

Supraleiter - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Bernhard Holzapfel, Karlsruhe Institute of Technology
ZIEHL VI, 20.3.2018

INSTITUTE FOR TECHNICAL PHYSICS



Supraleiter - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Historische Entwicklung und klassische Anwendungen

Hochtemperatursupraleiter (HTSL)

- YBaCuO
- “Herausforderung” Korngrenzen

HTSL im Magnetfeld

- Der Typ II Supraleiter
- Grenzen der Magnetfeldverträglichkeit

HTSL Anwendungsfelder

Entdeckung der Supraleitung

Heliumverflüssigung

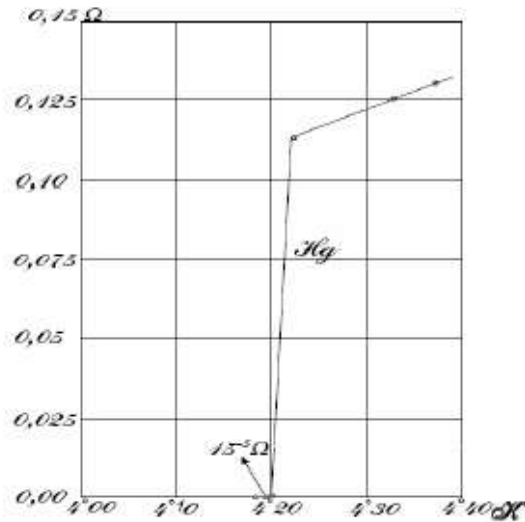
H. Kamerlingh Onnes, Leiden (1908)

Entdeckung der „Supraleitung“: ideale Leitfähigkeit

H. Kamerlingh Onnes, Leiden (1911)

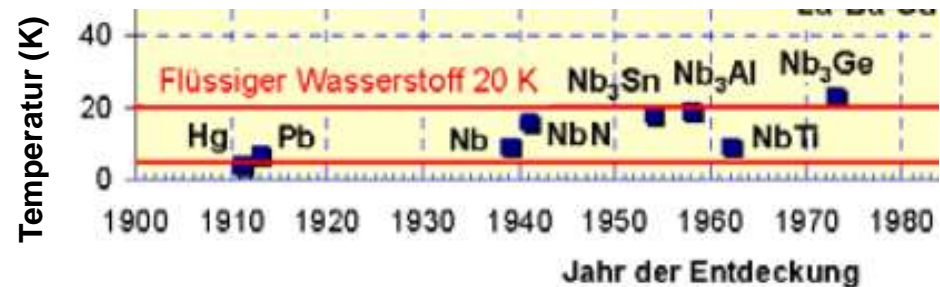


Kamerlingh Onnes



Sprung im elektrischen Widerstand von Hg: kritische Temperatur T_C

Viele Metalle werden supraleitend



Metalle & Legierungen

→ Verlustfreier Stromtransport möglich

Kühlung mit flüssigem Helium notwendig

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 :

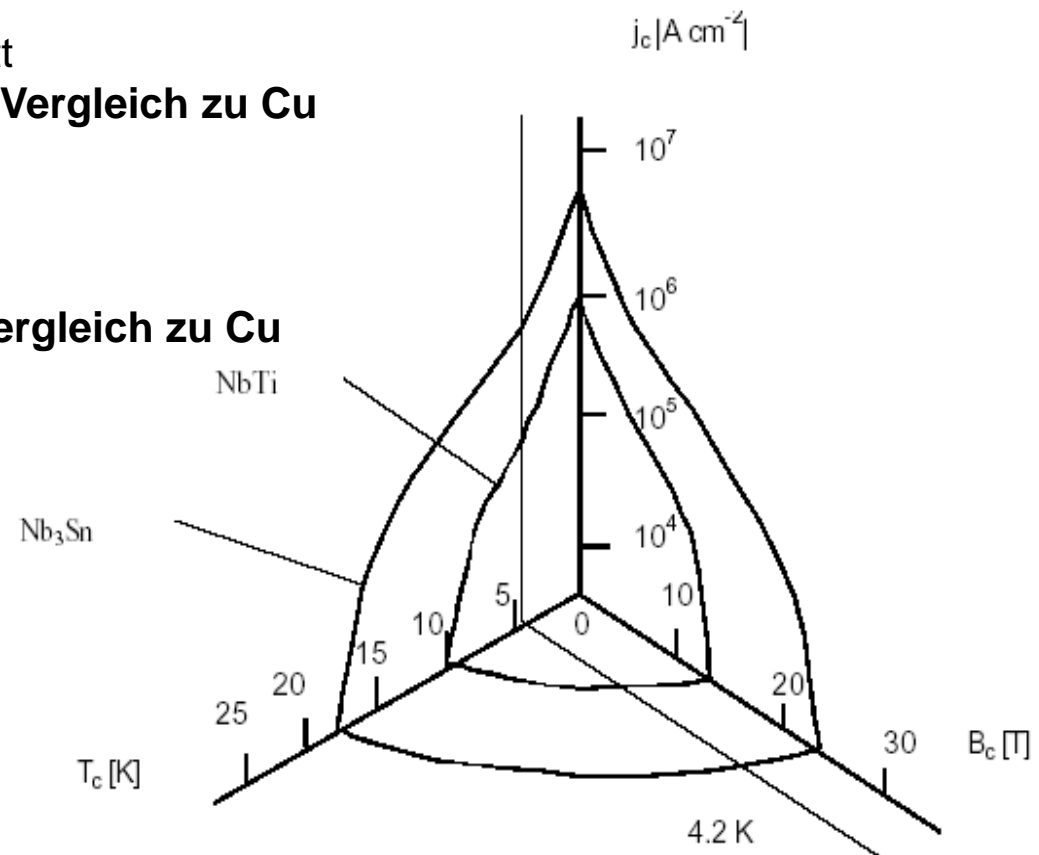
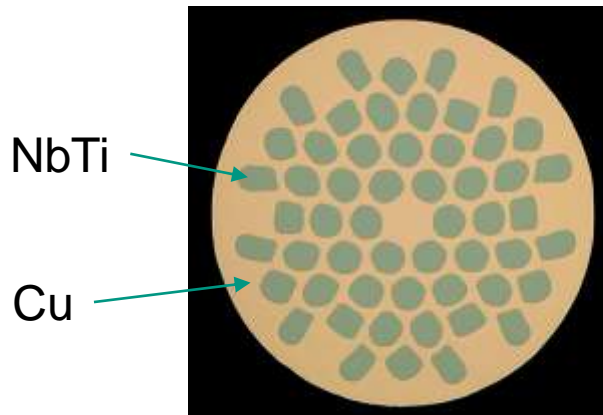
I_c bezogen auf den Supraleiterquerschnitt

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

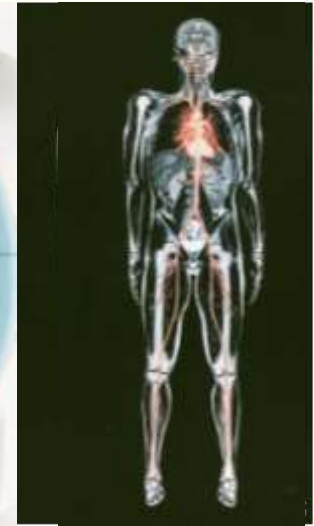
MRI Bildgebung

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.

