

100 Jahre Entwicklung von Supraleitern fuer Magnet- und Energietechnik

Helmut Krauth

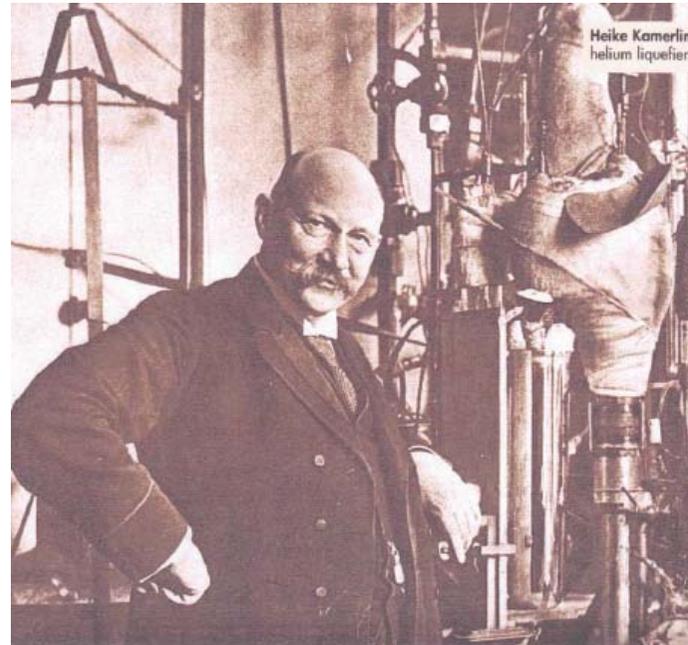
Superconductor Consultant

Hanau

Helmut.Krauth@t-online.de



Heike Kamerlingh Onnes (HKO)



**HKO neben seinem Helium-
Verfluessiger**

**(Glasapparatur, Glasblasarbeiten durch
den Thueringer Oskar Kesselring)**

Die wichtigsten Phasen der Supraleiter-Entwicklung

100 Jahre Supraleiterentwicklung fuer Hochstrom-Supraleiter (1911 – 2011)

(1) Die ersten Jahre (1911 – 1914): Entdeckung der Supraleitung, Nobel-Preis fuer Kamerlingh Onnes,

Erste Begeisterung und schnelle Ernüchterung

(2) 45 Jahre „Denkpause“ (1915 – 1961)

Theoretisches Verständnis: → 3 weitere Nobel-Preise in SL

Entdeckung der Typ 2 Supraleitung (Fluss-Schlaeuche)

Harte Supraleiter (Pinning der Fluss-Schlaeuche)

(3) **50 Jahre Entwicklung konventioneller Supraleiter (LTS) (1961 – 2011)**

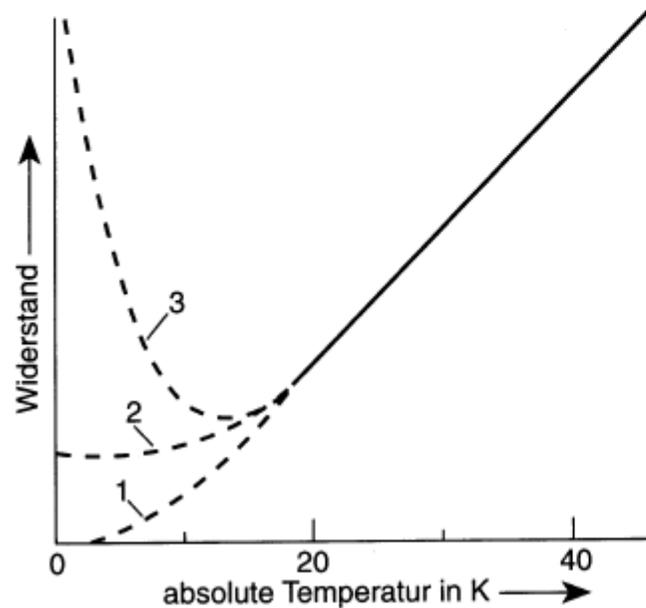
Zweite Begeisterungswelle und Anwendungen in der Magnettechnik

(4) **25 Jahre Entwicklung von Hoch-Tc-Supraleiter (HTS) (1987 – 2011)**

Dritte Begeisterungswelle und Anwendungen in der Energietechnik (?)

Erwartungen fuer den Widerstandsverlauf bei Metallen vor 1911

- 1 • Dewar (1904): Der Widerstand geht mit sinkendem T stetig gegen Null
Auch HKO (naheliegend wg. starker Abnahme von ρ mit sinkendem T).
- 2 • Matthiesen (1884): Der Widerstand strebt mit sinkendem T gegen Grenzwert,
d.h. $\rho(T \rightarrow 0 \text{ K}) \rightarrow \rho_{rest}$ (abhängig vom Reinheitsgrad)
→ Matthiesen-Regel $\rho(T) \approx \rho_{rest} + \rho_{phonon}(T)$
Streuung der Elektronen an Gitterfehlern und Phononen
- 3 • Kelvin (1902): Der Widerstand steigt mit sinkendem T bei T nahe 0 K stark an
(→ Lokalisierung der Elektronen). (Gilt z.B. fuer leitende Keramiken)



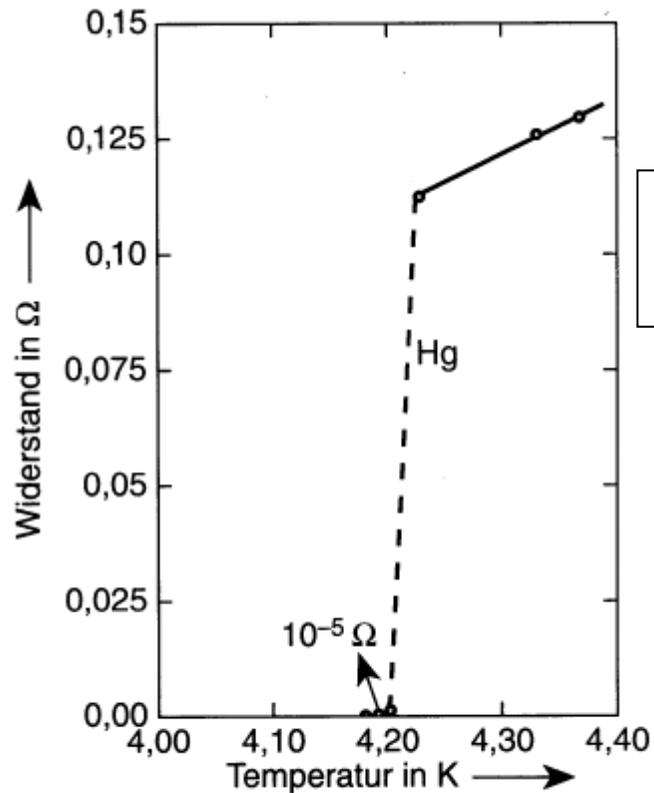
Buckel, Supraleitung 1994

Abb. 6.1: Zur Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von Metallen bei tiefen Temperaturen [aus W. Buckel, *Supraleitung*, VCH Weinheim, 5. Aufl. (1994); Abb.1].

Die Entdeckung der Supraleitung an Quecksilber 1911

08.04.1911: Laborbuch-Eintrag, dass R von Hg unmessbar klein bei ~3,5K (↔ Alternative 1)

26.10.1911: Messkurve unten: Unerwarteter Verlauf → „SUPRALEITUNG“



Von Kammerlingh Onnes entdeckte und untersuchte Supraleiter:

Hg $T_c = 4,15\text{K}$
 Pb $T_c = 7,2\text{K}$
 Sn $T_c = 3,72\text{K}$

Entstehung des Traums von
 verlustfreiem Stromfluss fuer:
 Energieuebertragung,
 Generatoren/Motoren, Magnete....

