

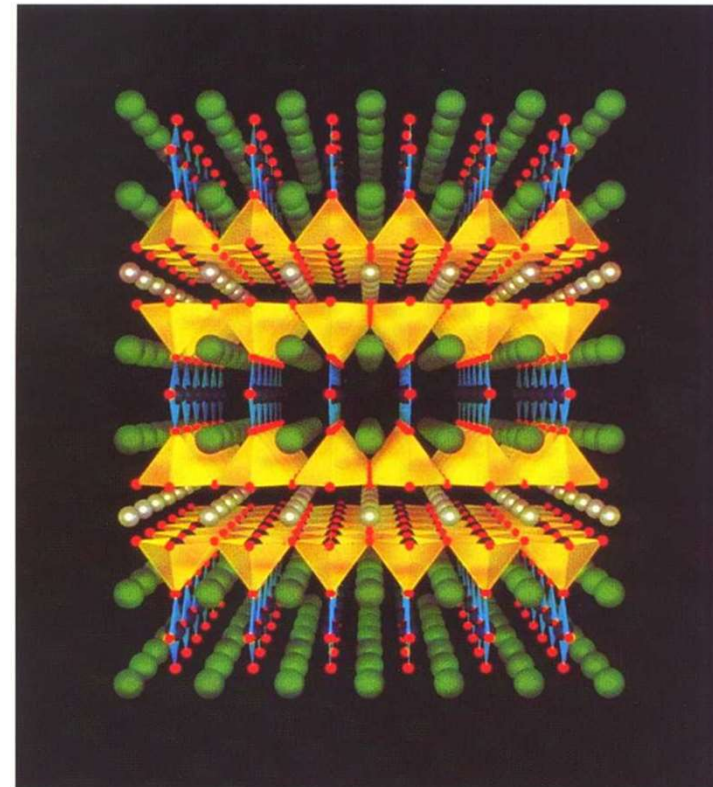
Hochtemperatur Supraleiter in der Energietechnik

Von erwarteter Revolution zu langsamer Evolution

(Willi Paul, Winterthur, 24.06.2024)

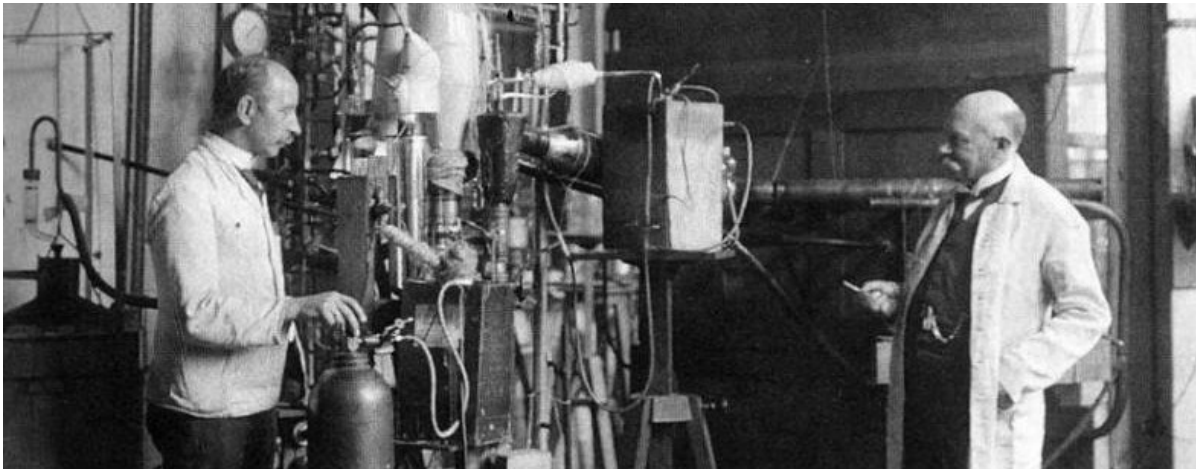
Übersicht

- Supraleitung
- Tieftemperatur Supraleiter
- Hochtemperatur Supraleiter (HTS)
- Herausforderungen der HTS
- HTS Anwendungen in Energietechnik
- Raumtemperatur Supraleiter
- Ausblick