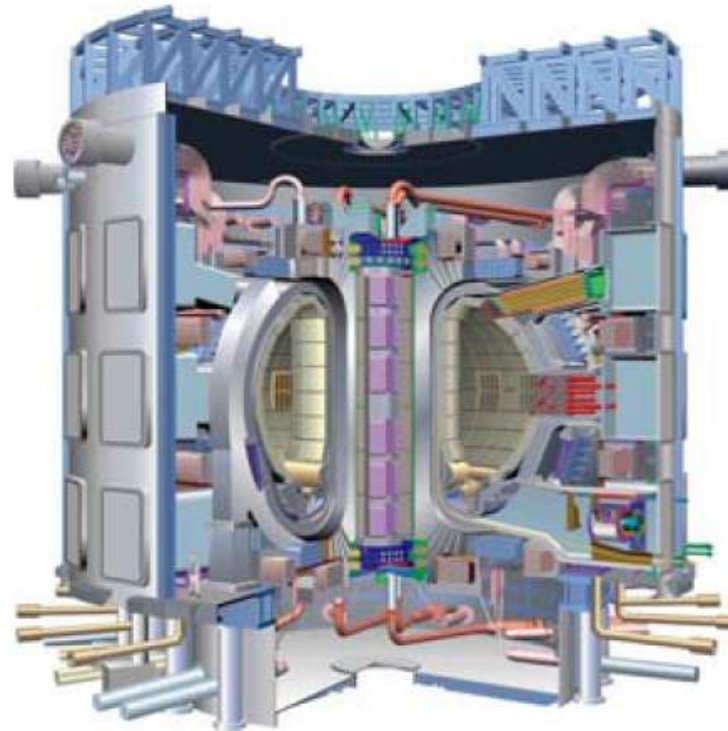


Anwendungen klassischer Supraleiter

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

Supraleiter - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Historische Entwicklung und klassische Anwendungen

Hochtemperatursupraleiter (HTSL)

- YBaCuO
- “Herausforderung” Korngrenzen

HTSL im Magnetfeld

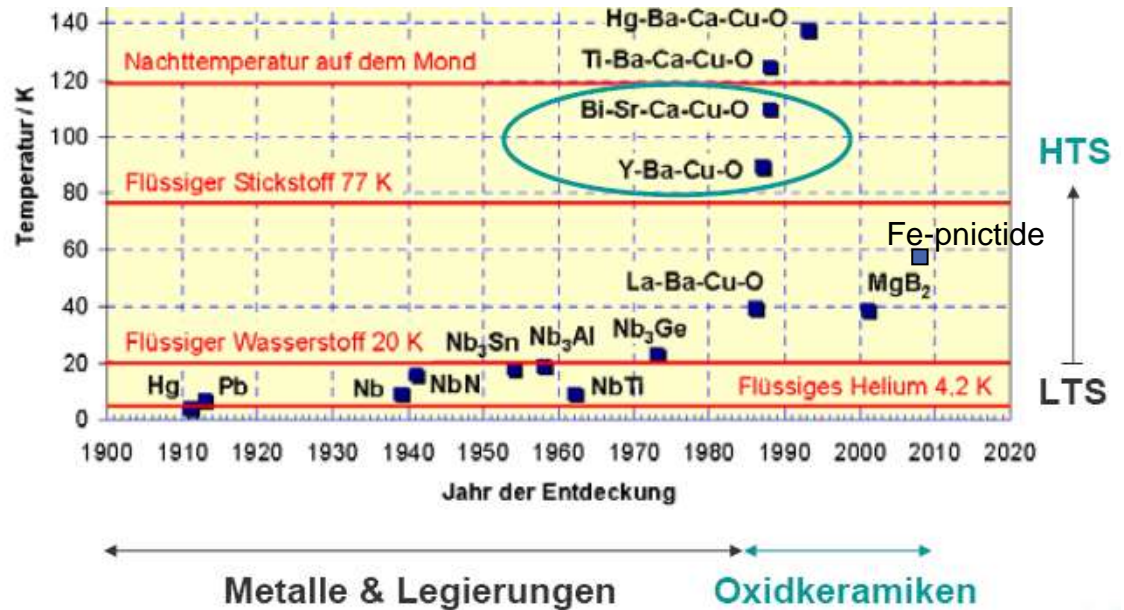
- Der Typ II Supraleiter
- Grenzen der Magnetfeldverträglichkeit

HTSL Anwendungsfelder

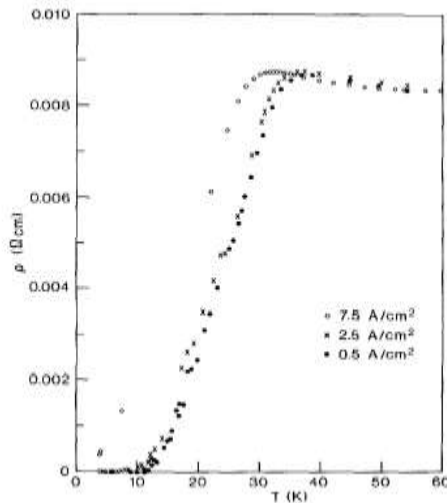
Hochtemperatursupraleiter (HTSL)



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



Kühlung mit flüssigem Stickstoff möglich



Für
 Anwendungen
 interessant

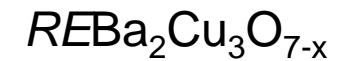
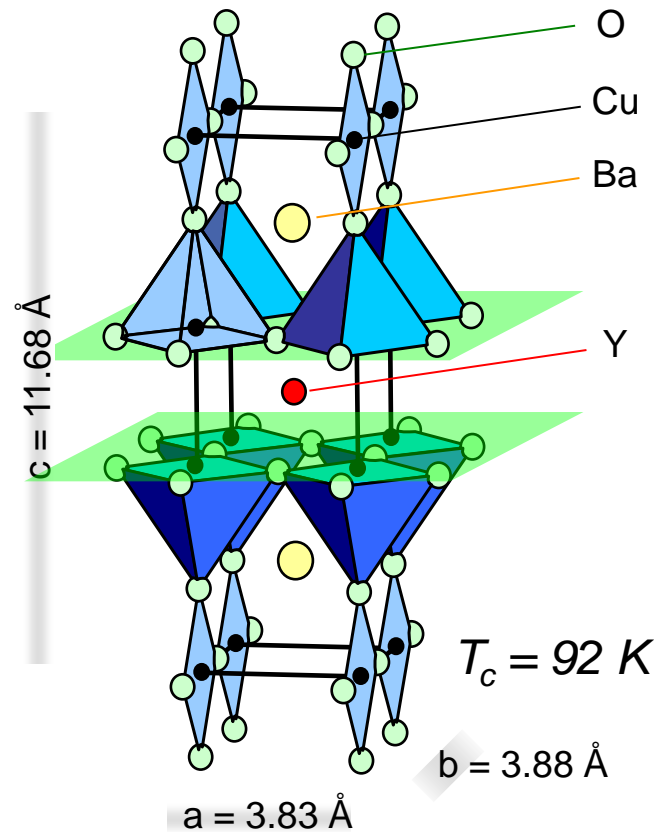
Verbindung		T_C (K)
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	Y-123	92
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	Bi-2212	84
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	Bi-2223	110
TlBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	Tl-1223	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	Hg-1223	133

Hochtemperatursupraleiter (HTSL)

komplexe
 Keramiken mit
 Schichtstruktur
 (2-dimensional)

CuO₂-Ebenen
 verantwortlich für
 Supraleitung

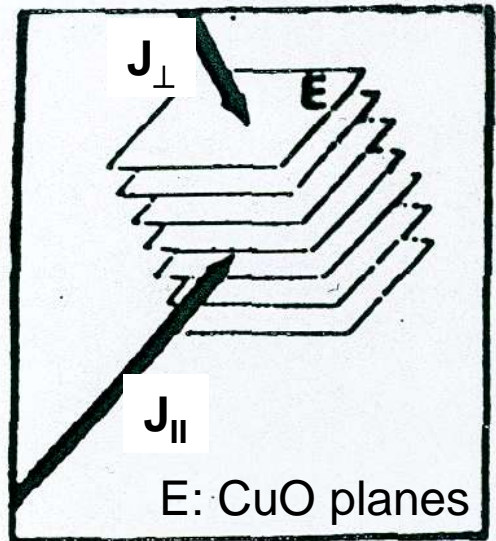
Eigenschaften
 zeigen starke
 Anisotropien
 z.B. $J_c(B, T, \theta)$



RE:
 Y, Nd, Er, Gd, Eu...