→ Widerstand verschwindet für $T < T_c$

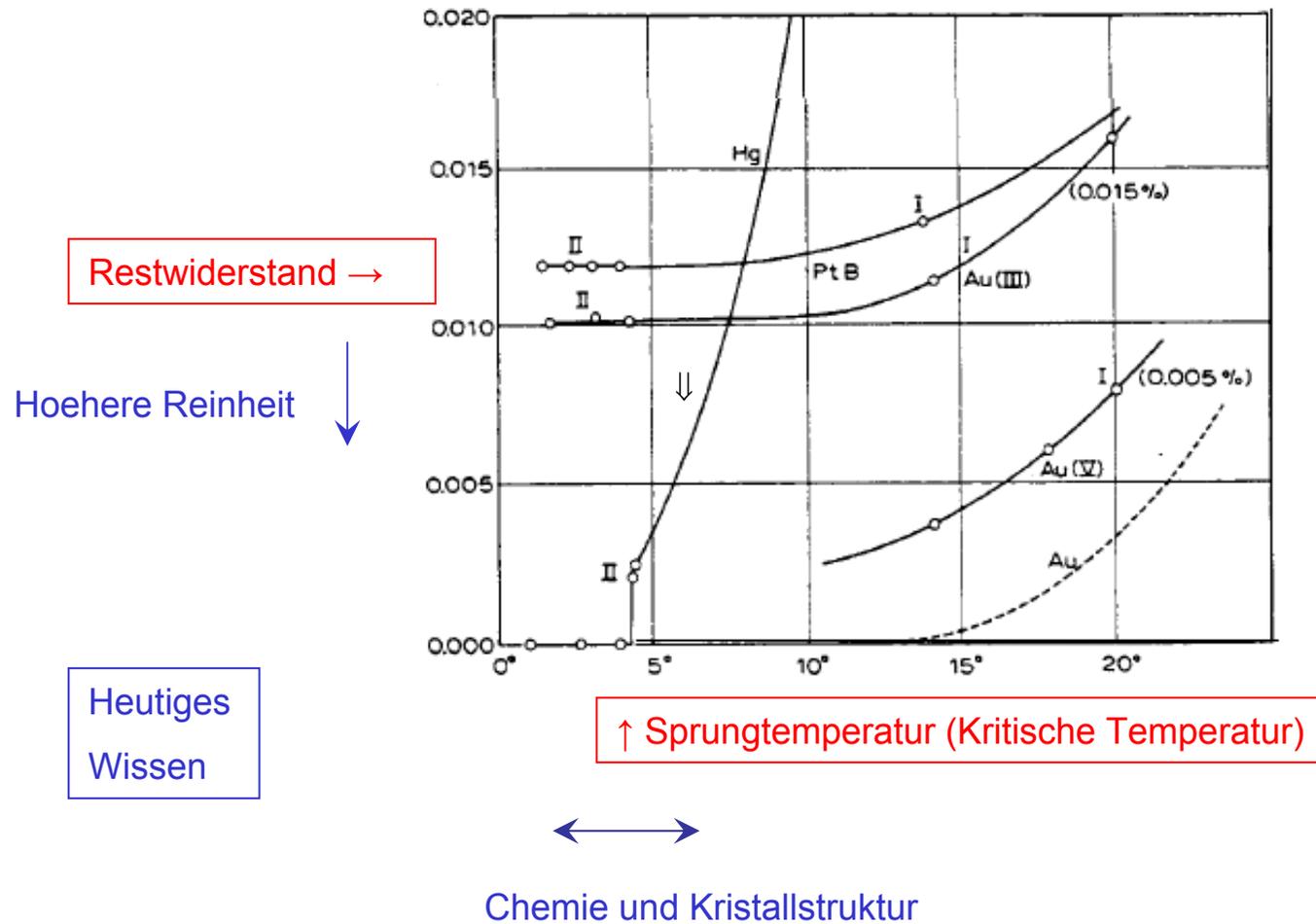
$T_c \equiv$ "kritische Temperatur"
 oder
 "Sprungtemperatur"

Abb. 6.2: Supraleitung von Quecksilber
 [nach H.K. Onnes, Comm. Leiden 120b
 (1911), aus W. Buckel, *Supraleitung*, VCH
 Weinheim, 5. Aufl. (1994); Abb.3].

".. Mercury has passed into a new state, which on account of its extraordinary electrical properties may be called the superconductive state"¹.

Widerstands-Messungen K. Onnes 1911 nach der He-Verflüssigung 1908

Messkurven aus dem Nobelpreis Vortrag 1913:



Physik-Nobelpreis 1913
**„...fuer Untersuchungen zu Materialeigenschaften
bei Tiefen Temperaturen, die unter anderem zur
Verfluessigung von Helium fuehrten“**

Erste Enttaeusung: Niedriges Kritisches Feld

Kamerlingh Onnes, Nobelpreis Vortrag 1913:

after this lecture was given and produced surprising results. In fields below a threshold value (for lead at the boiling point of helium 600 Gauss), which was not reached during the experiment with the small coil mentioned in the text, there is no magnetic resistance at all. In fields above this threshold value a relatively large resistance arises at once, and grows considerably with the field. Thus in an unexpected way a difficulty in the production of intensive magnetic fields with coils without iron faced us. The discovery of the strange property which causes this made up for the difficulties involved.

Erste Kernfrage: Wie wird ein Supraleiter mit einem Magnetfeld fertig ?

Zweite Enttäuschung: Niederer Kritischer Strom

Kamerlingh Onnes, Nobelpreis Vortrag 1913:

All that I have said so far about superconductors applies only to currents below a certain threshold value, which lies all the higher the lower one drops in temperature. Up to this threshold value of current intensities no potential differences are found at the ends of the resistance within the degree of accuracy reached so far. The wire has at the most only a residual micro-resistance. As soon, however, as the threshold value is exceeded, a potential difference is necessary to maintain the current. Then, in a way as yet unexplained, normal resistance occurs in the wire, and at the great rate at which the potential difference is increased at the ends, there can be a considerable rise in temperature. Thus a bright lead wire which had been dipped in liquid

Daueraufgabe bei der Leiterentwicklung: I_c -Erhöhung:

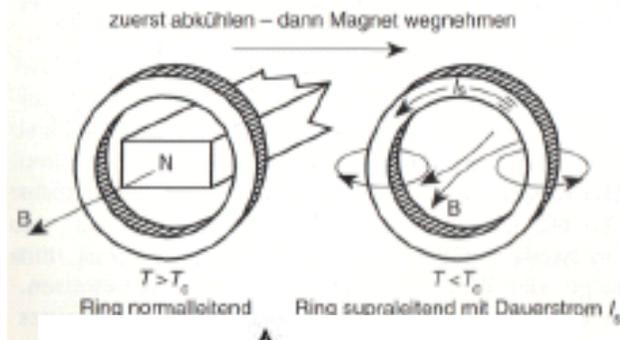
The great question still not solved is whether this first impulse proceeds from bad sections of the wire or is also produced in pure, tension-free, evenly crystallized metal. If the potential phenomena are to be attributed to bad spots, we shall learn to eliminate them and then it is perhaps possible that the

Zweite Kernfrage: Welche Mikrostruktur-Eigenschaften

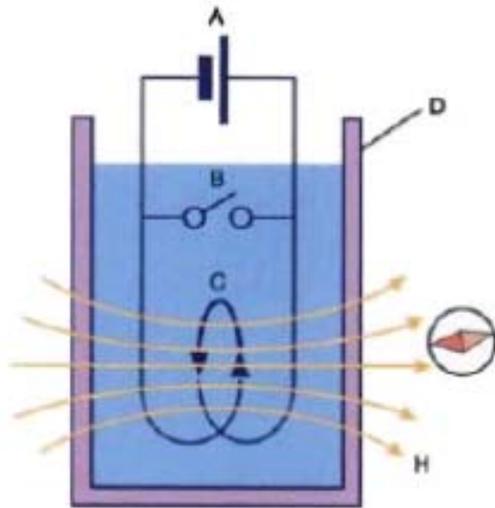
- ermöglichen hohe Stromtragfähigkeit (durch Pinning), welche
- wirken begrenzend auf die Stromtragfähigkeit (Risse, Weak Links)

Versuche zu supraleitenden SL Dauermagneten (K. Onnes 1914)

- **Empfindlichere Messung fuer $R \rightarrow 0$** K. Onnes, Comm. Leiden 141b, 1914
- **Anwendung in Persistent Mode Magneten (NMR, MRI,**)



Induktive Einkopplung durch Entfernen eines Magneten im supraleitenden Zustand des Rings aus Blei (Pb)



Spaetere Messungen von HKO und Vorgehen bei heutigen Persistent Mode Magneten (NMR, MRI, ...):
Netzgeraet zum Laden bei offenem (geheizten) Schalter
Ausschalten der Heizung

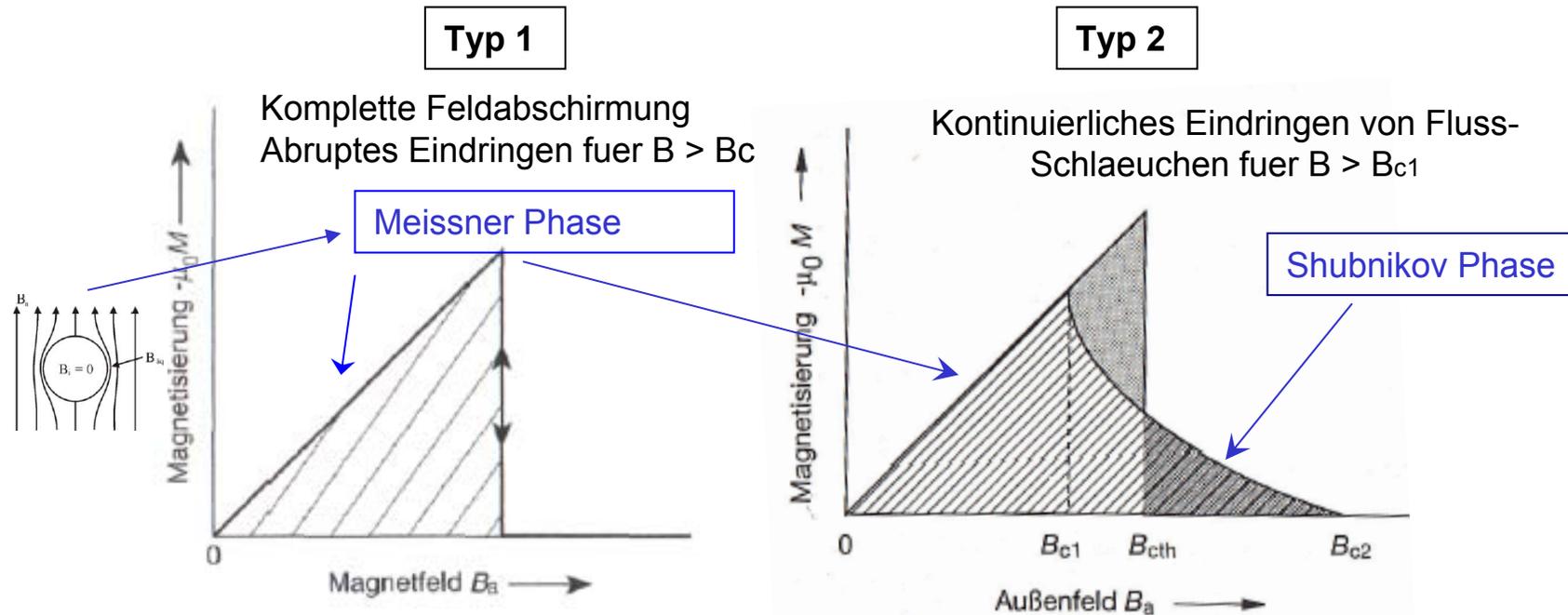
Messung des Magnetfelds:
Onnes: Magnetnadel
Heute: z.B. NMR-Sonde

