

Vorlesung Metallische Funktionswerkstoffe SS 2026



Leibniz Institute
for Solid State and
Materials Research
Dresden



Supraleitung IV

Dr. Ruben Hühne

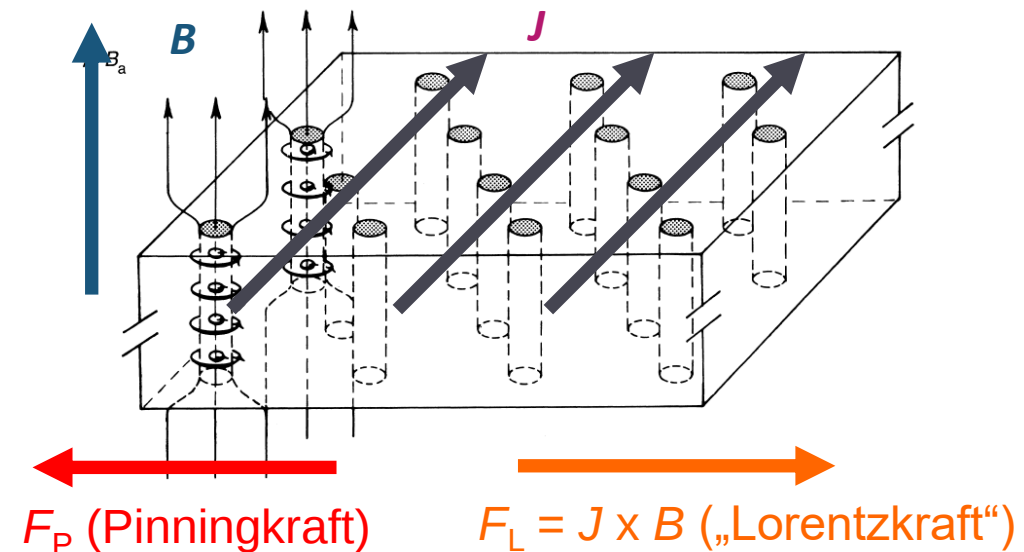
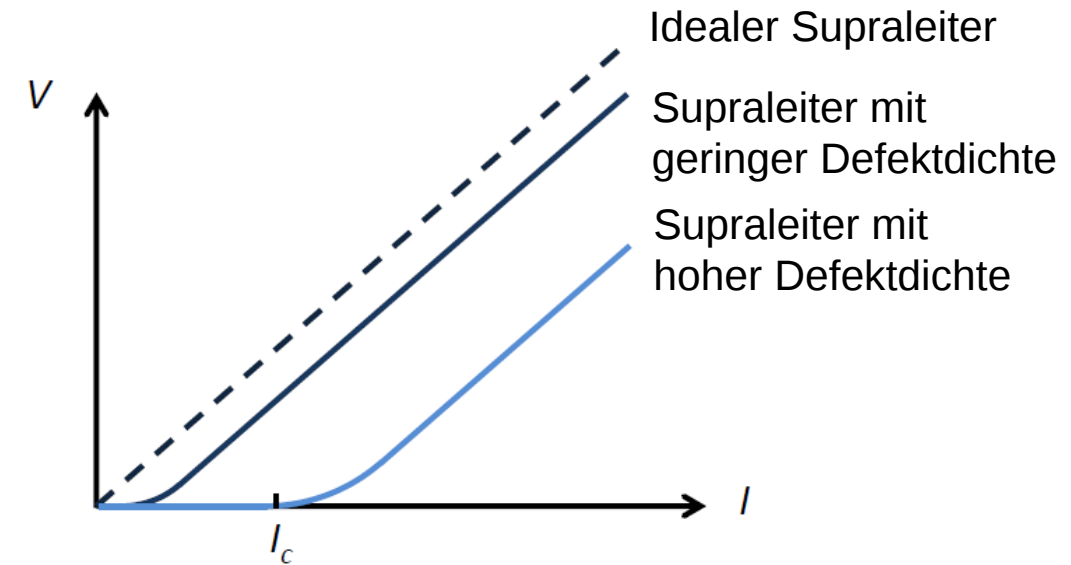
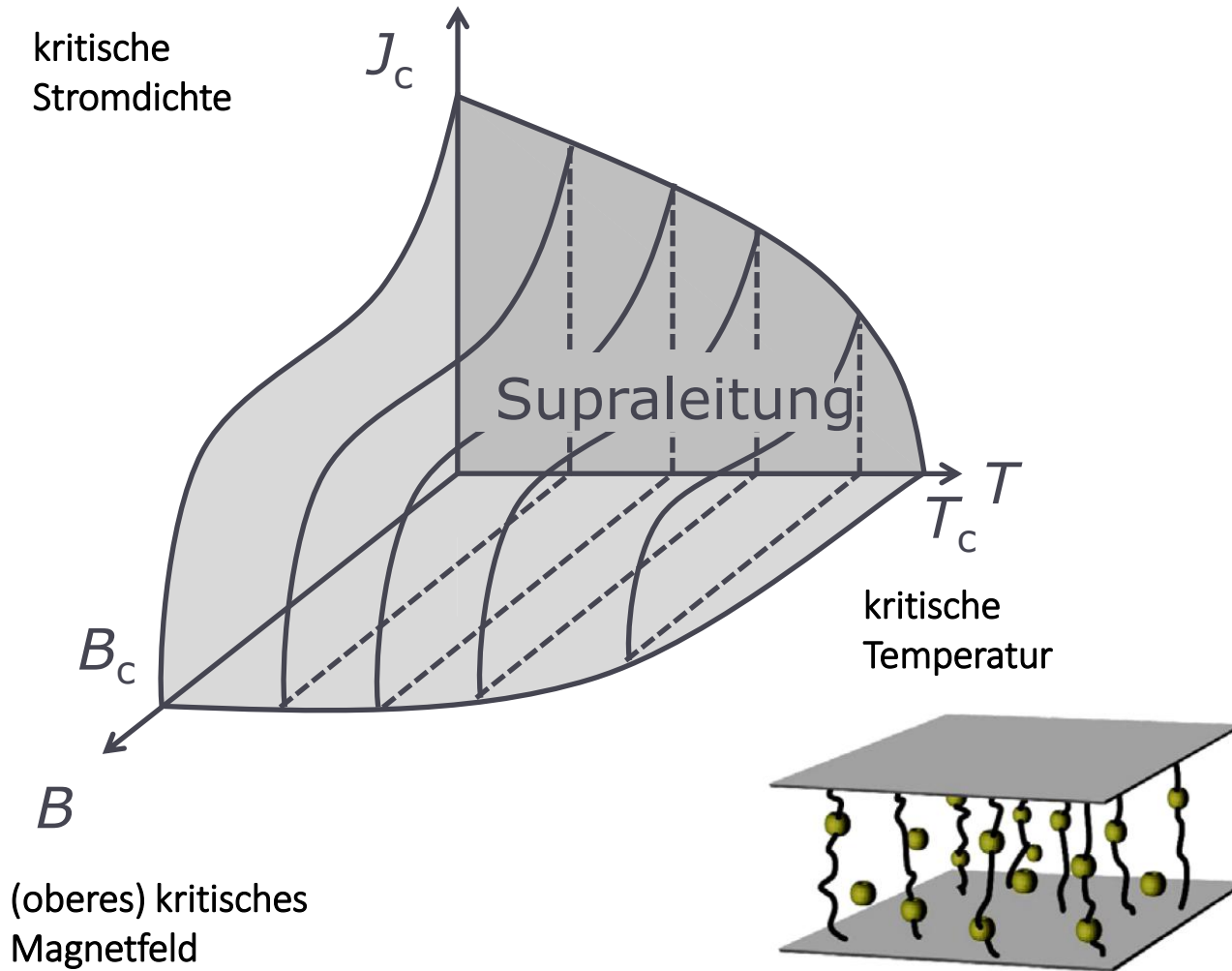
*Arbeitsgruppe Funktionale Oxidschichten und Supraleiter
Institut für Metallische Werkstoffe
IFW Dresden, Helmholtzstrasse 20, D-01069 Dresden, Germany
Mail: r.huehne@ifw-dresden.de*

Inhalt

- Entdeckung der Supraleitung
- Grundlegende supraleitende Effekte
- Phänomenologische Beschreibung
- Mikroskopische Beschreibung der Supraleitung
- Kritische Stromdichte und Pinning
- Konventionelle Supraleiter
- Ausgewählte unkonventionelle Supraleiter
 - Hochtemperatursupraleitung: Kuprate
 - Fe-basierte Supraleiter

Grundlegende supraleitende Effekte

Supraleitendes Phasengebiet



Konventionelle Supraleiter

Nb-basierte Legierungen

	T_c (K)
Nb	9.2
Nb ₃ Sn	18.0
Nb ₃ Ge	23.2
Nb ₃ Al	~19.0
NbTi	~10.0

- Typ II Supraleiter
- Klassische Elektron-Phonon-Kopplung
- Isotropes Verhalten
- Oft einfache kubische Struktur

Nb-Ti:

- Einfach verformbare Legierung
- Optimierte Pinningstruktur

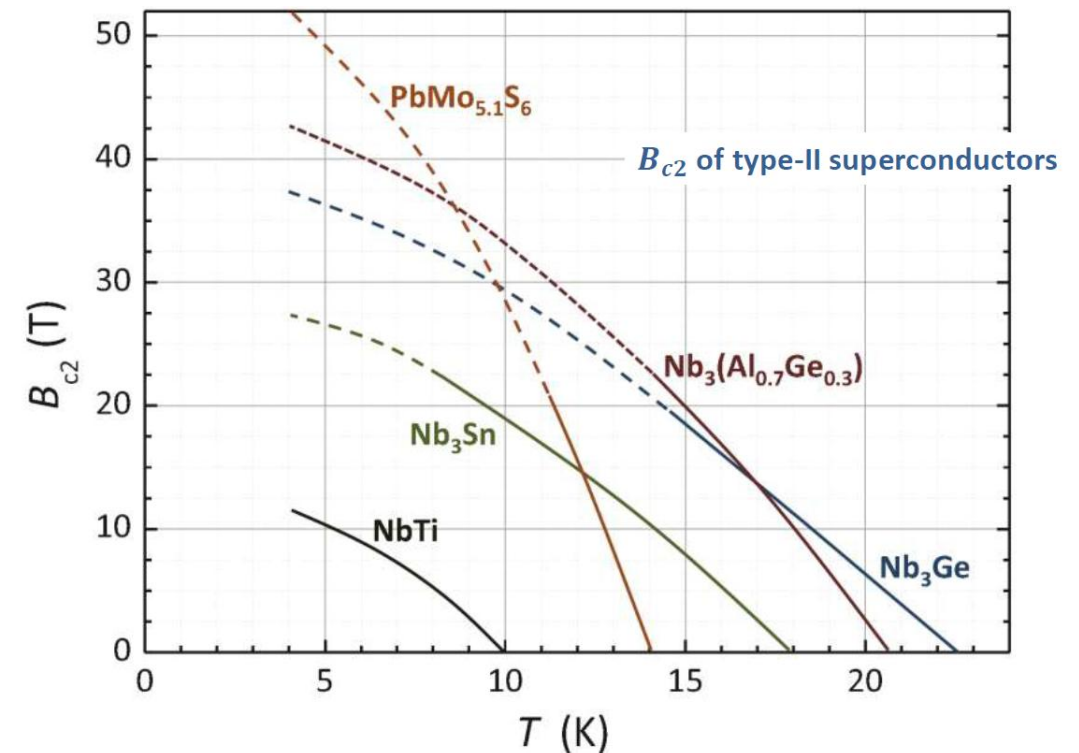
Nb₃Sn:

- Spöde intermetallische Verbindung
- Nachträgliche Reaktion aus Nb und Sn

→ Kühlung mit flüssigem He notwendig

→ Einsatz, wo stabile, starke Magnetfelder erforderlich

Verbindung	NbTi	Nb ₃ Sn	NbN
T_c [K]	≈ 10	≈ 18	≈ 16
B_{c2} [T]	≈ 10.5	≈ 23–29	≈ 15
$\lambda_L(0)$ [nm]	≈ 300	≈ 80	≈ 200
κ_∞	≈ 75	≈ 20–25	≈ 40



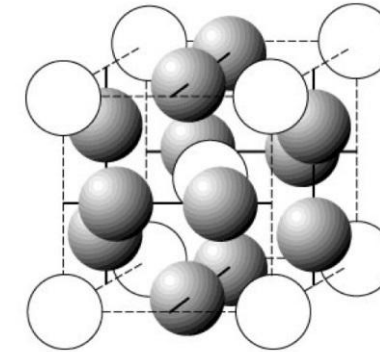
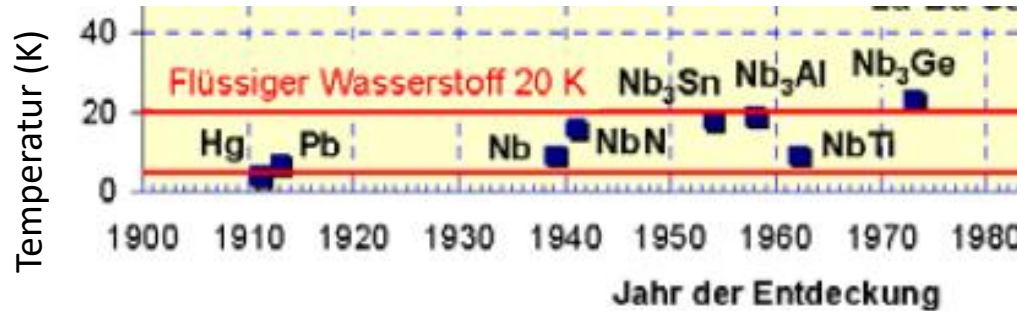
Konventionelle Supraleiter

Vergleich von NbTi und Nb₃Sn-Supraleiter

Properties	Unit	Nb47%Ti	Nb3Sn
T _c at 0T	K	10	18,3
Magnetic field	T(max)	11	25
Critical current density	A/mm ²	3300 (5T), 400 (9,5T)	12000 (5T), 3000 (12T)
Structure		Solid solution alloy	Intermetallic compound
Ductility		Ductile/tough	Ductile, brittle (after reaction)
Manufacturing methods		Co-process, hot/cold	Internal-Tin
		Precipitation HT	Bronze
			Power-In-Tube
Max unit length	km	50 - 270	10 - 40
Max unit weight	kg	200-450	50-100
typical final diameter	mm	0,4 - 2,0	0,6 - 1,5
Cu/Sc-ratio		1- 14	0,3 - 1,5
Filament size	micrometer	2,5 - 120	2 - 6
Filament number		1- 40 000	3000 - 40 000
Price	EUR/kg	50-200	500 - 1000
Technical price	EUR/kAm	1-4	10-20

Entdeckung neuer Supraleiter

Frage: Gibt es Regeln, mit denen ich nach besseren Supraleitern suchen kann?



