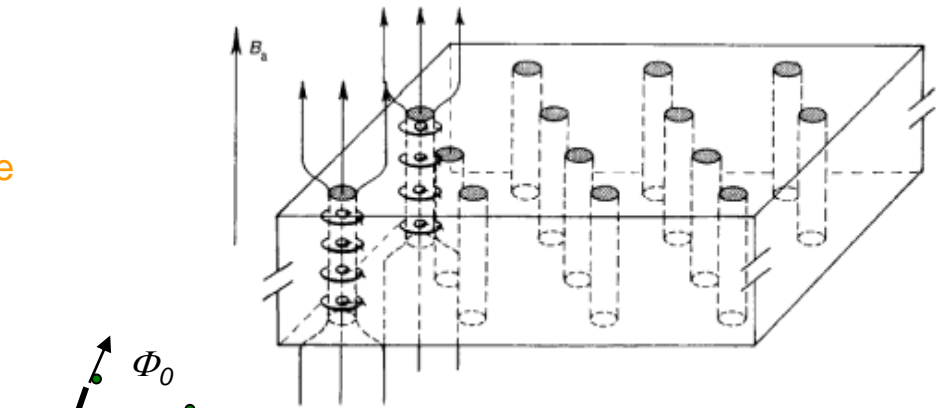
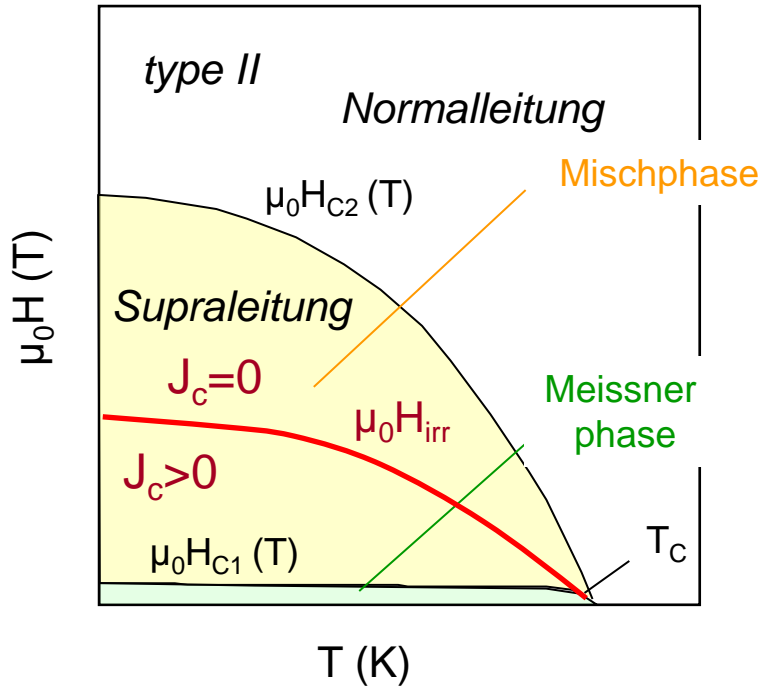
Pinning Engineering durch Einbringen verschiedenartiger Defektstrukturen (hier $\text{Ba}_2\text{YNbO}_6/\text{Ba}_2\text{YTaO}_6$ -Nanosäulen, Y_2O_3 -Nanopartikel, Stapelfehler) in supraleitende Matrix (YBCO)