$$\rho_{SL} < 10^{-17} \cdot \rho_{Cu} (300K)$$

Supraleiter im Magnetfeld: Typ 1 und Typ 2 Supraleiter

K. Onnes hatte nur (damals) rein herstellbare metallische Elemente untersucht

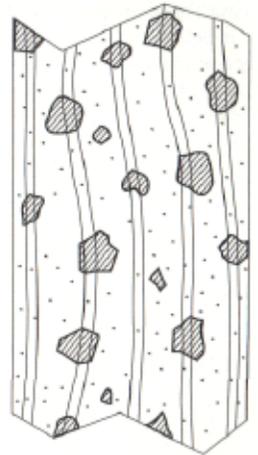
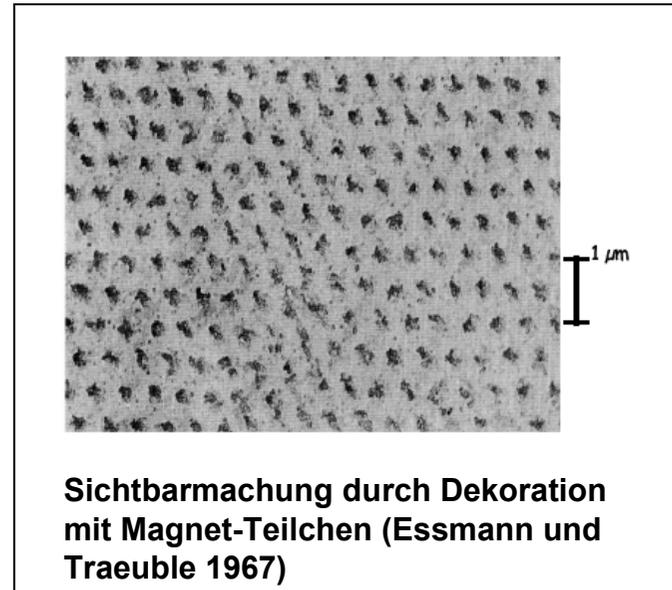
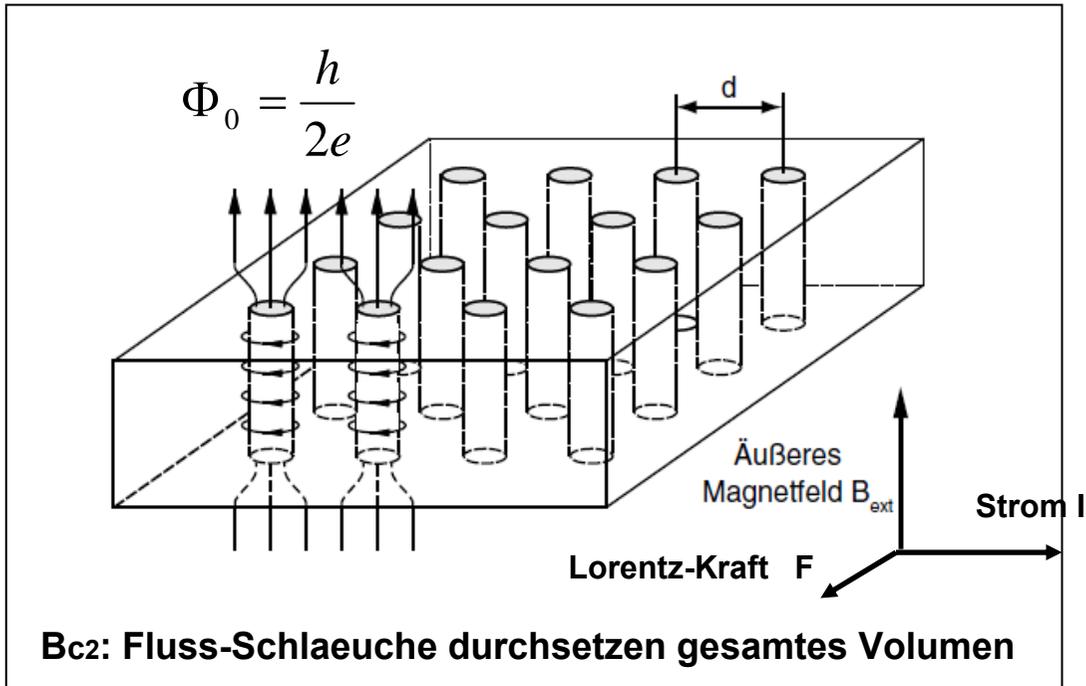
Alle waren unglücklicherweise Typ 1 Supraleiter mit niedrigem kritischem Feld



	T_c	B_c (4,2K)	B_c (0K)
Pb	7,2K	0,05T	0,08T
Hg	4,15K	0	0,04T
Sn	3,7K	-----	0,03T
+ alle (reinen) SL Metalle !			Ausser:

	T_c	B_{c1} (4,2K)	B_{c2} (4,2K)
Nb (1929)	9,25K	0,15T	0,27T
T_c	7,75K	0,12T	0,16T
V	5,3K	n.v	n.v.
→ Legierungen und Verbindungen !			

Fluss-Schlaeuche und Fluss-Verankerung (Pinning)



Verankerung der Fluss-Schlaeuche an Fehlstellen (Pinningzentren):

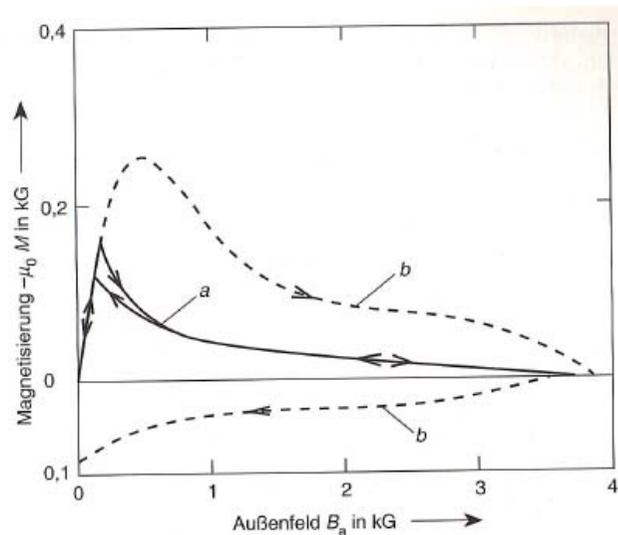
Die Pinning-Kraft $F_p = j_c \times B$ ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen den Fehlstellen und dem Fluss Schlauch-Gitter unter Beruecksichtigung von dessen Steifigkeit

Bei den stark anisotropen HTS mit NL Ebenen zwischen den SL Ebenen zerfallen die Fluss-Schlaeuche in „Pancakes“ auf das Flussgitter ist deshalb weniger steif. Gutes Pinning ist schwer zu erreichen. Hinzu kommt die thermische Aktivierung

Harte Supraleiter (ab ca. 1955+)

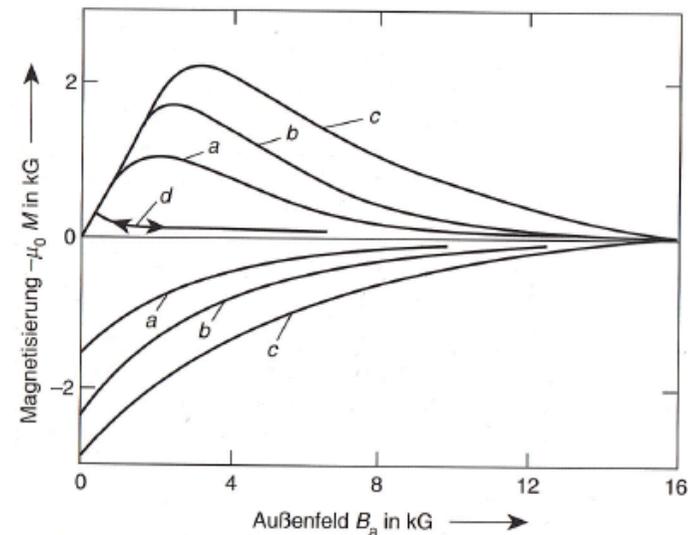
Typ 2 Supraleiter mit Haftzentren (Pinning Zentren) fuer die Fluss-Schlaeuche

