

Vorlesung Metallische Funktionswerkstoffe

SS 2026



Leibniz Institute
for Solid State and
Materials Research
Dresden



Supraleitung III

Dr. Ruben Hühne

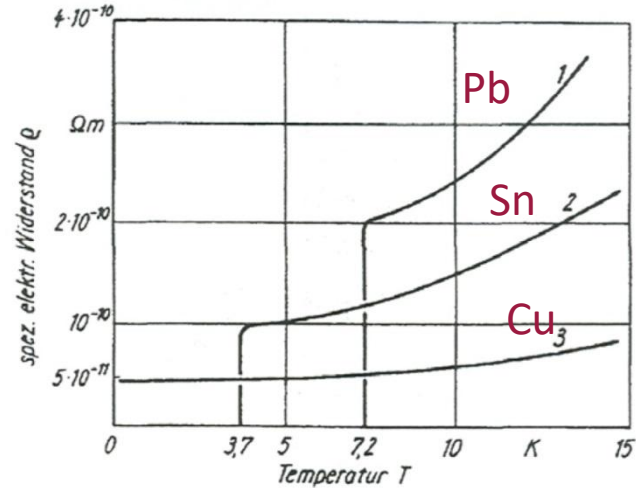
*Arbeitsgruppe Funktionale Oxidschichten und Supraleiter
Institut für Metallische Werkstoffe
IFW Dresden, Helmholtzstrasse 20, D-01069 Dresden, Germany
Mail: r.huehne@ifw-dresden.de*

Inhalt

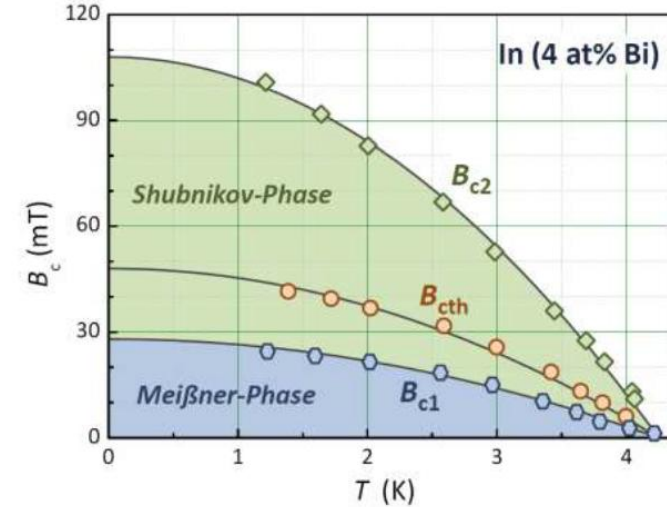
- Entdeckung der Supraleitung
- Grundlegende supraleitende Effekte
- Phänomenologische Beschreibung
- Mikroskopische Beschreibung der Supraleitung
- Kritische Stromdichte und Pinning
- Konventionelle Supraleiter
- Ausgewählte unkonventionelle Supraleiter
 - Hochtemperatursupraleitung: Kuprate
 - Fe-basierte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

Grundlegende supraleitende Effekte

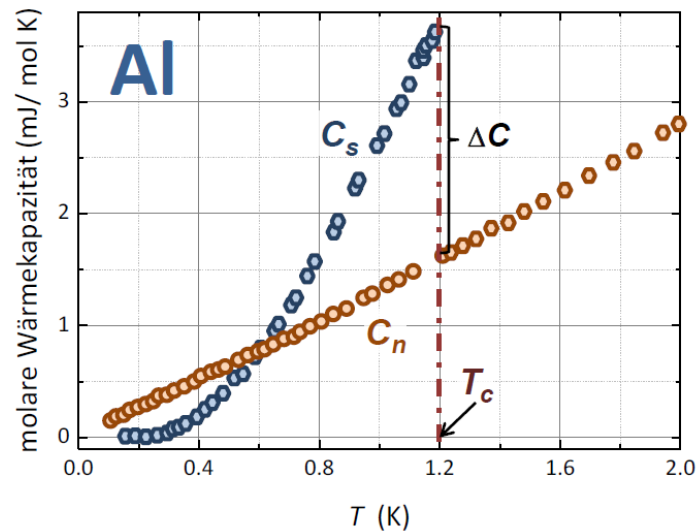
Verschwindender Widerstand



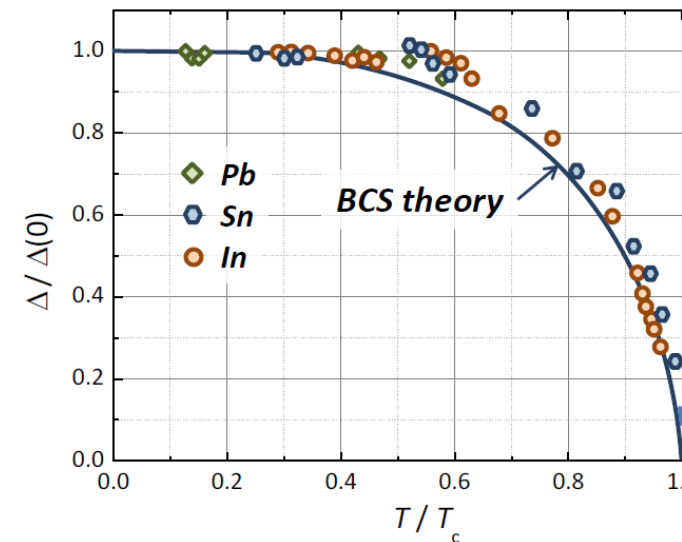
Meißner-Ochsenfeld-Effekt



Sprung in der Wärmekapazität



Ausbildung einer Energielücke



Grundlegende supraleitende Effekte

Charakteristische Kenngrößen

Londonsche Eindringtiefe λ_L

→ Maß für Eindringen des magnetischen Feldes

Ginzburg-Landau Kohärenzlänge ξ_{GL}

→ Maß über welche Länge die supraleitende Ladungsträgerdichte variieren kann

Ginzburg-Landau Parameter $\kappa = \frac{\lambda_L}{\xi_{GL}}$

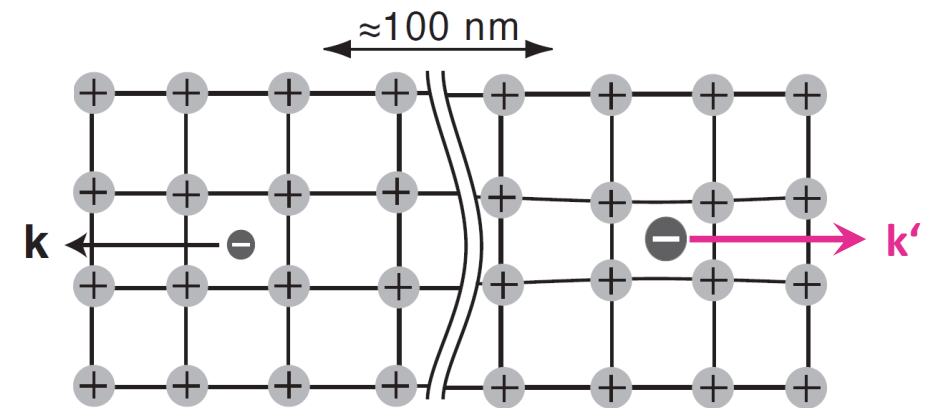
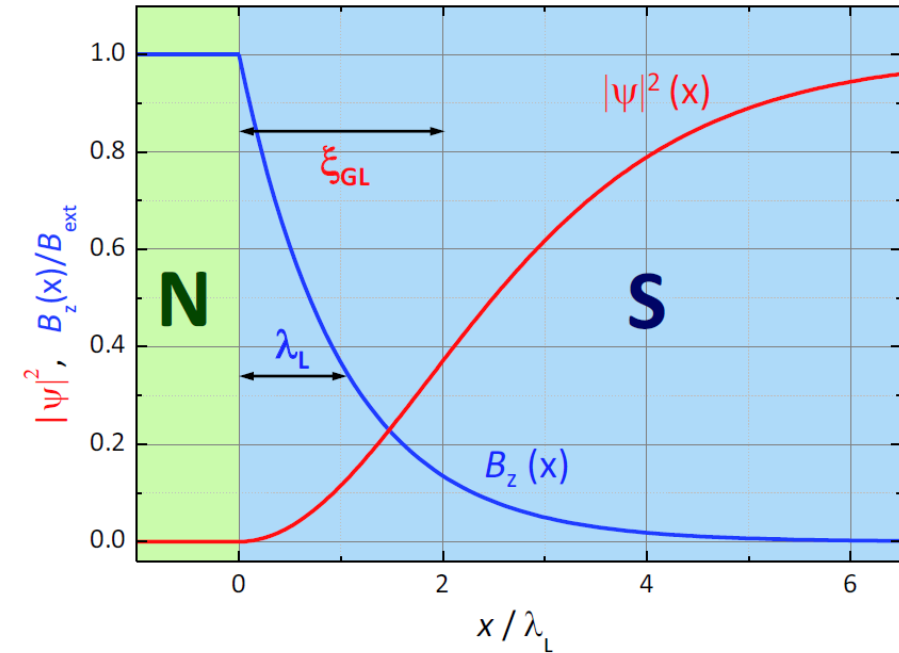
→ Bestimmt den Übergang zwischen Typ I und Typ II

Flussquant:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.0678 \times 10^{-15} \text{Vs}$$

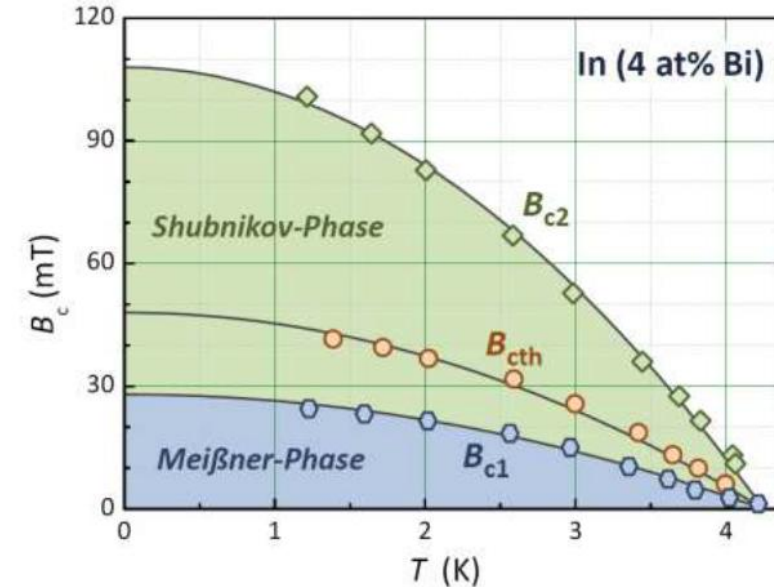
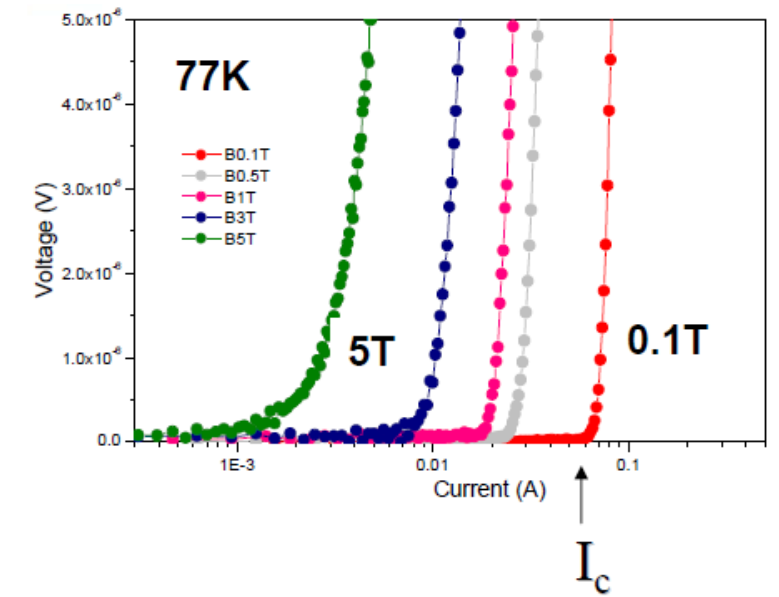
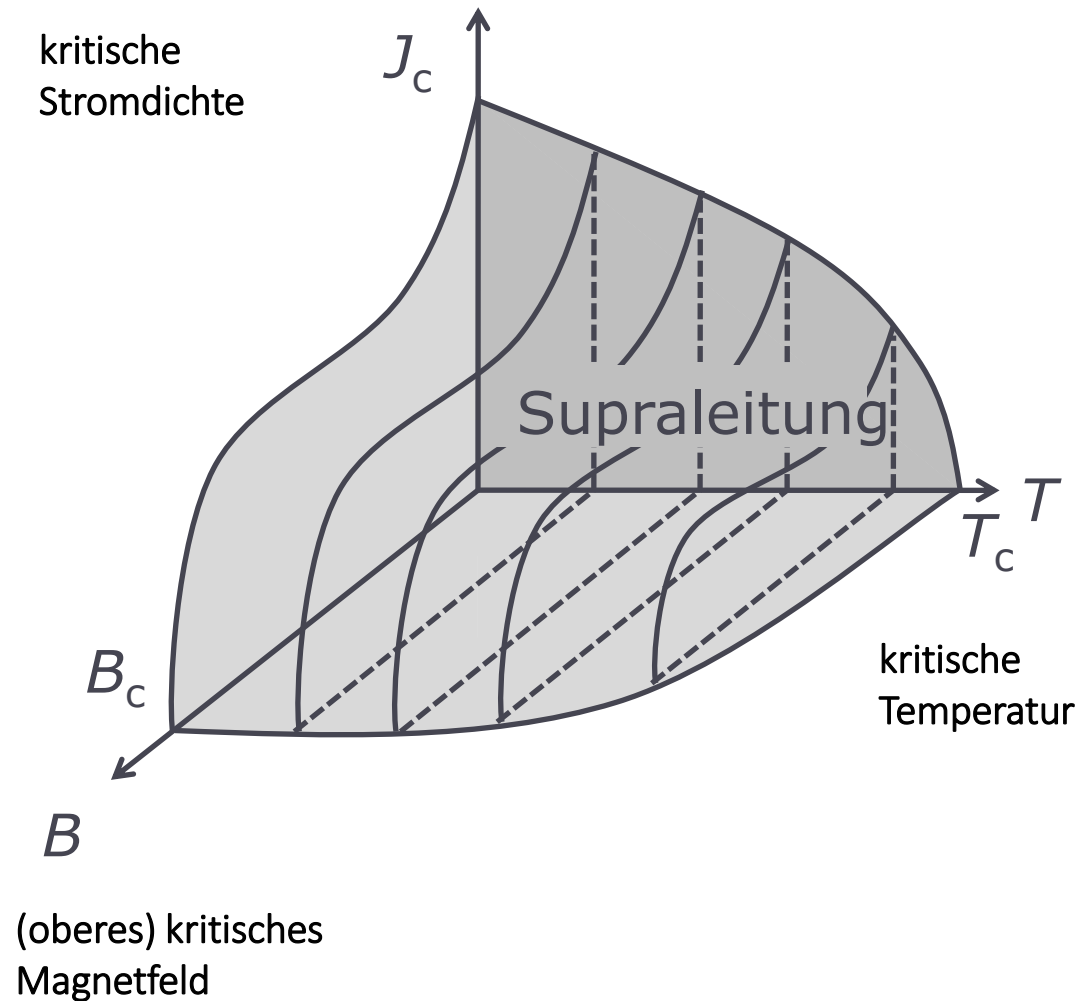
(BCS)-Kohärenzlänge ξ_0

→ Maß, über welche Länge die Korrelation von Cooper-Paaren wirksam ist (~ Ausdehnung eines Cooper-Paares)



Grundlegende supraleitende Effekte

Supraleitendes Phasengebiet



Kritische Stromdichte

Mikroskopische Beschreibung

Kinetische Energie, um die Bindung der Cooper-Paare aufzubrechen entspricht der Paarbrechungsstromdichte („depairing critical current density“)

London-Theorie

$$\oint \frac{m_s}{n_s q_s^2} \mathbf{j} d\mathbf{l} + \int \mathbf{B} d\mathbf{A} = 0$$

2. London-Gleichung

$$j_c = \frac{B_c}{\mu_0 \lambda_L}$$

Beispiel Pb:

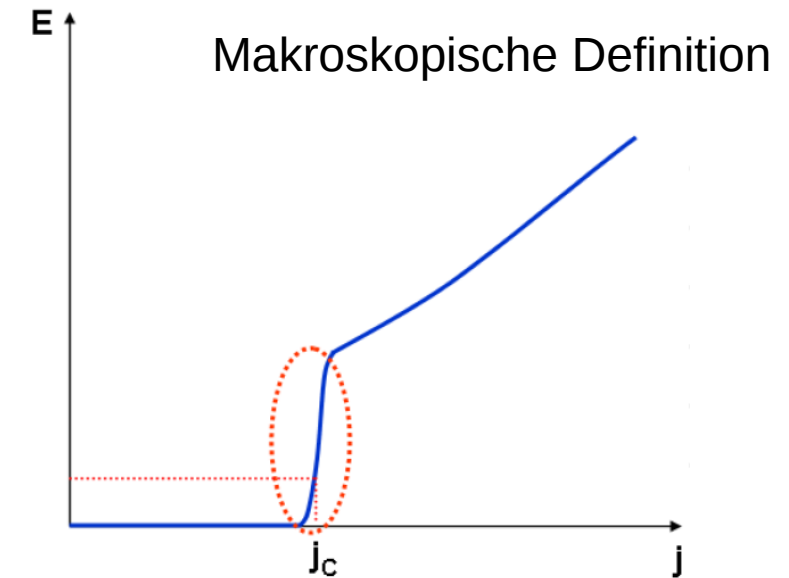
$$B_{cth} \approx 80 \text{ mT}, \lambda_L \approx 40 \text{ nm} \\ \rightarrow j_c \approx 8 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$$

Ginzburg-Landau-Theorie

$$j_c = \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \frac{B_{cth}}{\mu_0 \lambda_L}$$

Nb:

$$B_{cth} \approx 200 \text{ mT}, \lambda_L \approx 40 \text{ nm} \\ \rightarrow j_c \approx 2 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$$