→ Reichhaltige J_c -Winkelabhängigkeit

HTSL im Magnetfeld - Irreversibilitätsfeld

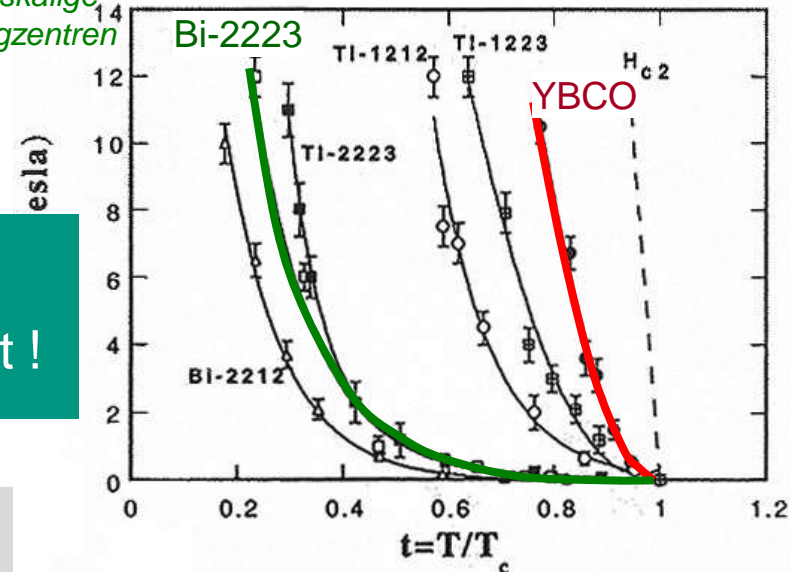
B(T) Phasendiagramm von Supraleitern



Einbau von Pinningzentren $\rightarrow J_c > 0$

Nanoskalige Pinningzentren

Das Irreversibilitätsfeld H_{irr} begrenzt in der Mischphase J_c und damit die Anwendbarkeit !



Supraleitung - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Historische Entwicklung, kritische Größen und
klassische Anwendungen