- Legierungen aus einem **SL Wirtsmetall** mit einem weiteren Metall (SL, NL) sind (meist) SL 2.Art
- Der Einbau von Gitterfehlern kann zu hohen Transportstroemen fuehren



Nb55Ta45 – Legierung

- (a) waermebehandelt
- (b) kaltverformt



10 kG = 1 T

PbBi – Legierung

- (d) reine ϵ -Phase
- (a,b,c) unterschiedliche Ausscheidungszustaende

Breite der Hystereseschleife ΔM ist proportional zum kritischen Strom beim jeweiligen Magnetfeld B

Die Rolle von Niob (Nb)

Von allen chemischen Elementen hat Niob (Nb) die besten supraleitenden Eigenschaften
Bei Betrieb unter $B_{c1} = 0,15T$ können verlustarme DC und AC Supraleitungsströme fließen

- Erste supraleitende Magnete mit/ohne Fe-Kern bis ~ 1T (50er Jahre),
- Energietechnik: Erste Hochleistungskabel (70/80er Jahre))

Noch heute wird **Nb in reiner elementarer Form** eingesetzt (Meissner-Phase):

- Hochfrequenzanwendungen (z.B. **Kavitaeten von Teilchenbeschleunigern**)
- Sensorik (z.B. SQUIDS)
- Digitale Elektronik

In der Magnettechnik wurden und sind **Nb-Legierungen und -Verbindungen**
bisher als einzige erfolgreich (**NbTi und Nb₃Sn**)

Hochfeldsupraleiter

Entdeckung der Hochfeldsupraleiter und Einstieg der Industrie Anfang ab 1961

- **Nb₃Sn**: 1961 Kunzler (AT&T Bell Labs) Leiter nach der Pulver-im-Rohr Technik (Nb+Sn Pulver) zeigt hohe Stromtragfaehigkeit bis 8,8T (Grenze des verfuegbaren Cu - Magneten)

- **NbZr**: James (Jimmy) Wong → 4T Magnet durch Oxford Instruments 1962, **dann NbTi** (dann wegen besserer Umformbarkeit) in mehreren Firmen weltweit (1962: Erster kommerzieller Draht von Westinghouse)

	Entdeckt	T _c	B _{c2} (4,2K)	Typ	Pinningzentren	Drahtfertigung
NbTi	Fruehe 1960er	9,5K	~10T	Duktile Legierung (Kfz)	Normalleitende α-Ti Ausscheidungen	Drahtziehen von NbTi in Cu-Matrix
Nb ₃ Sn	1954	18K	~25T	Sproede Intermetallische Phase (A15)	Korngrenzen	Drahtziehen von Nb in Matrix aus Prekursoren (CuSn oder Cu+Sn) Nb ₃ Sn-Bildung durch Schluss- Waermebehandlung

In der Folge wurden zahlreiche weitere Hochfeldsupraleiter mit zum Teil besseren SL Eigenschaften entdeckt (z.B. Nb₃Ge: T_c~23K, MgB₂:T_c~39K, PbMo₆S₈: B_{c2}~50T)

In keinem Fall ausser NbTi und Nb₃Sn wurde bisher jedoch eine geeignete, kostenguenstige Leiterfertigung erreicht

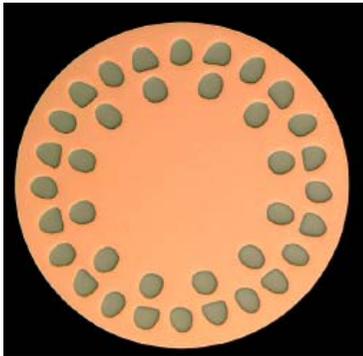
Technische Supraleiter fuer den Magnetbau

Supraleiter- Material in als Filamente in normalleitender Matrix eingebettet oder auf Substrat aufgebracht:

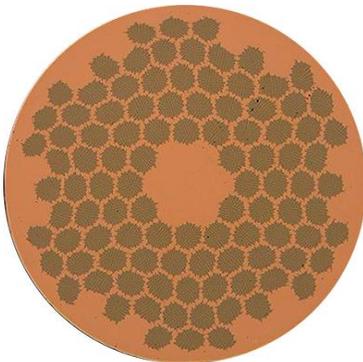
Thermomagnetische Stabilisierung, Quench-Schutz, mechanische Verstaerkung

- Hohe Stromtragfaehigkeit (hohe Stromdichte und ausreichende Flaechen)
- Kostenguenstige Fertigung in grossen Laengen

NbTi



NbTi/Cu Leiter mit
36 Filamenten (0.5-
2mm \varnothing)
z.B. fuer MRI und
NMR

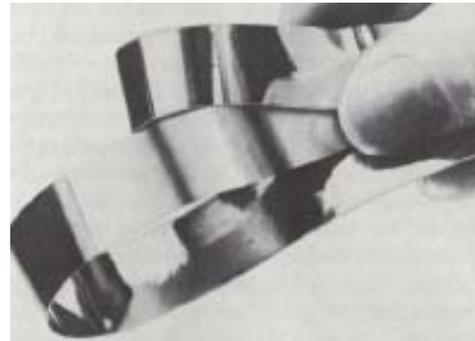


NbTi/Cu Leiter mit
8670 Fil. à 7 μ m
(~1mm \varnothing)
fuer LHC

Photos: Bruker EAS

H.Krauth, 11.05.2011

Nb₃Sn

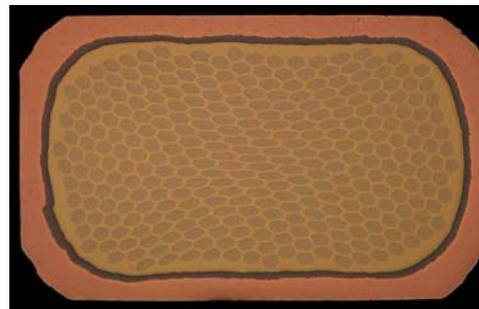


Bandleiter bestehend aus
Cu / Nb₃Sn auf Edelstahl-
Substrat:

Mit Hilfe von
CVD (RCA)
Diffusion (GE)

Photo: GE

Statt dessen



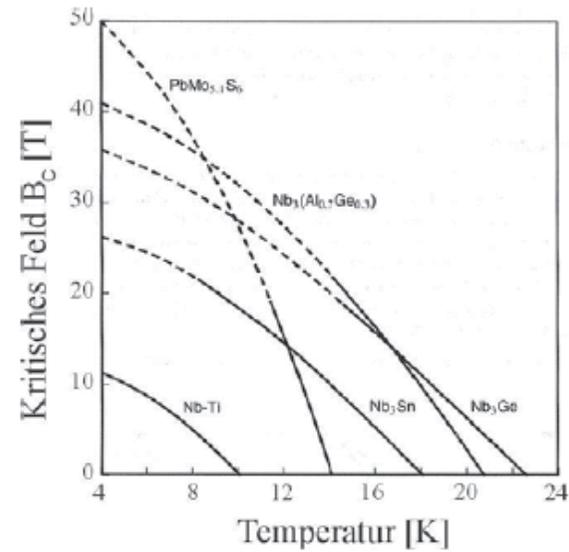
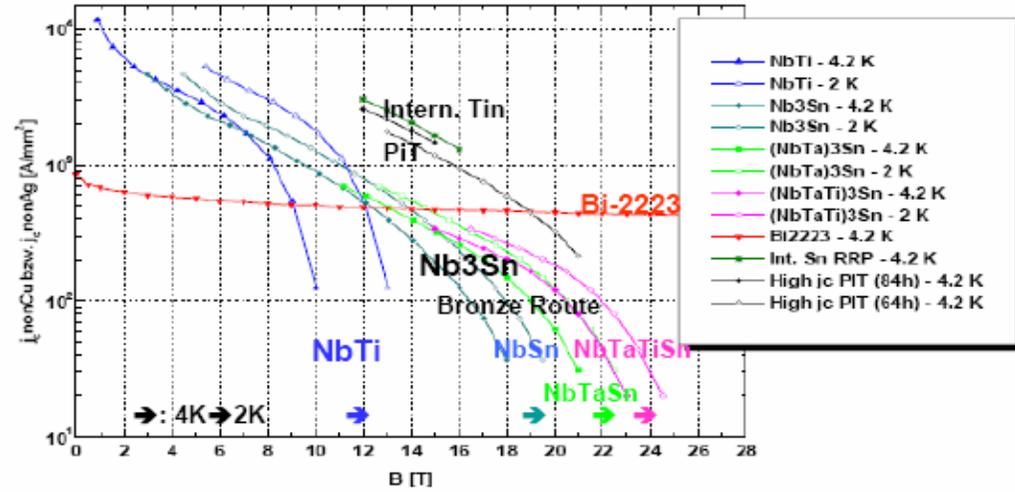
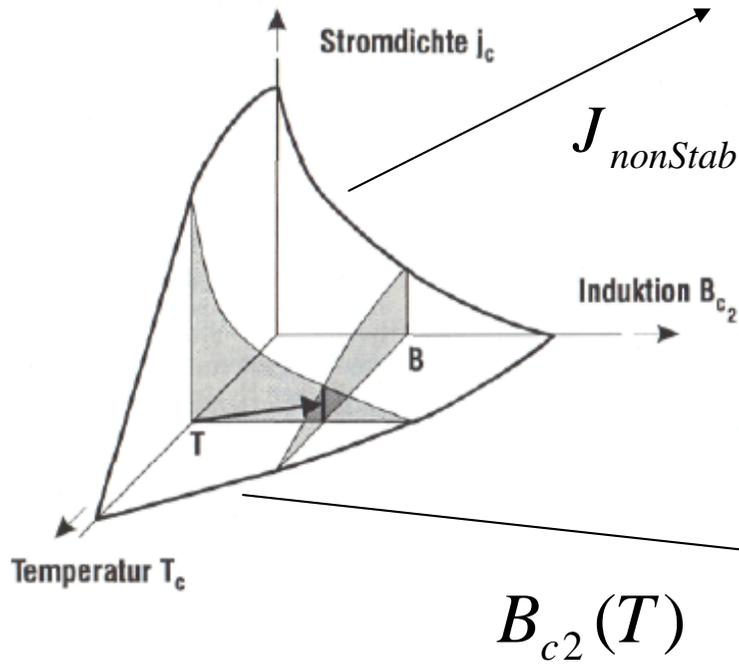
Nb₃Sn Leiter nach der
Bronzetechnik (Cu / Ta-
Barriere / 60.000Nb-
Filamente in Bronze-Matrix)
~2mmx3mm