REBCO

Bedingungen für eine hohe kritische Stromstärke



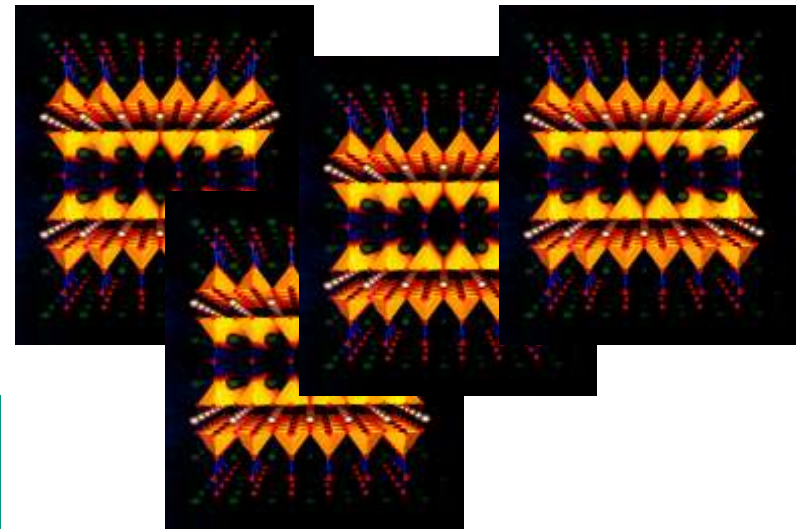
Polykristallines Gefüge



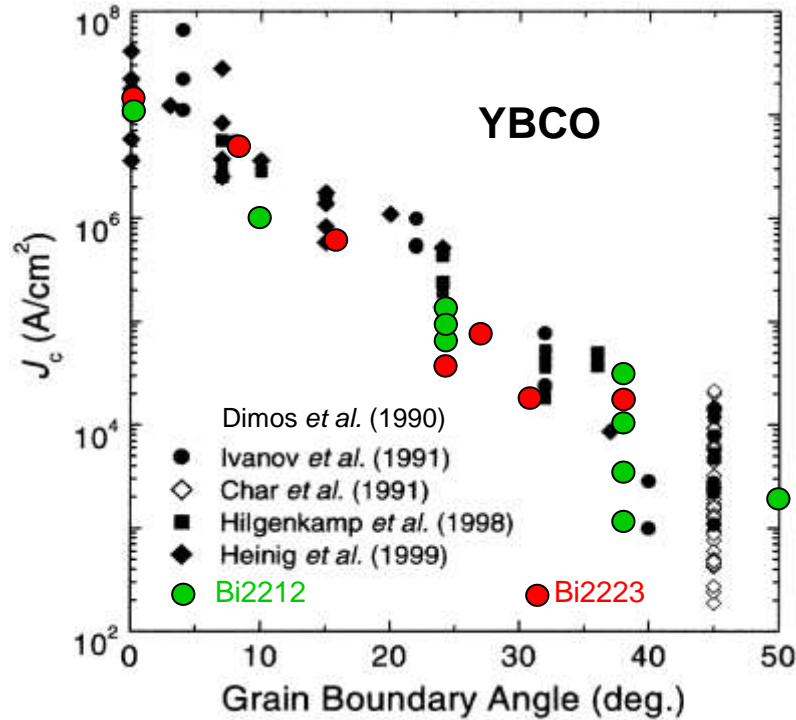
J_{\parallel} : Strom parallel zu CuO Ebene
 J_{\perp} : Strom senkrecht zu CuO Ebene

$$J_{\parallel} \gg J_{\perp}$$

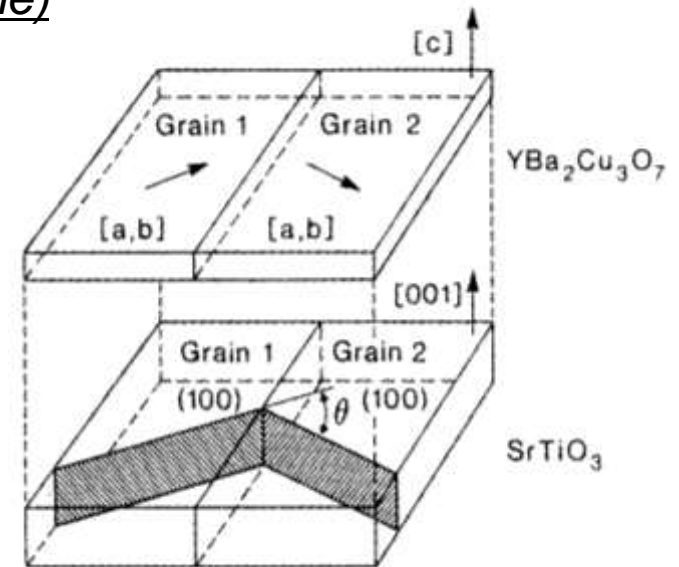
Parallele Ausrichtung der CuO Ebenen notwendig für hohes J_c



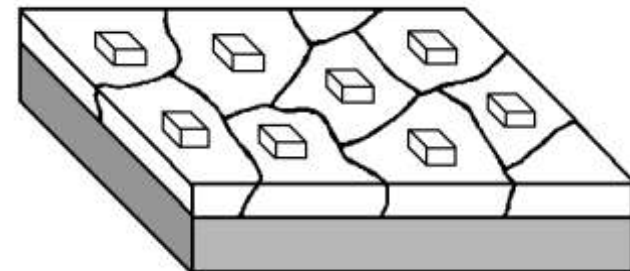
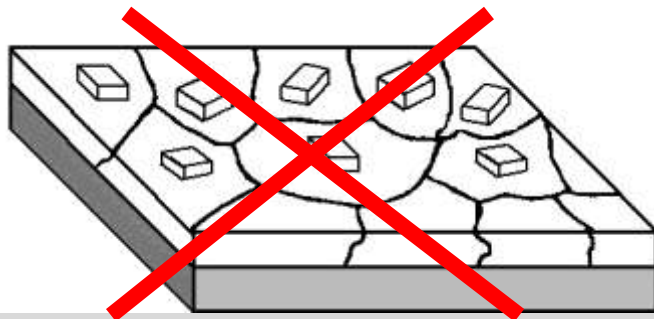
Das Korngrenzenproblem der HTSL



Messungen an künstlichen Korngrenzen (Bikristalle)