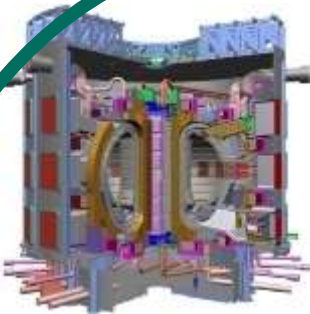
Supraleiter im Magnetfeld

- Typ I/Typ II Supraleiter
- Stromtransport und Pinning
- Irreversibilitätsfeld

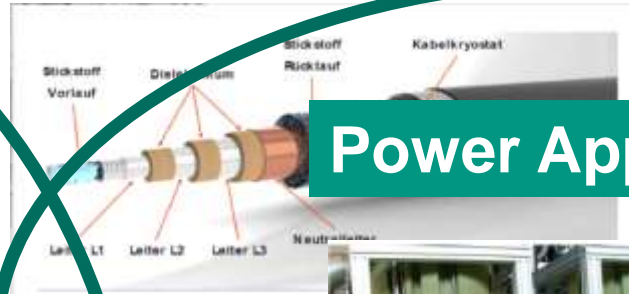
HTSL Anwendungsfelder

Anwendungsfelder der HTSL

Fusion



Power Applications



AC/DC cables



Transformer

FCL



FCC

Magnets

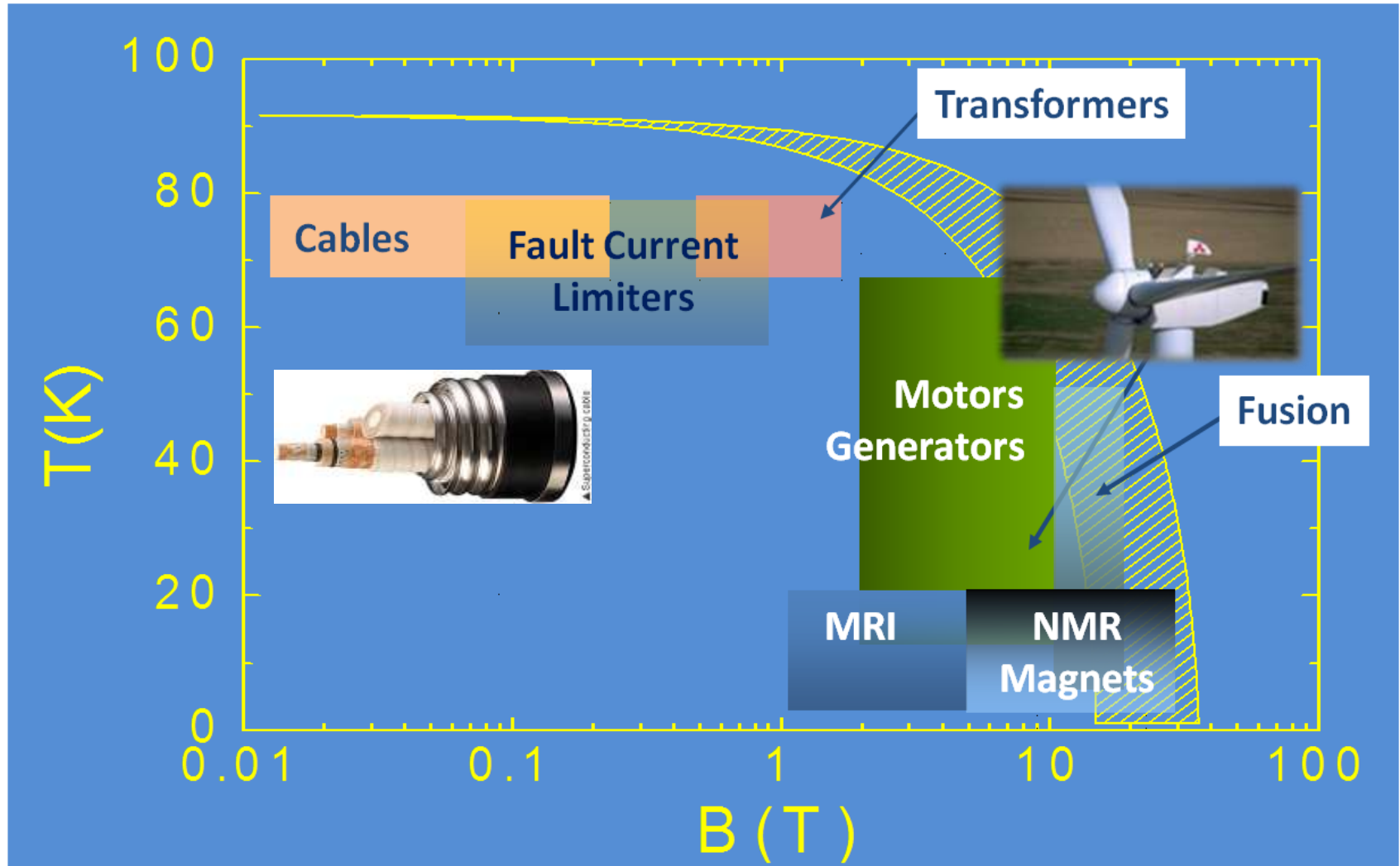


NMR/MRI



Rotating Machines

Anwendungsfelder der HTSL

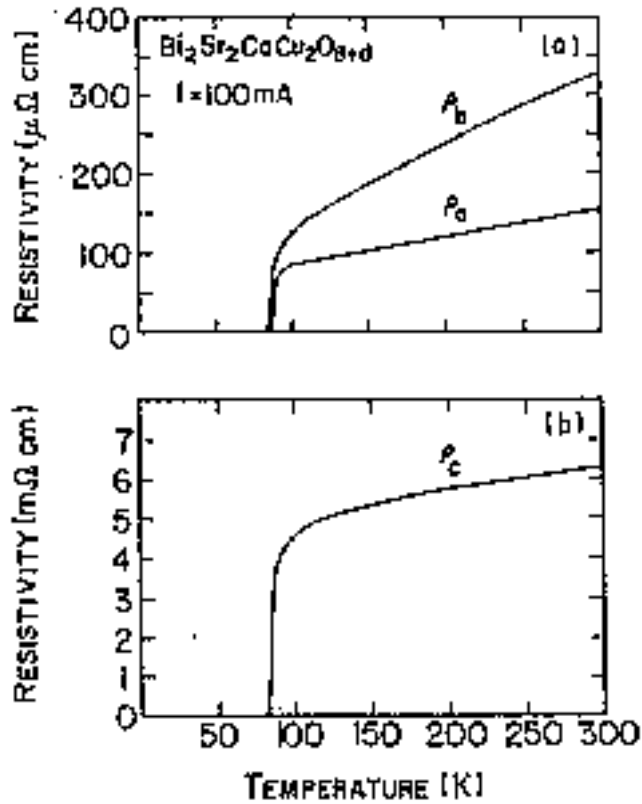


Zusammenfassung

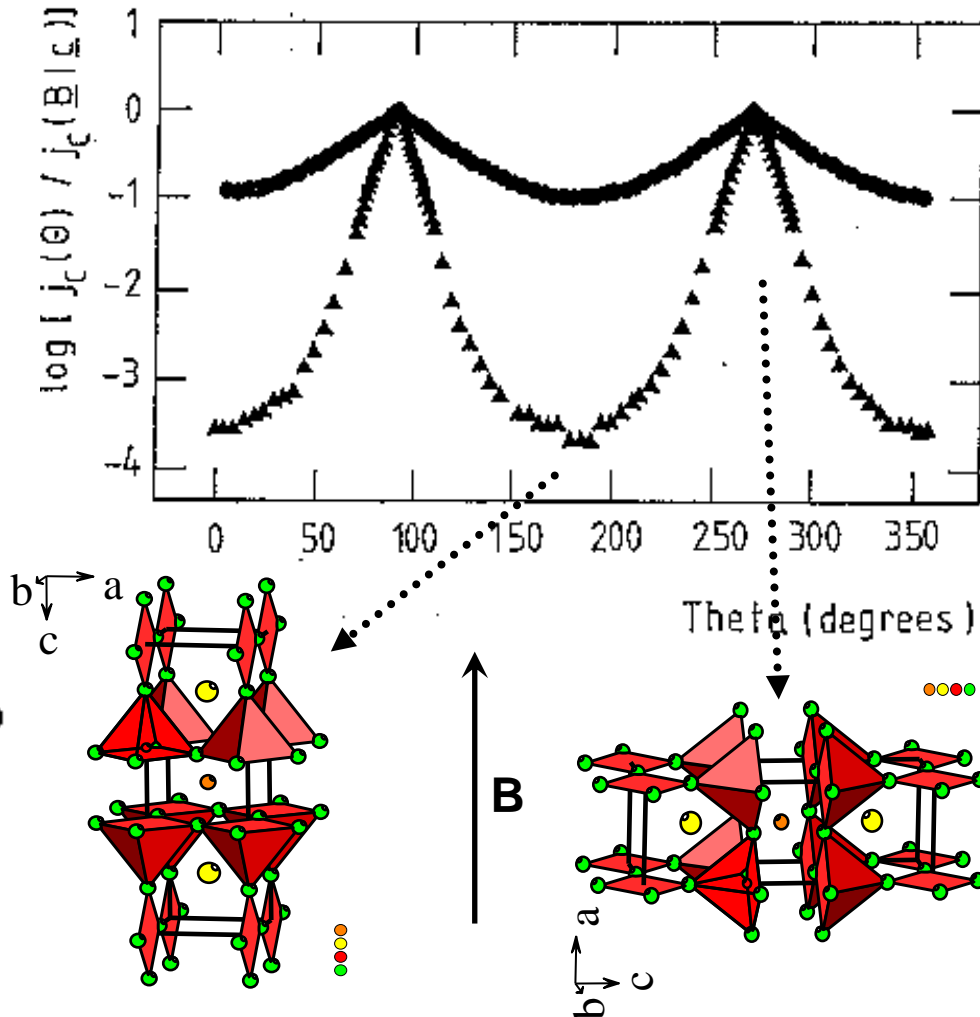
- HTSL erlauben energie- und magnetische Anwendungen mit höchster Stromdichte, Leistungsdichte und Energieeffizienz
- Breite Anwendungsfelder für HTSL mit unterschiedlichsten Material-/Systemanforderungen
- Hochstromtragende (HT)SL erfordern die Integration komplexer Nanostrukturen für hohe kritische Ströme
- Für HTSL begrenzt das Irreversibilitätsfeld $H_{irr}(T)$ die Anwendbarkeit in Magnetfeldern, insbesondere bei höheren Temperaturen
- Wechselstromverluste bestimmen Gesamtenergieeffizienz inkl. Kühlung