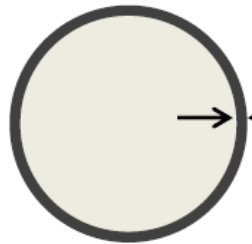
Kritische Stromdichte

Typ I Supraleiter



$d = 1\text{cm}$

$$J_y(x) = J_{y,0} e^{-(x/\lambda_L)}$$



$d = 1\text{cm}$

Pb-Draht:

$$j_c = 8 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$$

$$I_c = j_c \cdot \pi(d/2)^2 \approx 6 \times 10^7 \text{ A}$$

Strom fließt nur im Oberflächenbereich

$$I_c = j_c \cdot \pi d \lambda_L \approx 1 \times 10^3 \text{ A}$$

Technische Stromdichte

$$J_e = \frac{I_c}{\pi(d/2)^2} \approx 10 \text{ A/mm}^2$$

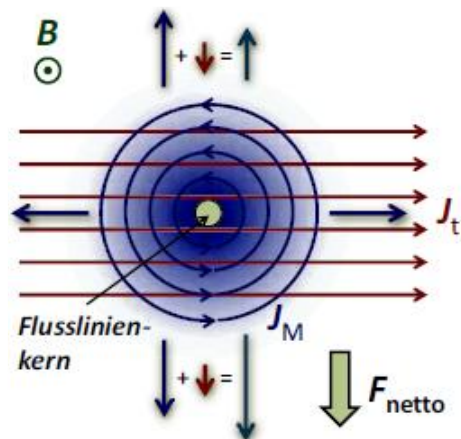
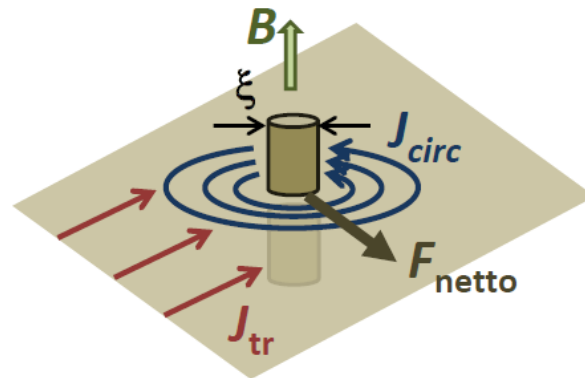
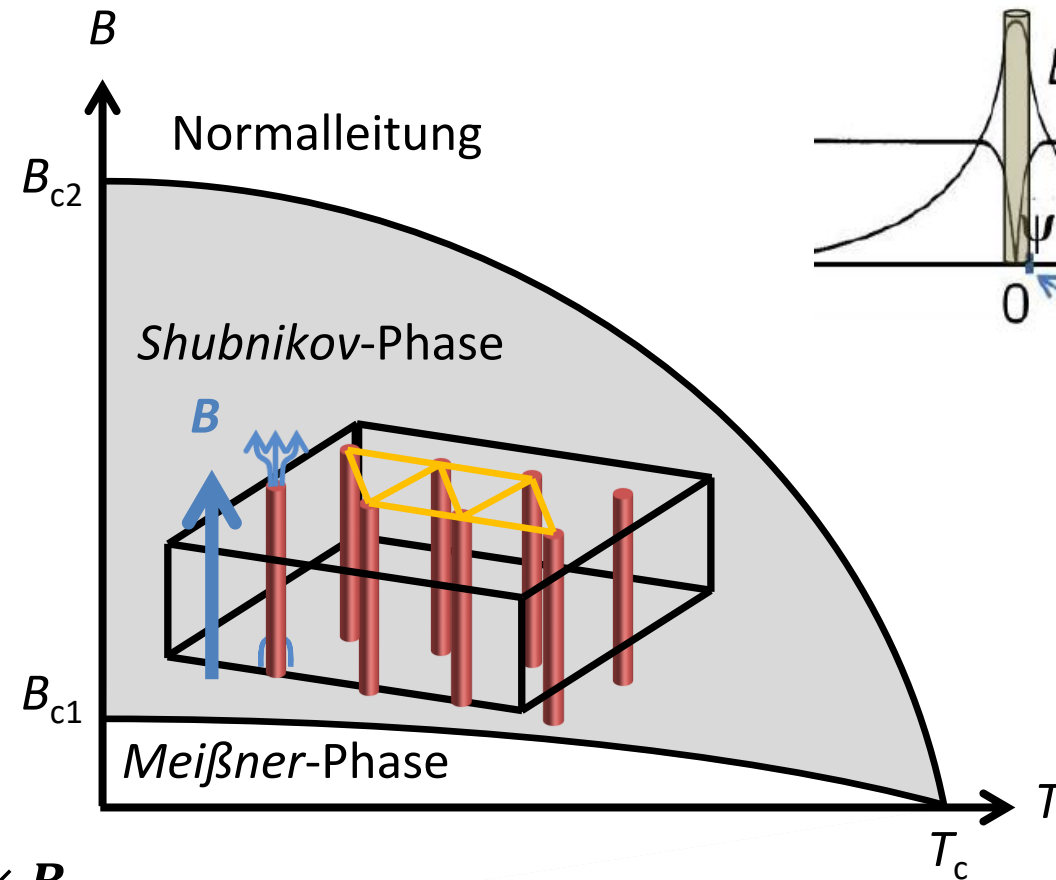
→ Nicht sinnvoll für die Anwendung

Kritische Stromdichte

Typ II Supraleiter

Feld dringt in Supraleiter ein
 → Strom nicht nur auf Oberfläche begrenzt

Wirkung Stromes auf Flusslinie:
 Lorentzkraft



$$f_L = J_{tr} \times B$$

Kraftdichte

Stromdichte

Kritische Stromdichte

Typ II Supraleiter

Lorentzkraft auf **einzelne** Flusslinie

$$F_L = \int_{vol} f dV = L \int_A f dA$$

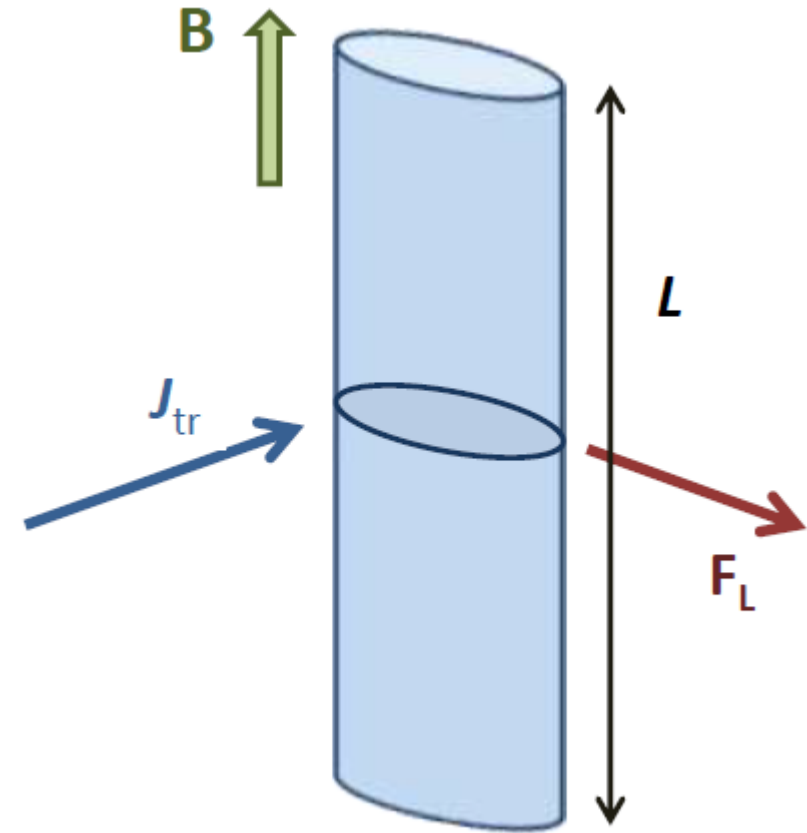
$$F_L = L \int_A J_{tr} \times B dA$$

Mit homogenem Strom gilt :

$$F_L = L J_{tr} \times \int_A B dA = L J_{tr} \times \Phi_0$$

Mittlere Kraft pro Volumen für Flusslinien mit Flächendichte n_Φ

$$B = \Phi_0 n_\Phi \quad f_L = J_{tr} \times B = \frac{F_L}{L} n_\Phi$$



→ Bewegung der Flusslinie führt zu einem Widerstand

Kritische Stromdichte

Ursache für den Widerstand während der Flusslinienbewegung

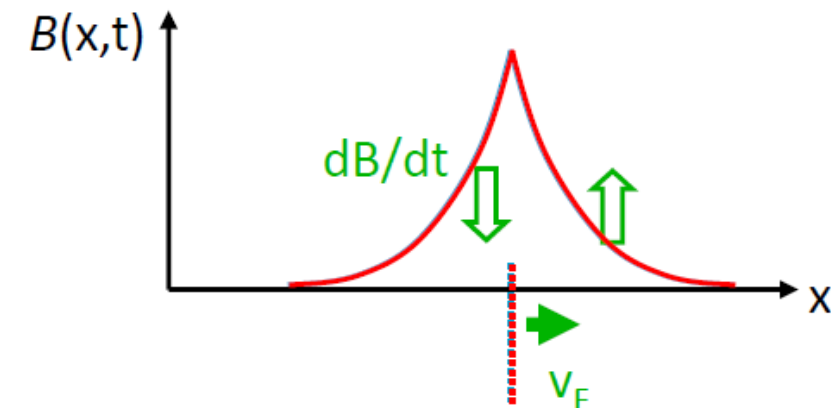
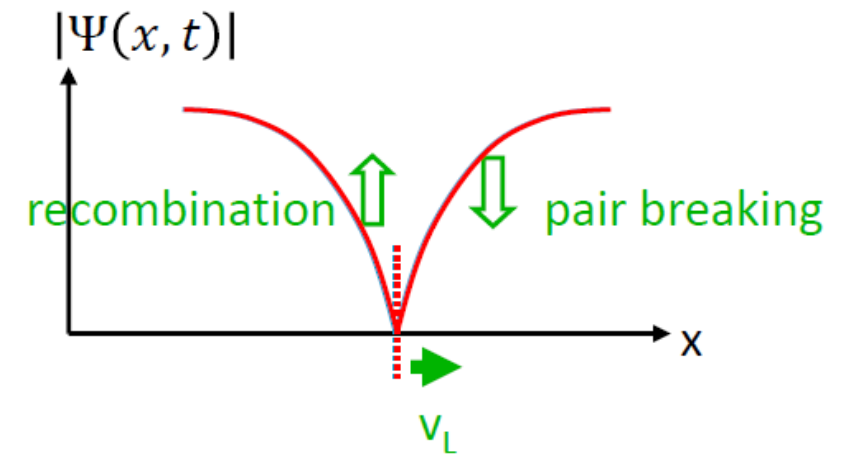
(a) Aufbrechen und Bildung von Cooper-Paaren verbunden mit Absorption und Emission von Phononen

→ Endliche Lebensdauer der Phononen verzögert thermisches Gleichgewicht, dadurch wird Wärme erzeugt

(b) Wirbelstromverluste durch Bewegung des normalleitenden Bereiches

→ Beide Mechanismen: $E \propto v_L$

$J_{tr} \propto v_L$ Entspricht Ohmschen Gesetz



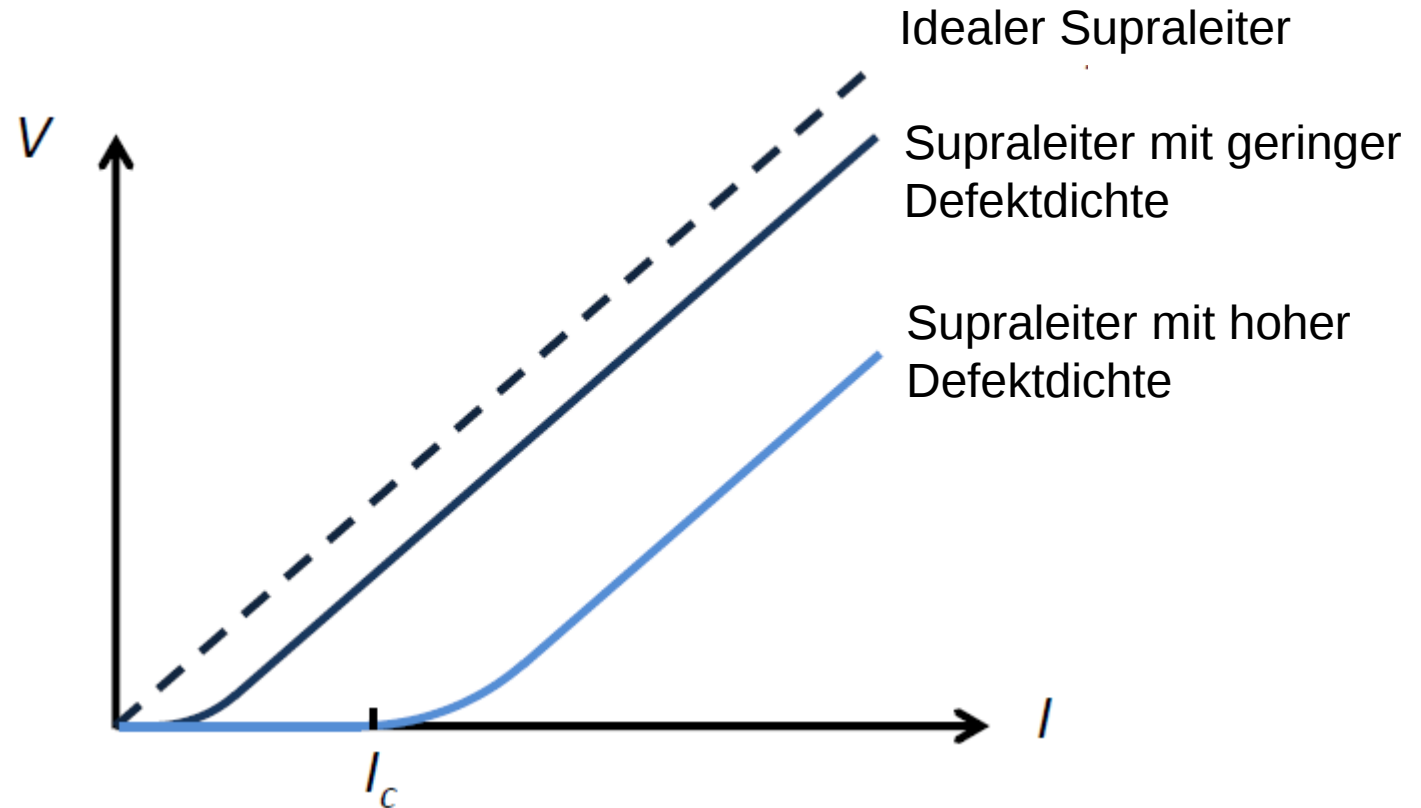
Kritische Stromdichte

Experimentelle Beobachtung

I_c ist abhängig von
Defektdichte

→ Flusslinien werden
festgehalten: $v_L = 0$

Flusslinienpinning



J_c ist hier durch die Flusslinienhaftkraft gegeben („depinning critical current density“)

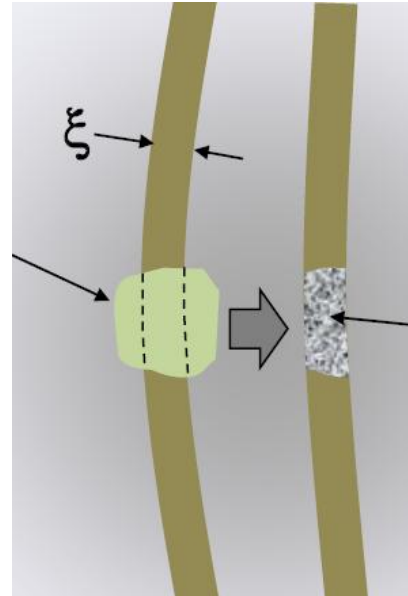
Kritische Stromdichte

Qualitatives Modell des Flusslinienpinnings

Fremdphasenpinning

Bereich mit reduzierter oder verschwindender Supraleitung: Kondensationsenergie geht nicht verloren

Pinningkraft

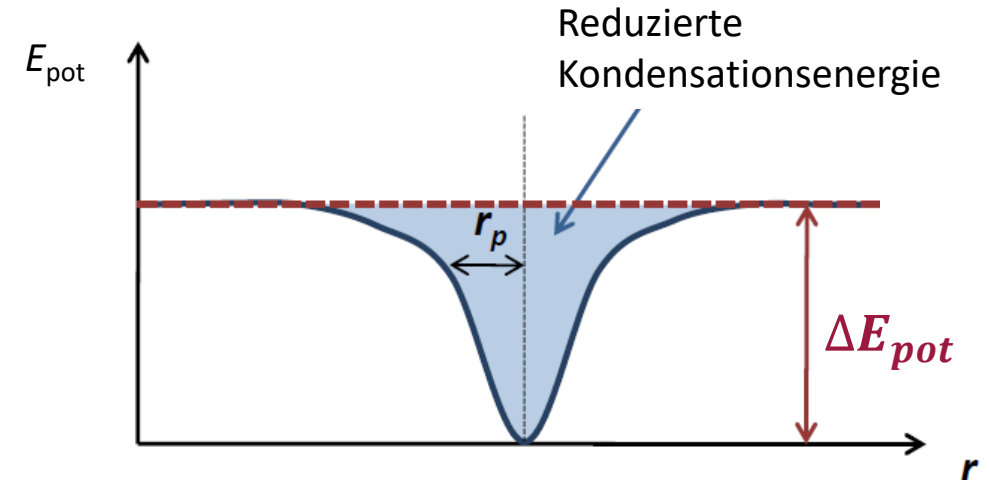


$$F_p = - \frac{\partial E_{pot}(r)}{\partial r} \approx - \frac{\Delta E_{pot}}{r_p}$$

Optimaler Defekt:

- $p = 1$: nicht supraleitend
- $r_p \simeq \xi$
- L_D maximal, d.h. Defekt parallel zu Flusslinie