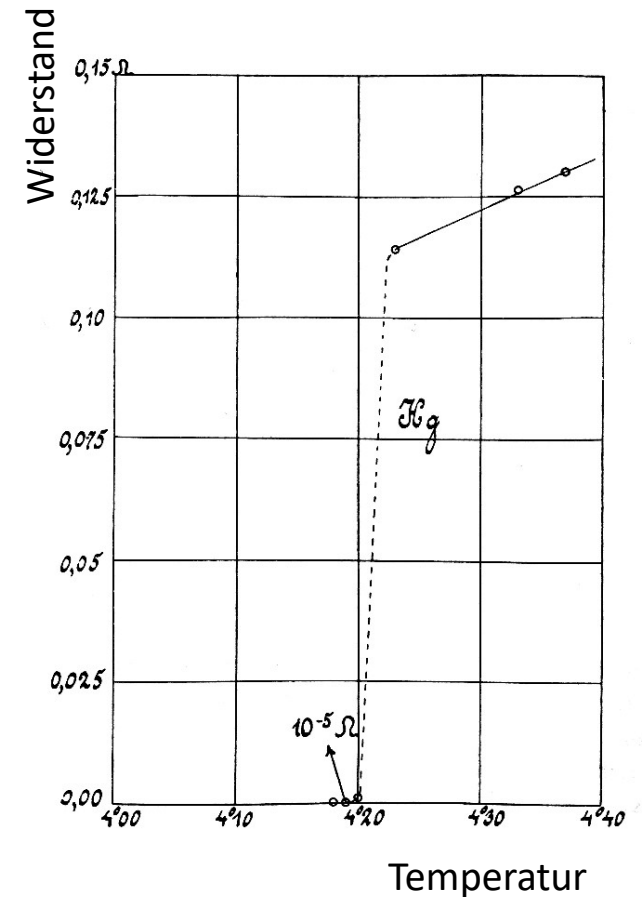


Entdeckung der Supraleitung

- **1911 entdeckt** an Quecksilber **durch Heike Kamerlingh Onnes** (hat 1908 als erster Helium verflüssigt, Nobelpreis 1913)

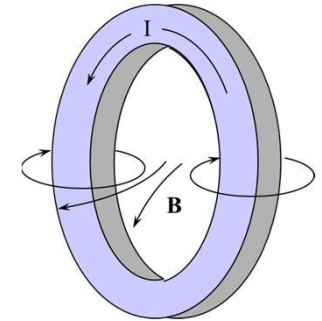
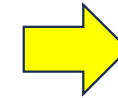
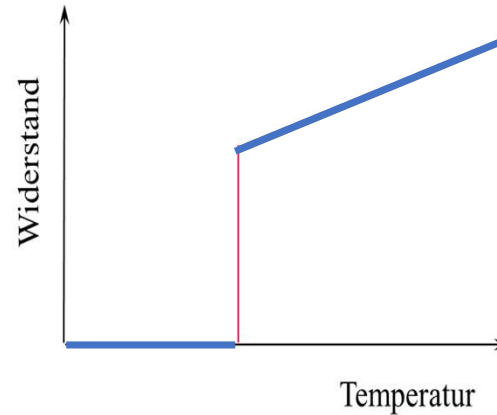


- In den folgenden Jahren wurden viele weitere Supraleiter gefunden (Pb, Nb, Sn,...)



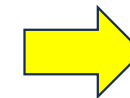
Physikalische Eigenschaften

- Elektrischer Widerstand $R = 0$



Ringstrom klingt nicht ab!

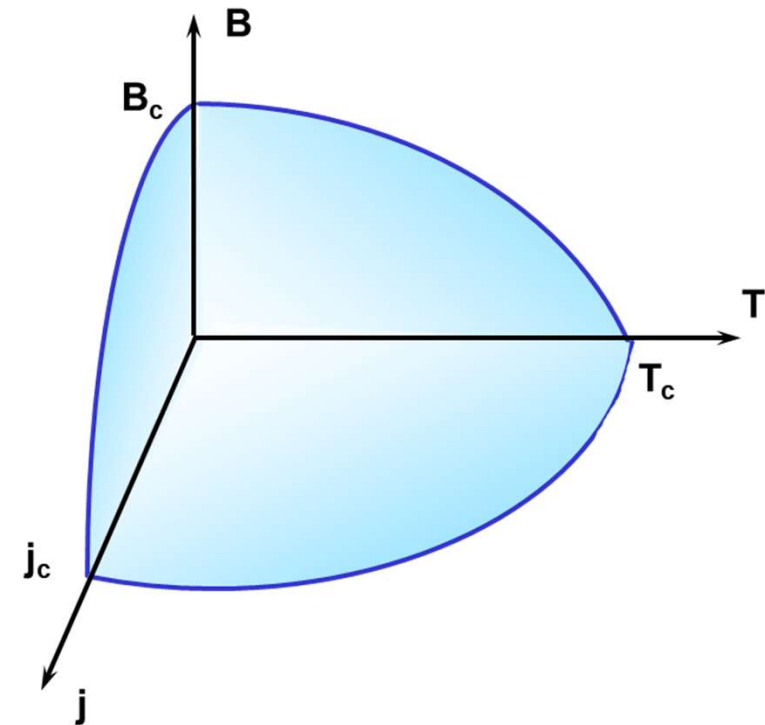
- Perfekter Diamagnet, d.h. Magnetfeld wird zu 100% verdrängt (viele Materialien sind schwach diamagnetisch aber nicht supraleitend !)