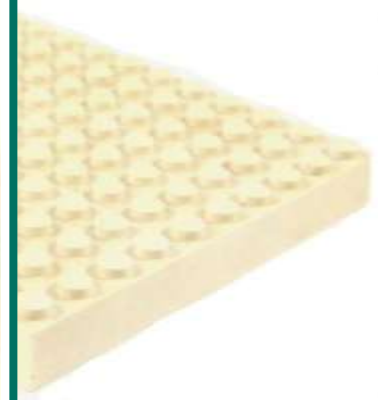
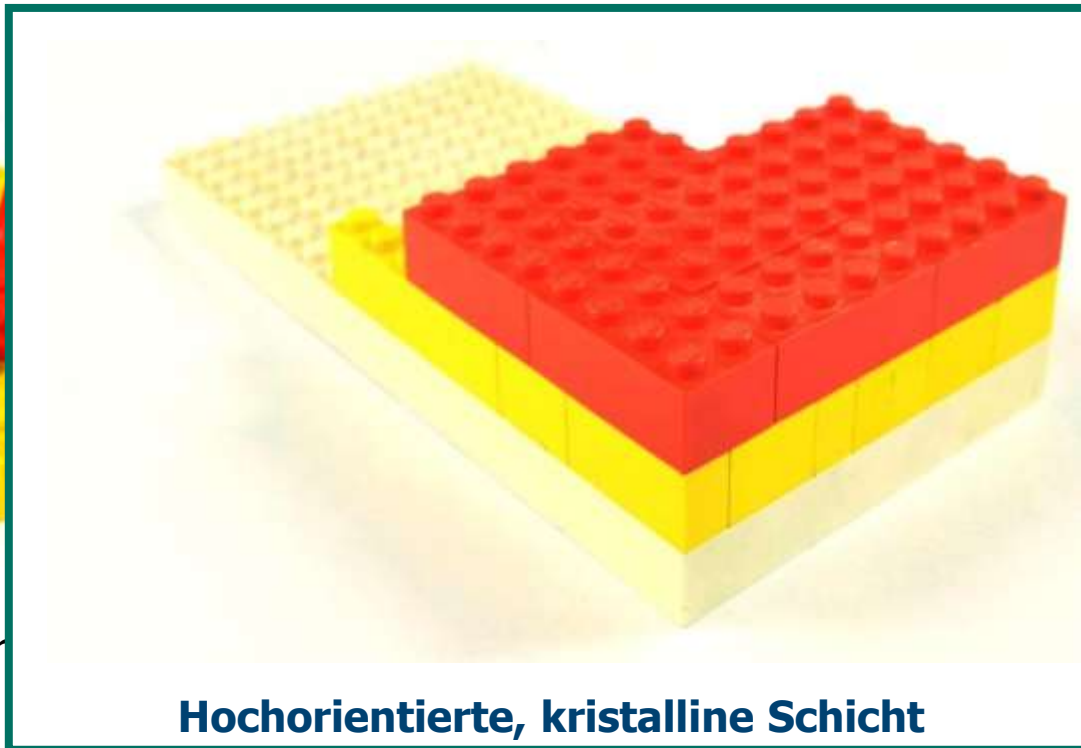


↪ Hohe Stromtragfähigkeit erfordert eine perfekte Kristallitausrichtung



Herstellung von Hochtemperatur-Supraleitern

- Die Lösung: Schichtabscheidung auf technischen Schablonen
 - Epitaktisches, orientiertes Wachstum



Statistisch or

lone

Hochorientierte, kristalline Schicht

Supraleiter - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Historische Entwicklung und klassische Anwendungen

Hochtemperatursupraleiter (HTSL)

- YBaCuO
- “Herausforderung” Korngrenzen

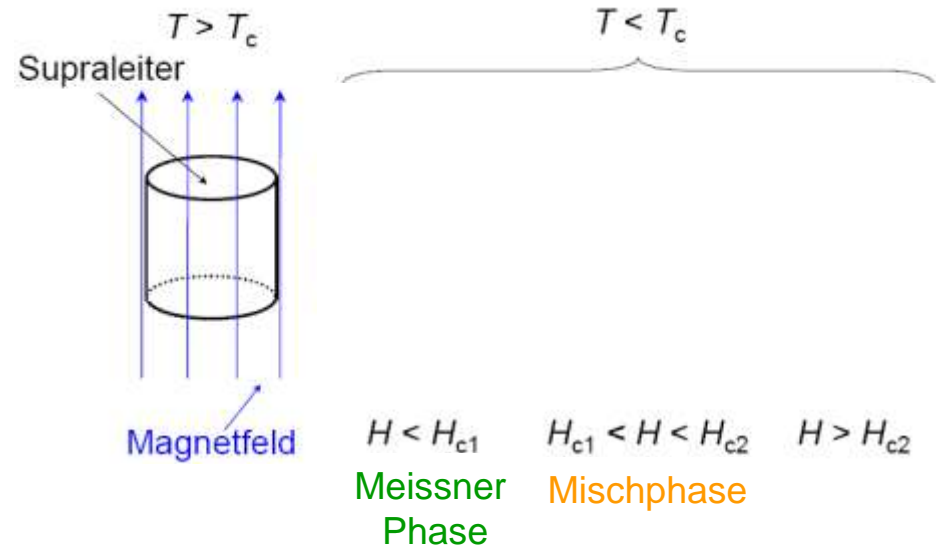
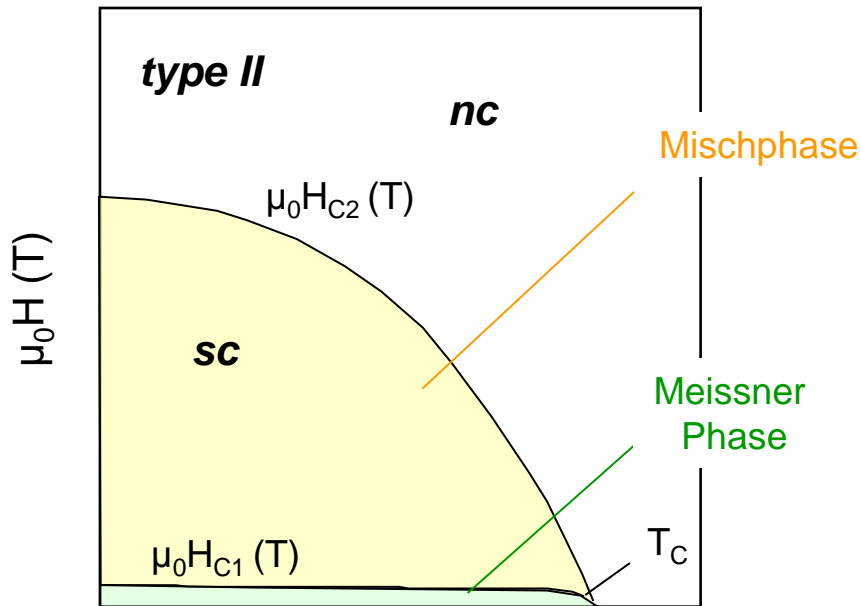
HTSL im Magnetfeld