Potentialmulde



$$\Delta E_{pot} = \tilde{E}_{kond} \pi \xi^2 L_D p$$

$\tilde{E}_{kond}$ Kondensationsenergie pro Volumeneinheit

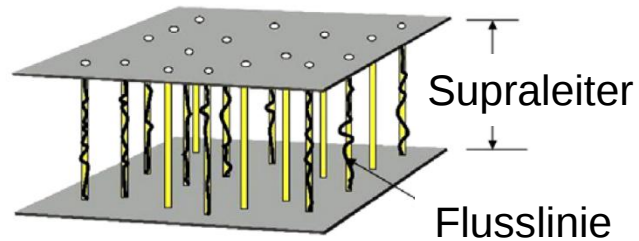
L_D Länge des Defektes

$0 \leq p \leq 1$ Reduktionsfaktor der Kondensationsenergie

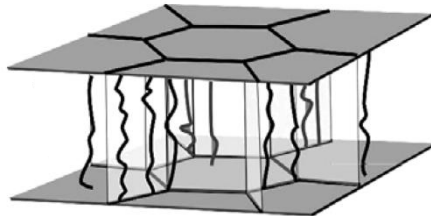
Kritische Stromdichte

Intrinsische und extrinsische Haftzentren

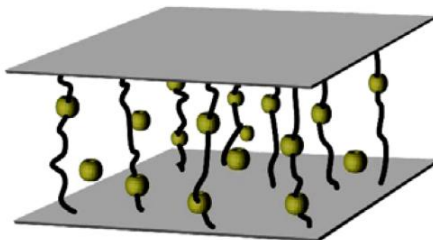
- Lineare Defekte:



- Planare Defekte:



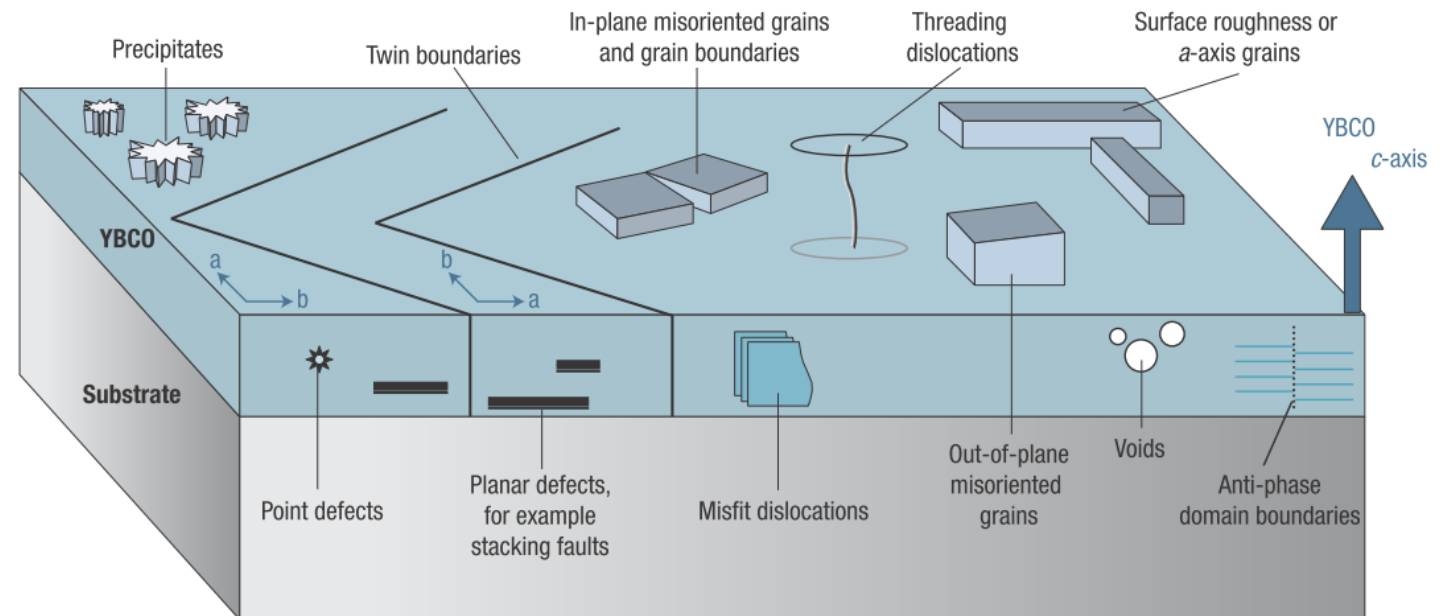
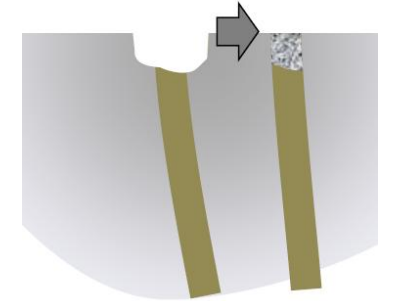
- Volumendefekte:



Definierte Erzeugung künstlicher Defekte durch Ausscheidungen, Bestrahlung etc.

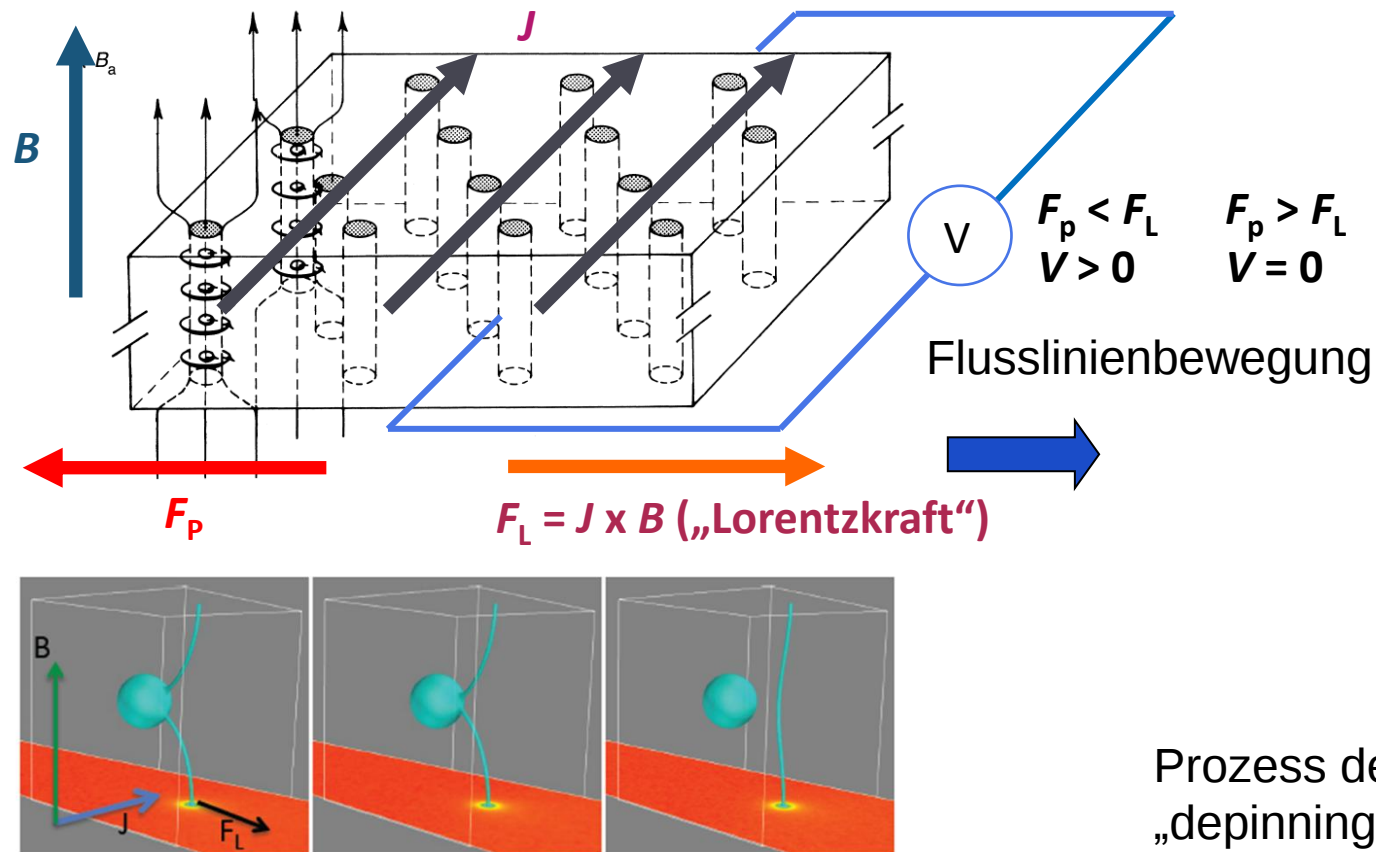
→ „Pinning Engineering“

Oberflächenpinning



Kritische Stromdichte

Qualitatives Modell des Flusslinienpinnings

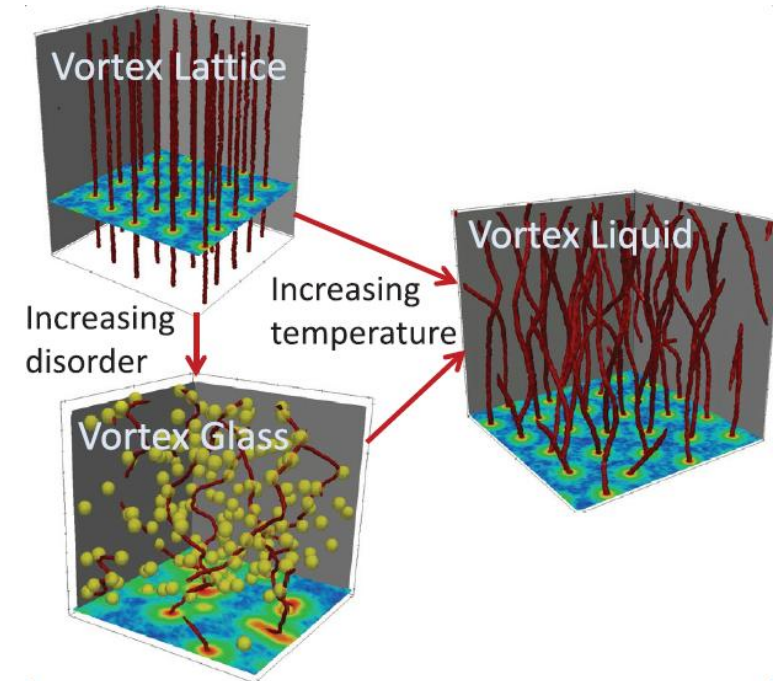


Kollektive Bewegung der Flussschläuche führt zu einem Spannungsabfall

→ Irreversibilitätsfeld $B_{irr} < B_{c2}$

Verhalten der Flusslinien ist von der Temperatur und der Verteilung der Defekte abhängig

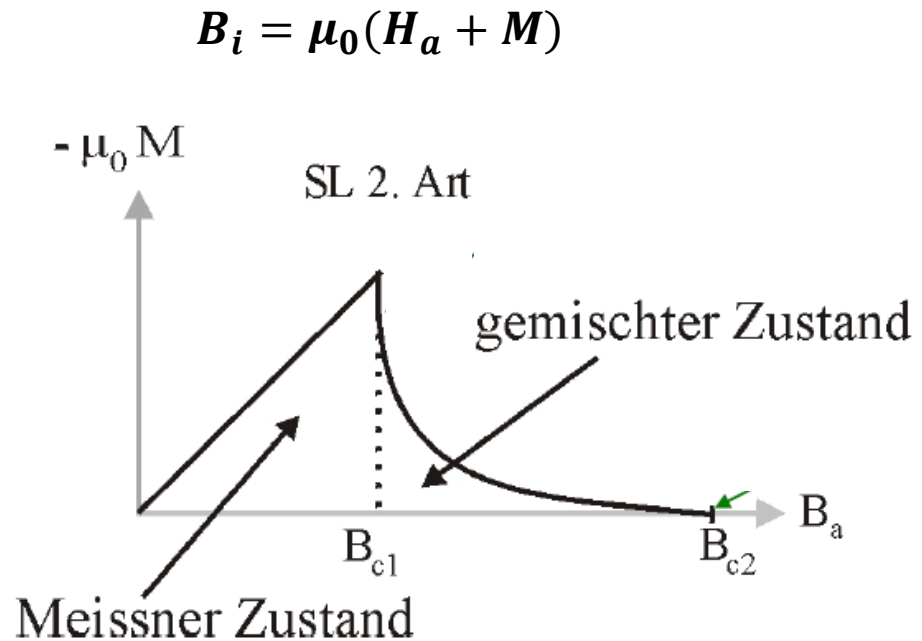
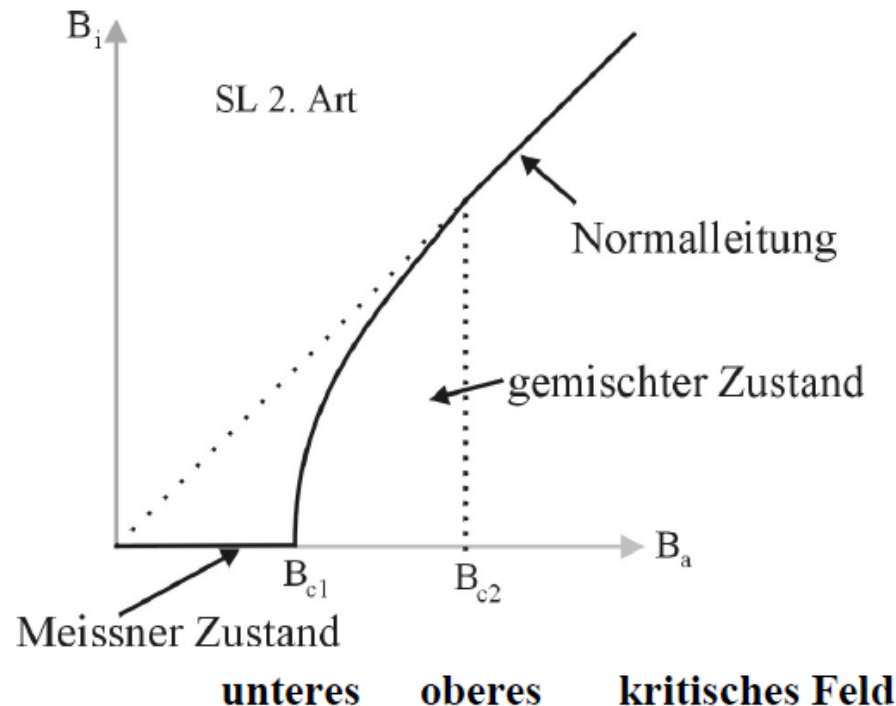
→ „Vortexphasen“



Harte Supraleiter

Typ II Supraleiter ohne Pinningzentren

Bei Anlegen eines Magnetfeldes dringen Flusslinien von der Oberfläche in den Supraleiter ein und verteilen sich mit Gleichgewichtsabstand

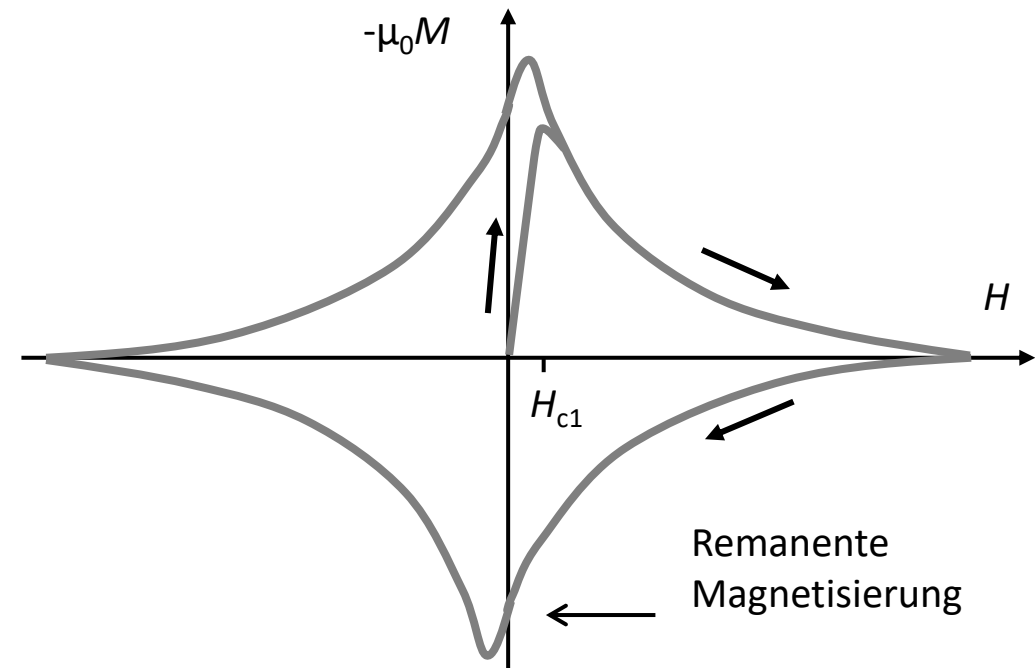
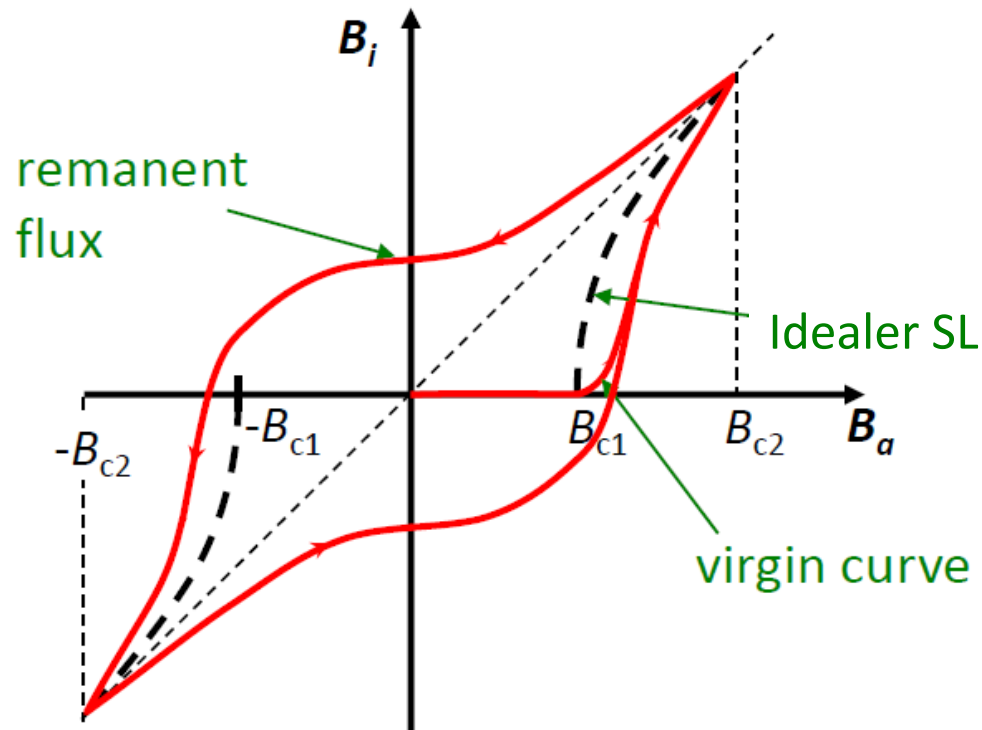