Höchstes T_c : 23.2 K in Nb₃Ge

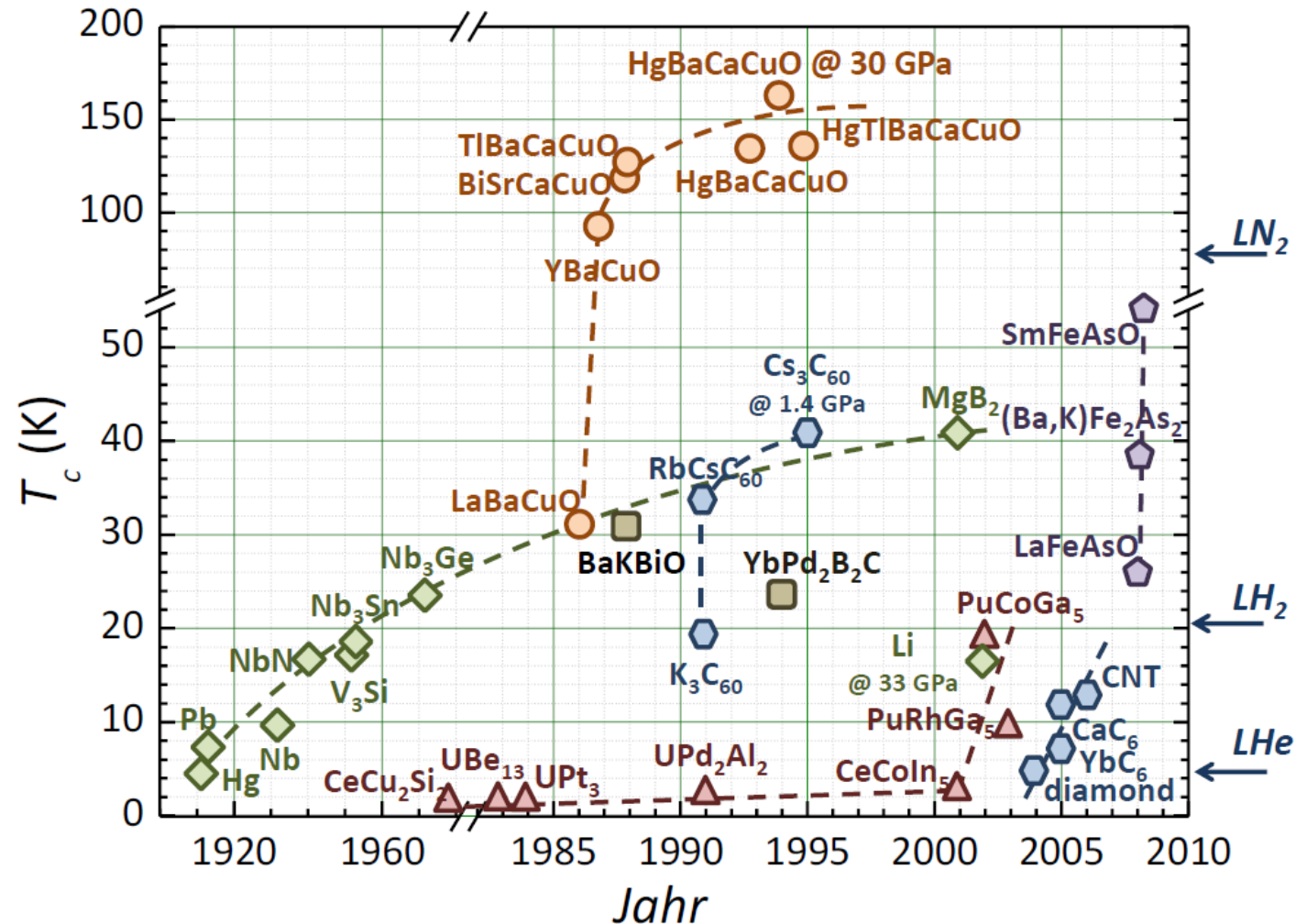
Matthiassche Regeln für hohes T_c 's (1960s)

- Übergangsmetalle sind besser als einfache
- Hohe Kristallsymmetrie (kubisch!)
- Hohe Ladungsträgerdichte am Ferminniveau
- Kein Sauerstoff
- Kein Magnetismus (d.h. Fe, Co, Ni)
- Keine Isolatoren

$$T_c = 1.13\theta_D \exp\left(-\frac{1}{g(E_F)V}\right)$$

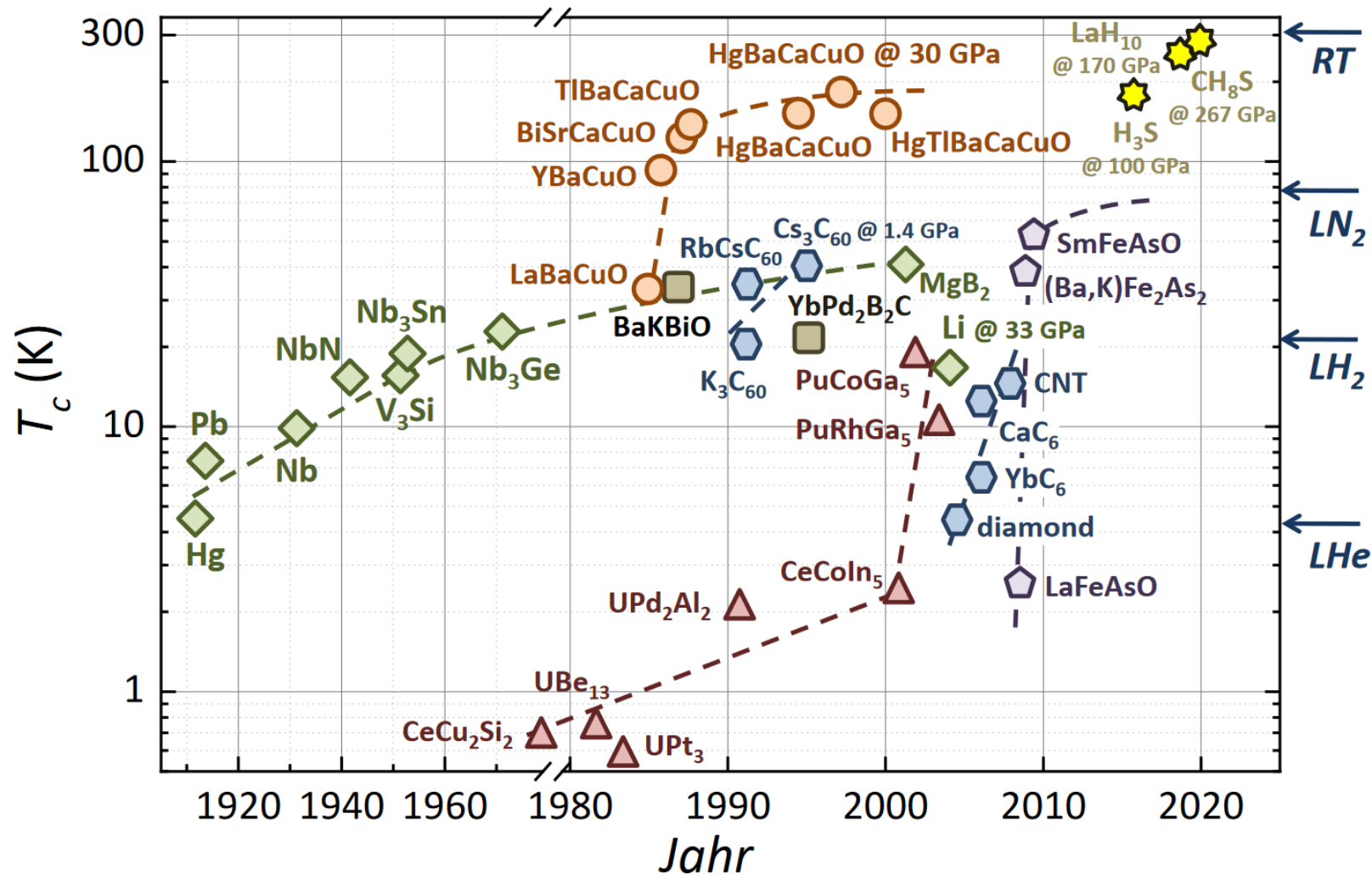
Entdeckung neuer Supraleiter

Ausgewählte supraleitende Materialien



Entdeckung neuer Supraleiter

Ausgewählte supraleitende Materialien

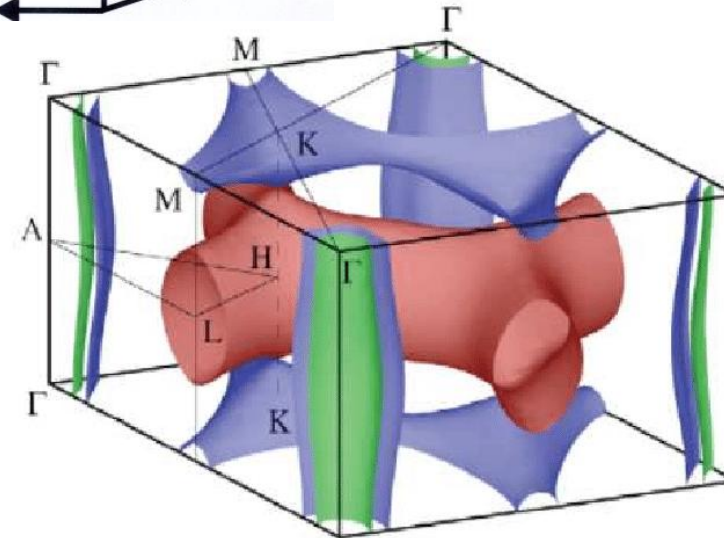
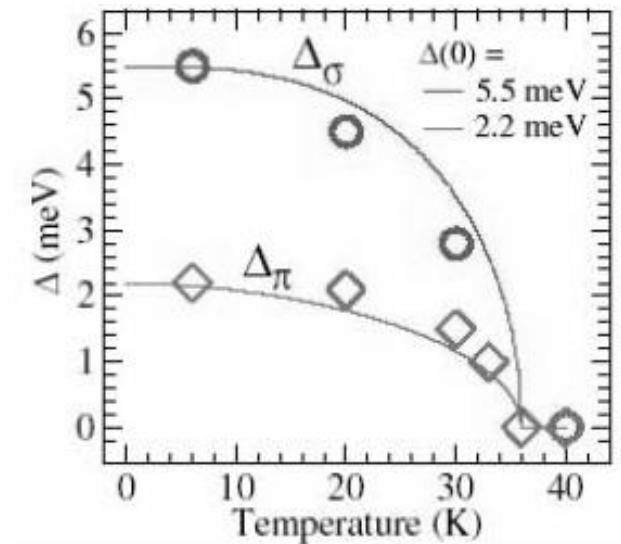
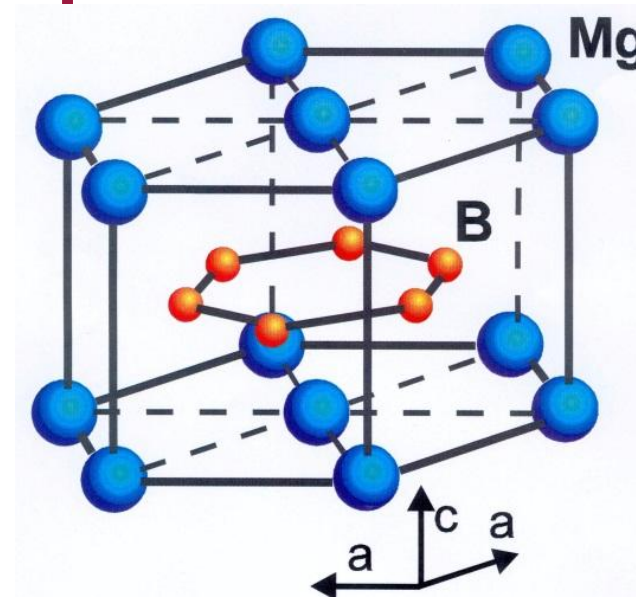


Neue konventionelle Supraleiter

MgB₂

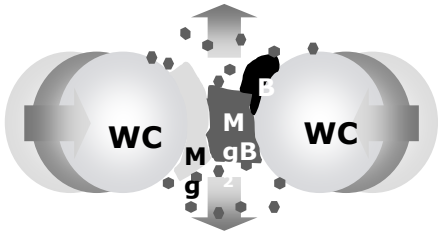
- Phase bekannt seit den 50er Jahren, aber Supraleitung erstmals 2001 gemessen
- $T_c = 39 \text{ K}$: höchstes T_c für binären Supraleiter
- Hexagonale Struktur
- Mehrere Bänder für Supraleitung verantwortlich: zwei Bandlücken
- Korngrenzen nicht begrenzendes Kriterium für kritischen Strom

große Kohärenzlänge $\xi_{ab} = 7\text{-}10 \text{ nm}$



Neue konventionelle Supraleiter

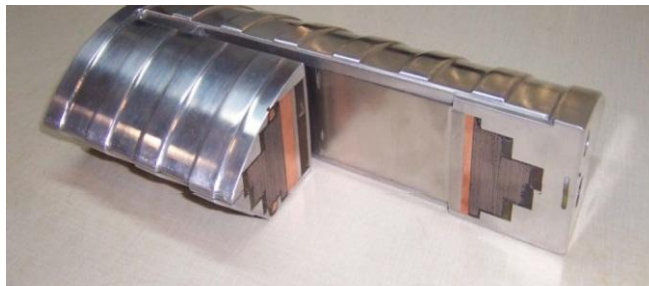
Pulver-im-Rohr Technologie für MgB_2



Mechanisch legierte Prekursoren + Metallhülle → supraleitender Draht

Anwendungen of MgB_2

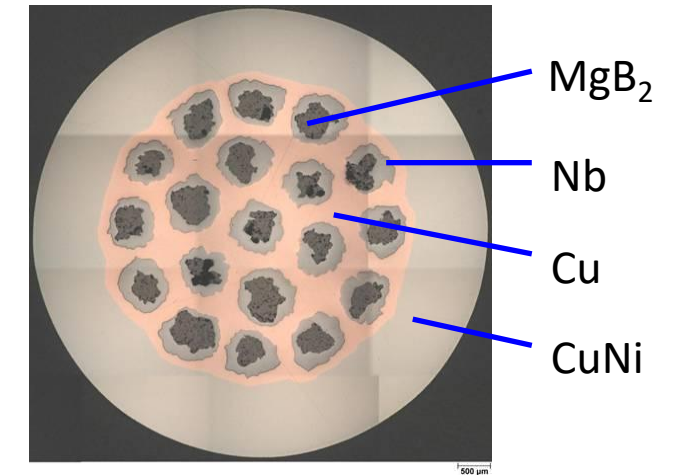
Temperatur für potentielle Anwendungen:
~ 20 K (Siedepunkt von Wasserstoff)



Off-shore Windturbine:
Generator (Hypertech Ohio)



Smart Grid: Fehlerstrombegrenzer
(Cesi Ricerca Milano)