Magnet schwebt über Supraleiter

Physikalische Eigenschaften

- **Supraleitung ist thermodynamischer Zustand**
- Der supraleitende Zustand wird durch hohe Temperatur (T), ein starkes Magnetfeld (B) und hohe Stromdichte (j) zerstört.
- In einer vereinfachten Darstellung existiert der supraleitende Zustand nur unterhalb der Werte
 - kritischer Temperatur T_c
 - kritischer Stromdichte j_c
 - kritischem Magnetfeld B_c



Mögliche Anwendungen in „Energietechnik“

- **$R = 0$ => weniger: Leiter-Verluste, -Material, -Gewicht, -Volumen**

=> Kabel zur Stromübertragung

=> Magnetspulen für

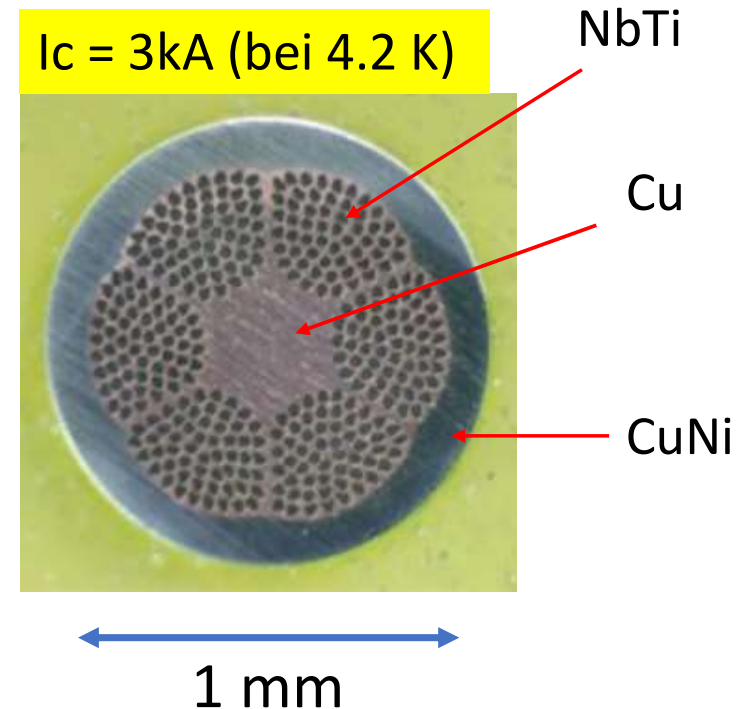
- Transformatoren (werden eventuell überflüssig, da man nicht bei HV übertragen muss)
- Motoren, Generatoren
- SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)
- Magnetlager, Schwebbahnen, Schwungrad (Energiespeicher)
- MRI (Magnetic Resonance Imaging)
- Kernfusion

- **Übergang von $R = 0$ zu $R > 0$ => Strombegrenzer**

- Diamagnetismus (Bulkmaterial)
 - Schwungrad (Energiespeicher)
 - Schwebbahn

Tiefemperatur Supraleiter – Stand 1985

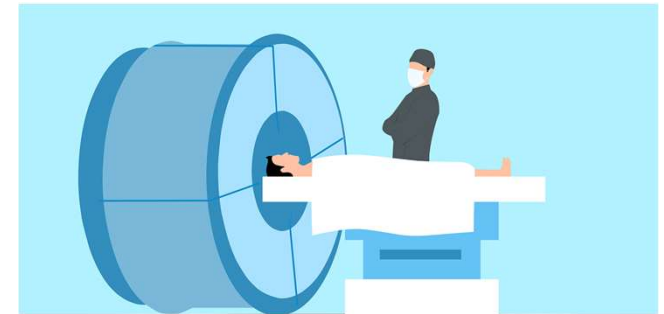
- Wichtigste Materialien für Anwendungen sind Niobium Legierungen
 - NbTi ($T_c = 9\text{K}$, $B_c = 15\text{T}$, $j_c > 5\text{kA/mm}^2$)
 - Nb₃Sn ($T_c = 18\text{K}$, $B_c = 25\text{T}$, $j_c > 10\text{kA/mm}^2$)
- **Technische Supraleiter sind Komposite**
 - zur thermischen Stabilisierung
 - zur Reduzierung von AC-Verlusten
- Ingenieure => Performance des Drahtes
Physiker => Komposit
Materialwissenschaftler => Herstellung
- **Gefordert war vor allem die Material-Forschung**
insbesondere Metallurgie (Kaltverformung, Drahtziehen)