→ Reversibler Prozess

Harte Supraleiter

Typ II Supraleiter mit Pinningzentren

Bei Anlegen eines Magnetfeldes dringen Flusslinien von der Oberfläche in den Supraleiter ein



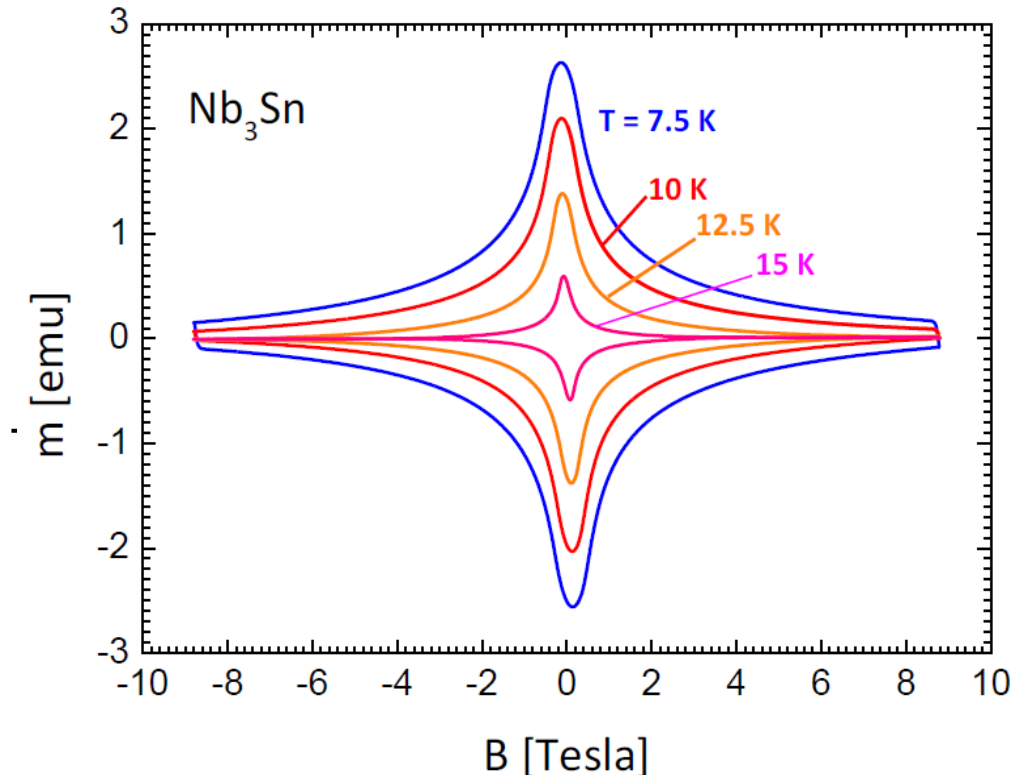
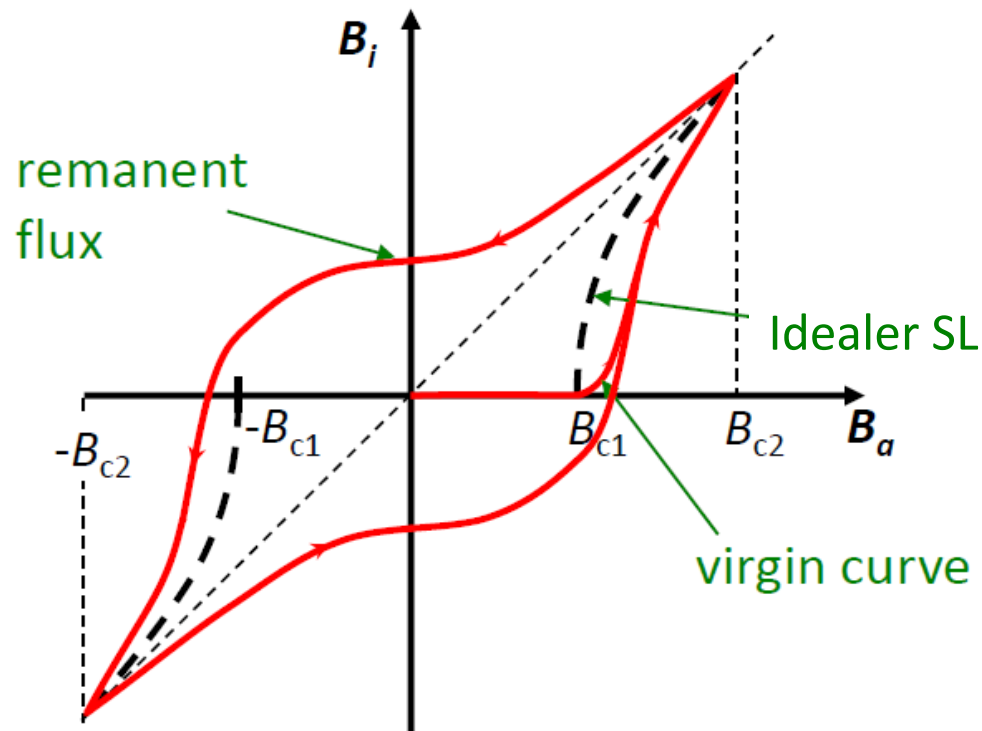
→ Magnetische Feld bleibt im Supraleiter erhalten: supraleitender Permanentmagnet

→ Feld ist nicht homogen im Supraleiter verteilt

Harte Supraleiter

Typ II Supraleiter mit Pinningzentren

Bei Anlegen eines Magnetfeldes dringen Flusslinien von der Oberfläche in den Supraleiter ein



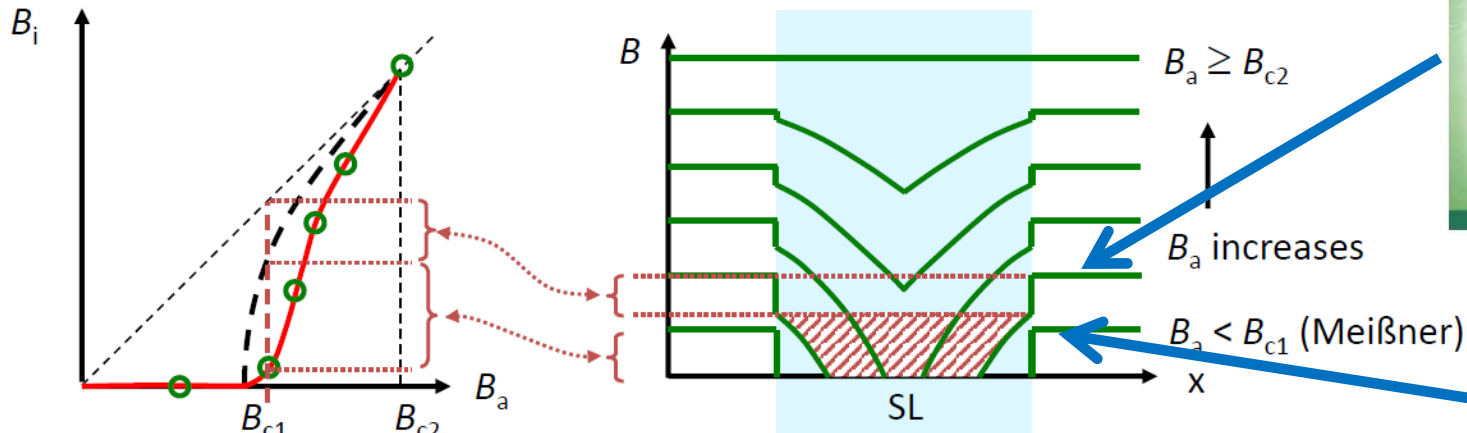
→ Magnetische Feld bleibt im Supraleiter erhalten: supraleitender Permanentmagnet

→ Feld ist nicht homogen im Supraleiter verteilt

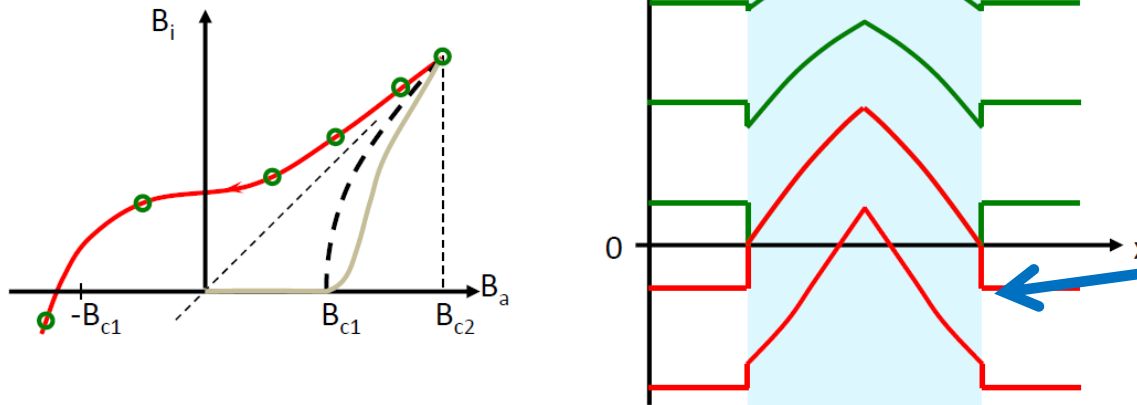
Harte Supraleiter

Typ II Supraleiter mit Pinningzentren

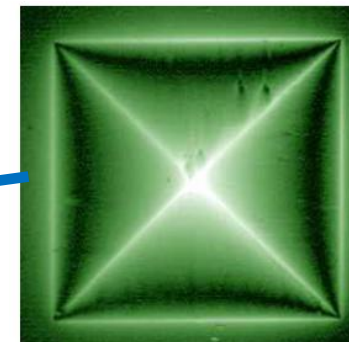
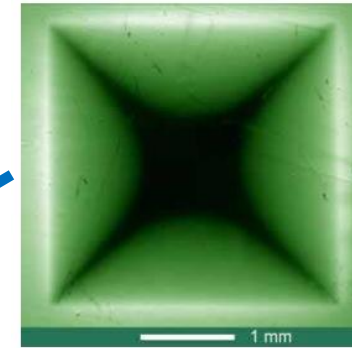
Magnetisierung



Demagnetisierung



Magnetooptische Aufnahmen



Harte Supraleiter

Bean Modell

$$\text{rot } \mathbf{B}_i = \mu_0 \mathbf{J}_{scr}$$

Ampèresches Gesetz

Feld in z-Richtung:

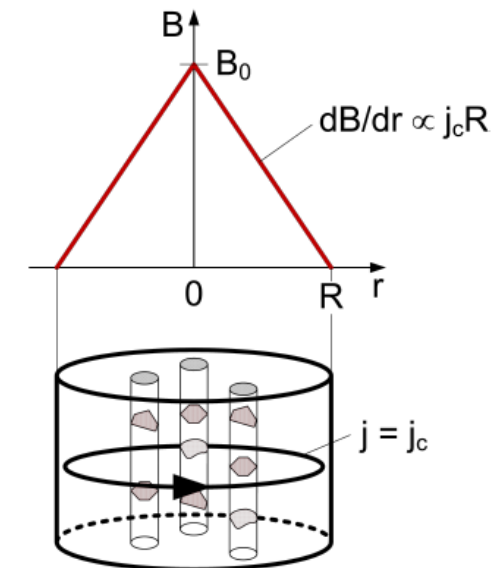
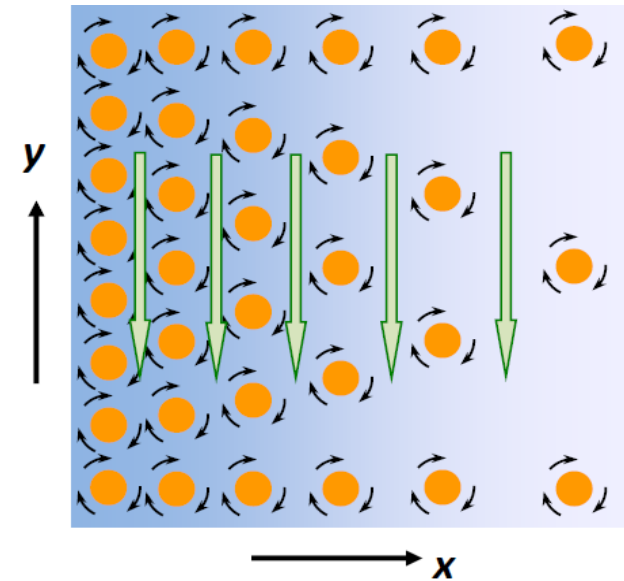
$$\frac{\partial B_{i,z}}{\partial x} = \mu_0 J_{scr,y}$$

$$\frac{\partial B_{i,z}}{\partial x} \text{ klein: } J < J_c \rightarrow \text{Flußlinien gepinnt}$$

$$\frac{\partial B_{i,z}}{\partial x} \text{ groß: } J > J_c \rightarrow \text{Flußlinien bewegen sich}$$

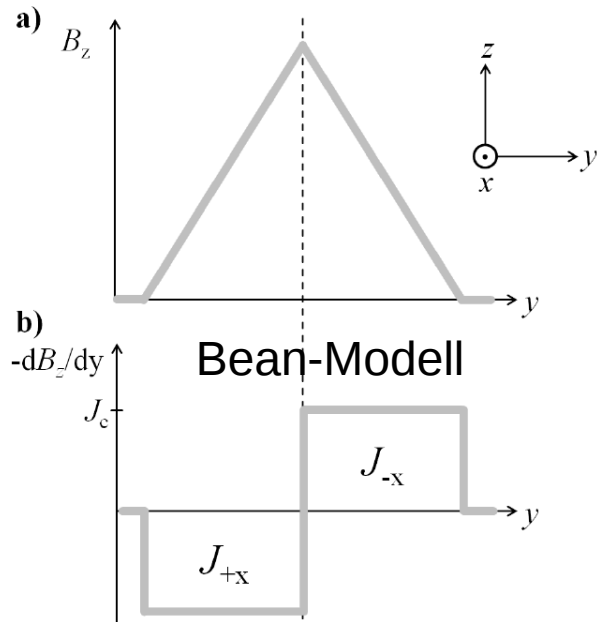
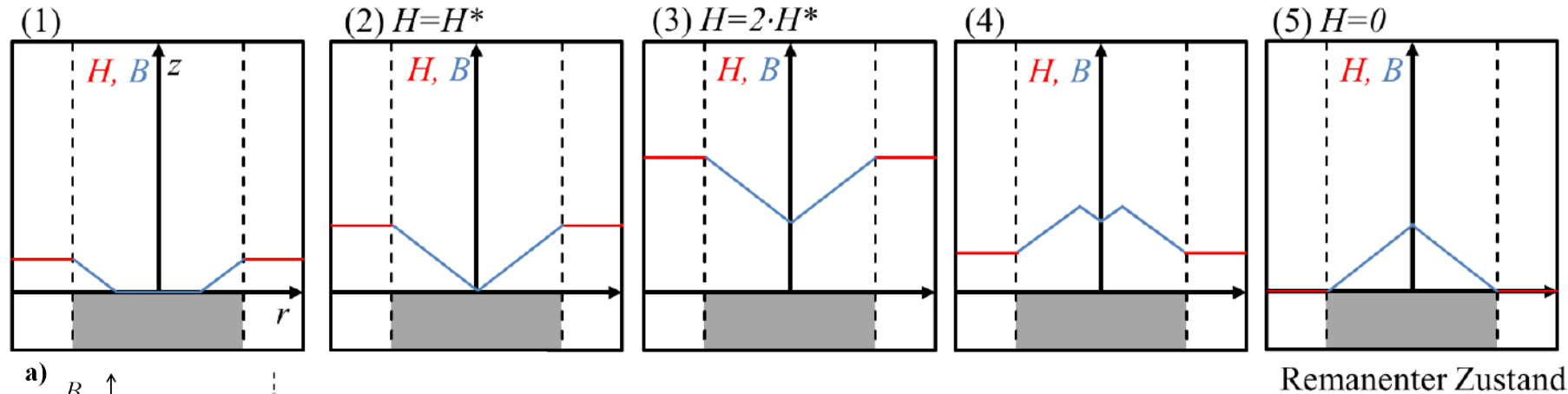
Bewegung bis: $J = J_c$ „kritische Zustand“

Aus der Messung von $\frac{\partial B_{i,z}}{\partial x}$ kann J_c ermittelt werden!