- Der Typ II Supraleiter
- Grenzen der Magnetfeldverträglichkeit

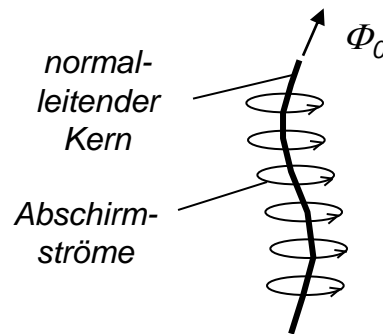
HTSL Anwendungsfelder

Anwendungsrelevante Typ II Supraleiter

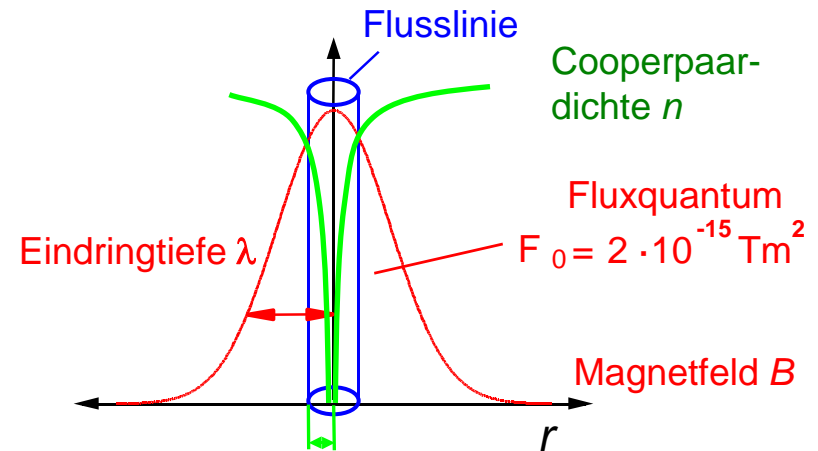
B(T) Phasendiagramm



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

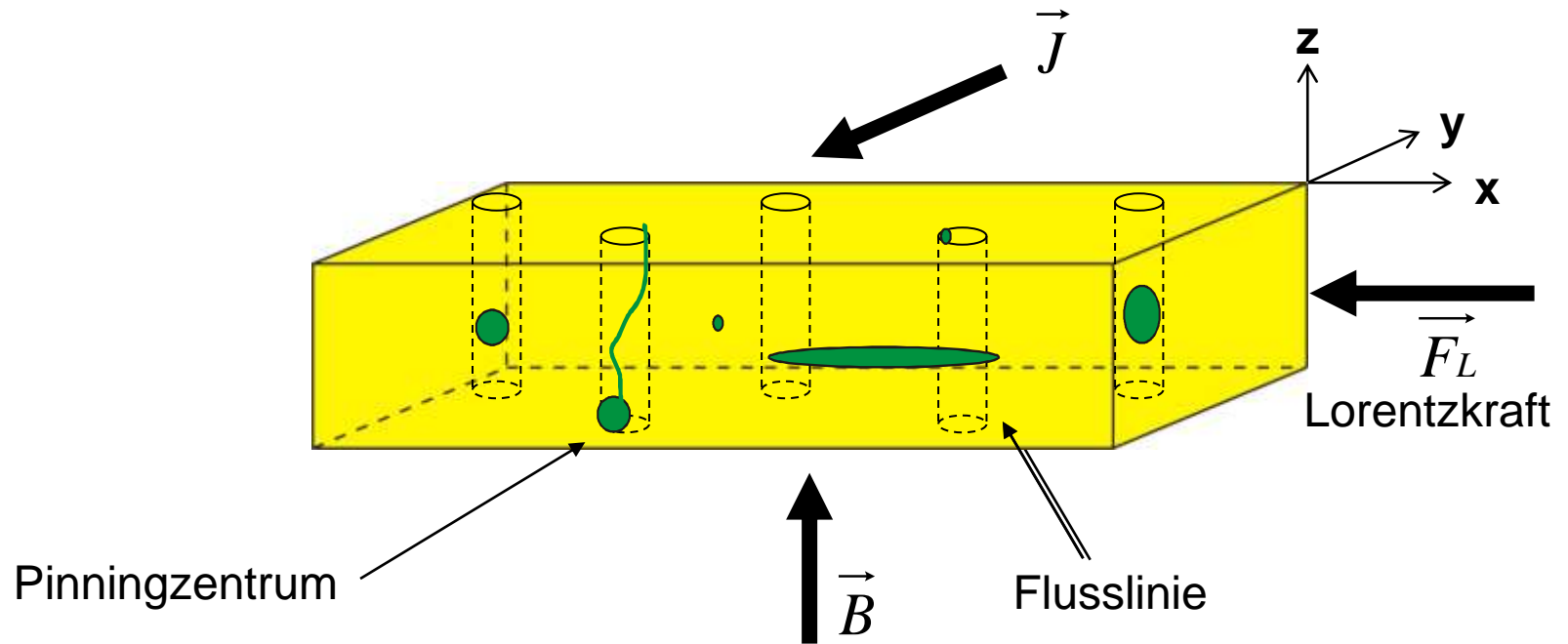


Vortex



Kohärenzlänge ξ

HTSL als 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 Nanostruktur der HTSL
- Wechselströme/-felder erzeugen Flußlinienbewegung und damit Verluste!

Supraleiter - Grundlagen, Effekte, Anwendungen

Historische Entwicklung und klassische Anwendungen

Hochtemperatursupraleiter (HTSL)