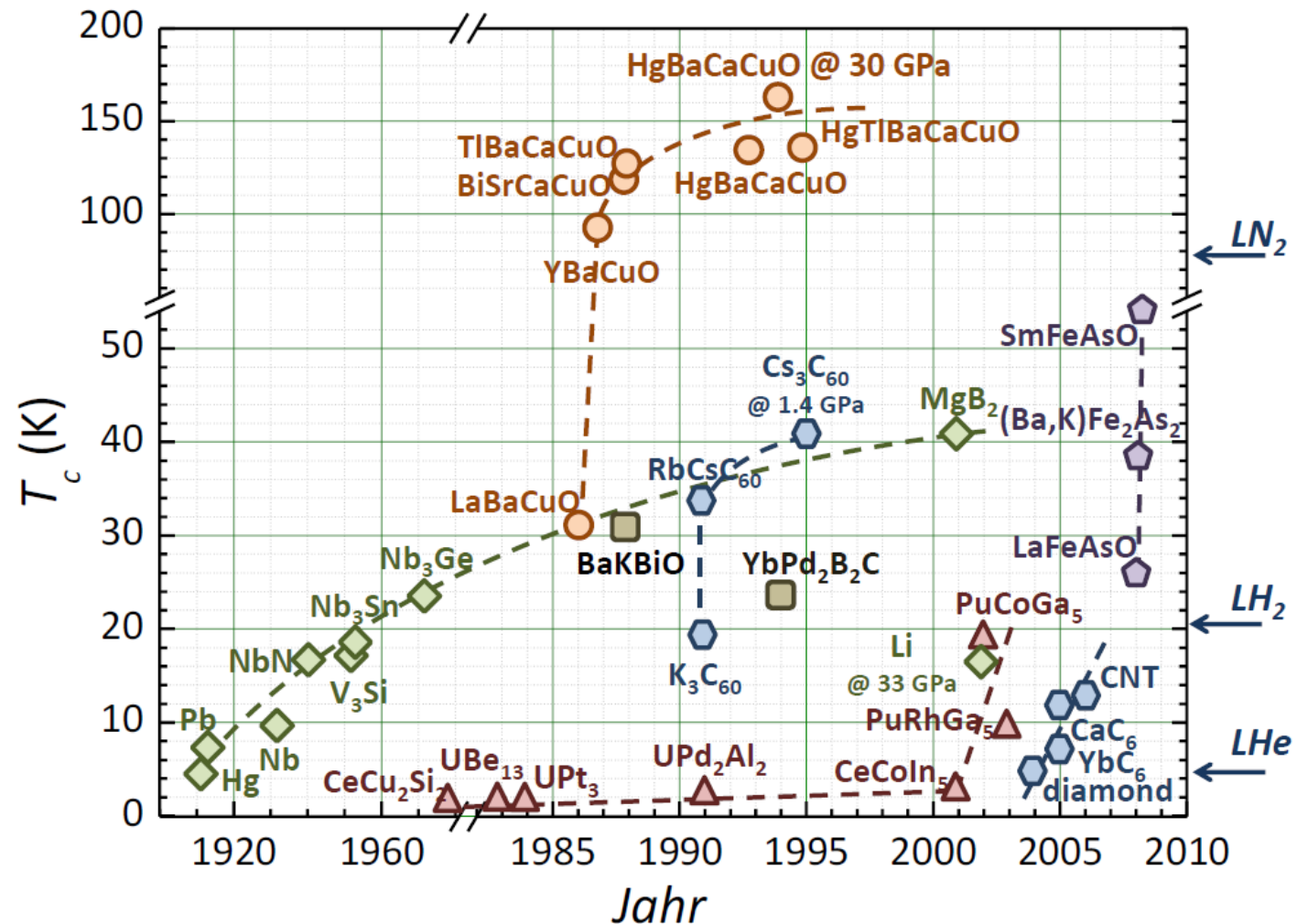
MgB₂ Multifilamentleiter



Magnet für MRI-Systeme
(Columbus/ASG Genua)

Entdeckung neuer Supraleiter

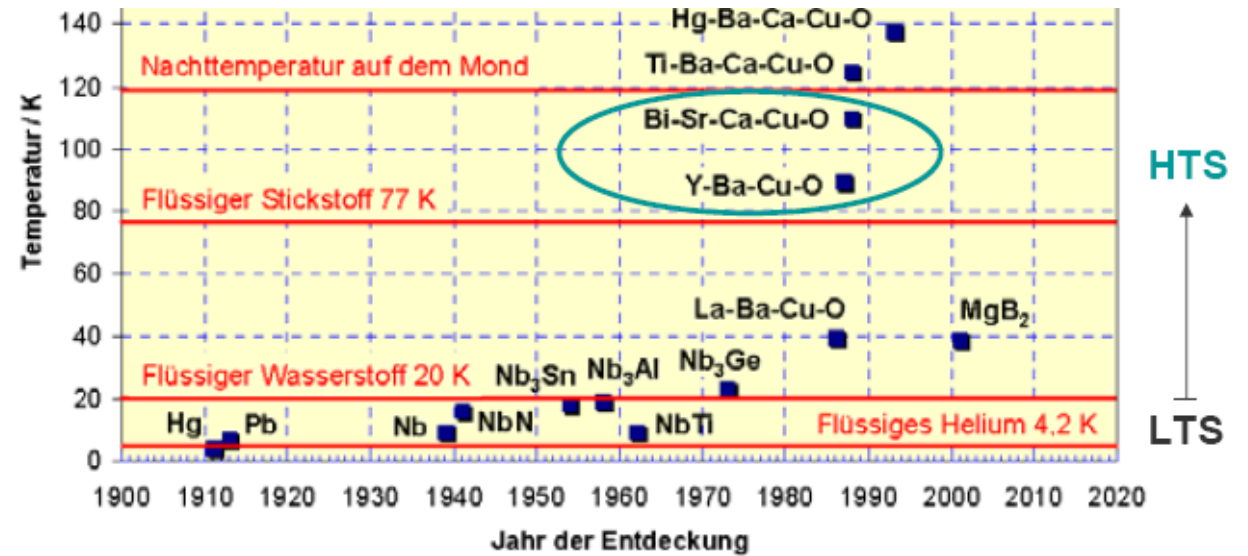
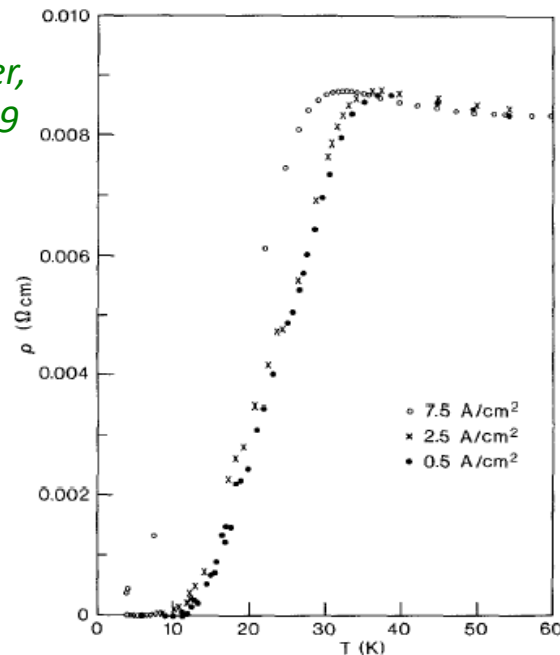
Ausgewählte supraleitende Materialien



Hochtemperatursupraleiter



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



→ Kühlung mit flüssigem Stickstoff möglich

Für
Anwendungen
interessant

compound		T_c (K)
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	Y-123	92
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	Bi-2212	84
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	Bi-2223	110
$\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	Tl-1223	125
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	Hg-1223	133

Hochtemperatursupraleiter

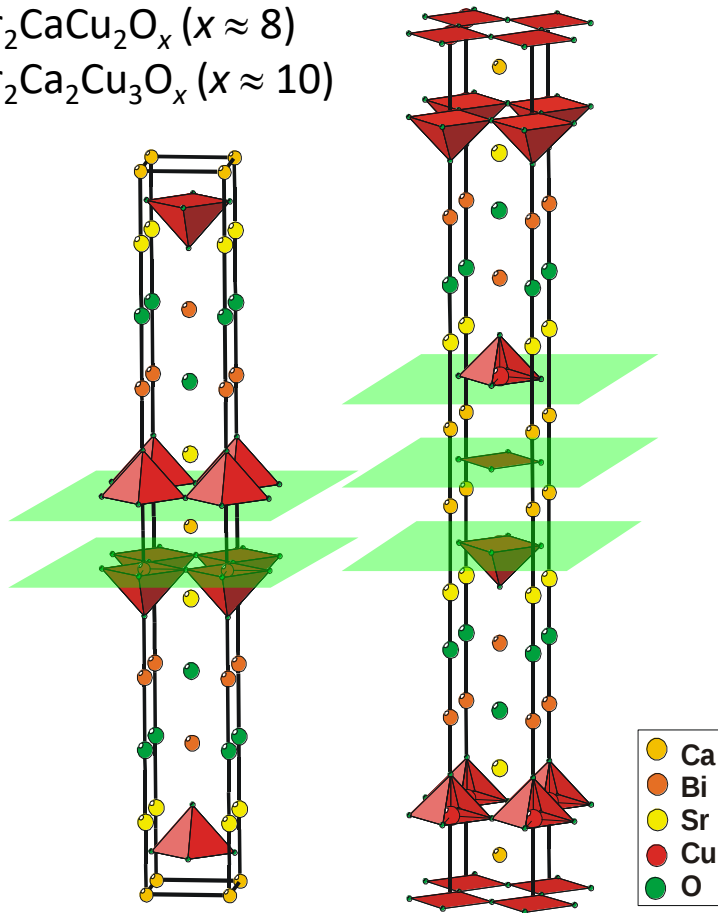
BiSCCO

Bi(Pb)-2212

Bi(Pb)-2223

2212 $\approx (\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ($x \approx 8$)

2223 $\approx (\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($x \approx 10$)



$T_c = 85 \text{ K}$

$T_c = 110 \text{ K}$

komplexe
Keramiken mit
Schichtstruktur
(2-dimensional)

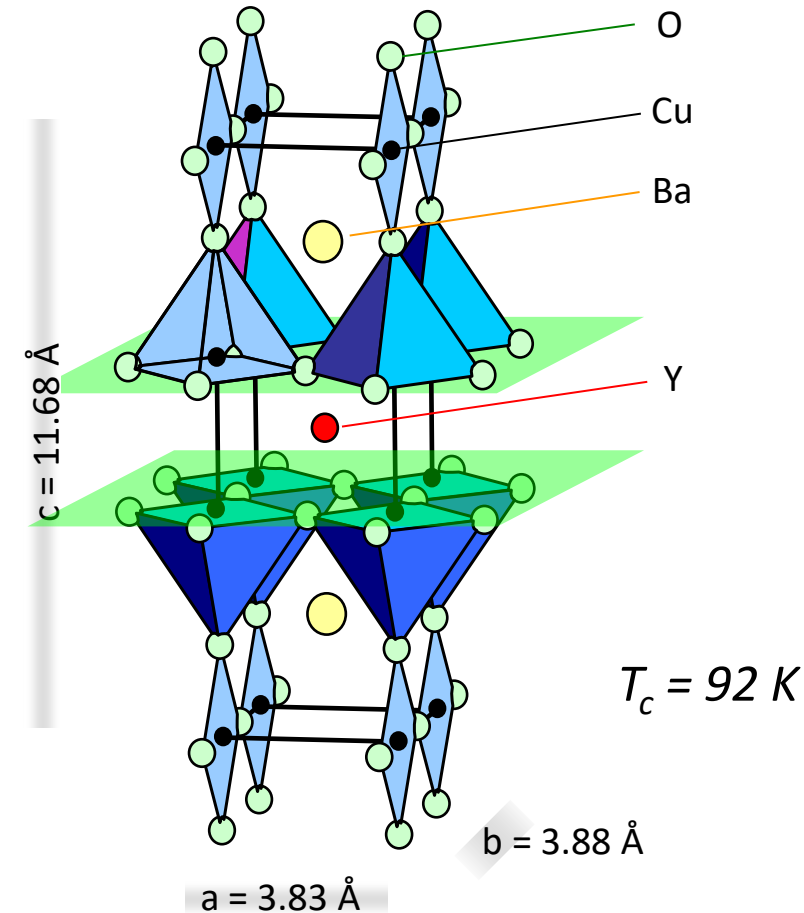
CuO_2 -Ebenen
verantwortlich für
Supraleitung

Eigenschaften
zeigen starke
Richtungs-
abhängigkeit

REBCO

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

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

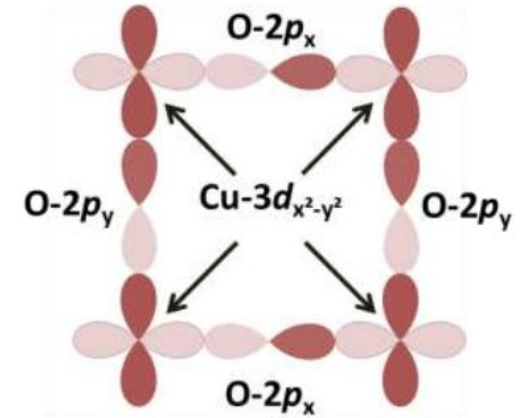
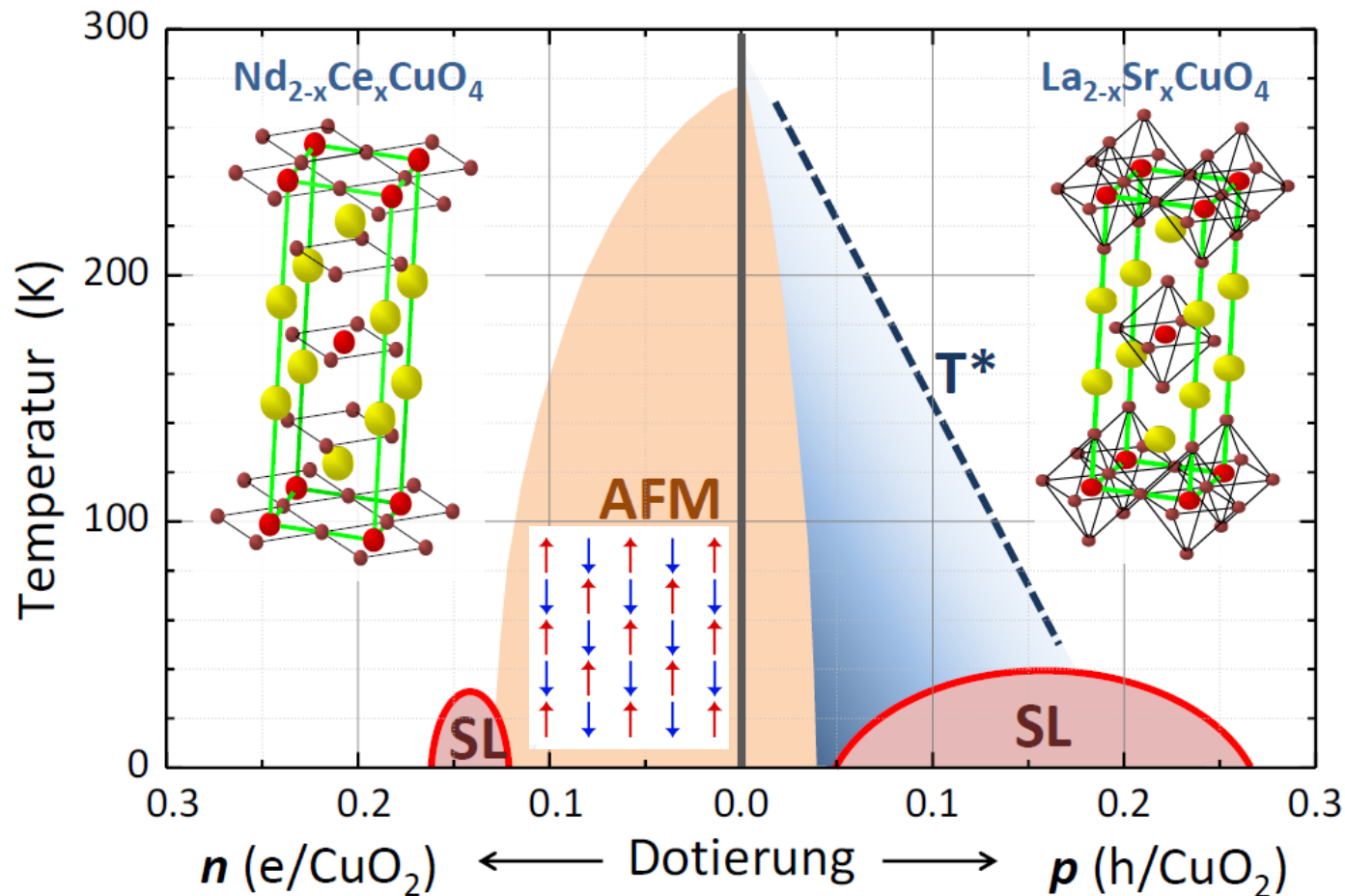