Tieftemperatur Supraleiter – Stand 1985

➤ Der nötige Aufwand zur Kühlung der Materialien unter T_c erlaubt nur wenige Anwendungen:

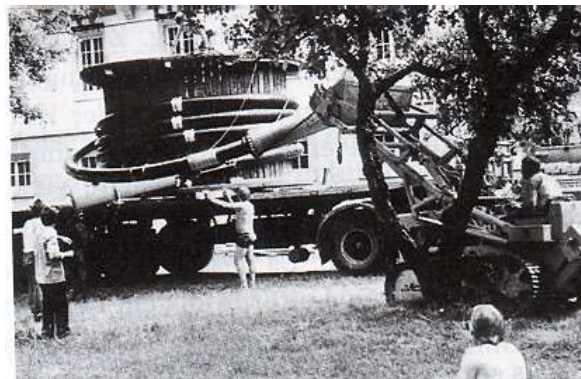
➤ **Magnete für Forschung**
(inclusive Beschleuniger)



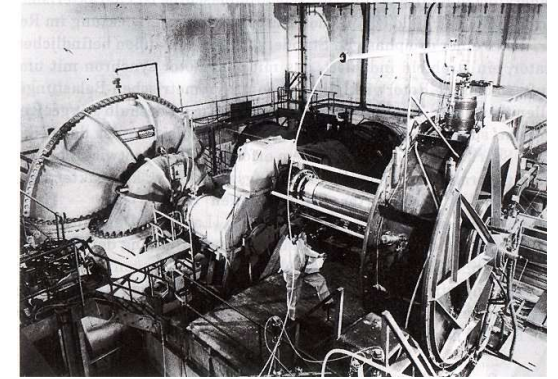
➤ **Magnete für MRI**
(Medizin, Forschung)

➤ Demonstratoren in Energietechnik:

- Generator, Motor
- Transformator
- Schwebebahn
- SMES
- Schwungrad
- Fusion (Magnete)
- Strombegrenzer