- YBaCuO
- “Herausforderung” Korngrenzen

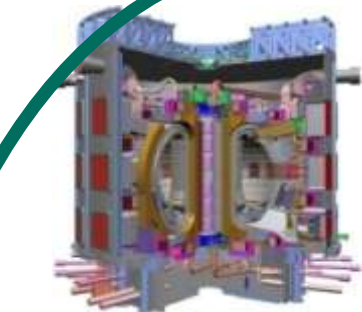
HTSL im Magnetfeld

- Der Typ II Supraleiter
- Grenzen der Magnetfeldverträglichkeit

HTSL Anwendungsfelder

Anwendungsfelder der HTSL

Fusion



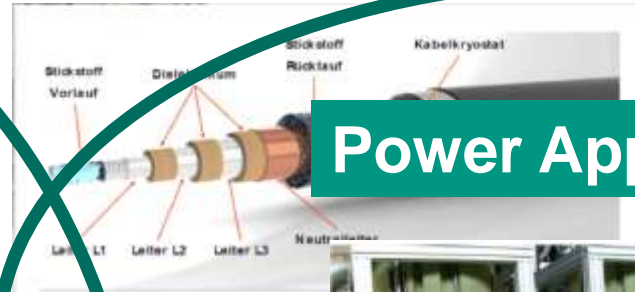
FCC



NMR/MRI

Magnets

Power Applications



AC/DC cables



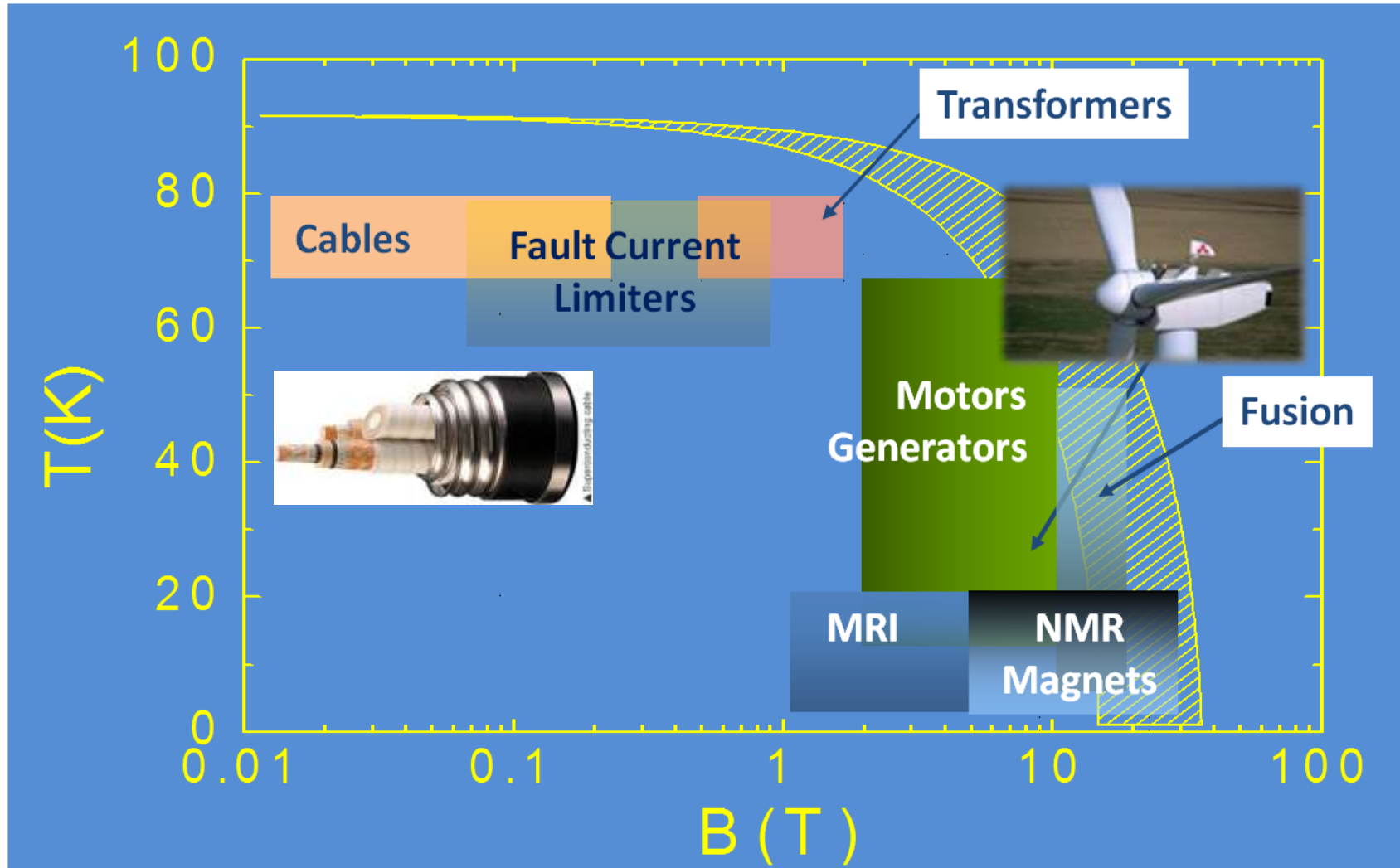
Transformer

FCL



Rotating Machines

Anwendungsfelder der HTSL



Anwendungsspezifische HTSL Anforderungen

- Power Applications
(HT/LB Eigenschaften, Homogenität, Kosten, Verbindungen, Isolation)
- Rotierende Maschinen
(MT/MB Eigenschaften, AC-Verluste, J_e (inkl. Isolation), mechanische, lange Leiterlängen, Kosten)
- Magnete
(LT/HB Eigenschaften, mechanische und elektrische Stabilisierung, supraleitende Verbindungen, lange Leiterlängen)
- Hochstromanwendungen erfordern multi-strand Kabelkonzepte

HT: High Temperature

MT: Medium Temperature

LT: Low Temperature

HB: High Field

MT: Medium Field

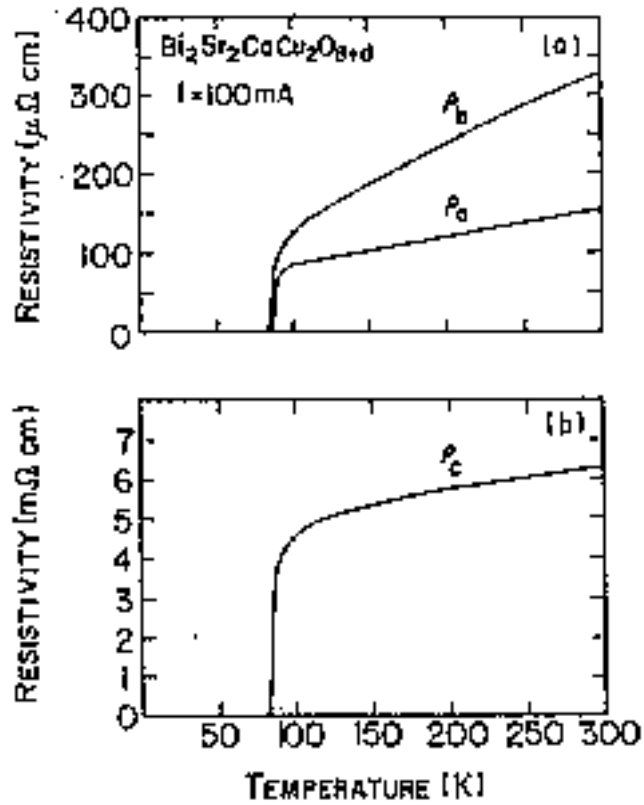
LT: Low Field

Zusammenfassung

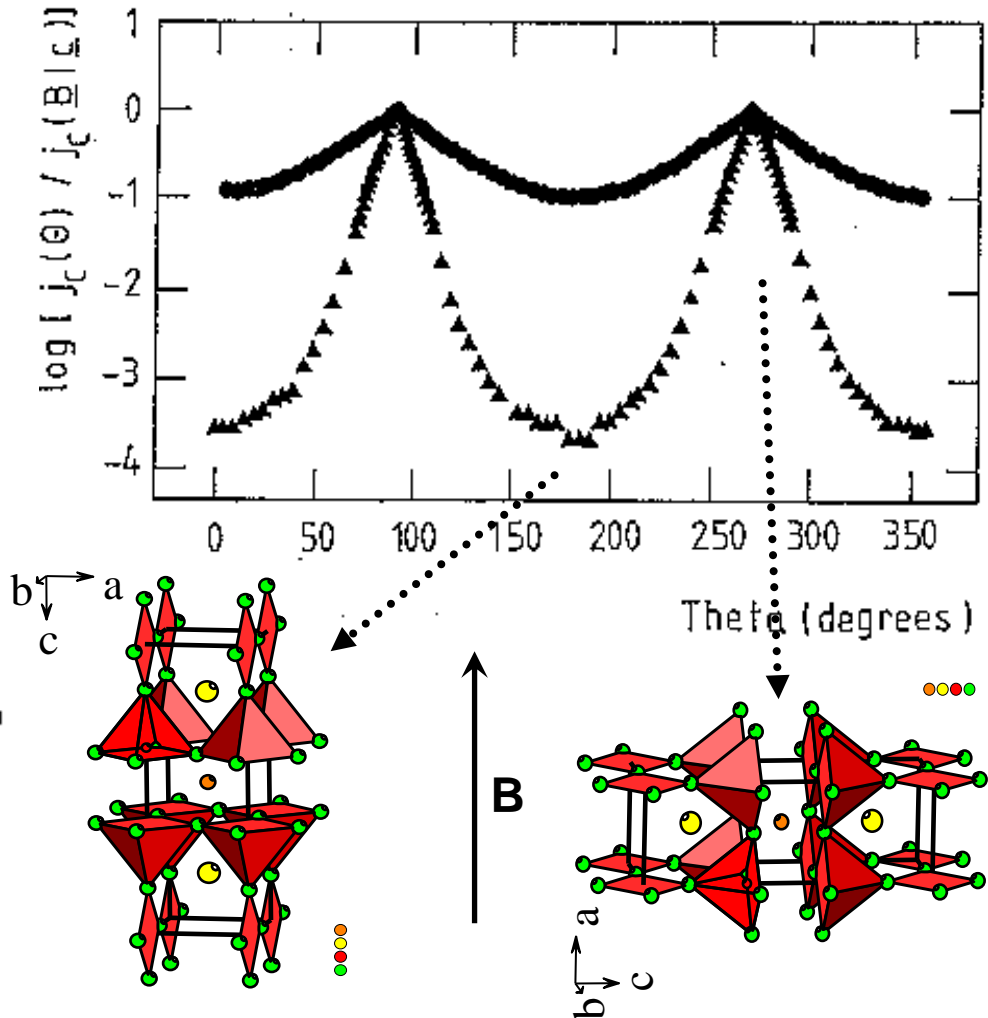
- HTSL erlauben energietechnische Anwendungen mit höchster Stromdichte, Leistungsdichte und Energieeffizienz
- Breite Anwendungsfelder für HTSL mit unterschiedlichsten Material-/Systemanforderungen
- Wechselstromverluste bestimmen Gesamtenergieeffizienz inkl. Kühlung
- Hochstromtragende HTSL Bandleiter erfordern eine industriell anspruchsvolle Herstellung und den Einbau komplexer Nanostrukturen
- Kostengünstige HTSL Bandleiter sind Grundvoraussetzung für einen breiten Markterfolg