$T_c = 92 \text{ K}$

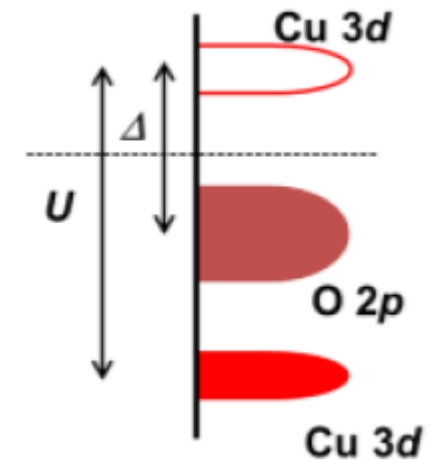
Kuprate-Supraleiter

Phasendiagramm

Ausgangsverbindung: antiferromagnetischer Isolator



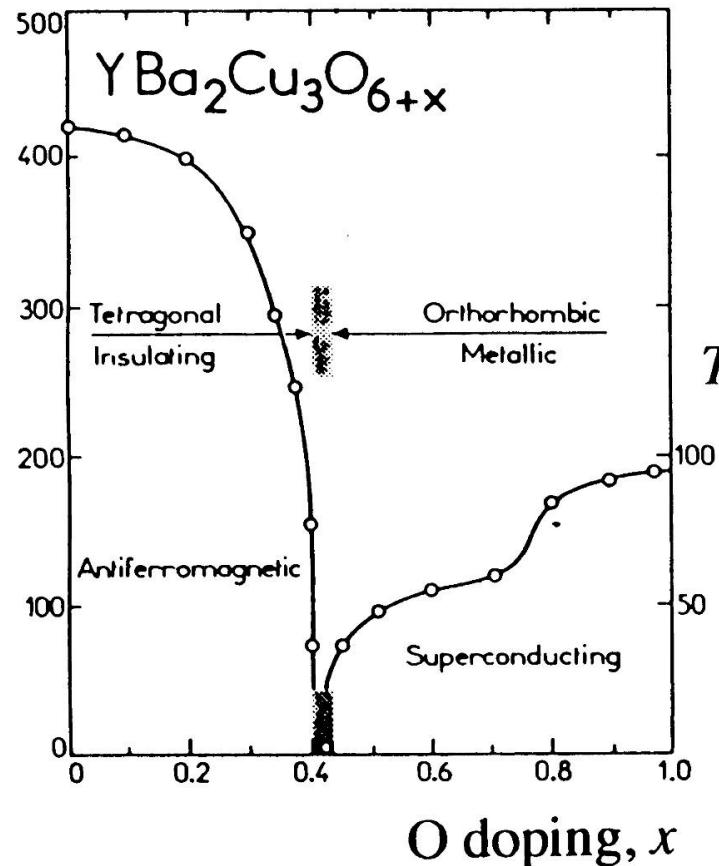
- 1 Außenelektron pro Cu-Atom
- Hüpfen zum Nachbaratom unterbunden



Kuprate-Supraleiter

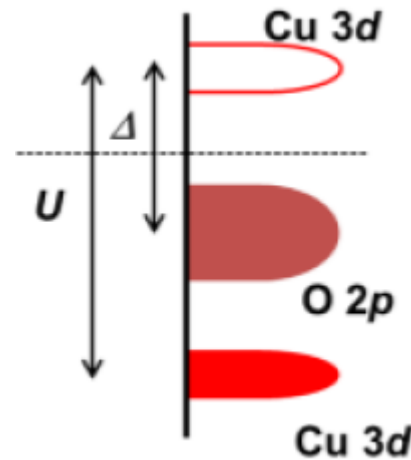
Phasendiagramm YBCO

T_N / K

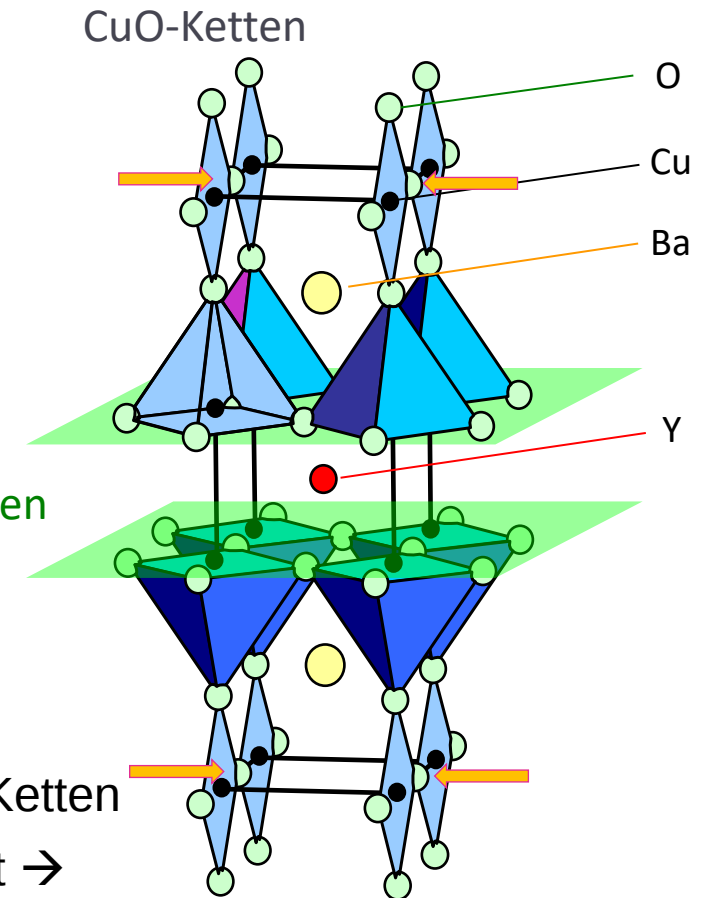


T_c / K

$x = 0$: kein Sauerstoff in den CuO-Ketten
 $x = 1$: Sauerstoff in Ketten komplett → Lochdotierung



CuO₂-Ebenen

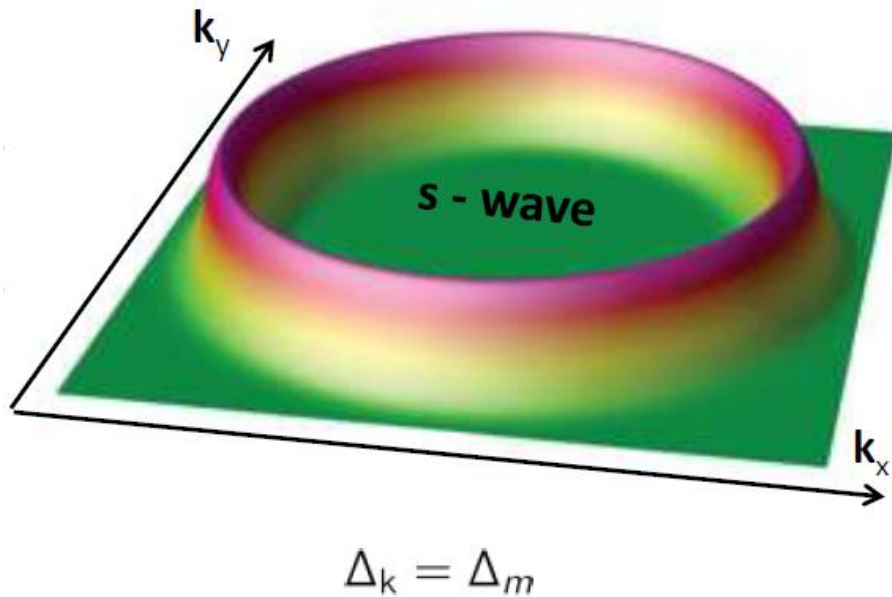


Kuprate-Supraleiter

Symmetrie der Wellenfunktion

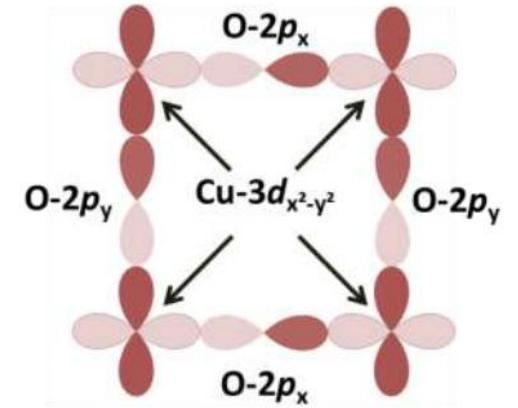
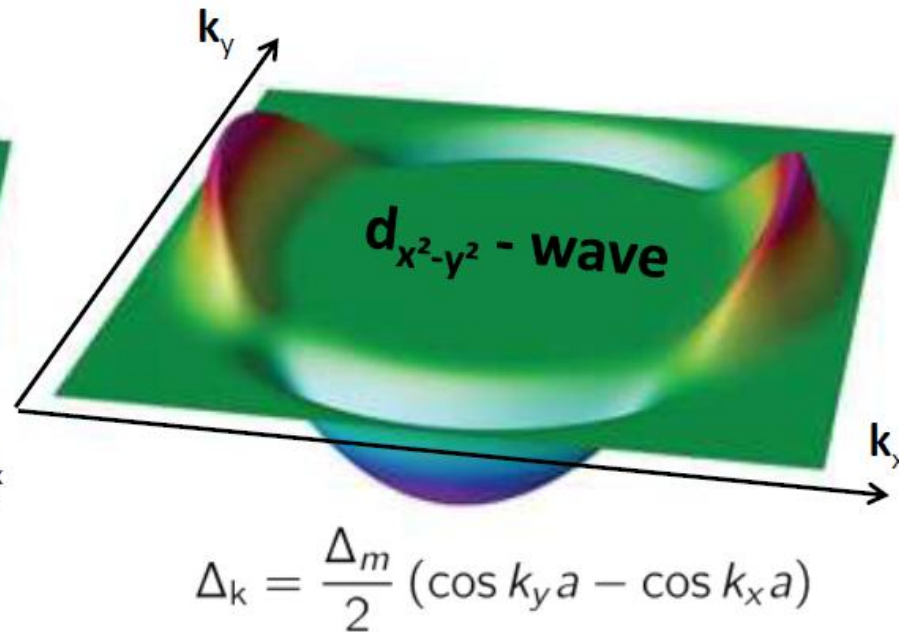
Konventionelle (metallische) Supraleiter

$$L = 0, S = 0$$



Kuprat-Supraleiter

$$L = 2, S = 0$$

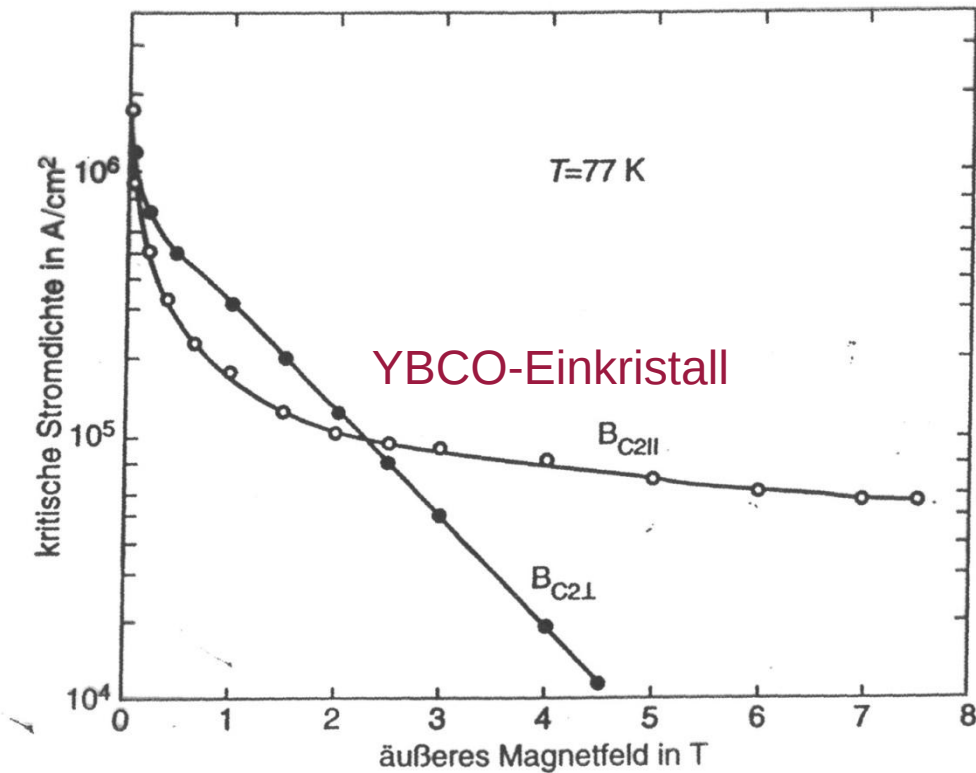


→ Attraktive Wechselwirkung zur Cooper-Paarbildung ist nicht mehr isotrop, sondern richtungsabhängig