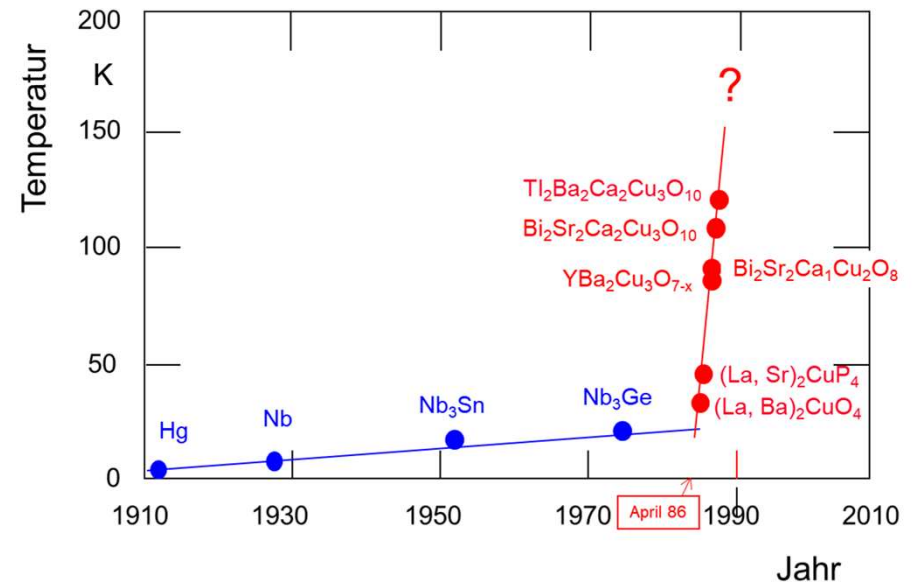
He-Kabel, Hannover, 1978



Unipolarmotor: 7.5 MVA, UK, 1971

Entdeckung der Hochtemperatur Supraleiter

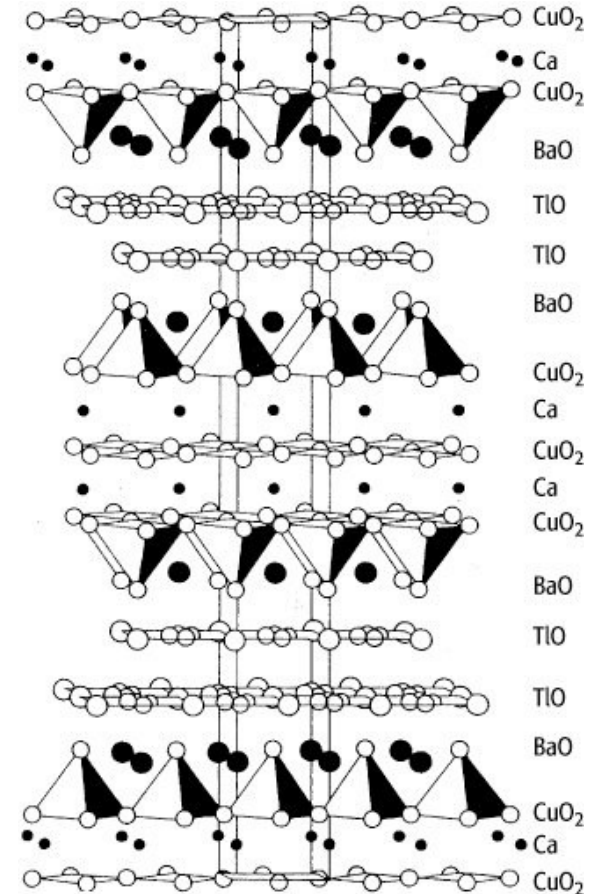
- **1986 entdecken Johannes Georg Bednorz und Karl Alexander Müller**, dass Lanthan-Barium-Kupferoxid bereits bei 35 K (-238 °C) supraleitend wird (Nobelpreis 1987)



- 1987/88 wurden Yttrium-Barium-Kupferoxid (**YBCO**) und 2 Bismut-Strontium-Calcium-Kupferoxide (**Bi-2212** und **Bi-2223**) mit Sprungtemperaturen oberhalb 90 K entdeckt. Diese können problemlos mit Flüssigstickstoff (77 K) unter ihre Sprungtemperatur gekühlt werden können.

Entdeckung der Hochtemperatur Supraleiter

- **Die Entdeckung der HTS war eine sehr grosse Überraschung:**
 - viele hielten so hohe T_c Werte für physikalisch unmöglich
 - die neuen Supraleiter waren Keramiken (bisher kannte man nur Metalle und Legierungen)
- **Es gab keine theoretische Erklärung für die HTS**
- **Die hohen T_c Werte vereinfachen den nötigen Kühlaufwand erheblich. Dadurch schien der Weg frei für eine breite industrielle Nutzung.**
- Neben den bereits erwähnten „Energietechnik-Anwendungen“ schienen auch **Elektronik-Anwendungen** (Transistoren, Filter, Sensoren...) in greifbarer Nähe (**diese werden im Vortrag nicht diskutiert**)

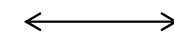
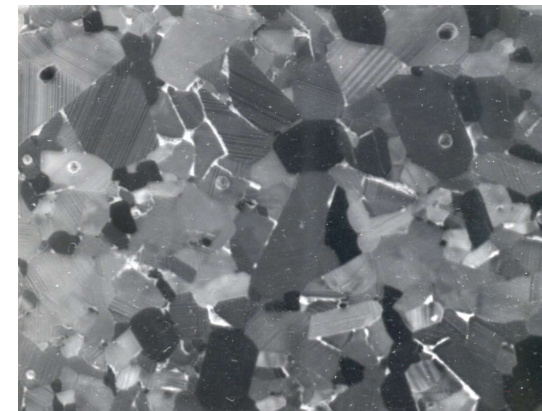


Goldgräberstimmung

- **Hochschulinstiute weltweit beginnen Forschungsprojekte**
(Physik, Chemie, Materialwissenschaften, Elektrotechnologie,...)
- **Industrie Forschung**
(ABB, Siemens, Alstom, Sumitomo-Electric, Hitachi, Pirelli-Cable, Hoechst.....)
- **Nationale Forschungsprogramme**
(Japan, USA, Süd Korea, Schweiz....)
- **Europäische Forschungsprogramme**
(BRITE/EURAM I (1989-1992), BRITE/EURAM II (1994-1998),...)
- **Startups**
(AMSC = American Superconductor,)