Starke Anisotropie der HTSL

Widerstand

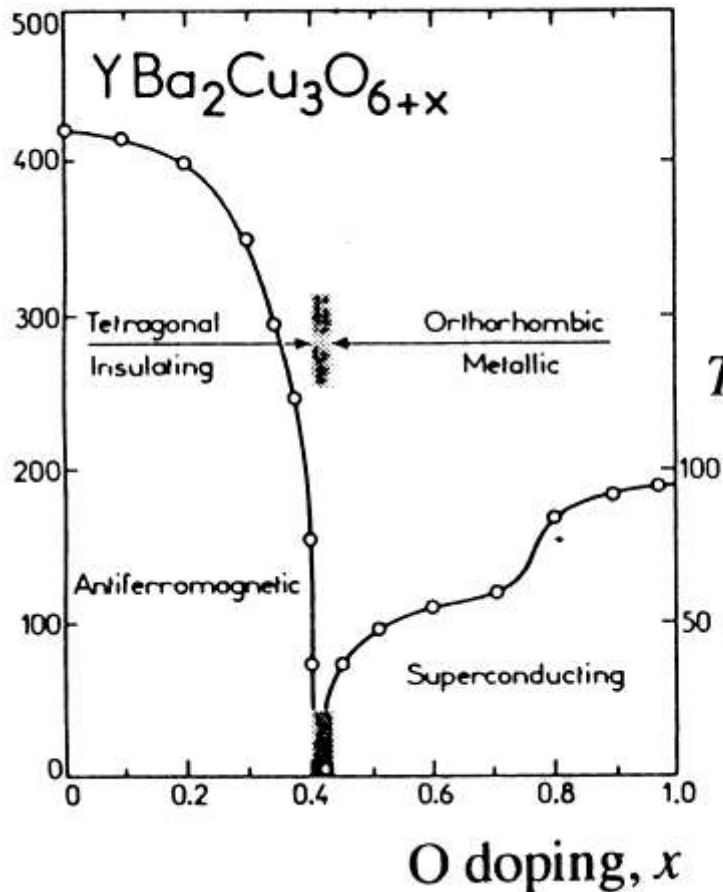


Kritische Stromdichte

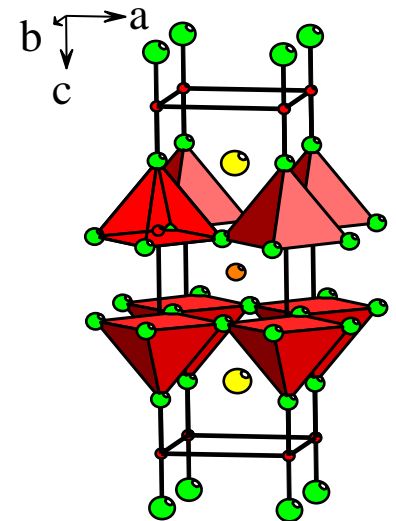
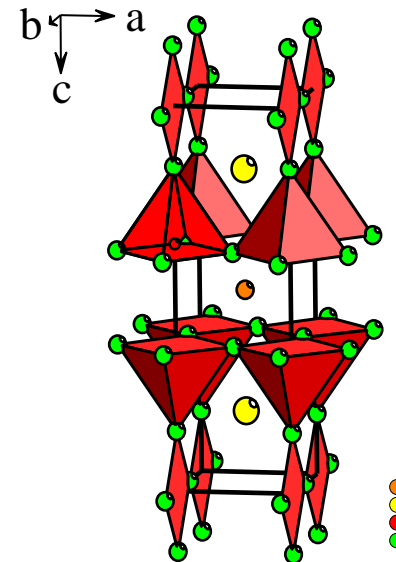


O-Dotierung und T_c

T_N / K



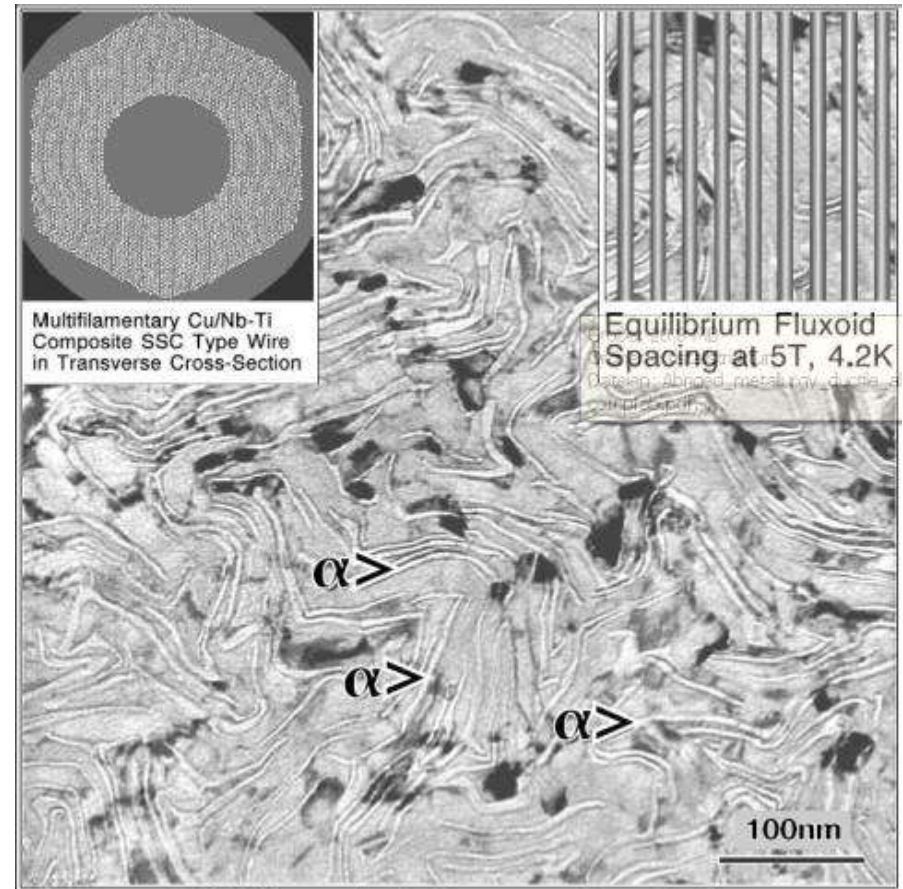
T_c / K



T_c hängt stark vom O-Gehalt ab

NbTi: Erhöhung der kritischen Stromdichte J_c durch α -Ti Pinningzentren

- Erzeugen von nicht supraleitenden α -Ti Ausscheidungen in NbTi-Matrix durch mehrstufige Sequenz von Kaltziehen und Wärmebehandlung
- Nach dem letzten Verformungsschritt: Größe der α -Ti Ausscheidungen entspricht ungefähr den Abstand der Flusslinien