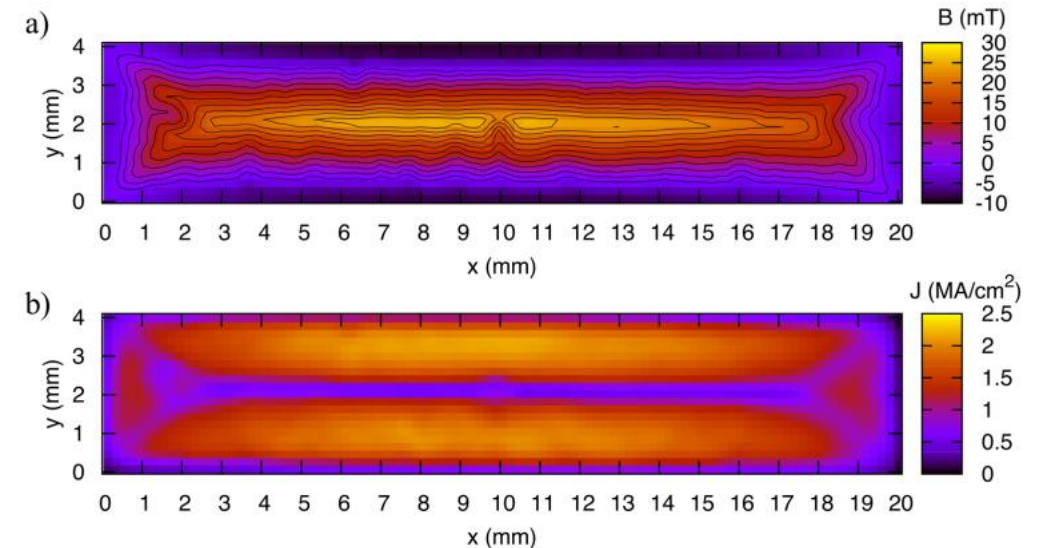
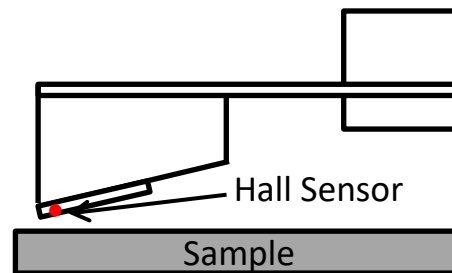


Harte Supraleiter

Messung des kritischen Stromes



Hallsonden-
Mikroskopie

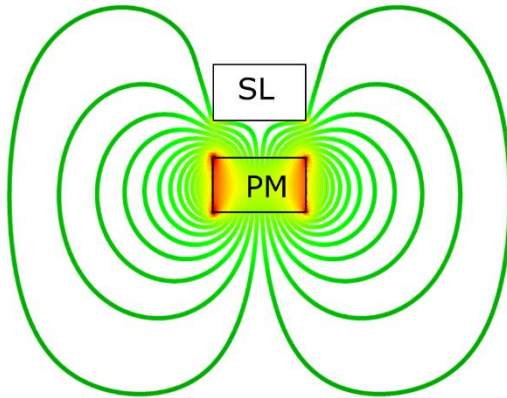


Harte Supraleiter

Stabiles Schweben mit harten Supraleitern

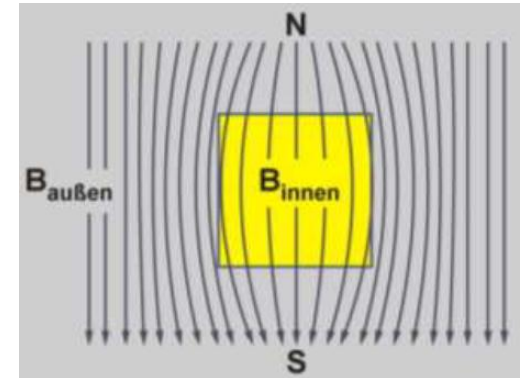
Nullfeldkühlung

„Diamagnetische Auftriebskraft“

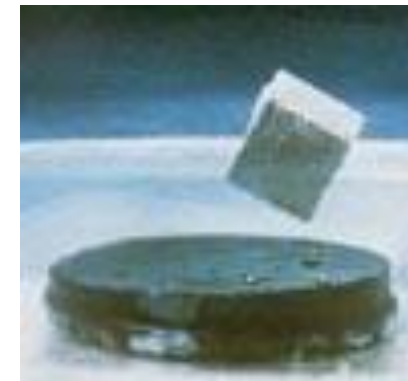
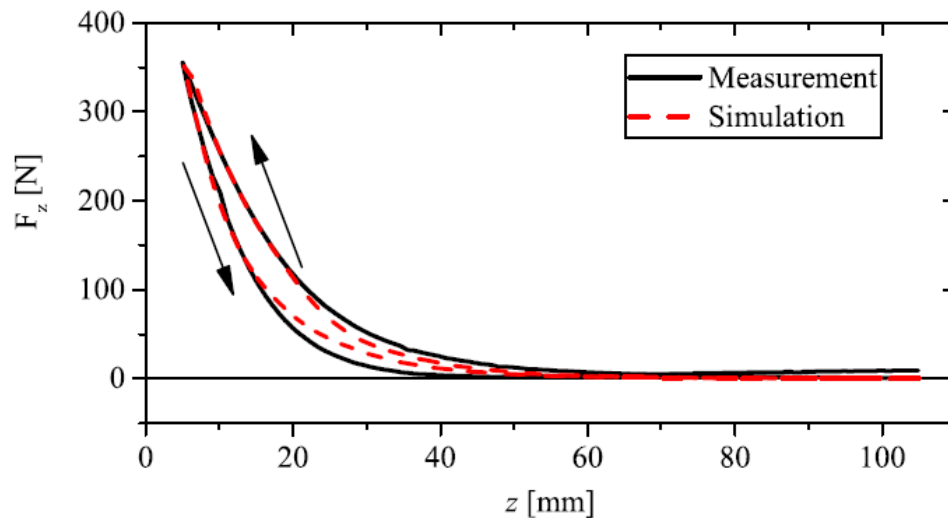


$$F_{lev,dia} = \frac{\chi_m}{2\mu_0} \mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B}$$

- Eindringen von Flussschläuchen oberhalb B_{c1}
- Hysterese bei großen Verschiebungen → Umordnung Flussschläuche

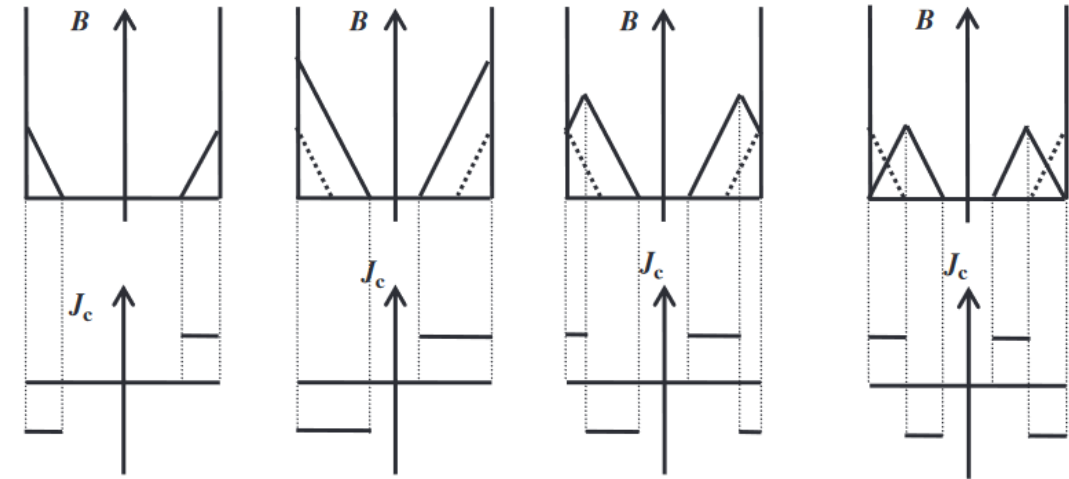
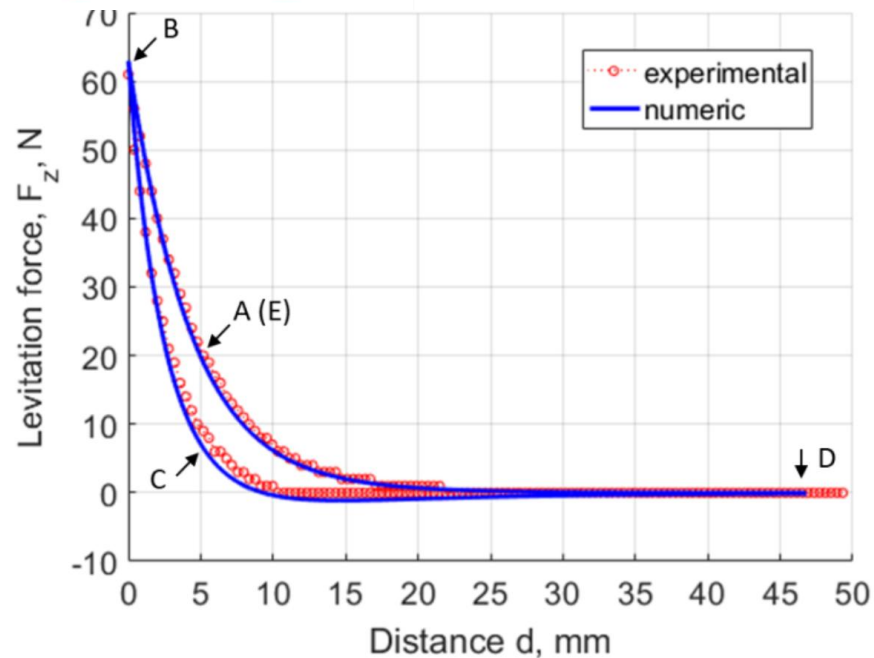
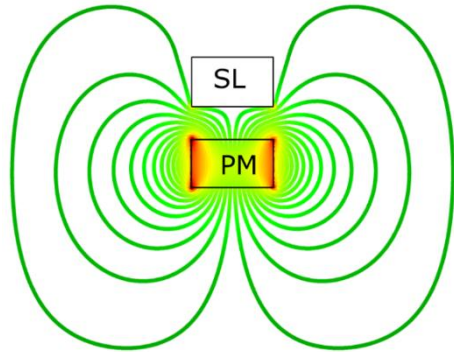


$$\mathbf{B}_i = (1 + \chi_m) \mathbf{B}_a$$



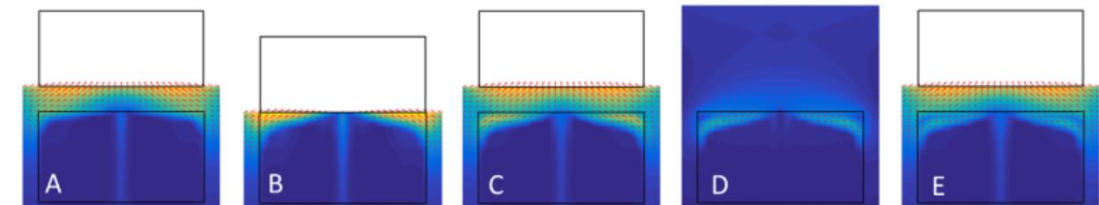
Harte Supraleiter

Stabiles Schweben mit Supraleitern



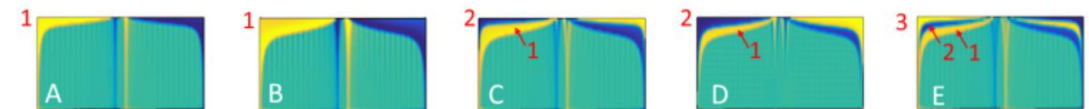
X. Wu et al., Physica C 486 (2013) 17

Numerische Simulationen



a) Magnetic flux density, T

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6



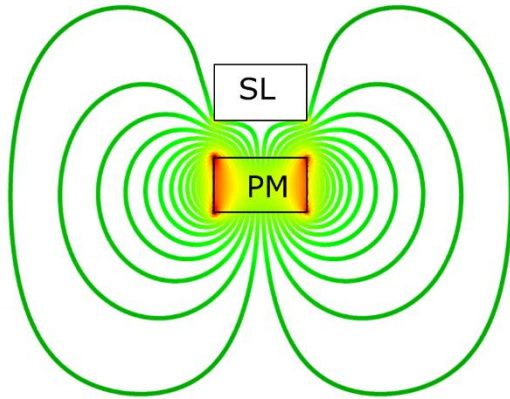
b) Current density, A/m²

-1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5 $\times 10^8$

Harte Supraleiter

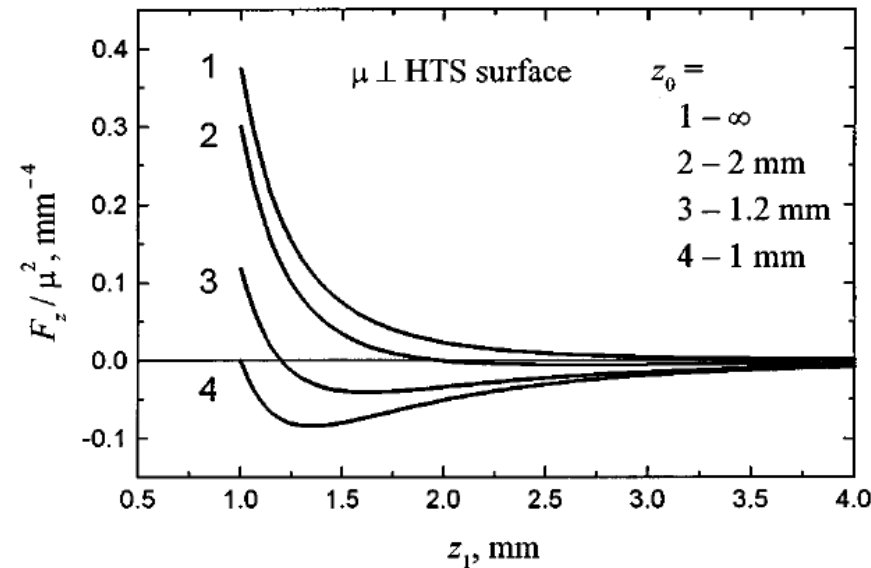
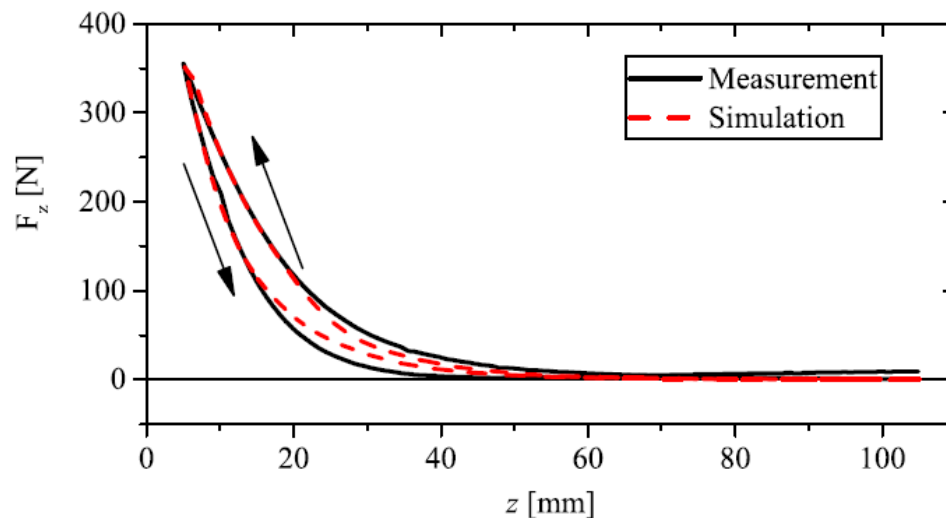
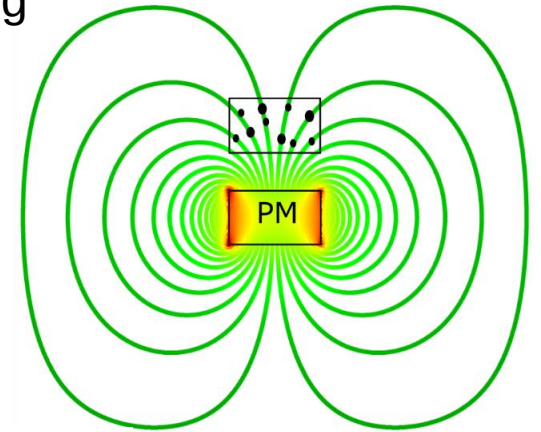
Stabiles Schweben mit Supraleitern

Nullfeldkühlung



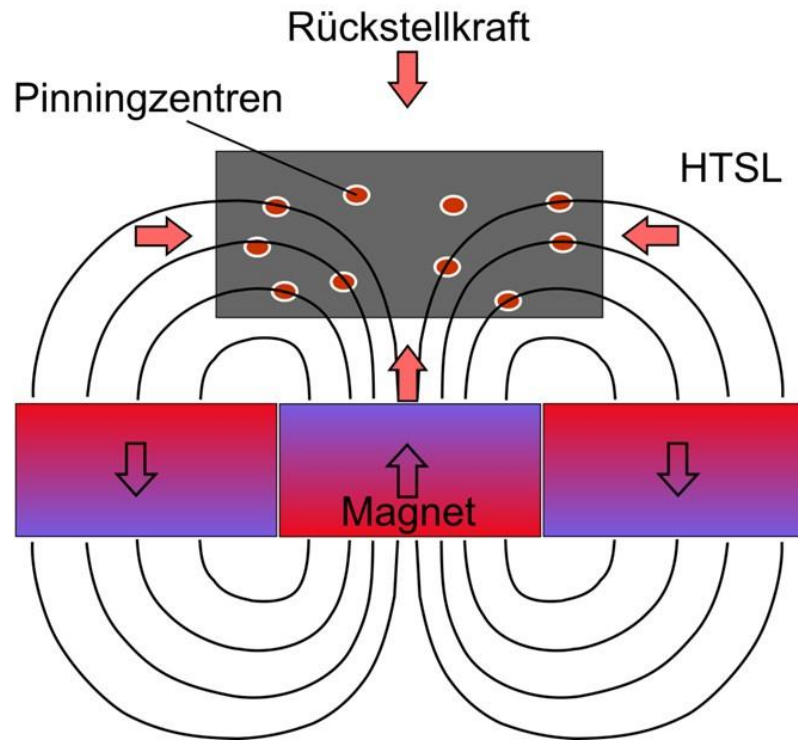
- Eindringen von Flussschläuchen oberhalb B_{c1}
- Hysterese bei großen Verschiebungen → Umordnung Flussschläuche
- „Einfrieren“ der Magnetfeldanordnung bei Feldkühlung → stabil in beide Belastungsrichtungen

Feldkühlung



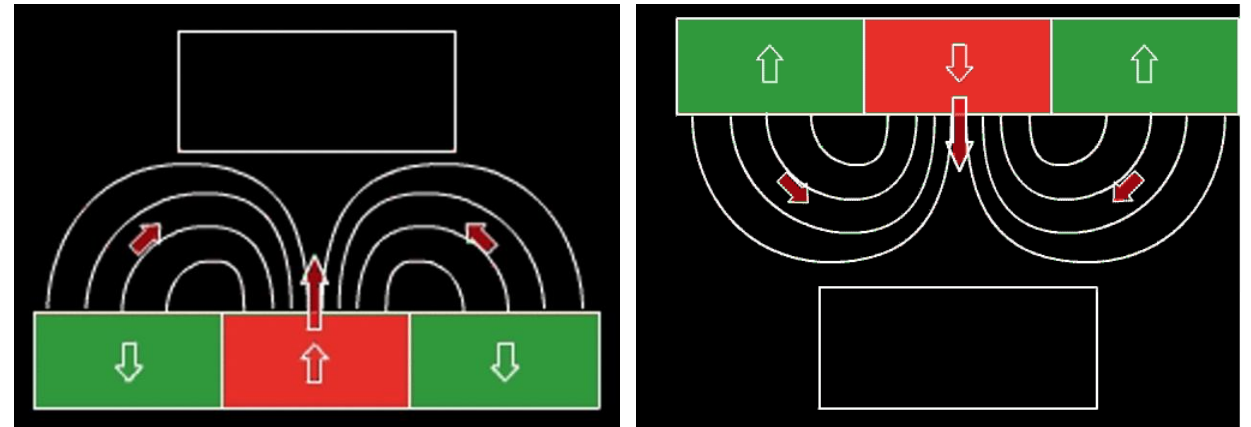
Harte Supraleiter

Stabiles Schweben mit Supraleitern

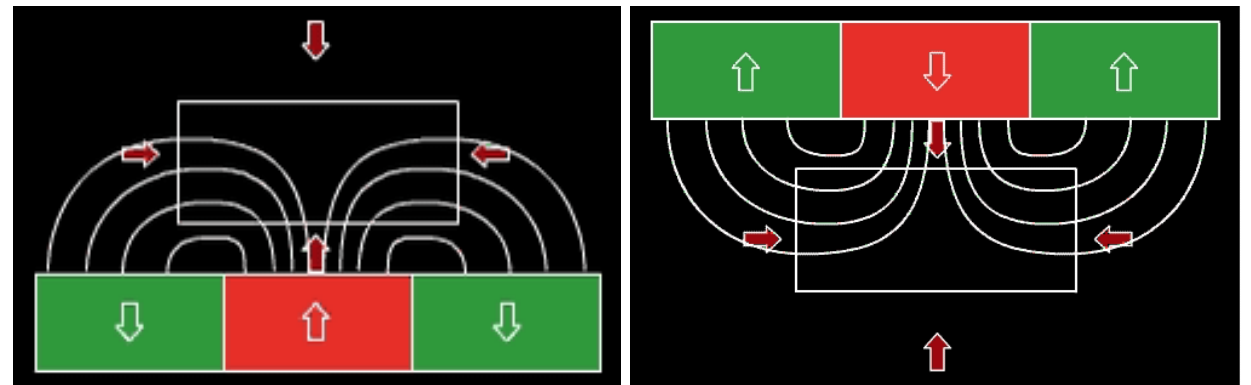


Inhomogene Magnetfeldkonfiguration dringt in den Supraleiter ein und wird von den Haftzentren „fixiert“