Die Herausforderungen der HTS

- Komplizierte Verbindungen => schwierige Herstellung
- Aggressive Schmelze => **teure Substrate (z.B. Ag)**
- Keramik => **sehr brüchig**
- Granularität => „**weak links**“
- Stark Anisotrop (nahezu 2-d) => „**weak links**“
- **Es brauch vor allem Materialwissenschaft**
(nicht Metallurgen sondern Keramiker)



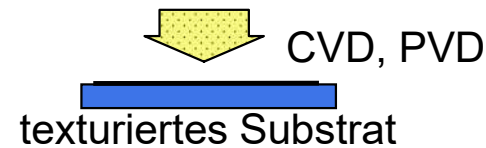
50 μm

Materialentwicklung – Stand 1990

1.) Filme

Epitaktisches Wachstum

(1 μm , 10 $\text{kA}/\text{mm}^2 \Rightarrow 10 \text{ A}/\text{mm}$)*



2.) Dickfilme

Partielles Schmelzen

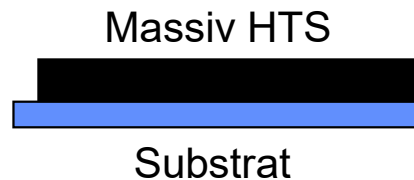
(20 μm , 200 $\text{A}/\text{mm}^2 \Rightarrow 4 \text{ A}/\text{mm}$)*



3.) Massiv-Teile

Schmelzprozesse

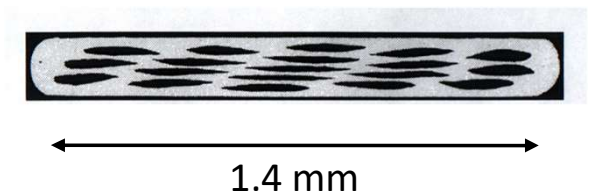
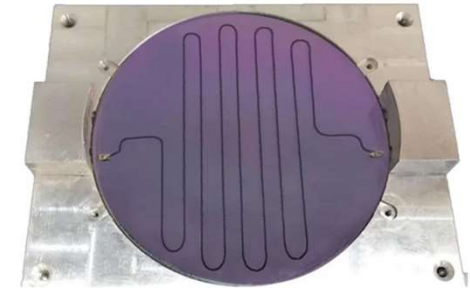
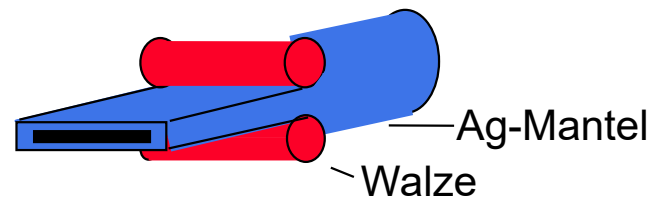
(1 mm , 20 $\text{A}/\text{mm}^2 \Rightarrow 20 \text{ A}/\text{mm}$)*



4.) Powder-In-Tube Drähte

Thermomechanische Prozesse

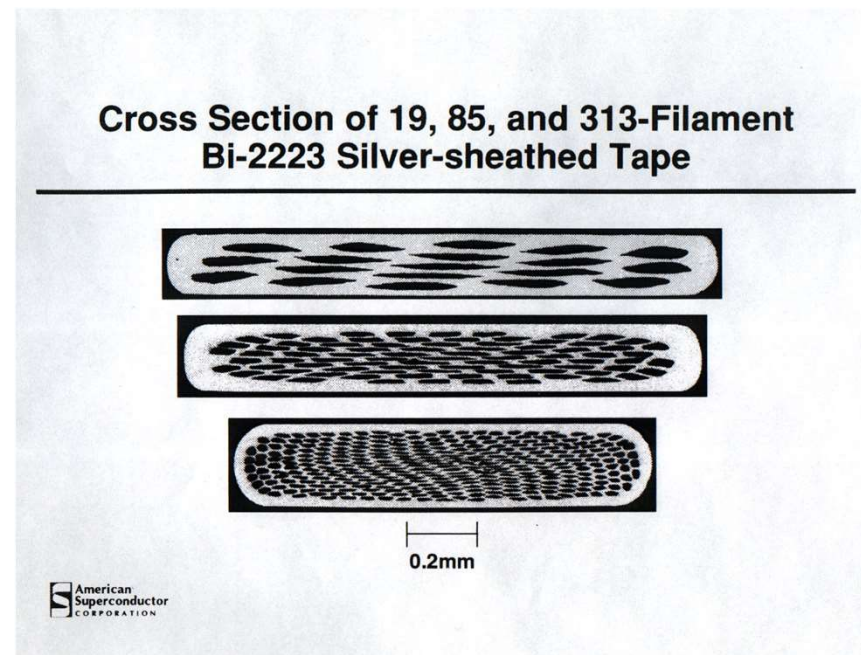
(20 μm , 500 $\text{A}/\text{mm}^2 \Rightarrow 10 \text{ A}/\text{mm}$)*