fuer NMR

„Wind-and-React“

6. Supraleiterseminar Braunschweig

Kritische Oberflaeche von Hochfeldsupraleitern



Supraleitende Dauerstroeme und Cu – Matrix : Konsequenzen

1. Unvermeidbare **Magnetisierung der Filamente**

- Gefahr von **magnetischen Instabilitaeten**

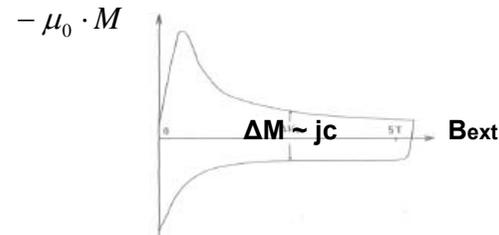
- Erzeugung von **Feldfehlern** (z.B. in Dipolmagneten)

- **Hysteresse-Verluste** aufgrund der staendigen Ummagnetisierung der Filamente

$$\propto d_{fil} \cdot f \Rightarrow$$

- Sub- μm Filamente bei LTS (4,2K) bei 50/60Hz notwendig

- Bei Bandleitern: Magnetfeld muss i. w. parallel zum Band sein



2. **Kopplungs-Verluste**: Wirbelstromverluste im Kupfer, modifiziert durch die Anwesenheit des Supraleiters

$$\propto f^2$$

- Reduktion durch Twist der Draehte und kleine Durchmesser bzw.

- Transposition bei Kabeln, Roebel-Staeben („Schlingstroeme“)

Die AC Verluste bei 4K waren auch ein Grund fuer die Erfolglosigkeit der LTS in der Energietechnik (trotz Entwicklung von NbTi sub- μm Filamentleitern)

Auch bei HTS muessen die AC Verluste bei der Betriebsmittel-Auslegung beruecksichtigt werden

Hohe Leiterstroeme

- Typische Stroeme in NbTi und Nb₃Sn Draehten mit ~1-2mm \varnothing liegen bei einigen 100A, je nach externem Magnetfeld

- Fuer Stroeme im kA-Bereich werden **voll transponierte Kabel** verwendet:

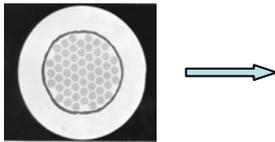


~ 1,1mm \varnothing , 8900 Filamente

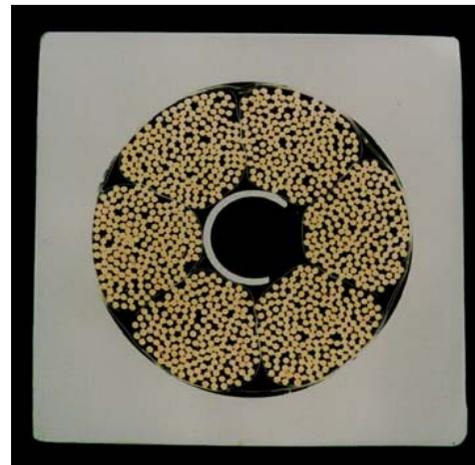
LHC:

Voll transponiertes Keilseil fuer die Dipolmagnete

> 15kA @ 4.2K, 8T



~ 0,8mm \varnothing , 4000 Fil.



← ~ 50mm →

ITER:

Voll transponiertes „Cable-in-Conduit“

(~ 900 Strands, 1/3 aus Cu)

> 50kA @ 4,2K, 12T

Anwendungen in der Magnettechnik

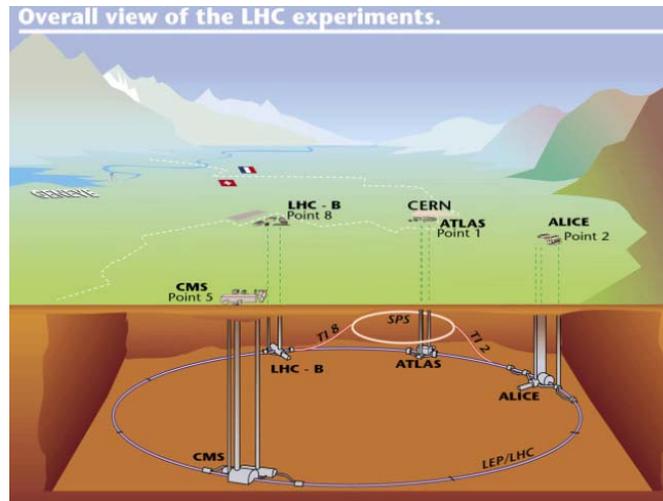
- Forschung und Entwicklung -

Technologietreiber

1968: 6-woechiger Workshop (!!) in Brookhaven Nat. Lab. !

Beschleuniger-Technologie

Beispiel: LHC



27km Umfang, 1750 Hauptmagnete,

1200to NbTi/Cu Strands

2x7 TeV @ 1,9K, 8,3T

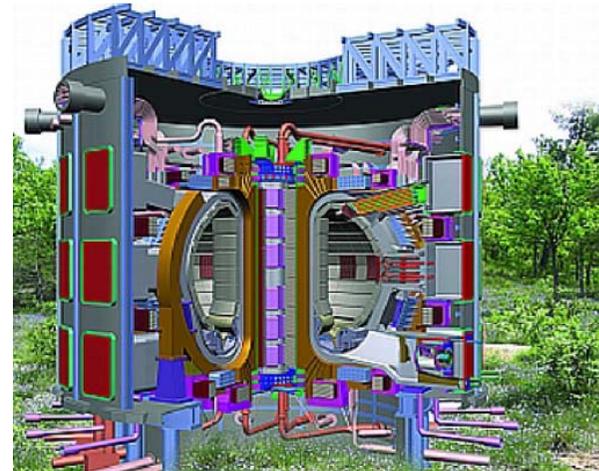
2 SL Detektor-Magnete

Zur Zeit in Betrieb bei 50% (Kabelverbindungen)

H.Krauth, 11.05.2011

Kernfusion

Beispiel: ITER



12 Toroidalfeldspulen, Zentrales Solenoid,
6 Poloidalfeldspulen

550to Nb₃Sn/Cu und 250to NbTi/Cu Strands

Felder bis 13T @ 4,2K

Zur Zeit im Bau

6. Supraleiterseminar Braunschweig

Anwendungen in der Magnettechnik - Kernspinresonanz -

Ausnutzung der mit dem Kernspin verbundenen Magnetischen Momente zur Bildgebung bzw. zur Spektroskopie, meist anhand des Wasserstoff-Kerns (Proton)

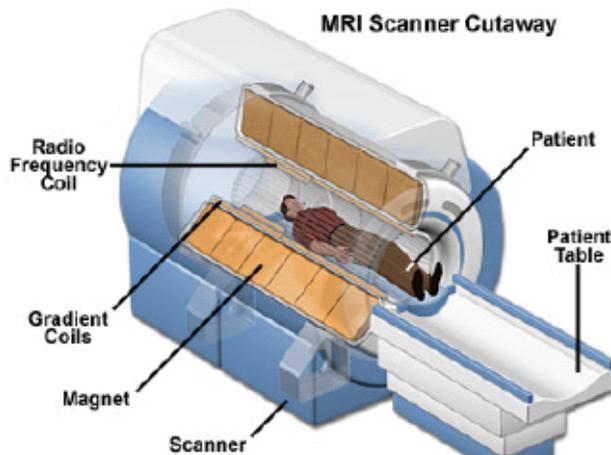
Die Auflösung steigt mit der Höhe des externen Magnetfelds

Hohe Feldgenauigkeit erforderlich: $\Delta B/B < 10^{-7} - 10^{-8}$ im Messvolumen und während der Messzeit

→ Höchste Anforderungen an geometrische Toleranzen und Persistent Mode Betrieb

Tomographie (MRI / MRT) als unerwarteter, sehr grosser Markt

Für die Anwendung in der Medizin wurde das „Nuclear“ vermieden



- 1977 erster Scan eines Menschen (Cu Magnet)
- Derzeit > 2500 SL Systeme pro Jahr
- Installierte Basis > 30000 Systeme
- ~ 100 Mio Untersuchungen pro Jahr