Kein Magnetfeld im Supraleiter (Nullfeldkühlung)

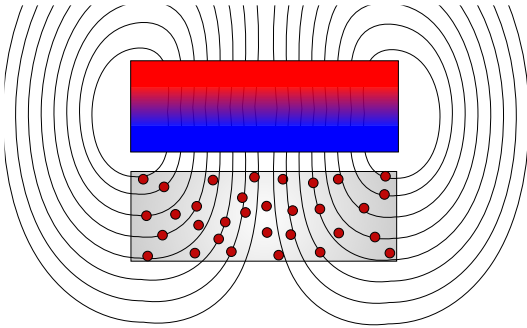


Magnetfeld im Supraleiter (Feldkühlung)



Harte Supraleiter

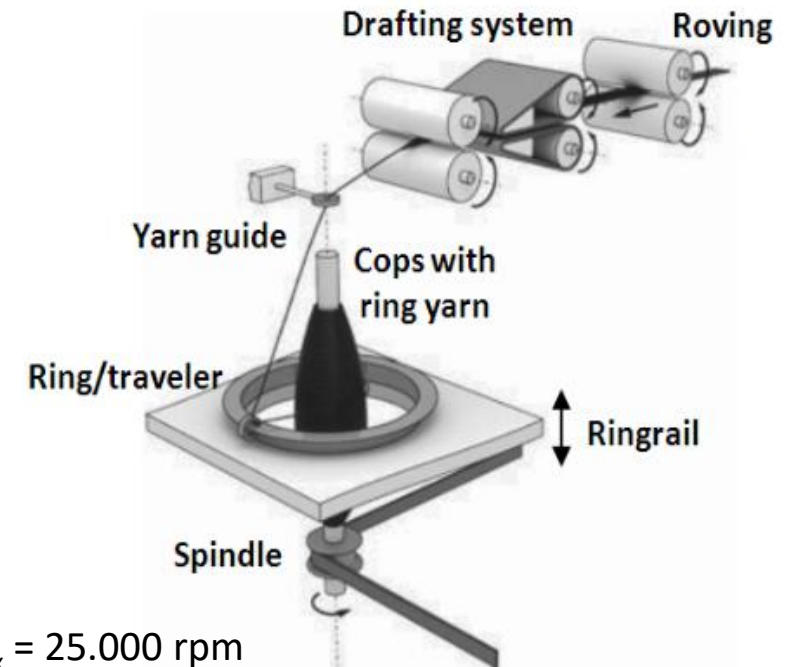
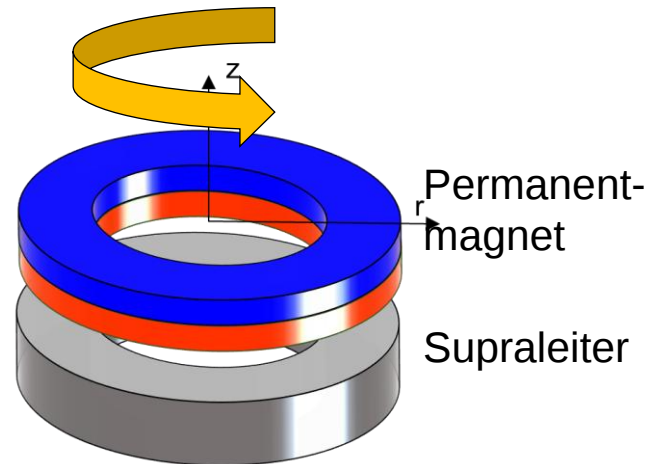
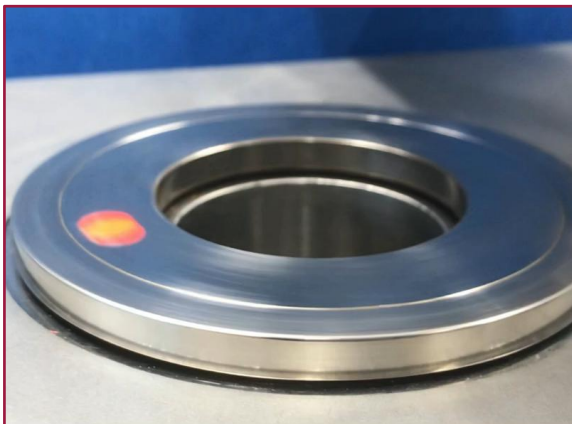
Stabiles Schweben mit Supraleitern



- Supraleiter „speichert“ inhomogene Magnetfeldkonfiguration beim Abkühlen unterhalb T_c
- Relativbewegungen gegen Magnetfeld führen zu Rückstellkräften → Größe korreliert mit Feldgradient
- Keine Rückstellkräfte, wenn Feld sich nicht ändert

Rotationssymmetrische Bewegung

Schnelldrehende reibungsfreie Lager

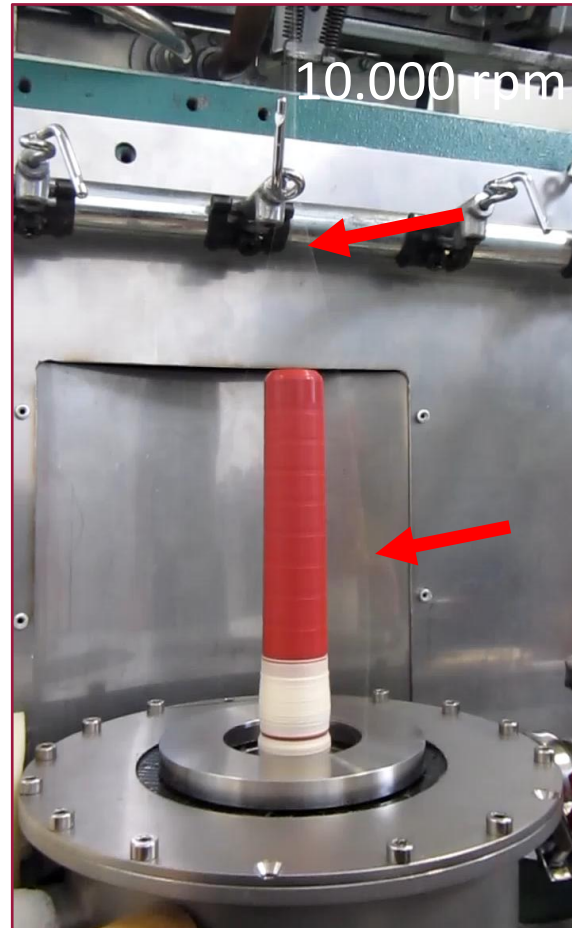


Harte Supraleiter

Supraleitendes Lager für den Ringspinnprozess



Test in offenem LN₂ (~10.000 rpm)



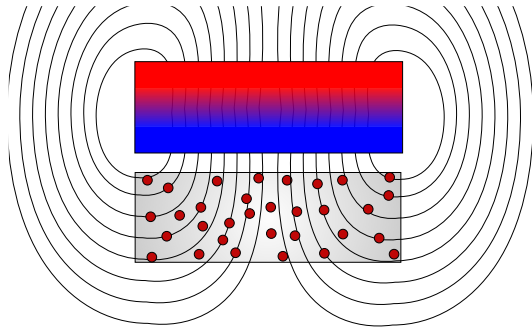
Cryostat 1.0 (77 K, max. 25.000 rpm)



Cryostat 2.0 (65 K, max. 50.000 rpm)

Harte Supraleiter

Stabiles Schweben mit Supraleitern



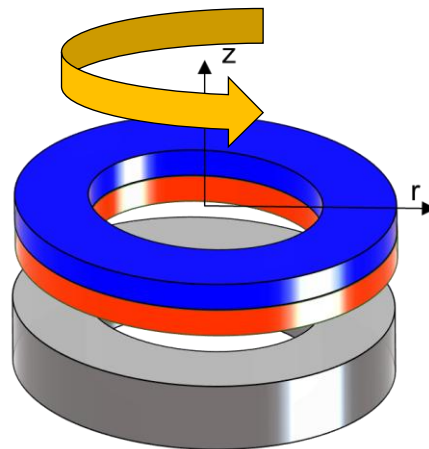
- Supraleiter „speichert“ inhomogene Magnetfeldkonfiguration beim Abkühlen unterhalb T_c
- Relativbewegungen gegen Magnetfeld führen zu Rückstellkräften → Größe korreliert mit Feldgradient
- Keine Rückstellkräfte, wenn Feld sich nicht ändert



Rotationssymmetrische Bewegung

Schnelldrehende reibungsfreie Lager

25.000 Umdrehungen/min

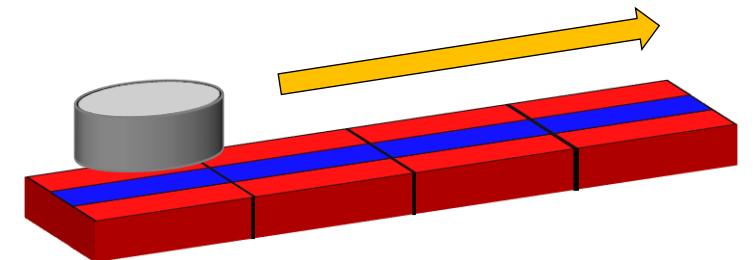


Permanentmagnet

Supraleiter

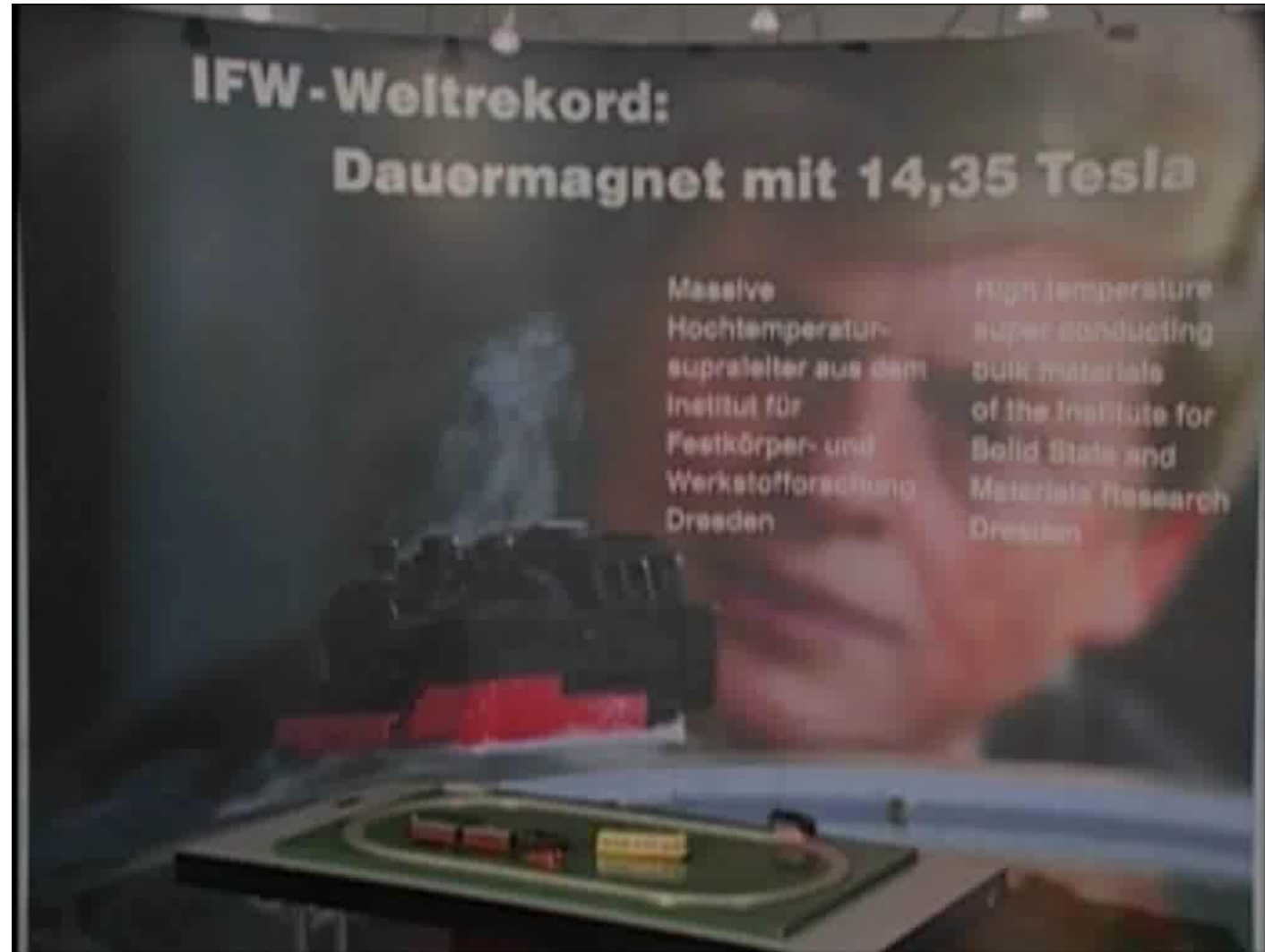
Linearbewegung

Berührungsfreier Transport



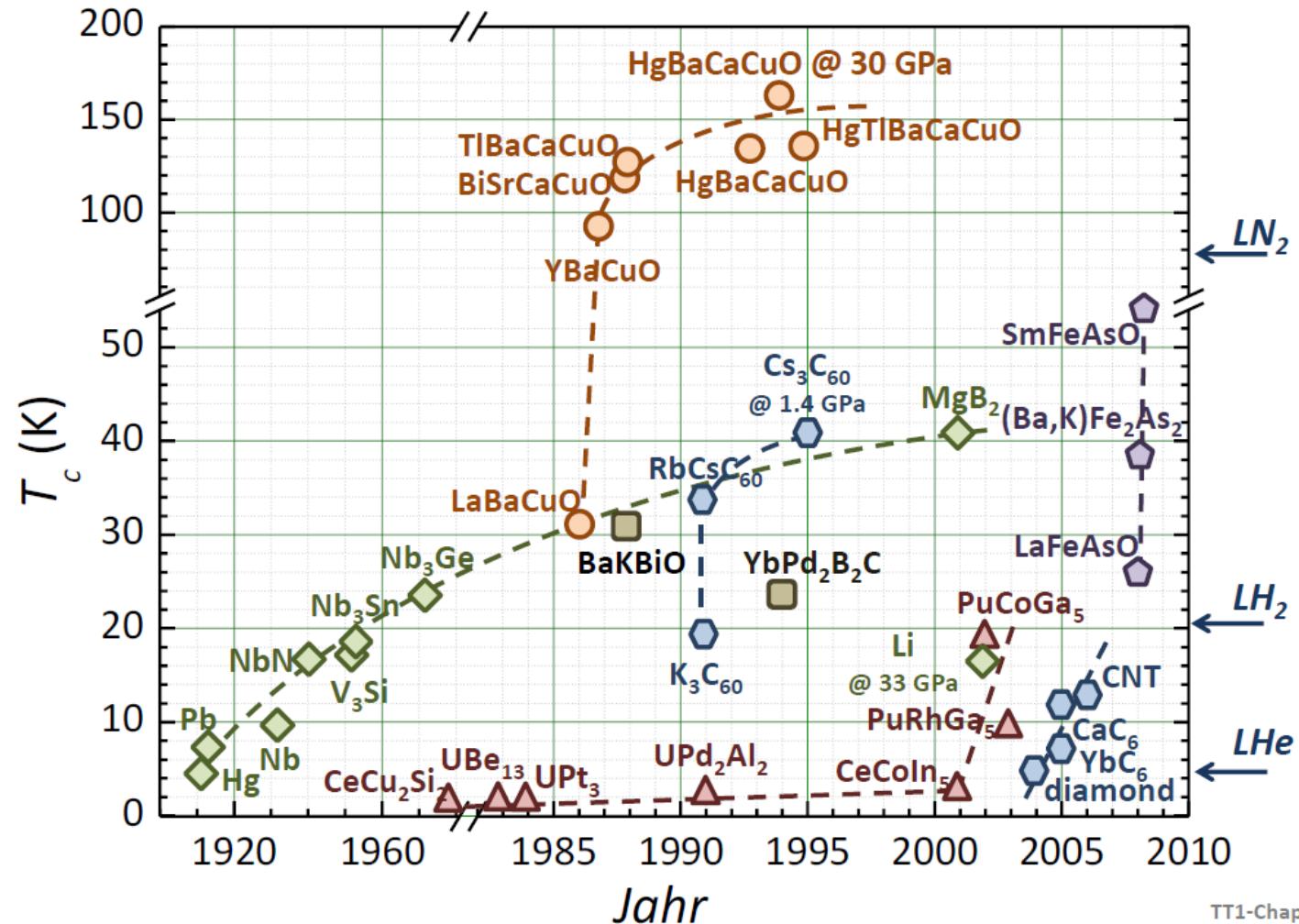
Harte Supraleiter

Stabiles Schweben mit Supraleitern



Konventionelle Supraleiter

Ausgewählte supraleitende Materialien



Konventionelle Supraleiter

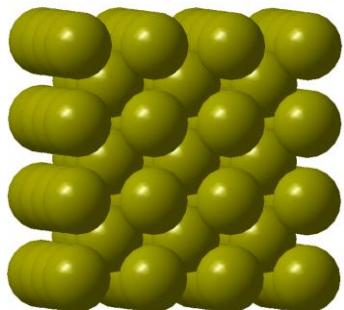
Nb-basierte Legierungen

	T_c (K)
Nb	9.2
Nb ₃ Sn	18.0
Nb ₃ Ge	23.2
Nb ₃ Al	~19.0
NbTi	~11.0
NbN	~16.0

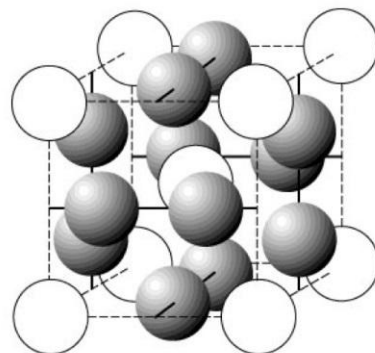
- Typ II Supraleiter
- Klassische Elektron-Phonon-Kopplung
- Isotropes Verhalten