Starke Anisotropie der HTSL

Widerstand

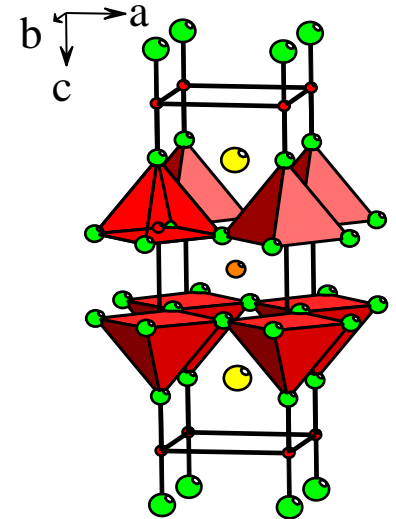
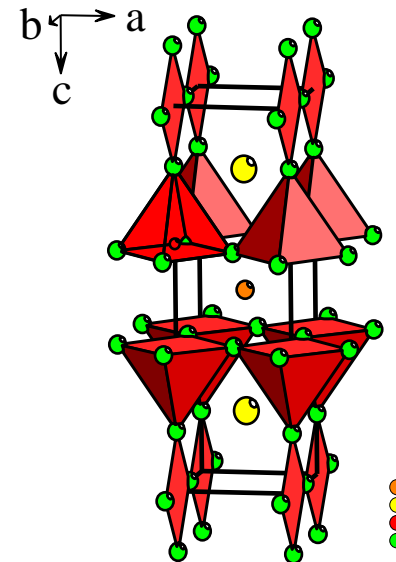
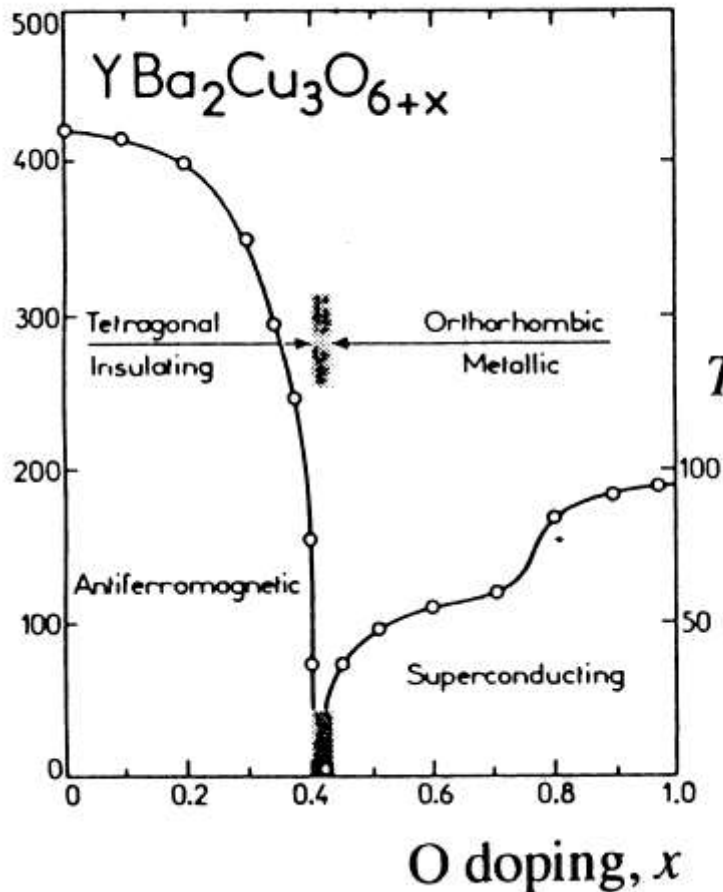


Kritische Stromdichte



O-Dotierung und T_c

T_N / K



T_c hängt stark vom O-Gehalt ab