Klinisch (Patientenfeld) :
- „Offene“ Systeme bis 1T
- „Röhren“ 1,5 – 3T (Bild)

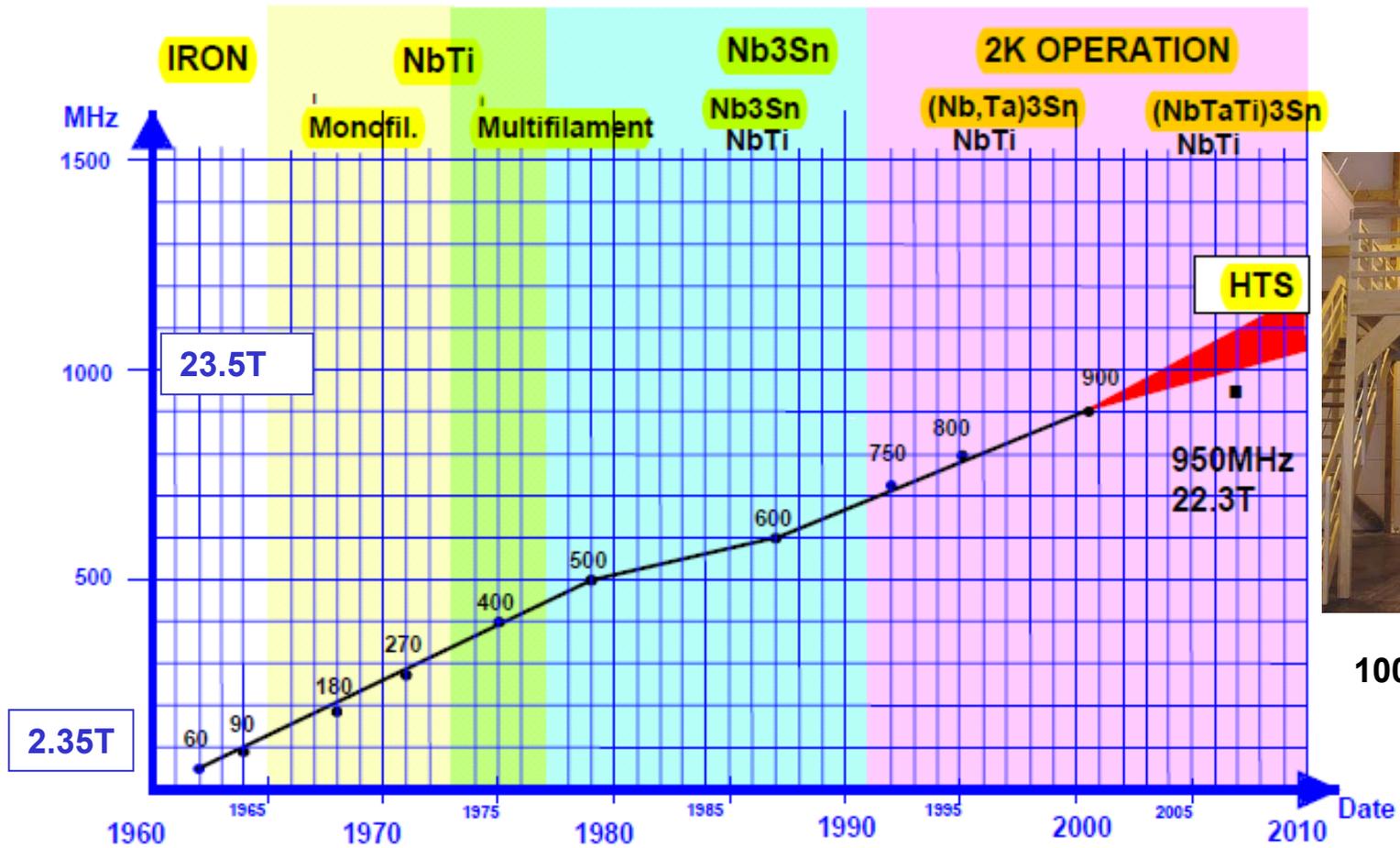
Forschung:
- 7T (+)

Spektroskopie (NMR)

Aufnahme von Spektren für die chemische Analytik (Forschung, Qualitätskontrollen)

Magnet- und Anwendungs-Performance vs. Material und Kuehltechnik

Fortschritts in der NMR Spektroskopie („Market Pull“)



1000MHz = 23,5T

Diagramm und Photo: Bruker Biospin

Weitere Erfolge und (zahlreiche) Enttaeuschungen

Anwendungen in der Magnettechnik - Industrielle Verfahrenstechnik -

Sehr erfolgreiche Anwendung:

- Magnete für die Herstellung von reinsten Si-Ein- / Polykristallen fuer Mikro-Elektronik und Photovoltaik

(insbes.Wafer ab 300mm Durchmesser, insbes. kuenftig 450mm)

Am Markt weniger erfolgreich:

- Magnetische Separation (Konventionelle Loesungen bevorzugt)
- MagLev (Weiternin in Japan in Entwicklung) etc.

Anwendungen in der Energietechnik

Nicht bis zur praktischen Anwendung (→ gestoppt, u.a. auch wegen HTS Entdeckung):

- SMES
- Leistungskabel
- Strombegrenzer
- Rotierende Maschinen

Hat sich die Situation durch die HTS
wesentlich veraendert ??

Entwicklung der höchsten bekannten Sprungtemperaturen von 1911 bis heute

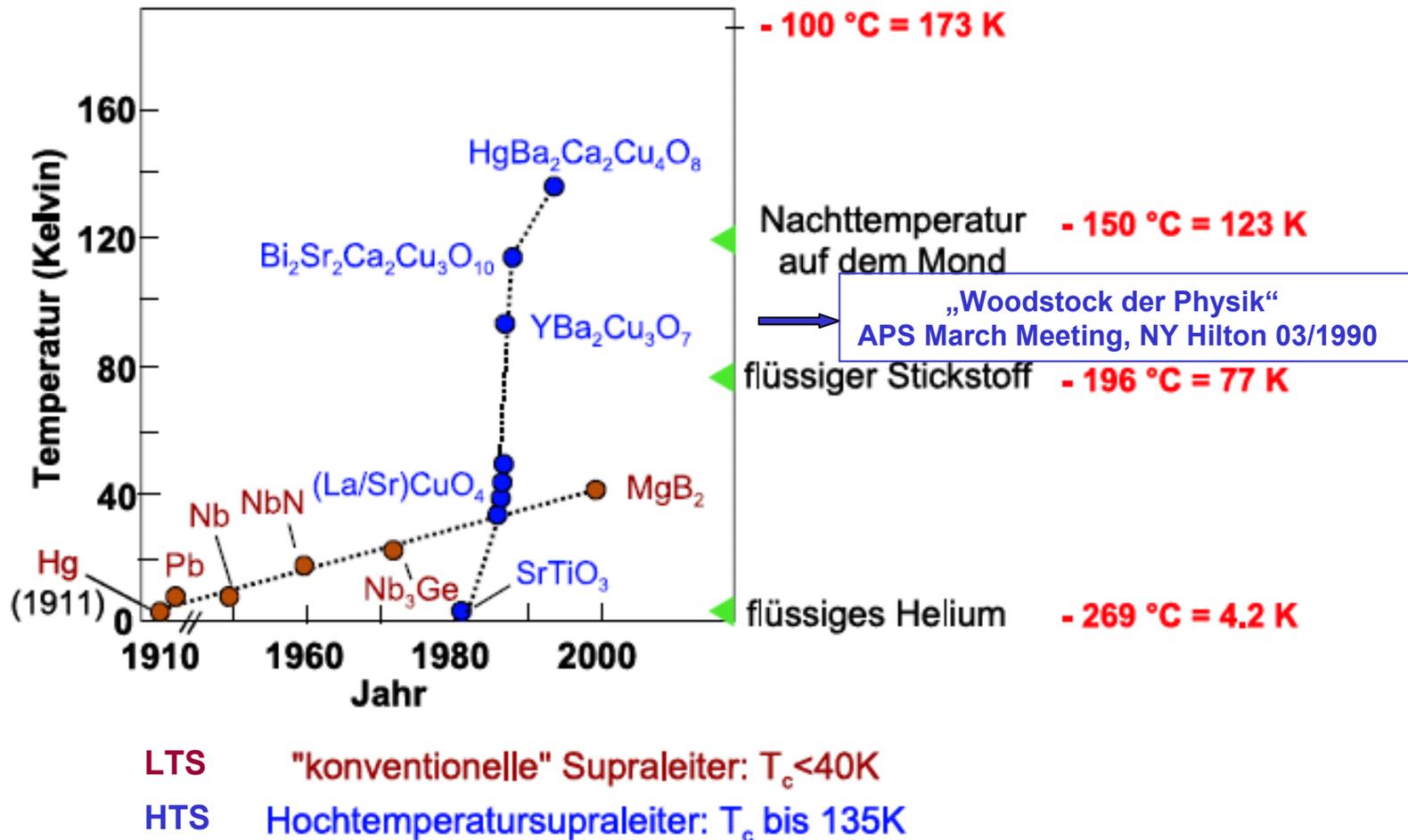


Abb. 6.6: Zeitliche Entwicklung der Entdeckung von Materialien mit Sprungtemperatur T_c [adaptiert aus *Spektrum der Wissenschaften*, Mai 1997].