Kuprate-Supraleiter

Anisotropie der Eigenschaften

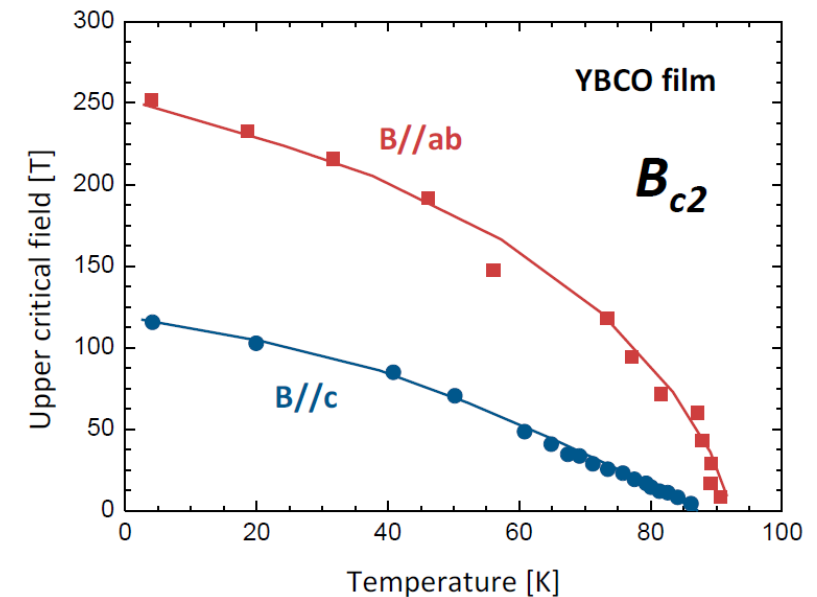
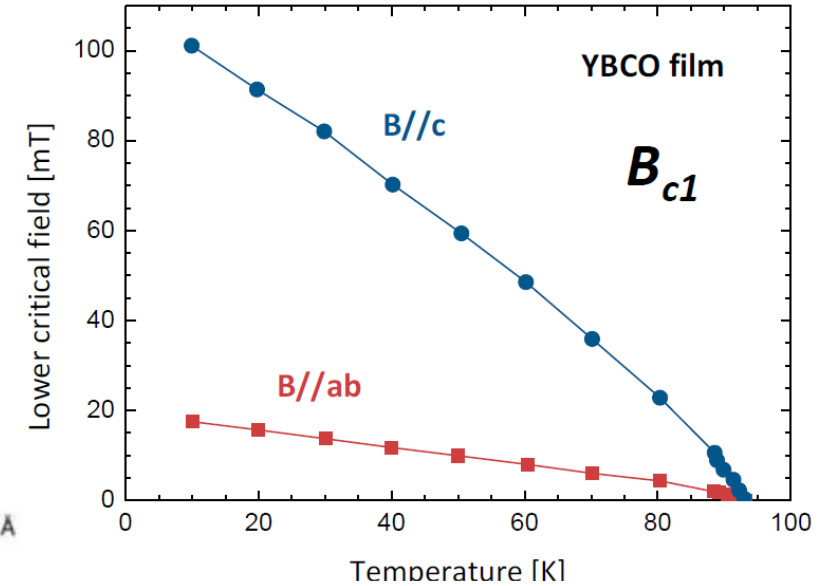
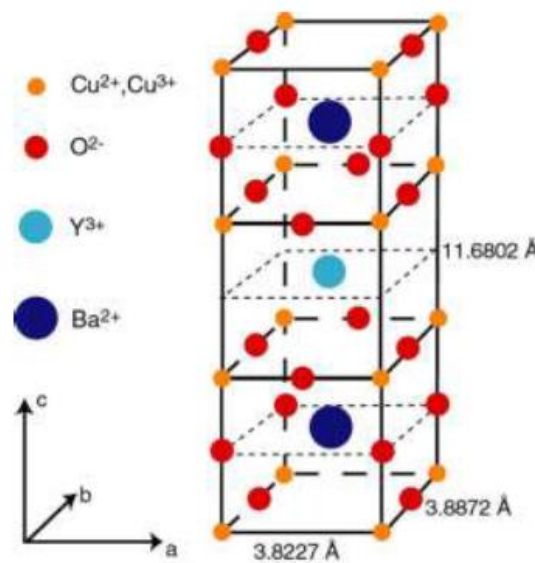
kritische Stromdichte



Anisotropieparameter

$$\gamma = \frac{\lambda_c}{\lambda_{ab}} = \frac{\xi_{ab}}{\xi_c}$$

kritische
Felder

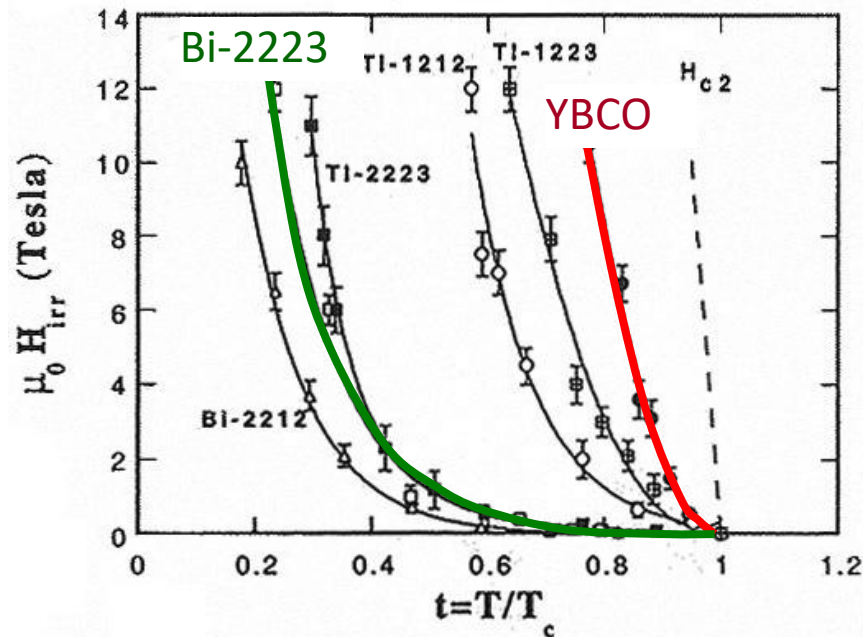


Kuprate-Supraleiter

Eigenschaften im Magnetfeld

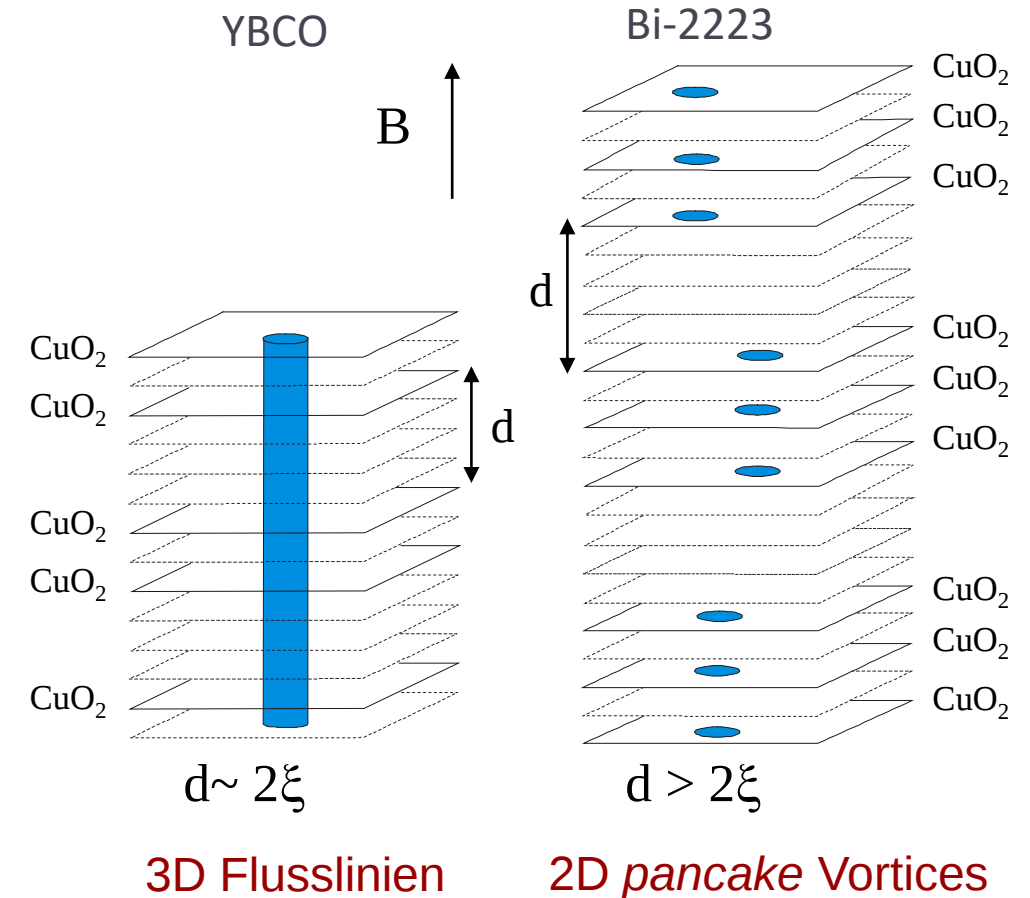
Extrem hohes B_{c2} : >100 T

Irreversibilitätslinie: Feld, bei dem Flusslinien wandern



→ YBCO ist bevorzugtes Material für **Anwendungen** bei 77 K in höheren Magnetfeldern

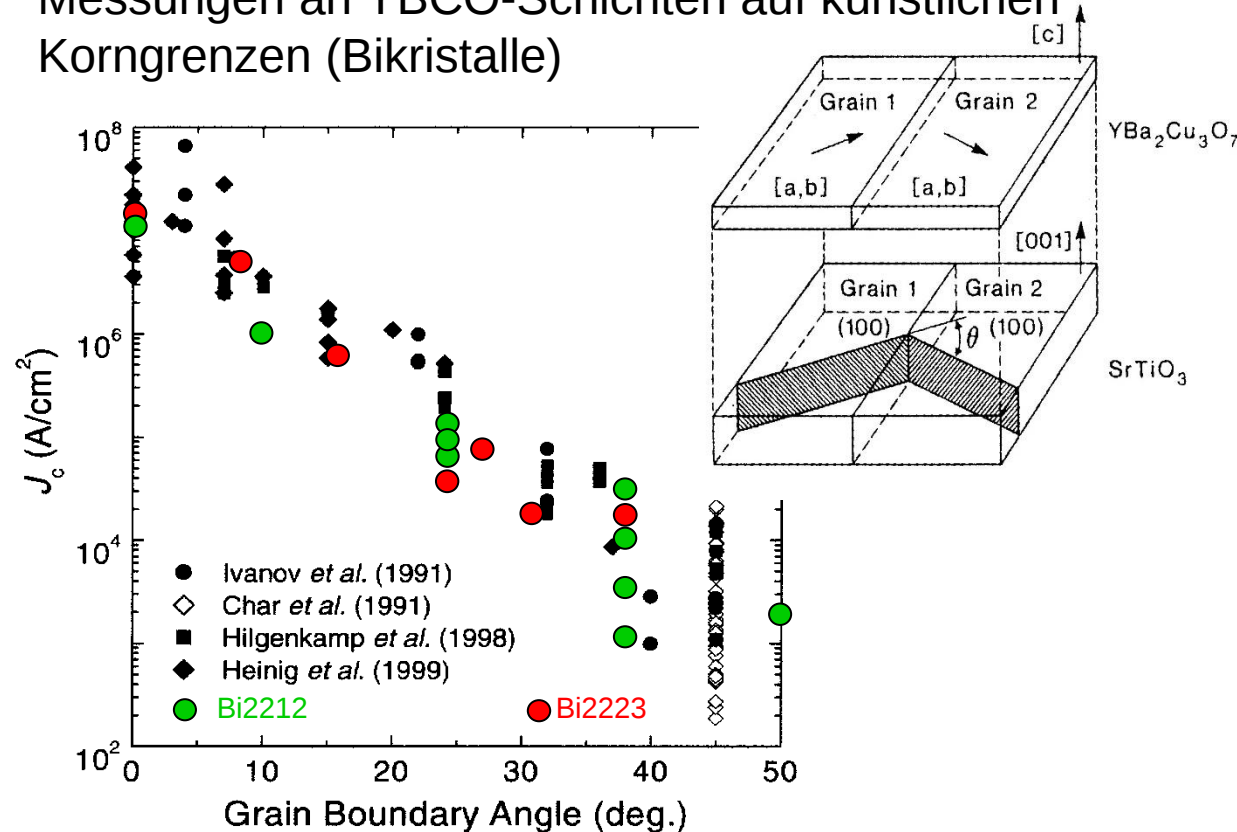
Eigenschaften der Flußlinien sind abhängig von der Kristallstruktur des Materials



Kuprate-Supraleiter

Eigenschaften von Korngrenzen

Messungen an YBCO-Schichten auf künstlichen Korngrenzen (Bikristalle)



→ Exponentieller Abfall von J_c oberhalb eines Winkels von ca. 4°

Ursache:

- ❖ Extrem kleine Kohärenzlänge ($\xi_{ab} \approx 1.4$ nm, $\xi_c \approx 0.2$ nm) und niedrige Ladungsträgerdichte

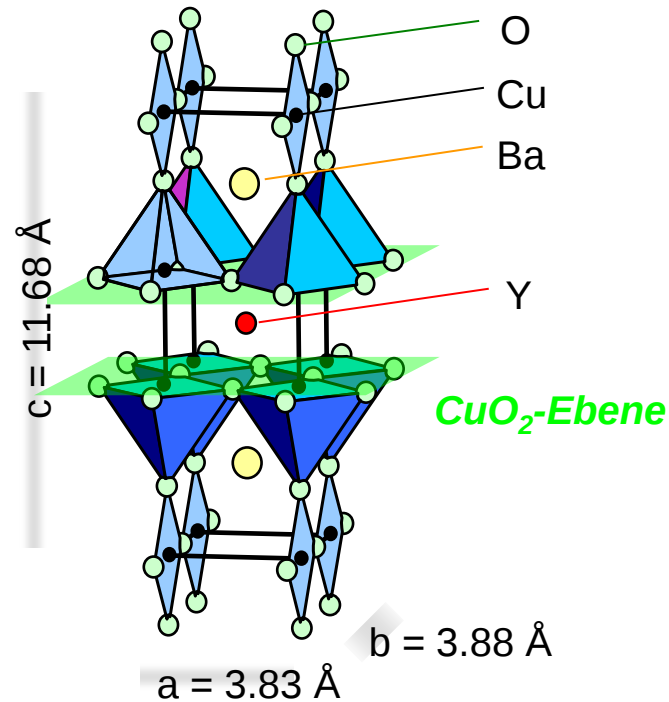
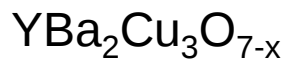
Einflussfaktoren:

- ❖ **Mikrostruktur:**
 - Spannungsfelder um Versetzung,
 - Gestörte Bereiche in Korngrenzen
- ❖ Abweichungen von der idealen **Stöchiometrie**
 - Sauerstoffleerstellen
 - Unordnung
 - Lokale Zustände
- ❖ Symmetrie des **Ordnungsparameters**
- ❖ **Bandverbiegung** durch Grenzflächenladung
- ❖ Direkte **Unterdrückung der Cooper-Paarung**

Kuprate-Supraleiter

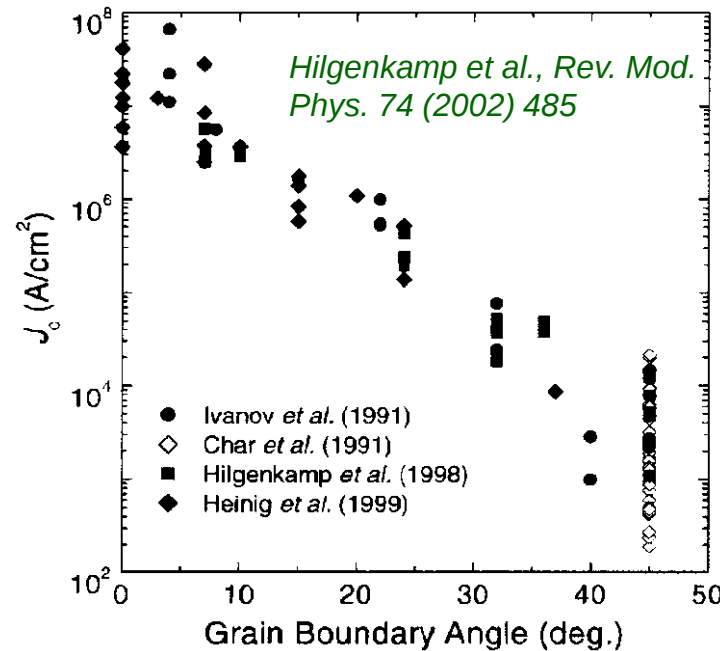
Herausforderungen für den Einsatz

Komplexe Kristallstruktur

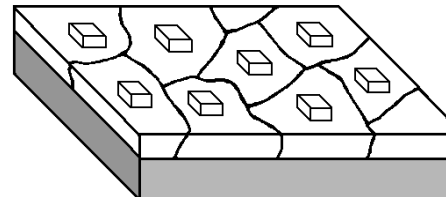


Eigenschaften sind richtungsabhängig

Korngrenzen



Stromtransport braucht **quasi-einkristallines Material!**



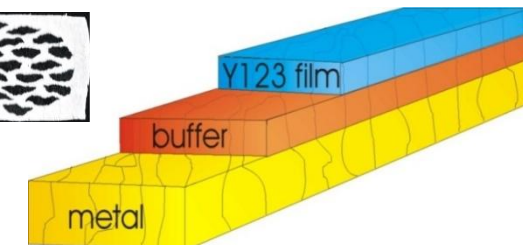
Mechanische Eigenschaften

Spröde Keramik



Herstellung von Metall-Keramik-Kompositen:

- Pulver-im-Rohr-Technologie
- Bandleitertechnologie



Kuprate-Supraleiter

Pulver-in-Rohr Technologie für BiSCCO-Leiter

Pulver

Mischung der Ausgangsstoffe

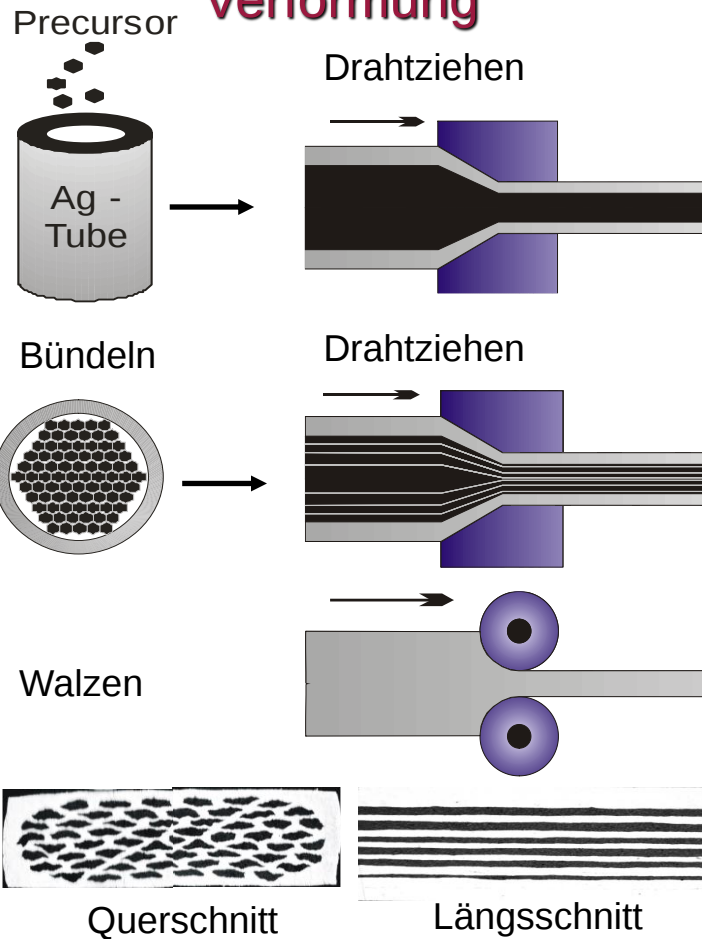


- Sol-gel Verfahren
- Mechanisches Legieren

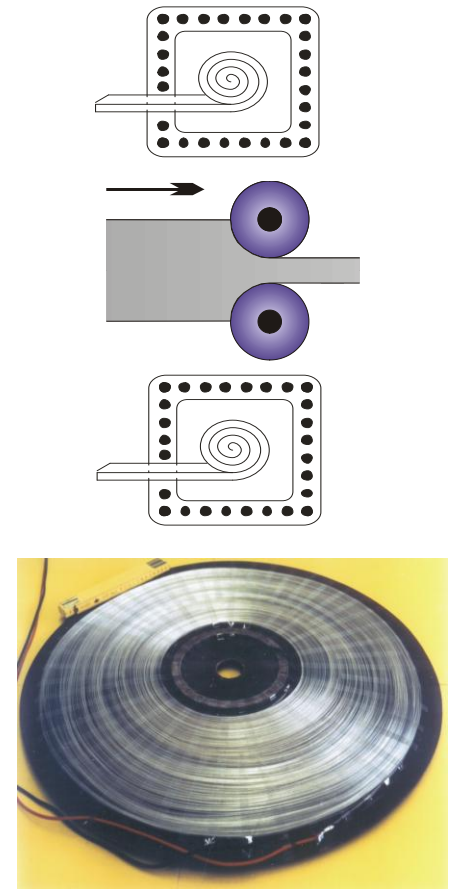


z.B. BiPbSrCaCuO Pulver
mit Bi-2223
Zusammensetzung

Verformung



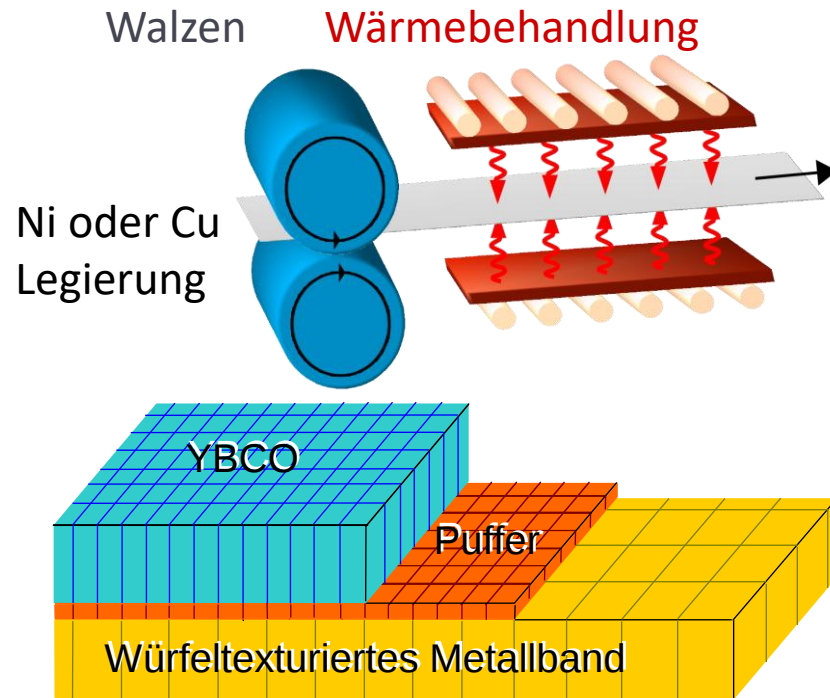
Wärmebehandlung



Kuprate-Supraleiter

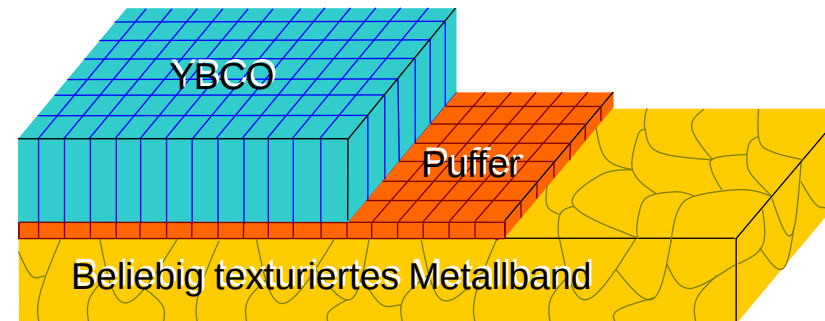
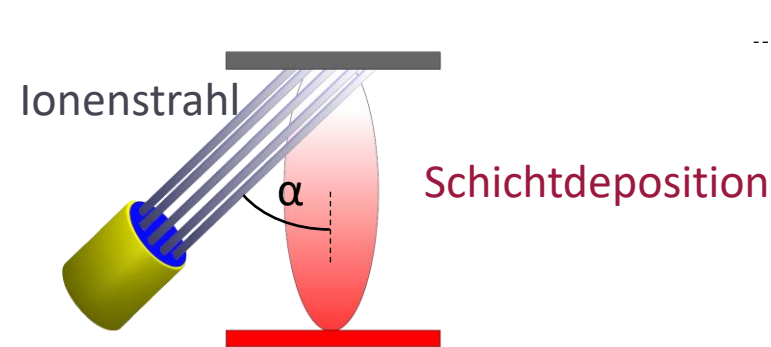
Herstellung von YBCO-Bandleitern

Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates (RABiTS)



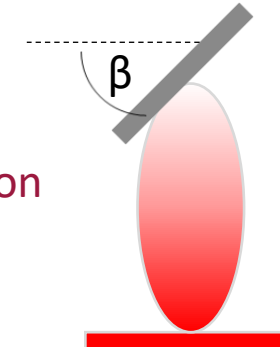
→ Biaxial texturierte Substrate

Ion Beam Assisted Deposition (IBAD)



→ Biaxial texturierte Barrierschichten

Inclined Substrate Deposition (ISD)



YBCO-Deposition:

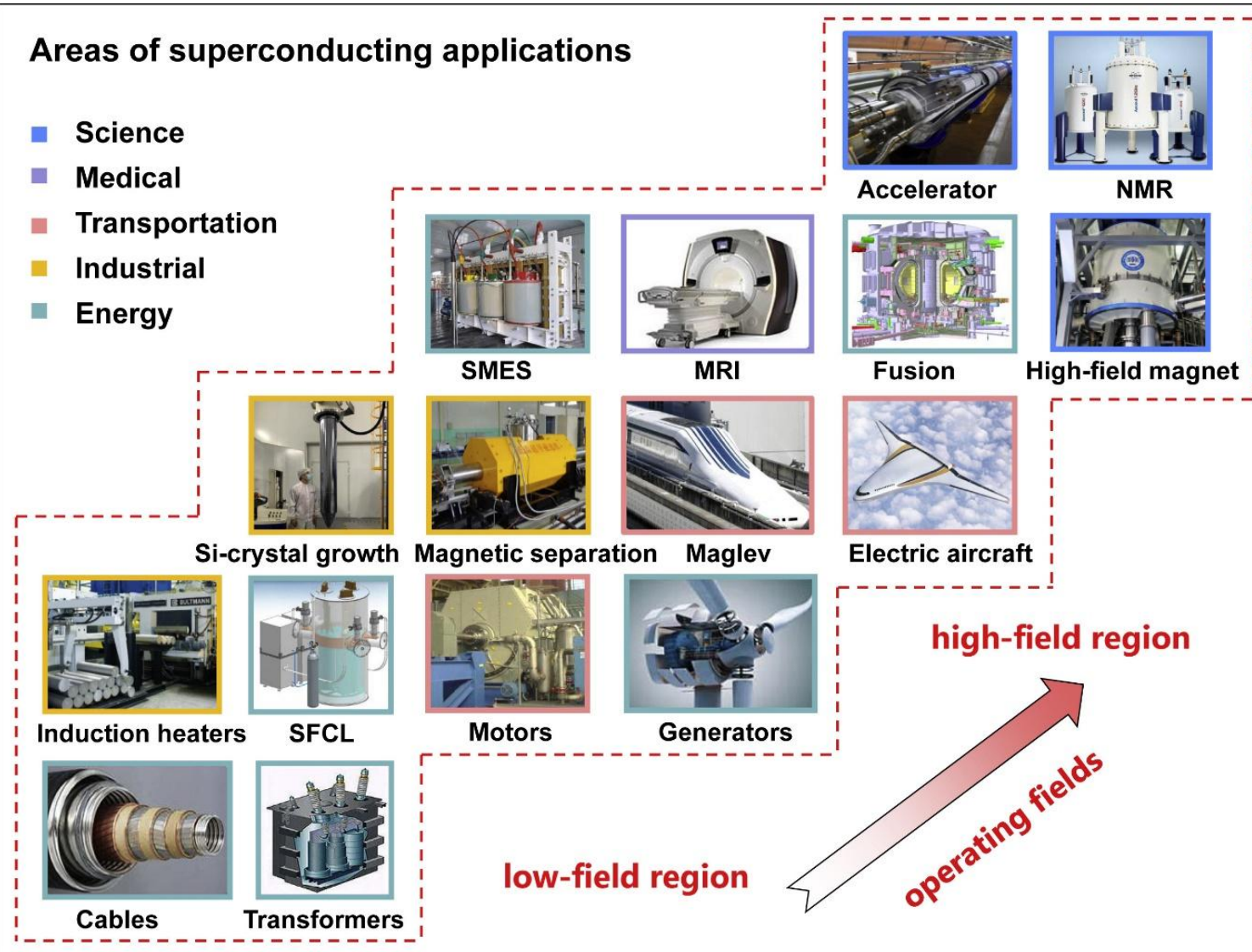
- PLD
- MOCVD
- Thermisches Co-Verdampfen

Mittlerweile in Längen von mehreren 100 Meter verfügbar, aber noch zu teuer!

Anwendungen Hochtemperatursupraleiter

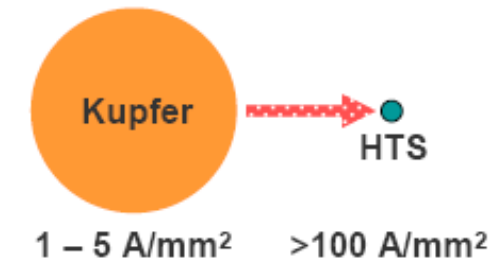
Areas of superconducting applications

- Science
- Medical
- Transportation
- Industrial
- Energy



Vorteile Supraleiter:

- Stromdichte → geringeres Gewicht bei gleicher Leistung



- Geringere Verluste / höhere Effizienz
- Umweltfreundlich
- Effizienz Kühltechnik für LN_2 wesentlich höher als für LHe!