Metalle mit einfacher kubischer Struktur

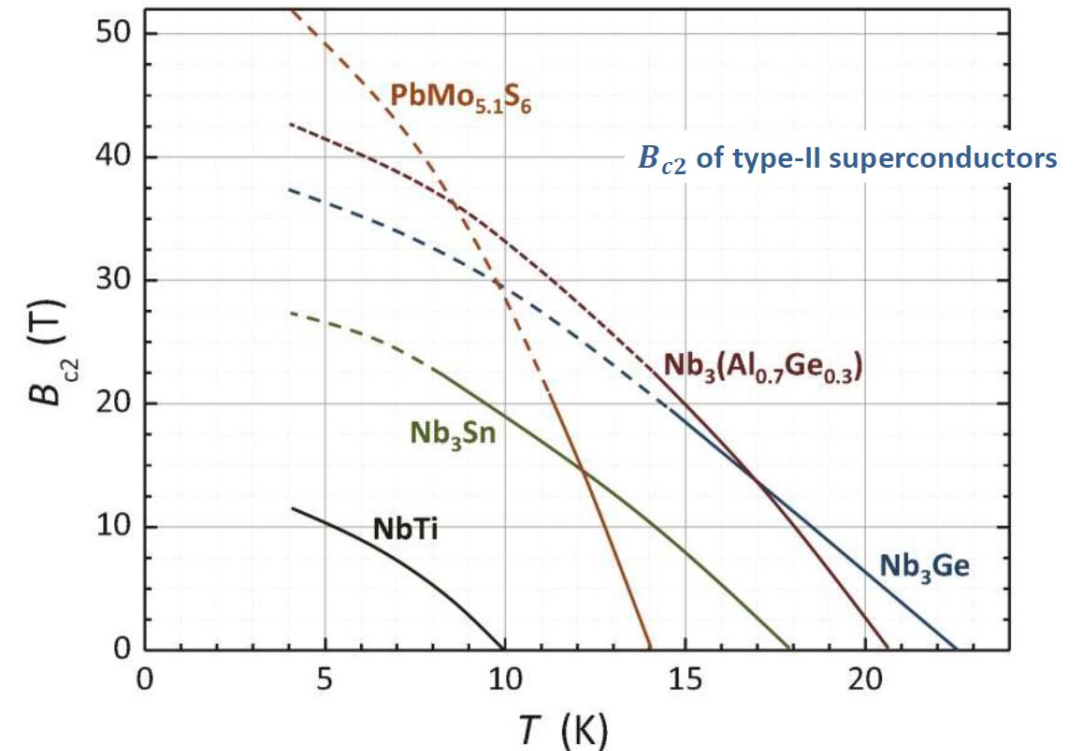
Nb



Nb₃Sn

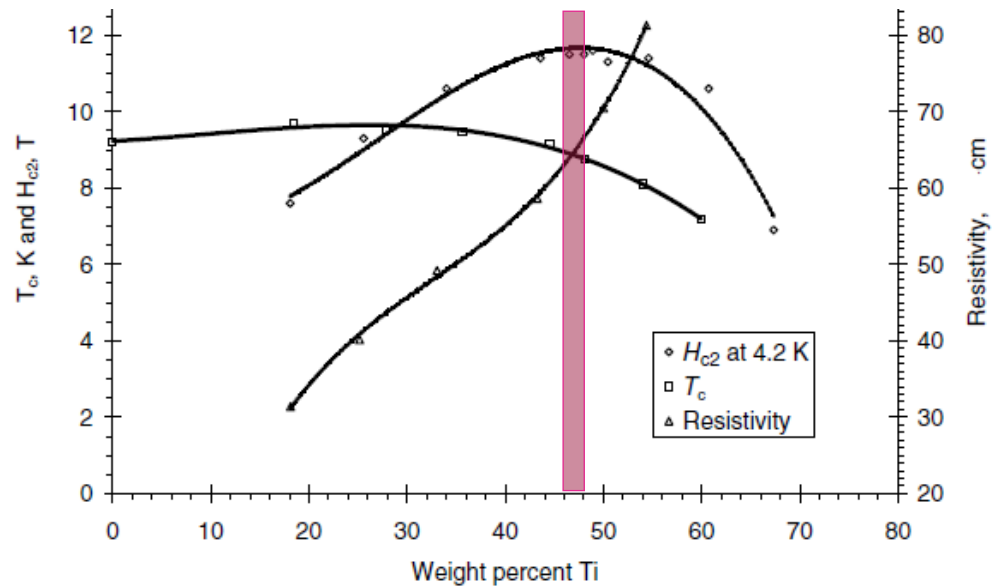


Verbindung	NbTi	Nb ₃ Sn	NbN
T_c [K]	$\simeq 10$	$\simeq 18$	$\simeq 16$
B_{c2} [T]	$\simeq 10.5$	$\simeq 23\text{--}29$	$\simeq 15$
$\lambda_L(0)$ [nm]	$\simeq 300$	$\simeq 80$	$\simeq 200$
κ_∞	$\simeq 75$	$\simeq 20\text{--}25$	$\simeq 40$



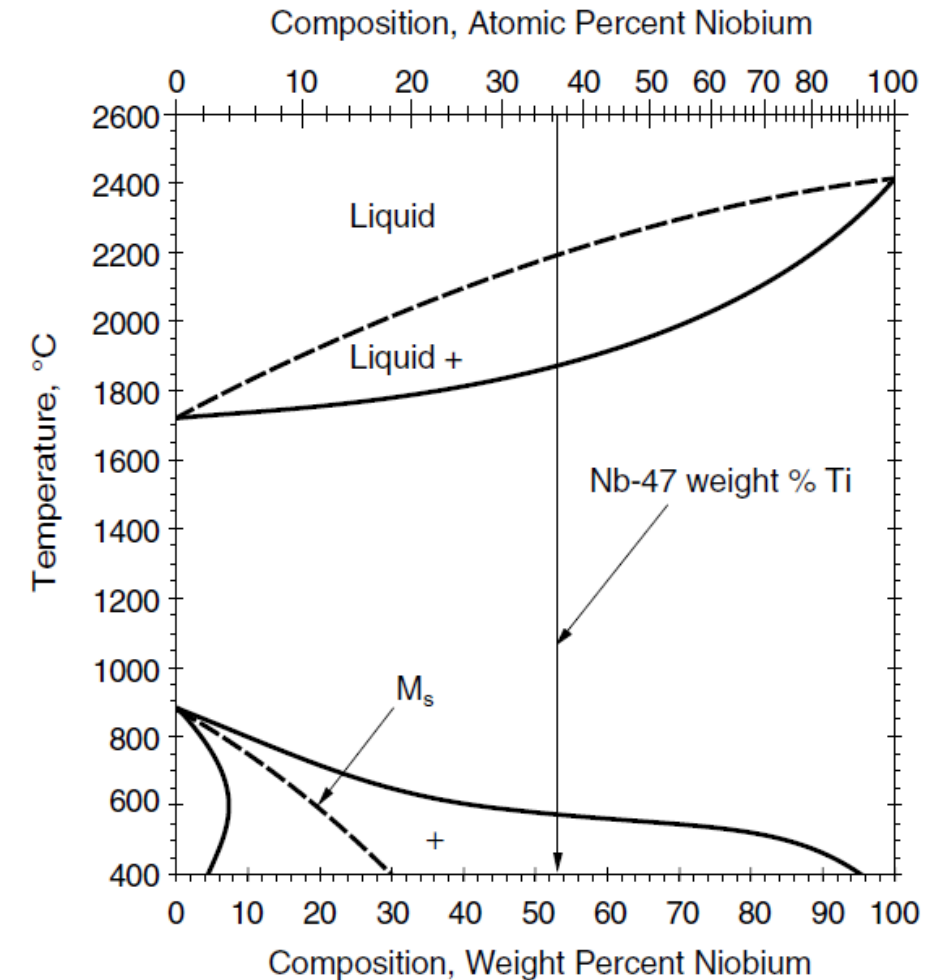
Konventionelle Supraleiter

NbTi-Legierungen



Flusslinien bei
5 T und 4.2 K

Ti-reiche Aus-
scheidungen

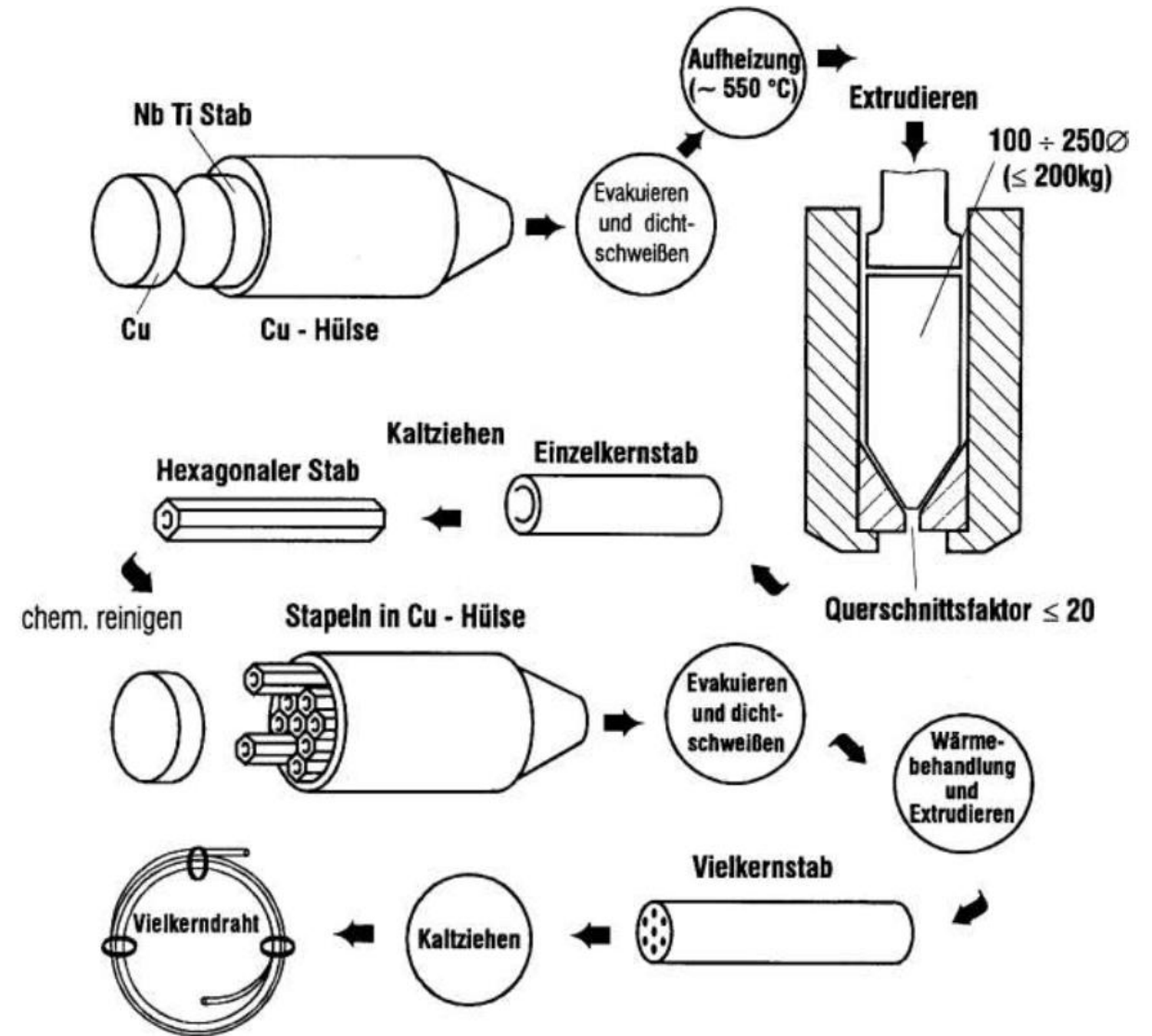
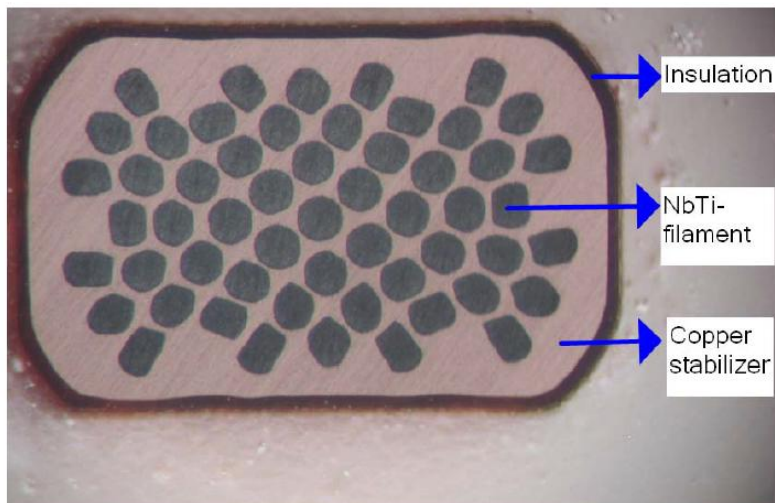


Ti-reiche Zweitphase (1...2 at.%Nb)

Konventionelle Supraleiter

NbTi-Legierungen

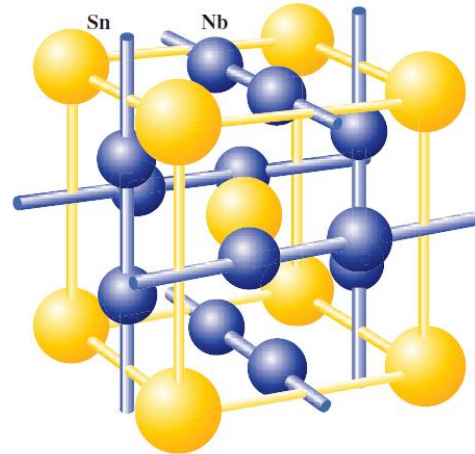
- Herstellung mit konventioneller Metallumformungsroute
- Mehrkernleiter für Reduzierung von Wechselstromverlusten
- Cu-Stabilisierung für Fall des Zusammenbruches der Supraleitung notwendig



Konventionelle Supraleiter

Nb_3Sn -Supraleiter

- Intermetallische, kubische A15 Phase
- Mechanisch sprödes Verhalten
- Ähnliche inter-metallische Phasen: Nb_3Al , Nb_3Ge