Neuartige Eigenschaften der HTS

1986: Ende der Fahnenstange ?

75 Jahre Supraleitung bei Appl. Supercond. Conf. Baltimore: noch ohne Erwähnung der HTS

1987: Ausrufung der HTS Revolution

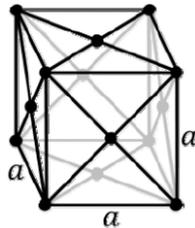
Zu Recht ?

Wesentliche neue Eigenschaften der „Hoch-Tc-Supraleiter“

Eigenschaft	Erleichterung	Verschlechterung
Hohes T_c	Erlaubt höheres T_{op} , Einfachere und kostengünstigere Kühlung	Thermische Aktivierung der Fluss-Schlaeuche Niedriges B_{irr}
Hohes B_{c2} (wegen sehr kleiner Kohärenzlänge)	Höchste Magnetfelder bei tiefer Temperatur	Weak Links an Korngrenzen
Anisotropie		SL Strom nur in CuO-Ebenen Schlaeuche zerfallen in Pancakes
Keramik		Komplexe Herstellung Sproedigkeit

Erfahrung: Hoehere Tc Werte sind meist mit hoeherer Komplexitaet verbunden

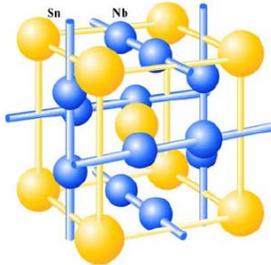
NbTi
(krz)



Tc ~ 9,5K

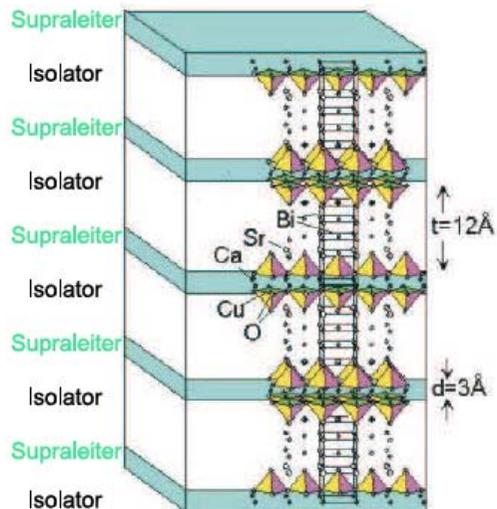
Duktil umformbar in Cu-Matrix
„Isotrop“

Nb3Sn
(A15)



Tc ~ 18K

Ueber duktile Prekursoren herstellbar durch Umformung (CuSn-Bronze, Cu + Sn), dann Waermebehandlung zur Nb3Sn Bildung
„Isotrop“

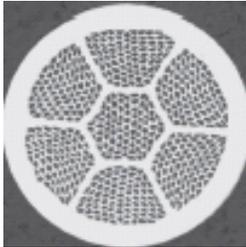


Bi2Sr2CaCu2O8
Perowskit

Tc ~ 85K

Keramik, ueber Pulvertechniken oder Duennfilmtechniken herstellgar
Extrem anisotrop: SL Strom nur innerhalb der CuO-Ebenen, Material muss texturiert werden !
Im Magnetfeld: $B_{c2par} \gg B_{c2perp}$
Pinning fuer B_{par} hoeher (intrinsisch) als in B_{perp} (→ Einbringen von kolumnaren Defekten in Feldrichtung notwendig)

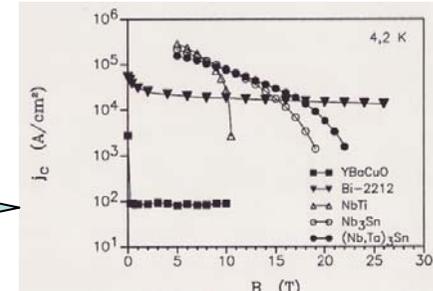
HTS Leitergeometrien



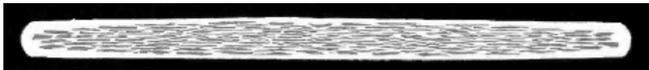
Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_x (Bi-2212) Powder-in-Tube PiT Rundleiter mit Ag Matrix (Selbst-Textur nach partiellem Aufschmelzen)

← Photo: OST

Weltweit erste Messung hoher Stromdichten bei 4K (Bruker EAS, 1989)



Derzeit weiterverfolgt in USA fuer Hochfeldmagnete (Teilchenbeschleuniger)

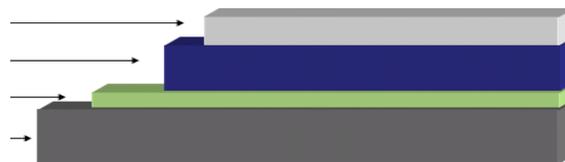


Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y (Bi-2223, „1G“) PiT Bandleiter (~ 0.22x4 mm²)

Photo: Bruker EAS

Texturierung durch alternierendes Flachwalzen und Waermebehandeln (100-200A @ 77K,0T)
Weiterverfolgt hauptsaechlich in Japan (Sumitomo) und China

Schutzschicht (Ag,Au)
~ 1μ Y-123
~ 1μ Keramik-Puffer
~ 50-100μ Metall-Substrat



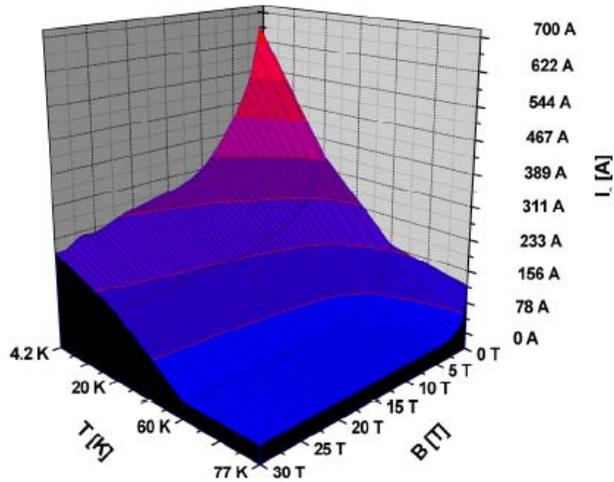
Y₁Ba₂Cu₃O_z (Y-123, „2G“) Bandleiter

2 Basis-Linien:

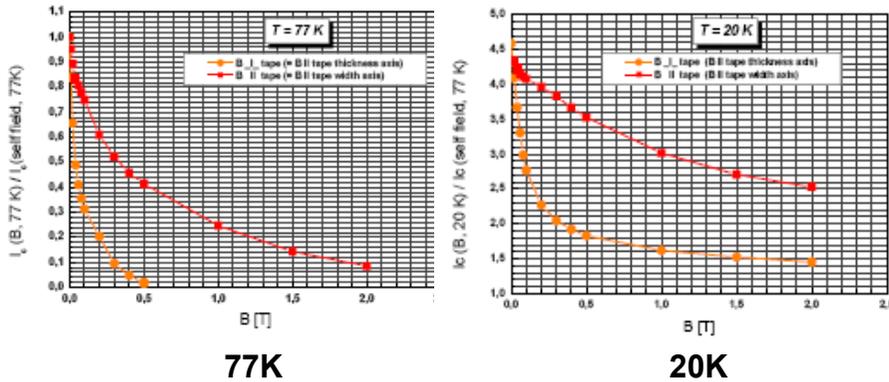
- Texturiertes Metallband
- Texturierung des Puffers

Zahlreiche Unter-Varianten

Kritische Stroeme und Leiterkosten von HTS



Kritische Oberflaeche von **Bi-2223 Bandleitern**
 fuer die „gute“ Feldrichtung B || CuO-Ebenen
Anisotropie im Magnetfeld:



Y-123 noch komplexere Winkelabhaengigkeit

H.Krauth, 11.05.2011

Generelles zu Leiterkosten

**Kosten aus Herstellersicht:
 Kosten pro Masse oder Volumen**

Kosten aus Nutzersicht:

**Kosten pro Stromtraefaeheigkeit und
 Laenge**

$$\frac{\text{Kosten}}{I_c(B,T) \cdot \text{Laenge}} = \frac{\text{Kosten}}{\langle j_c(B,T) \rangle \cdot \text{Volumen}}$$

in €/kAm

Groessenordnungen:

NbTi	~ 1 €/kAm	@ 4,2K, 5T
Nb ₃ Sn	~ 10 €/kAm	@ 4,2K, 10T
HTS	~ 100 €/kAm	@ 77K, 0T

Kupfer	~ 10 – 50 €/kAm @ 300K
--------	------------------------

(je nach zulaessiger Stromdichte und
 aktuellem Cu-Preis)

Supraleiter-Anwendungen in der Energietechnik – Auf ein Neues

In den 1970er und 1980er Jahren wurden weltweit Untersuchungen zu Anwendungen der LTS in der Energietechnik durchgeführt

Meist blieb es bei Labor-Experimenten und - Demonstratoren. In Einzelfaellen erfolgte auch ein Test im Netz

Wie heute wurden verschiedene Betriebsmittel untersucht z.B.