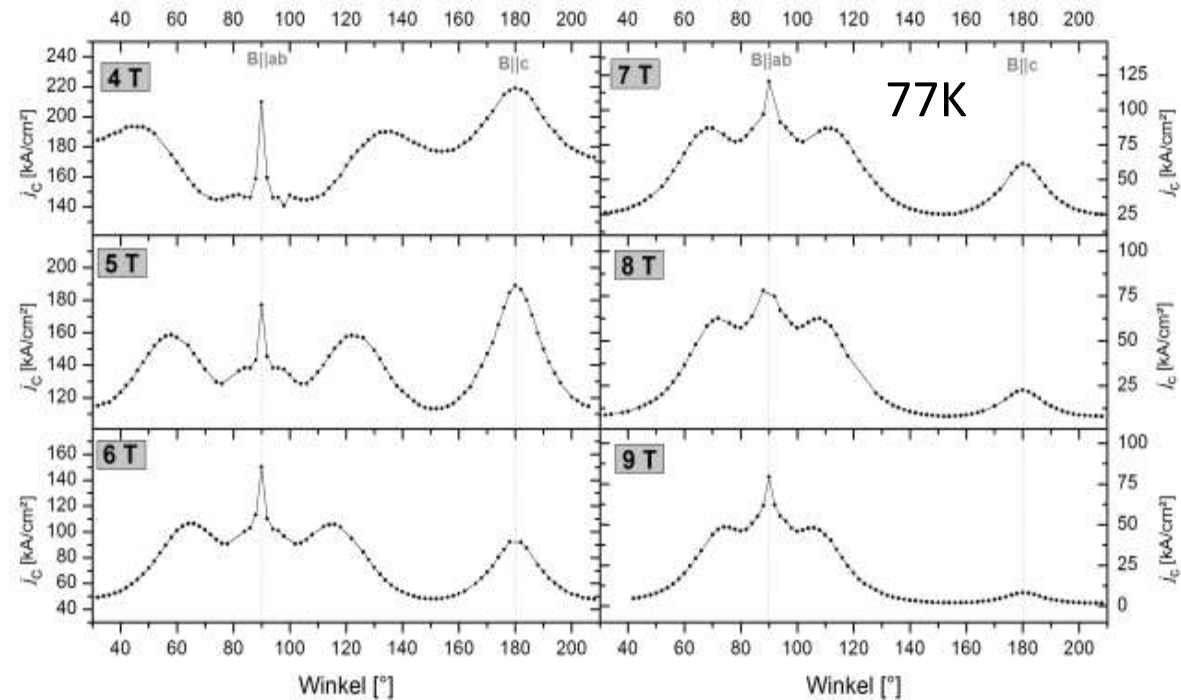
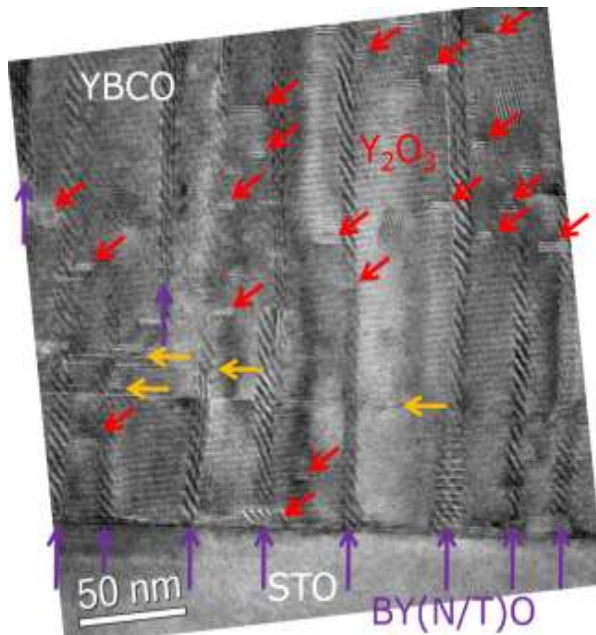


TEM Micrograph of a Transverse Cross-Section of a Nb-47wt.%Ti Filament at Peak Final Strain

Courtesy of P. Lee

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)

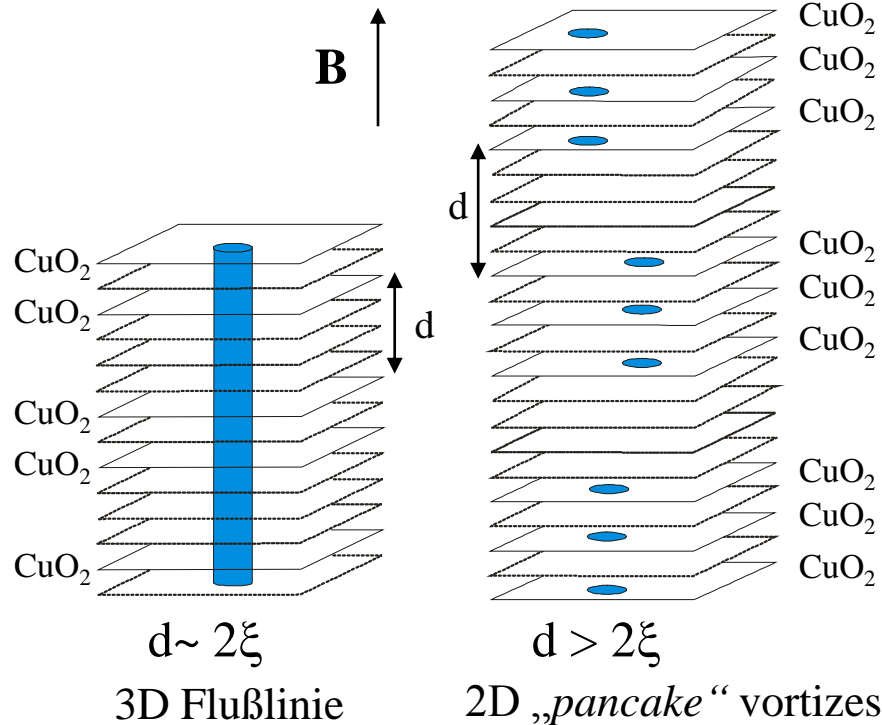


→ Reichhaltige J_c -Winkelabhängigkeit

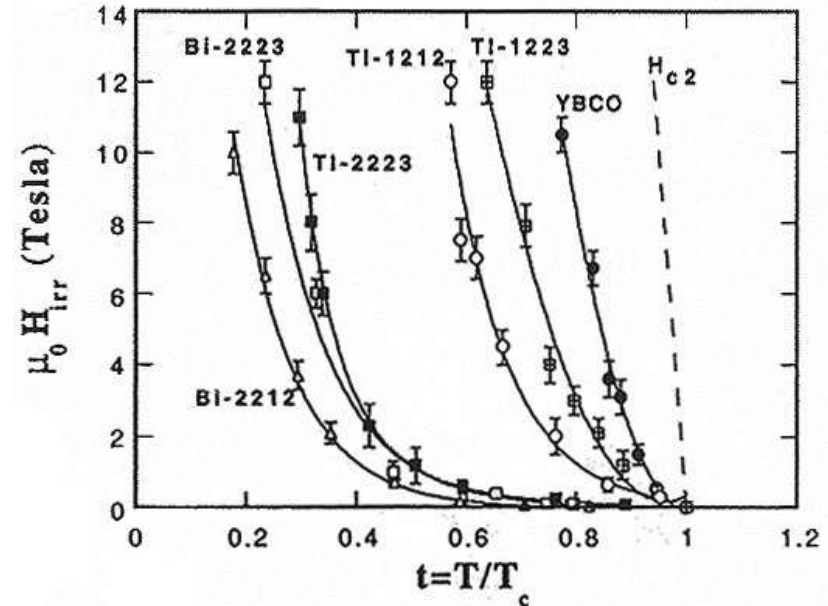
Irreversibilitätsfelder der Kuprate

YBCO

BSCCO-2223



Irreversibilitätsfelder



Sehr kleine Kohärenzlänge der Kuprate (nm) + $\xi_c < \xi_{ab}$!

Reduzierte Anisotropie vs. hohes T_c
Bei 77K hat YBCO das höchste H_{irr} !

MgB₂ : Ein neuer, alter Supraleiter

- Die Phase MgB₂ ist seit den 50´er bekannt !
 - Jones et al., *J. Am. Chem. Soc.* 76 (1954) 1434
- Supraleitung wurde aber erst 2001 entdeckt
 - Nagamatsu et al., *Nature* 410 (2001) 63
- T_c=39K : Das höchste T_c eines binären Supraleiters
- Große Kohärenzlänge, $\xi_{ab} = 7\text{-}10$ nm
- **Kein Korngrenzenproblem !**
- Moderate obere kritische Felder
 - reines MgB₂ : < 10T
 - C-dotiertes MgB₂ : < 20T
 - in Dünnschichten bis 60T !