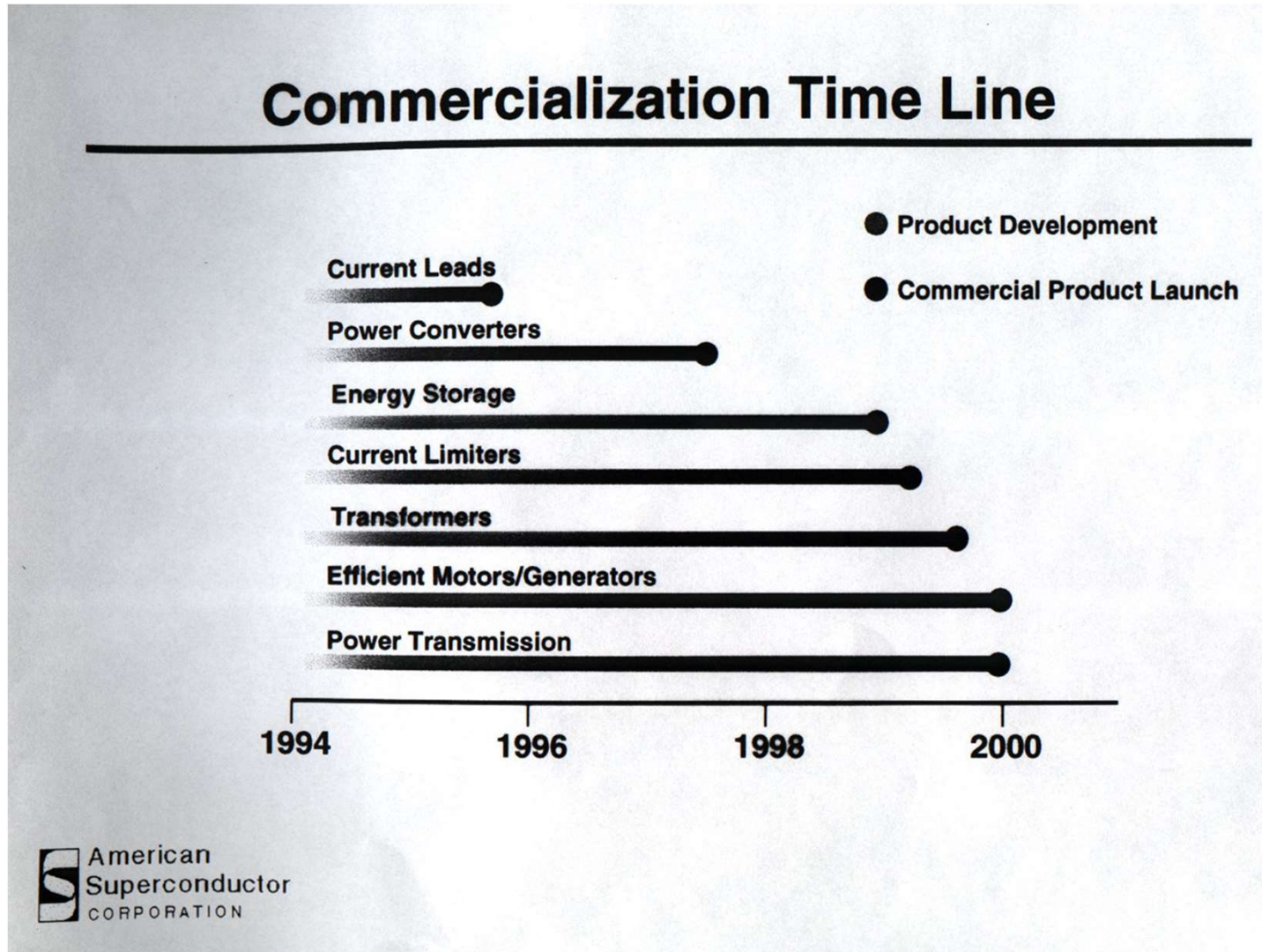
* @77K

Focus auf Bi-2223 PIT-Drähten - AMSC

- Drähte sind Schlüsselkomponente für fast alle Anwendungen in der Energietechnik
- Bi- 2223 PIT-Drähte zeigen zunächst die besten Resultate
- Hersteller: AMSC (American Superconductor, Startup), Sumitomo,...