Anwendungen Hochtemperatursupraleiter

Anwendungen in der Energieerzeugung und -umsetzung

Mobile Plattformen, Transport und Stromerzeugung

Motoren & Generatoren

- kleiner und leichter
(Schiffsantriebe, Windkraftwerke)
- höherer Wirkungsgrad
- bessere Betriebsparameter
(Lastwechsel, Überlast)

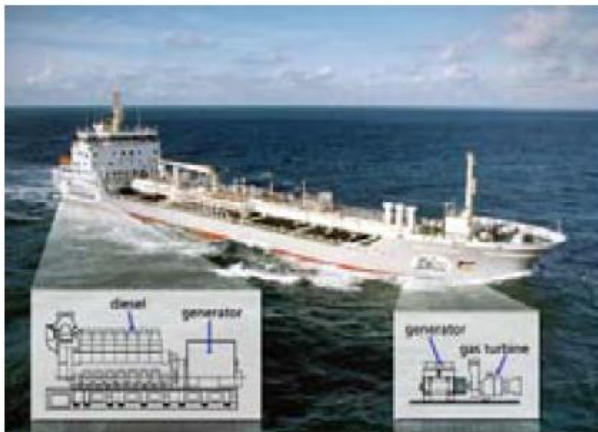


Bild: Siemens



Windturbine (EcoSwing)



Kompakte Fusionsreaktoren

Anwendungen Hochtemperatursupraleiter

Anwendungen in der Energieübertragung

Energieübertragungskabel

- hohe Übertragungskapazität
- platzsparend
- EM abgeschirmt
- strombegrenzend (Option)



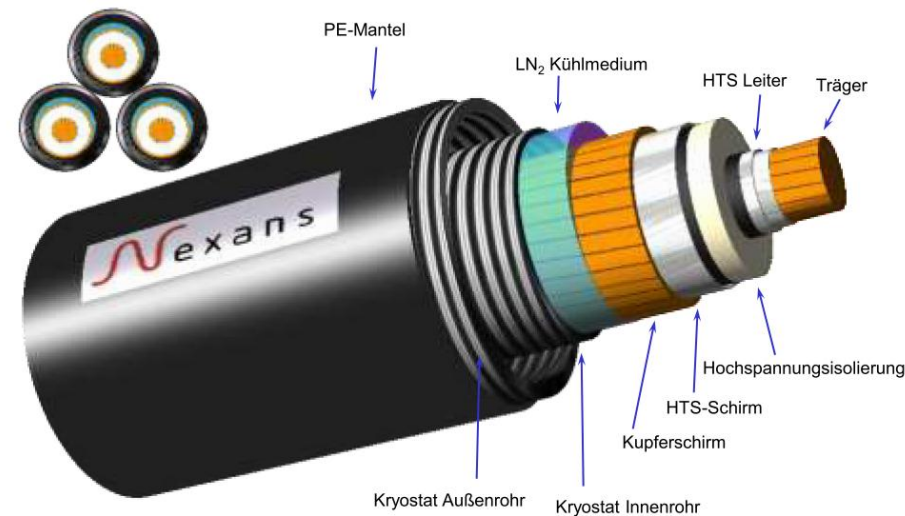
Beispiel: 138 kV, 575MW Übertragungskapazität



LIPA
Kabelprojekt



Manhattan



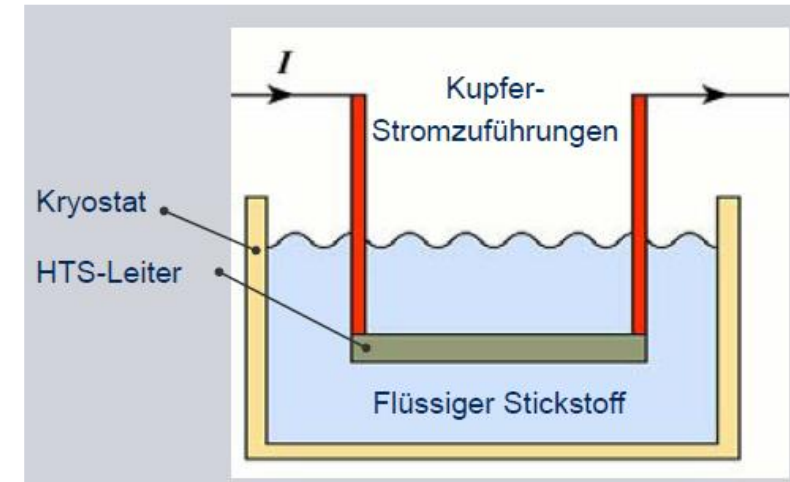
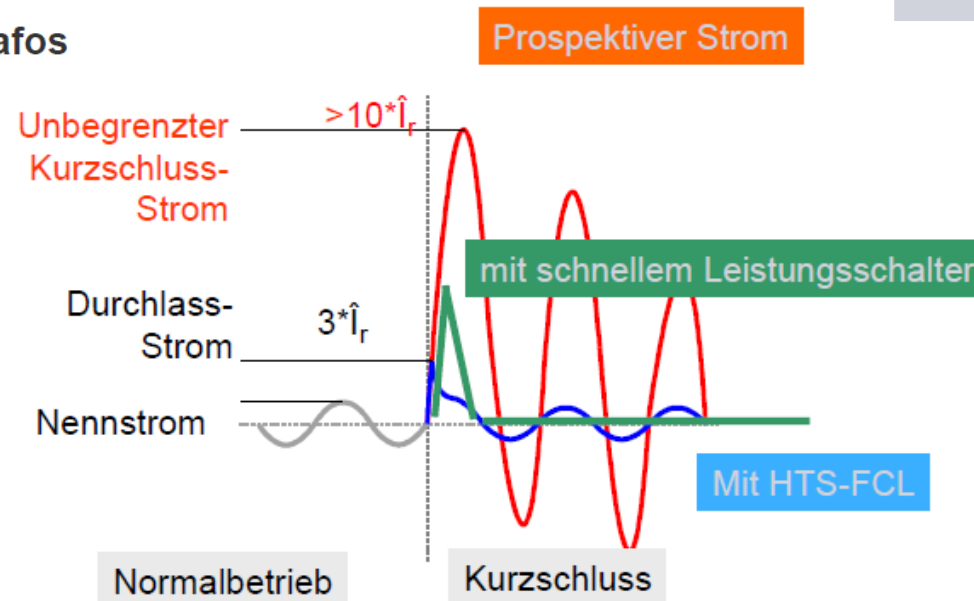
Anwendungen Hochtemperatursupraleiter

Anwendungen in der Energietechnik

Schneller Übergang SL $\Rightarrow$ NL bei Überlast

Supraleitende Strombegrenzer (SSB)

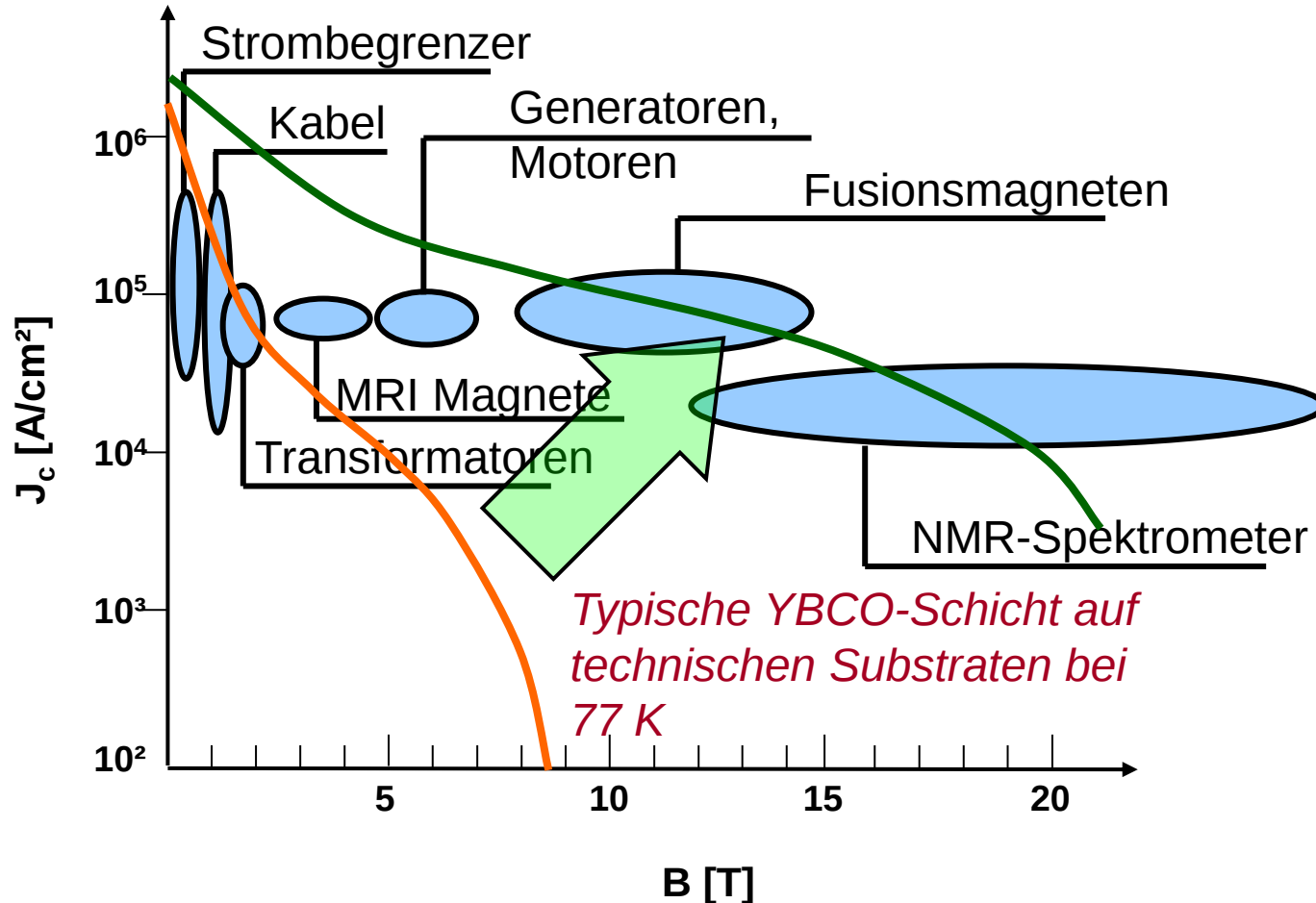
- schnelles Ansprechen (ms)
- Begrenzung statt Unterberechnung
- selbstheilend
- spart Großtrafos



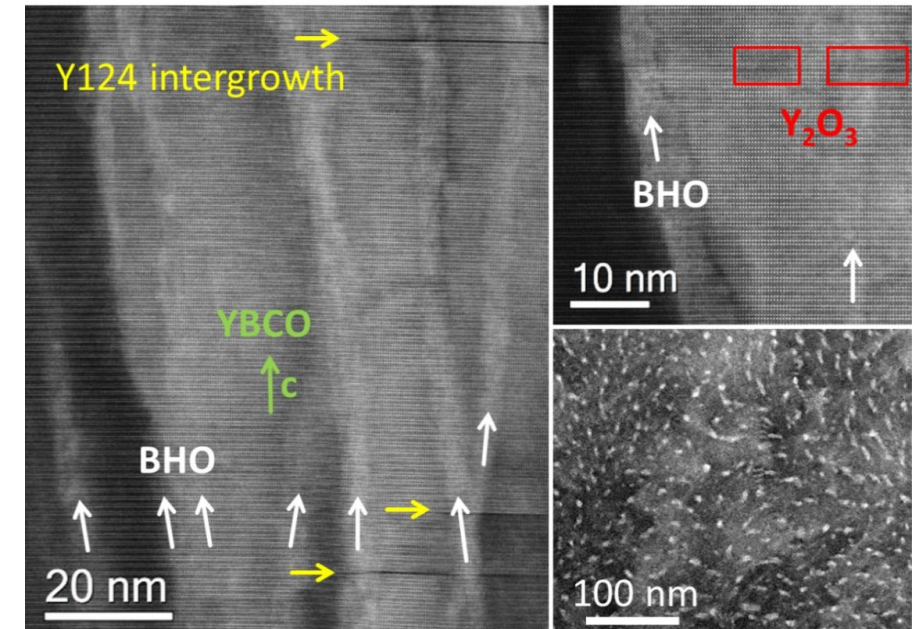
Kraftwerk
Boxberg

Anwendungen Hochtemperatursupraleiter

Notwendige Eigenschaften



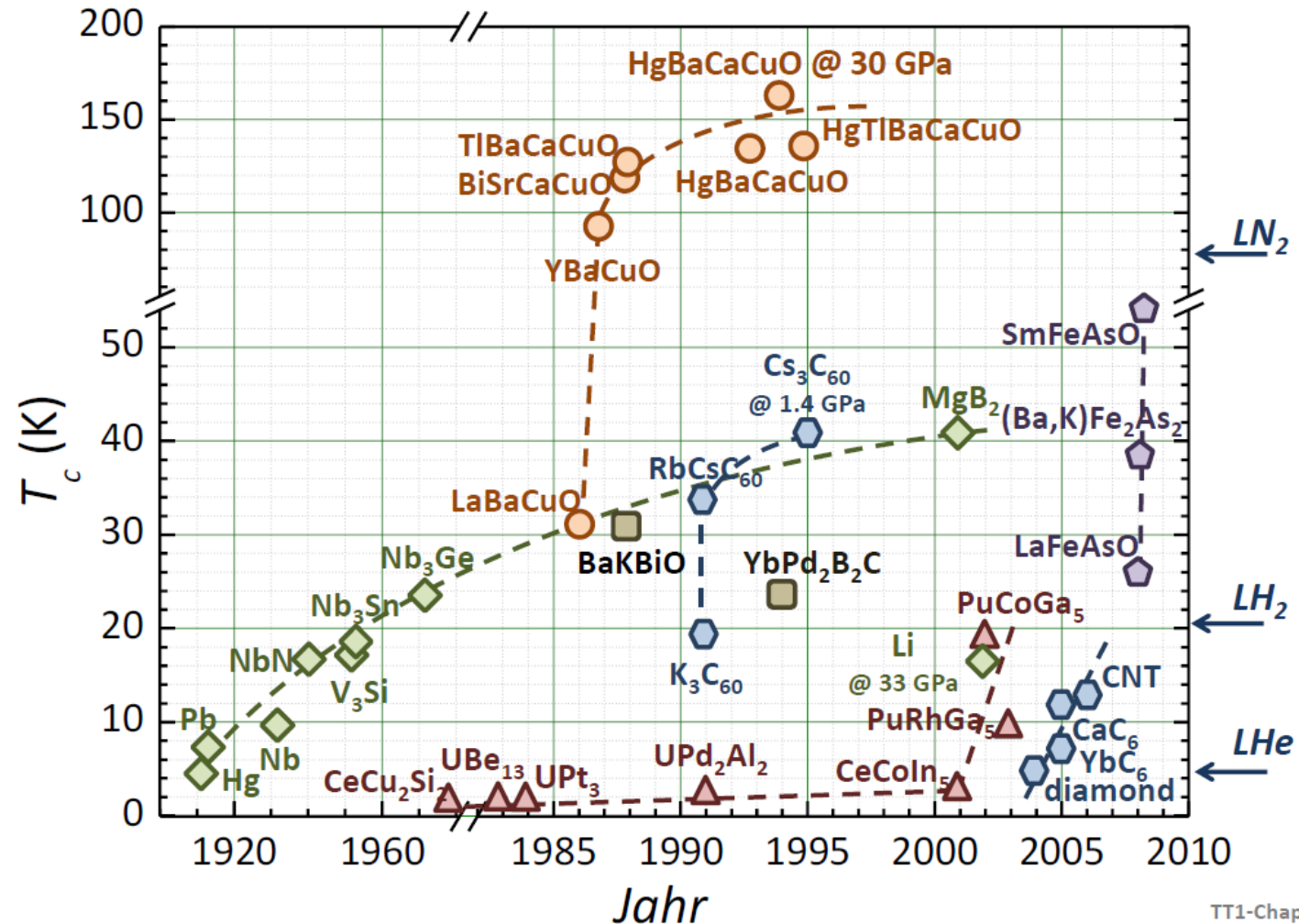
- Anwendung bei **tieferen Temperaturen** (z.B. 65 K für Motoren, 30 K für Windturbinen)
- Verbesserung des $J_c(B)$ -Verhaltens (gezielte Dotierung für **besseres Pinning**)