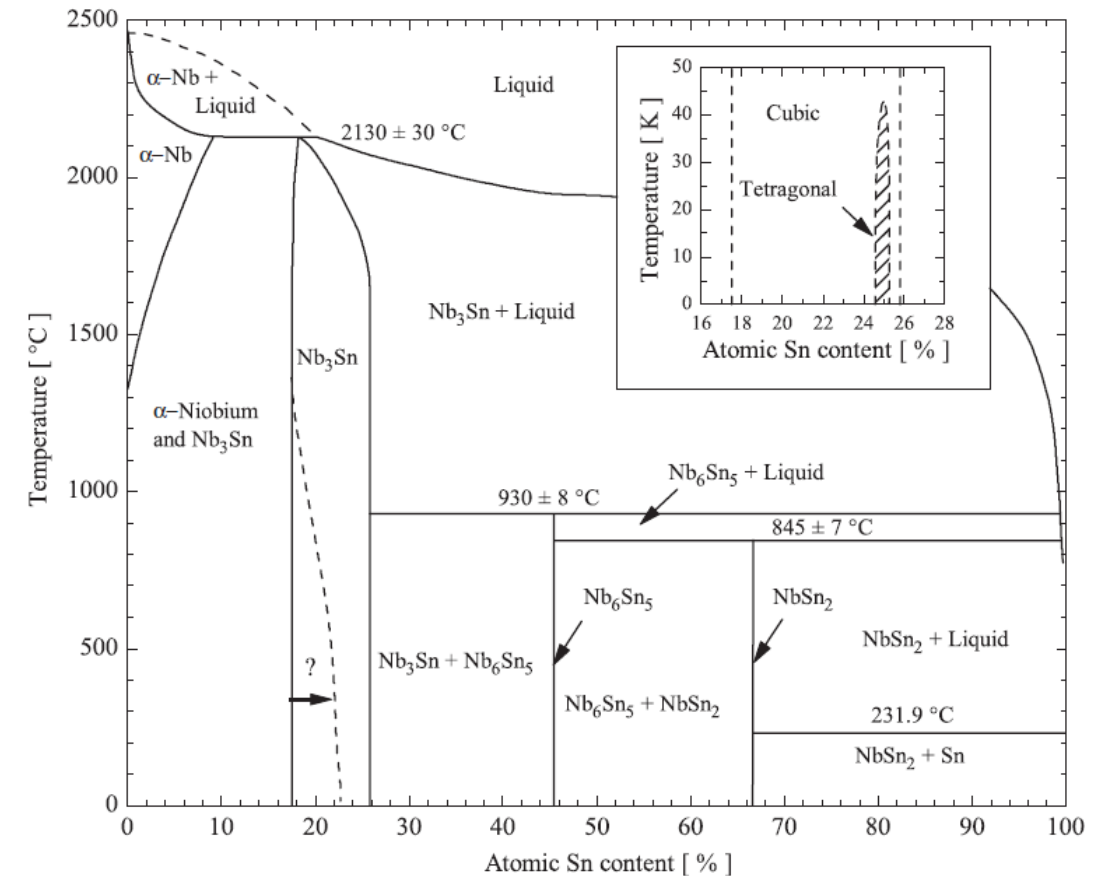
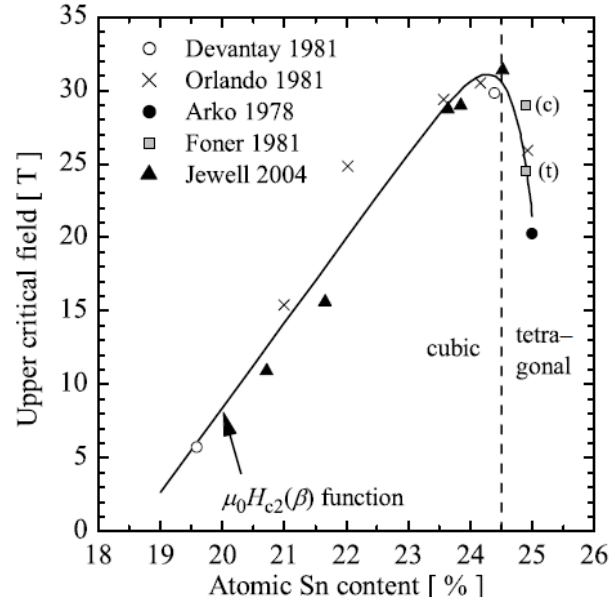
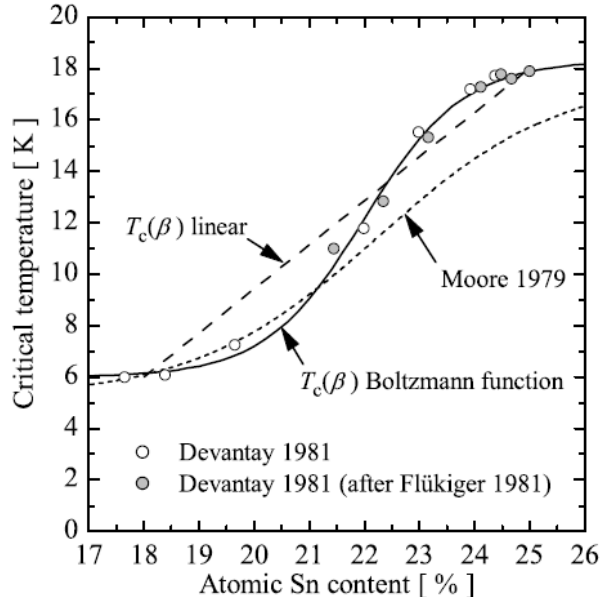
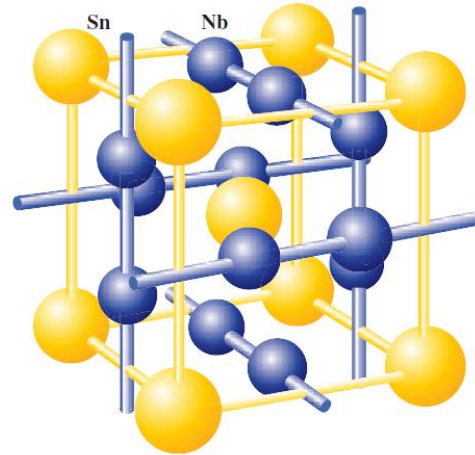


B \ A ₃	Ti 4	Zr 4	V 5	Nb 5	Ta 5	Cr 6	Mo 6
Al 3			11.8	18.8			0.6
Ga 3			16.8	20.3			0.8
In 3			13.9	9.2			
Tl 3				9			
Si 4			17.1	19			1.7
Ge 4			11.2	23.2	8.0	1.2	1.8
Sn 4	5.8	0.9	7.0	18.0	8.4		
Pb 4		0.8		8.0	17		
As 5			0.2				
Sb 5	5.8		0.8	2.2	0.7		
Bi 5		3.4		4.5			
Tc 7							15.0
Re 7							15.0
Ru 8						3.4	10.6
Os 8			5.7	1.1		4.7	12.7
Rh 9			1.0	2.6	10.0	0.3	
Ir 9	5.4		1.7	3.2	6.6	0.8	9.6
Pd 10			0.08				
Pt 10	0.5		3.7	10.9	0.4		8.8
Au 11		0.9	3.2	11.5	16.0		

Konventionelle Supraleiter

Nb₃Sn-Supraleiter

- Intermetallische, kubische A15 Phase
- Mechanisch sprödes Verhalten
- Ähnliche inter-metallische Phasen: Nb₃Al, Nb₃Ge



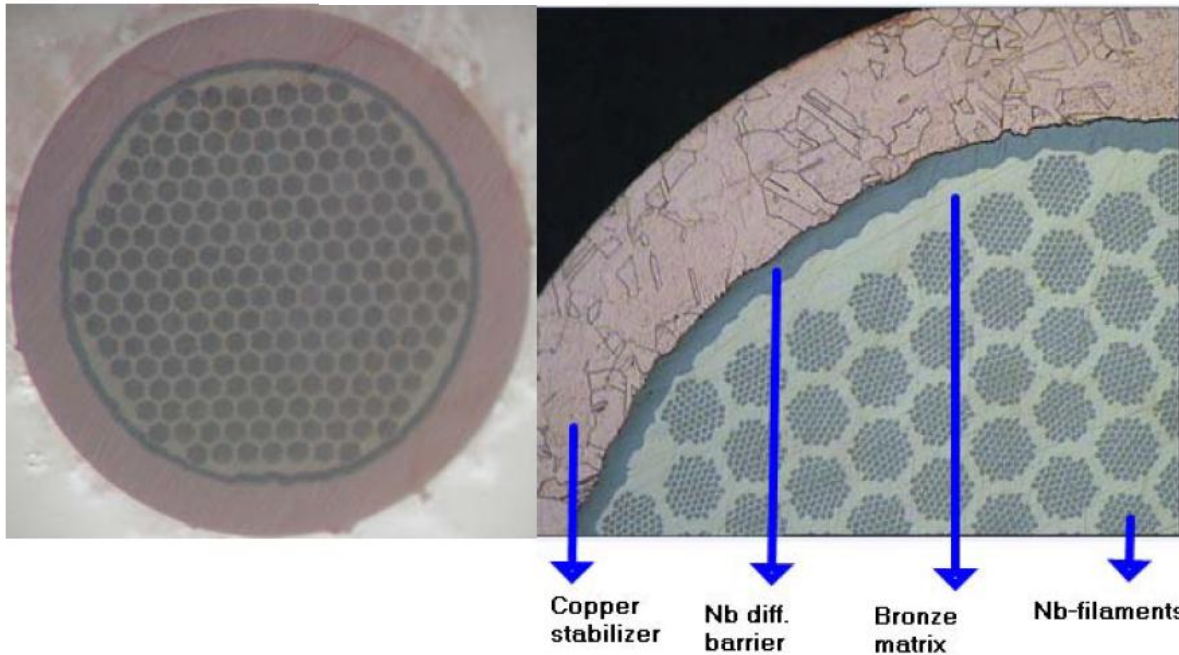
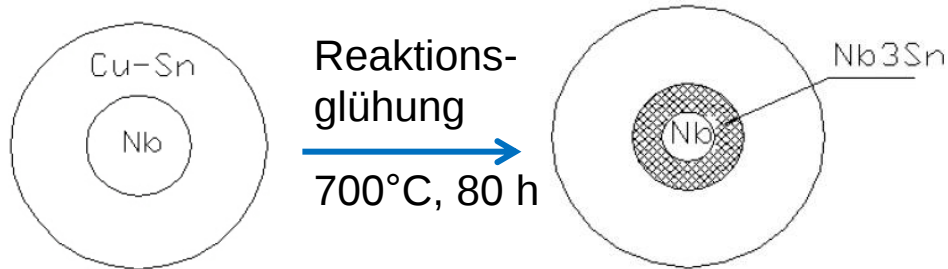
Pinning vor allem an Korngrenzen:
 → Typische Korngröße von 100-200 nm
 nicht optimal (z.B. ~15 nm für 12 T)

Konventionelle Supraleiter

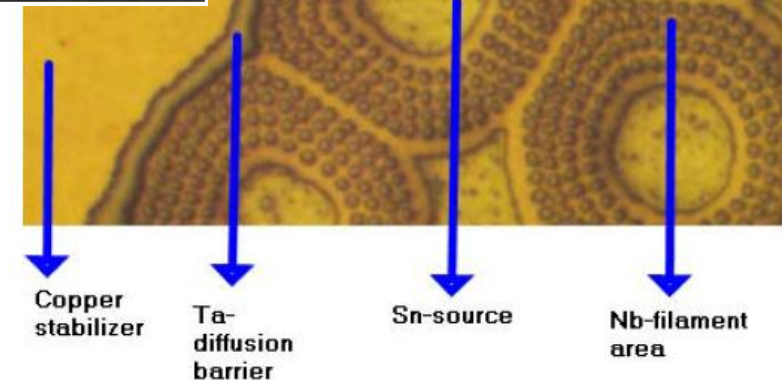
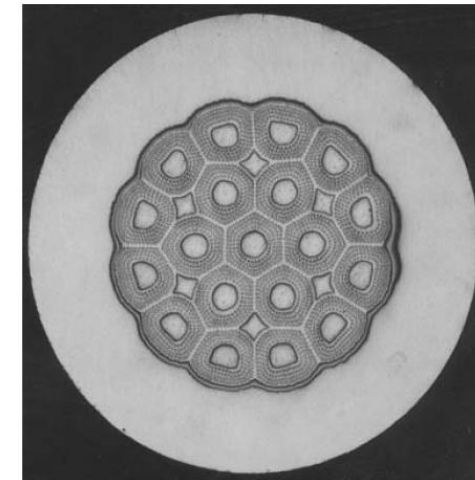
Nb₃Sn-Supraleiter

Herausforderung: sprödes Verhalten von Nb₃Sn → schlecht umformbar

Bronze-Route

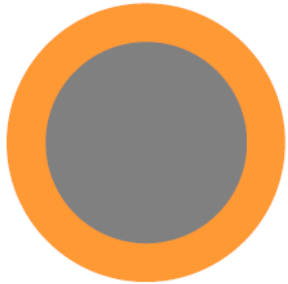


„Interne Sn“ Route



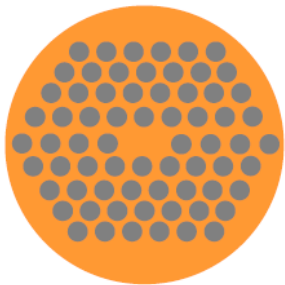
Konventionelle Supraleiter

Weshalb Multifilamentleiter?



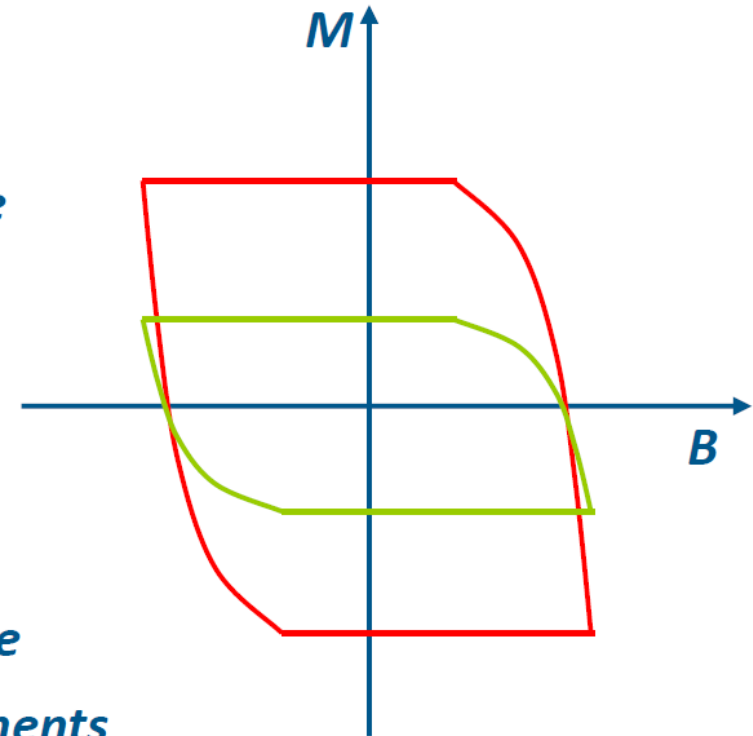
$$\Delta M \propto J_c d$$

d is the filament size



$$\Delta M \propto n J_c d$$

d is the filament size
n is the number of filaments



Reduzierung der Hystereseverluste in Wechselstromanwendungen

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

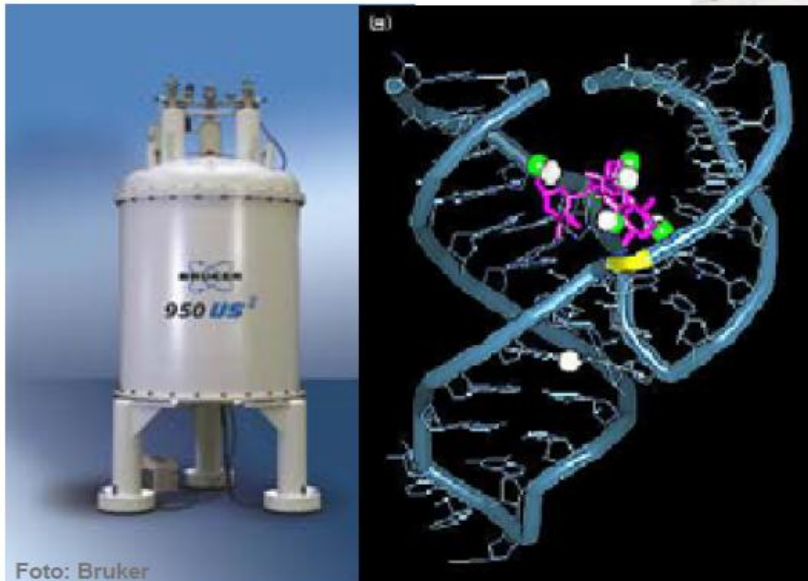
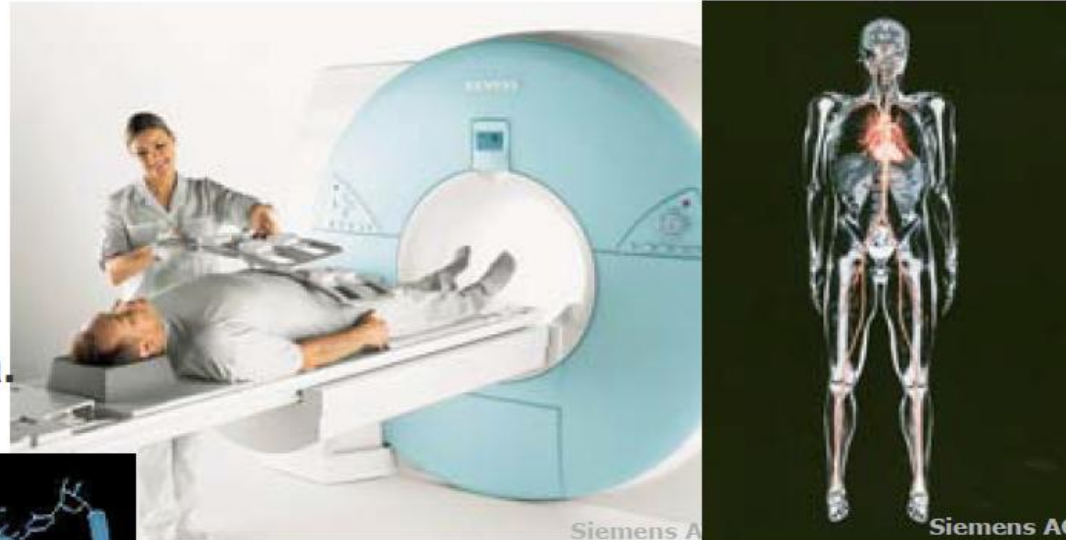
Anwendungen konventioneller Supraleiter

Einsatz in Medizin und Analytik

Medizintechnik

MRI Bildgebung
für weiches Gewebe
(Organe, Knorpel, Sehnen)

Weltmarkt > 3 Mrd € p.a.
> 3000 to NbTi p.a.



Analytik

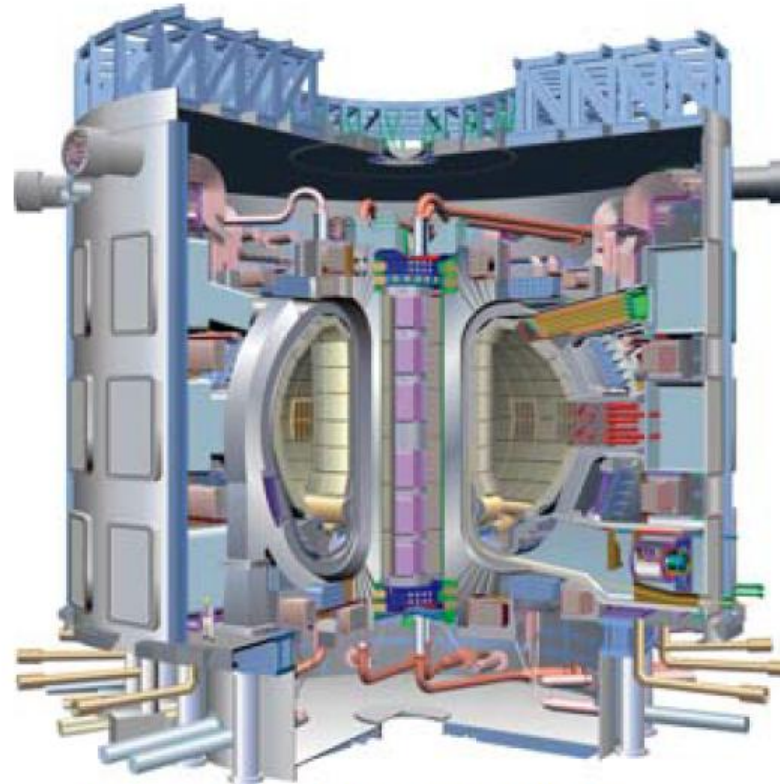
NMR Spektroskopie

Weltmarkt > 500 M€ p.a.
> 500 to Nb₃Sn p.a.

Anwendungen konventioneller Supraleiter

Magnetbau für Großforschungseinrichtungen und Kernfusion

Large Hadron Collider, LHC at CERN



International Thermonuclear
Experimental Reactor, ITER

- Beschleuniger für die Teilchenphysik oder Medizintechnik
- Kernfusionsreaktoren

> 500 to Nb_3Sn



ITER Kabel