- Strombegrenzer mit NbTi:

 Transduktor-Prinzip mit Standard NbTi Leitern (NEI / UK)

 Resistiver Begrenzer mit sub- μm NbTi Filamenten (Alstom+EdF / F, Toshiba+TEPCO / J)

- Turbogeneratoren mit Duennfilament NbTi Leitern in Mischmatrix (KWU / D, SuperGM / J)

- Energiekabel meist mit Nb (z.B. in D Siemens: AC, AEG: DC)

Die Versuche scheiterten wegen der komplexen Kuehltechnik und der hohen Kosten von Kuehlung und z.T. komplizierten Leitern. Alle wurden nach der Entdeckung der HTS frueher oder spaeter abgebrochen

Ist das jetzt mit den HTS anders ?

Geblichen sind hohe Leiter- und (reduzierte) Kuehlkosten, sowie die generellen Einfuehrungshuerden.

Der sehr fruehe Wechsel von „1G“ nach „2G“ war hierbei nicht unbedingt hilfreich

Strombegrenzer mit Supraleitern (FCL)

Supraleiter koennen in Strombegrenzern als Schaltelemente oder/und als Begrenzelemente eingesetzt werden. Entsprechend gibt es zahlreiche Varianten, die untersucht werden

Supraleiter nur (induktives) Begrenzelement
Alle Arten von (Supra)Leitern (DC, aber $B \gg 0$)

„Saturable Core“ (Transduktor-Prinzip)

Schalten durch Fe Uebergang aus Saettigung

z.B. Zenergy , Innopower/CN (Bi-2223)

- Sehr schnelles Schalten + Erholen
- Begrenztes Impedanzverhaeltnis
- **Grossvolumig schwer**

Elektronisches Schalten z.B. Dioden oder Thyristoren in **Graetz-Schaltung**

(z.B. Academia Sinica China)

- **Hohe Verluste im Normalbetrieb**
- **Teuer insbes. bei hoher Spannung**

Supraleiter als Schaltelement

Supraleiter sieht 50/60Hz

Angepasste Leiterarchitekturen erforderlich

„Resistiv“: SL im AC Stromfad

Begrenzung meist durch Stromtransfer in Shunt

z.B Siemens+AMSC, Superpower (2G tape), Nexans (Bi-2212 Massivmaterial)

- Intuitiv einfach
- **Netzspannung im Kryostaten**

„Shielded Core“: Induktive Ankopplung

(z.B. Bruker BEST)

- **Keine Hochspannung im Kryostaten**
- **Qualitaet der Kopplung durch den (Kunststoff)-Kryostaten hindurch noch zu demonstrieren**

Alle 4 Varianten sind bei Kunden in Netz- Erprobung: Eine Bewertung steht noch aus

Rotierende Maschinen

- Entwicklungen der 1970 / 1980er Jahre konzentriert auf Turbogeneratoren mit SL Erregung (Rotor)
- Wirtschaftlichkeitsgrenze je nach Studie > GVA
- Arbeiten deshalb eingestellt

- Die hoeheren moeglichen Betriebstemperaturen der HTS haben, zusammen mit den geaenderten „Randbedingungen“ zu einer voellig neuen Bewertung Rotierender SL Maschinen gefuehrt

- Abhaengig von der Anwendung sind folgende Aspekte wichtig:

- ◆ Hoehere **Betriebstemperatur (77K - 20K)**, hoeherer Wirkungsgrad
- ◆ **Hohe Energiedichte**, reduziertes Volumen, reduziertes Gewicht
- ◆ **SL Rotor-Erregung**, Luftspaltwicklung moeglich
- ◆ **Verbesserte Betriebseigenschaften**: Hohe Stabilitaet, Hohe Dynamik , wenig Oberwellen
- ◆ **Weiter Leistungsbereich**: von einigen 100kVA (z.B. Oswald) bis einige 100MVA (z.B. Siemens)

77K: Einfache Kuehlung

20K: Verbesserte SL Eigenschaften

- **Avisierte Anwendungen**:

- ◆ Industriemotoren, Schiffsantriebe
- ◆ Generatoren fuer Regenerative Energien (Offshore Wind, Laufwasser)
- ◆ Turbogeneratoren fuer Gross-Kraftwerke

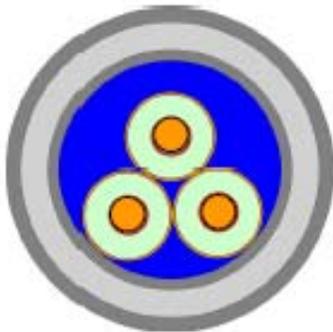
- **Wuensenswert: AC Supraleiter** fuer Wechselfeldwicklung

Energieuebertragungs - Kabel

- Bandleitergeometrie gut geeignet (Herstellungstechnik, relativ geringe AC Verluste da Magnetfeld parallel)
- Hohe Stroeme, erniedertes Spannungsniveau, kein Streufeld
- Alle 3 gezeigten Varianten im Netz erprobt zunaechst mit „1G“ und zunehmend mit „2G“

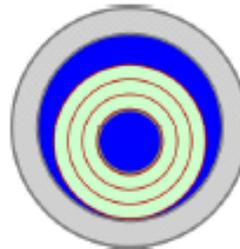
Mittelspannung (10kV – 40kV)

3 Leiter in einem
Kryostaten



z.B. Sumitomo, LS Cable

Konzentrische
Leiter



z.B. Ultera (NKT/Southwire), [Nexans]

„Hochspannung“ (> 60kV)

3 separate Leiter



z.B. Nexans, Furukawa, [LS Cable]

Darstellung: Nexans

- Noch kein rein kommerzielles Projekt
- Hohe Investitionskosten fuer Leiter und Kryostat
- Ausgepraegtes Henne / Ei – Problem bei Leiterherstellung

Ausblick

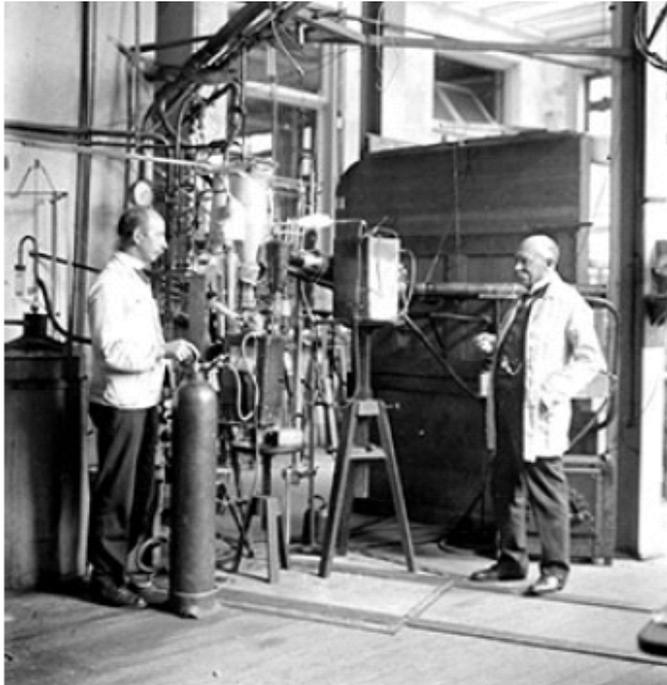
- Die **Metallischen Supraleiter (LTS)** haben eine ihre gesicherte Anwendung in der **Magnettechnik**, mit NbTi als Arbeitspferd
- HTS sind mittelfristig interessant fuer sehr hohe Magnetfelder $>>20T$ und langfristig auch fuer mittlere Magnetfelder (insbesondere im Falle schwindender He-Ressourcen)

- Die **HTS** haben ihren Anspruch auf Anwendungen in der **Energietechnik erfolgreich angemeldet**
- Erste **industrielle Anwendungen** sind bei **Strombegrenzern, Rotierenden Maschinen und laengerfristig bei Energie-Uebertragungskabeln** zu erwarten
- Allerdings muessen die **technische Ueberlegenheit, wirtschaftliche Wettbewerbsfaehigkeit, Zuverlaessigkeit, Lebensdauer**, etc. der HTS Betriebsmittel gegenueber den kritischen Anwendern noch nachgewiesen werden
- Darueberhinaus muss der Entwicklungsstand bei den HTS-Leitern weiter vorangetrieben werden:
 - ◆ **Grossmengenproduktion mit verbesserter Ausbringung und reduzierten Kosten**
 - ◆ **Weitere Verbesserung der Eigenschaften wie**
 - Erhoehung der kritischen Stromdichte im Magnetfeld bei hohen Temperaturen
 - Reduzierung der AC Verluste bei 50/60Hz
 - Stromtragfaehigkeit $>> kA$

- Die Entdeckung eines Supraleiters mit noch **hoeherer Sprungtemperatur** ist nicht auszuschliessen, Dieser waere aber vermutlich noch schwieriger in Foerm eines Technischen Supraleiters herstellbar

100 Jahre Supraleitung 1911 - 2011

Eine spannende Erfolgsgeschichte - Trotz zahlreicher Enttäuschungen und Lektionen



Kamerlingh Onnes mit seinem Ingenieur Gerrit-Jan Flim an der Flüssig- Helium Glasapparatur

Photo: Leiden Institute of Physics

H.Krauth, 11.05.2011



Fusionsexperiment W7X mit 70 supraleitenden NbTi Spulen im Aufbau in Greifswald mit noch nicht geschlossenem Edelstahl-Kryostaten

Photo: IPP, 03/2011

6. Supraleiterseminar Braunschweig