TEM: dichte BaHfO₃ Nanosäulen mit $\varnothing \approx 5$ nm in der YBCO Matrix

Entdeckung neuer Supraleiter

Ausgewählte supraleitende Materialien



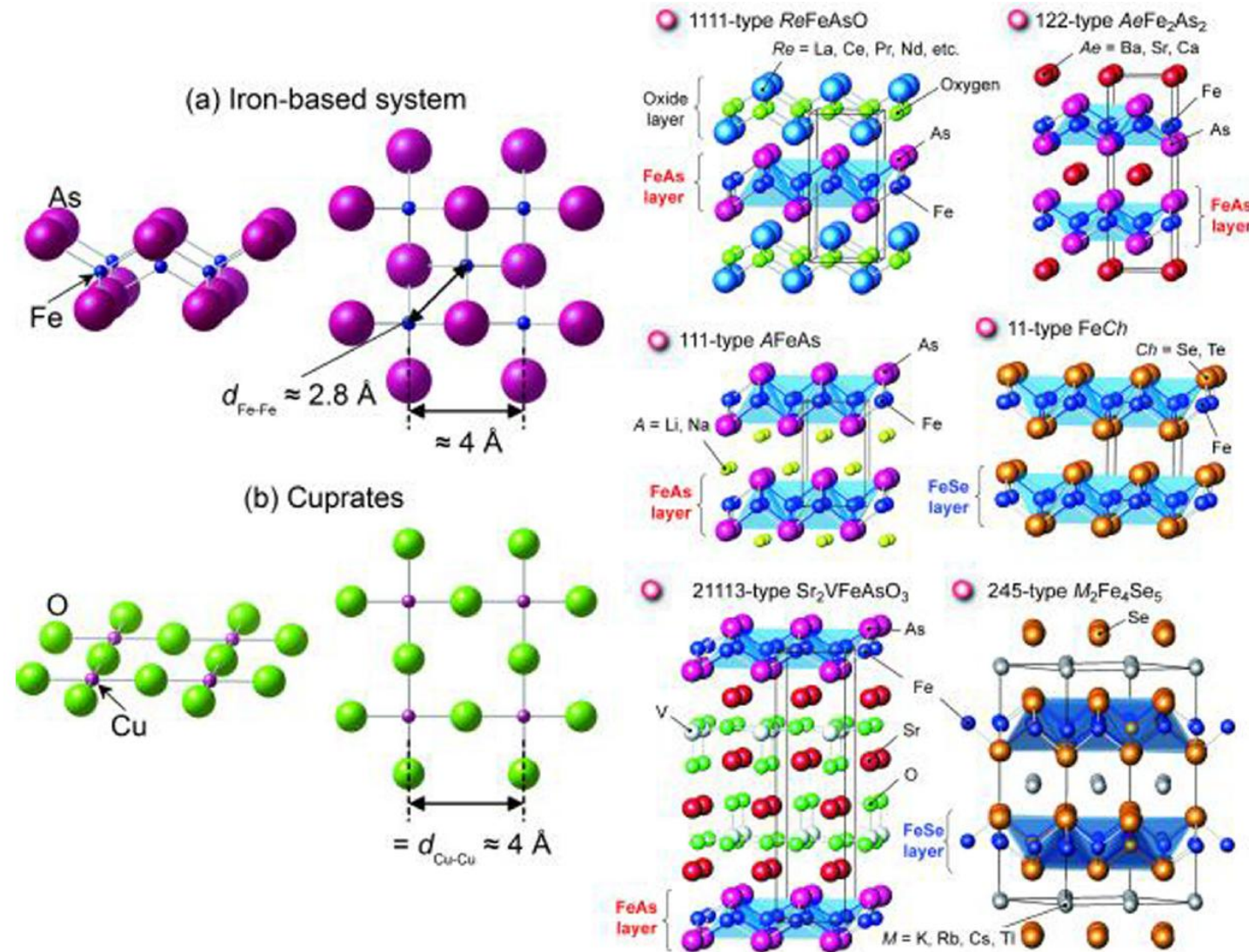
TT1-Chap:

Fe-basierte Supraleiter



Hideo Hosono

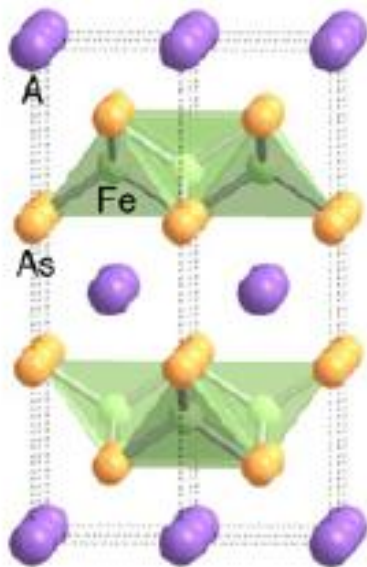
- Entwicklung transparenter Halbleiter
- Supraleitung erstmals 2006 gemessen
- Sehr viele verschiedene Verbindungen
- Höchstes $T_c \sim 65$ K
- Zentrales Bauelement: FeAs bzw. FeSe-Lage
- Anderer Kopplungsmechanismus als bei Kupraten



Fe-basierte Supraleiter

Herausforderungen für den Einsatz

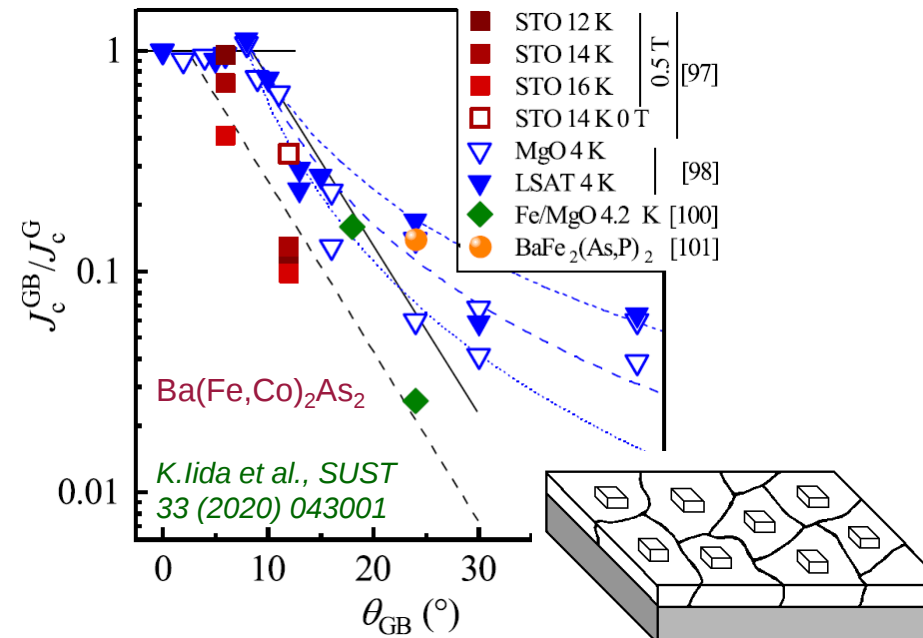
Komplexe Kristallstruktur



FeAs-Lage

→ Anisotrope Eigenschaften

Korngrenzen

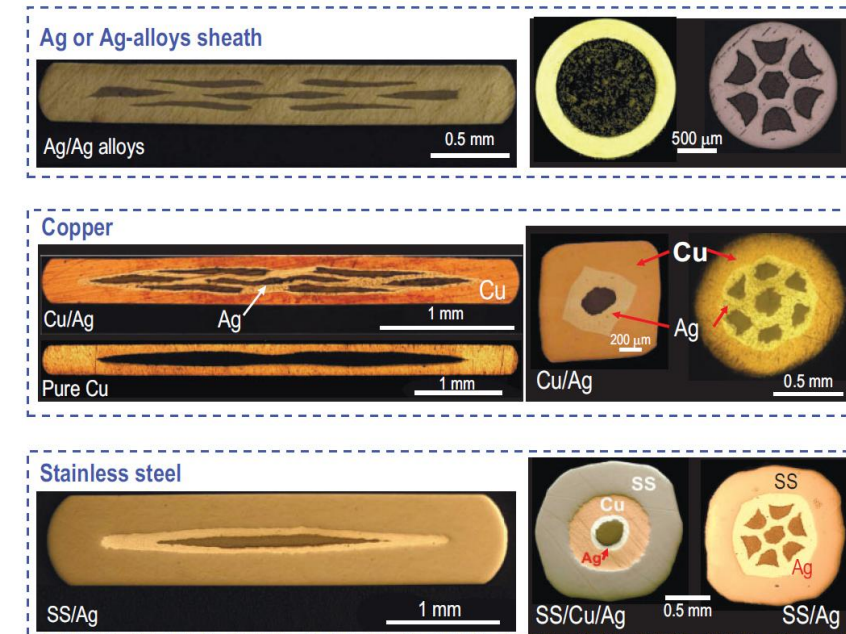


Ursache: kleine Kohärenzlänge

→ Stromtransport braucht *quasi-einkristallines Material!*

Mechanische Eigenschaften

Spröde intermetallische Verbindung

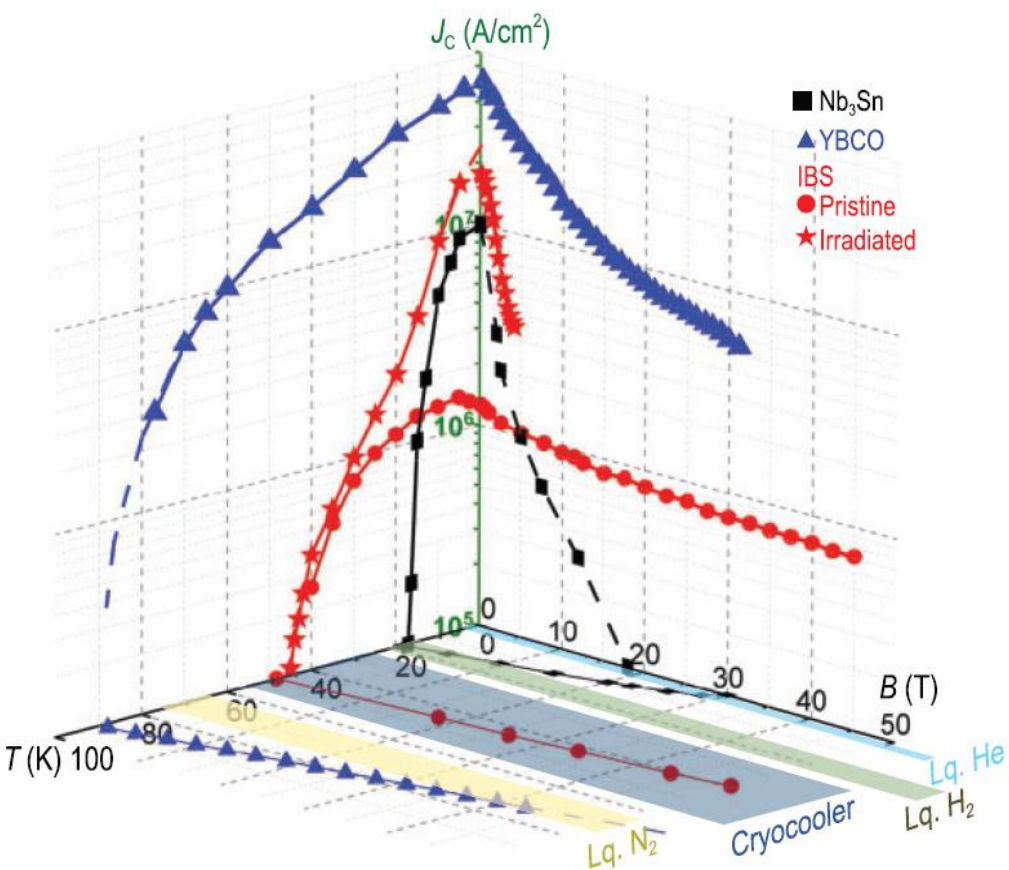
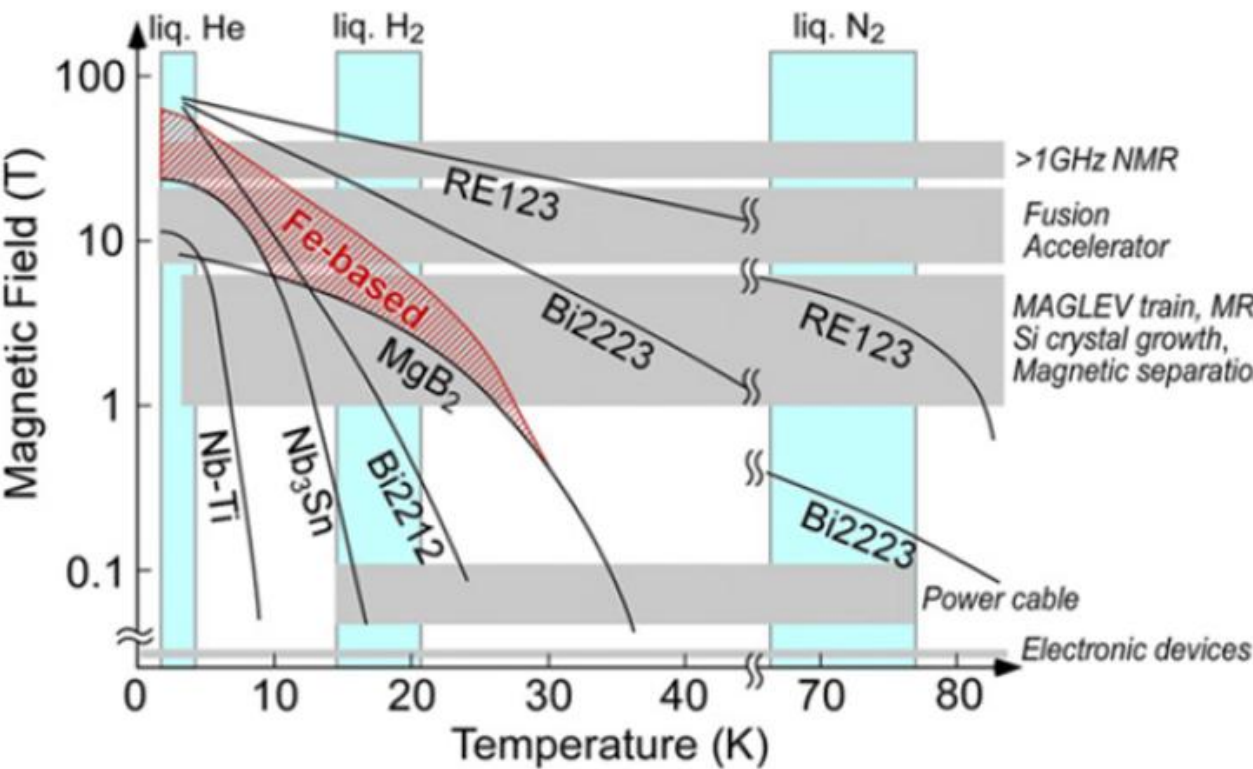


→ Bandleiter (schwierig, da O₂-frei)

→ Pulver-im-Rohr Technologie

Supraleitende Materialien

Anwendungsperspektiven unterschiedlicher Supraleiter



	ξ_{ab} (nm)	λ_{ab} (nm)	T_c (K)	H_{c2} (T)
Nb ₃ Sn	11	200	18	25
MgB ₂	10	50	39	14
YBCO	2.2	120	92	>100
Ba-122	3	200	35	60
Sm-1111	2.5	200	55	>100