Businessplan AMSC – Stand 1994

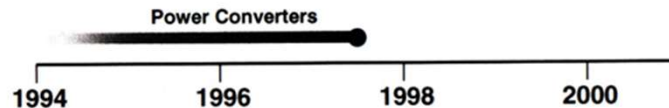


Businessplan AMSC – Stand 1994

Market Opportunity

Power Converters

- End-users: Utilities, Process Industry, Military
- **Market Size: Over \$200 Million** in 1994 for Conventional Devices > 100 kW
- Market Drivers:
 - Motor Drives, Power Quality, and Power Control
 - More Compact, More Efficient Power Conversion Systems



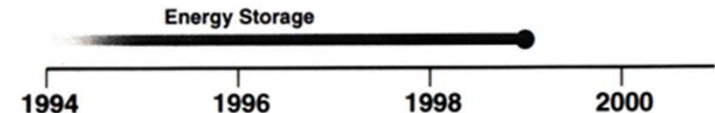
- 9/94 Fundamental Patent on Cryogenic Power Converters Issued to AMSC
- 9/94 Demonstrated 10 kW Rectifier
- 2/96 Demonstrate 75 kW, 3-Phase Inverter



Market Opportunity

Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

- End Users: Utilities, Industrial Manufacturers
- Anticipated Market Size:
 - **Over \$100 Million / Year for micro-SMES**
- Market Drivers:
 - Power Fluctuations Cost U.S. Industry \$12 Billion / Year in Lost Productivity
 - Solution to Harmful Power Fluctuations



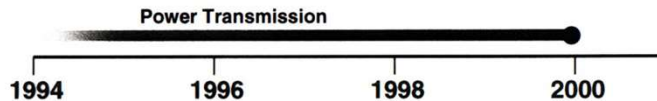
- 10/94 Demonstrated 2 Tesla, Cryocooled Magnet
- 3/96 Deliver First HTS micro-SMES Subsystem



Businessplan AMSC – Stand 1994

Power Transmission Time Line

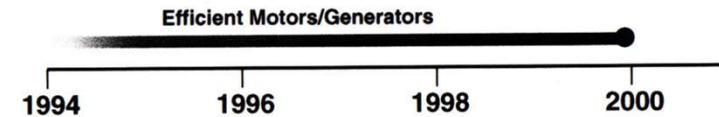
- 9/92 First 1m Prototype Cable Conductor, 500 amps
- 6/93 1m Cable Conductor, 1100 amps
- 11/93 1m Cable Conductor, 2300 amps
- 3/94 1m Cable Conductor, 4200 amps
- 10/94 Contract with Pirelli/EPRI/DOE: Develop 30m Cable Conductors



- mid 1995 Ship Cable Wire to Pirelli
- late 1995 Demonstrate 30m Cable Conductor at EPRI test site
- late 1997 Demonstrate 100m Power Cable System

Motors and Generators Time Line

- 7/91 First Motor with Useful Power Output: 0.03 hp
- 4/93 Demonstrated 2 hp Motor
- 1/94 Demonstrated 5 hp Motor
- 10/94 Demonstrated 2 Tesla, Refrigerator-Cooled Magnet Coil



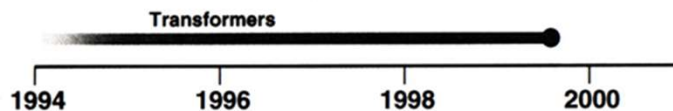
- 6/95 Deliver Coil for Prototype 1MW Generator to U.S. Air Force
- 12/95 Demonstrate 100 hp Motor with Reliance
- 12/98 Demonstrate 1,000 hp Motor
- 12/99 Demonstrate 5,000 hp Motor

Businessplan AMSC – Stand 1994

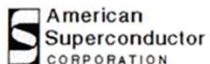
Market Opportunity

Transformers

- End-users: Utilities
- Market Size:
 - Over \$3 Billion in 1994 for Conventional Transformers > 40 MVA
- Market Drivers:
 - Smaller Size, Lower Weight
 - More Environmentally Friendly
 - Cost Savings from Lower Energy Losses



- 12/94 Agreement with ABB Group to Develop Prototype 630kVA HTS Transformer
- 12/96 Test Prototype 630kVA Transformer in Geneva Power Grid



Market Opportunity

Current Limiters

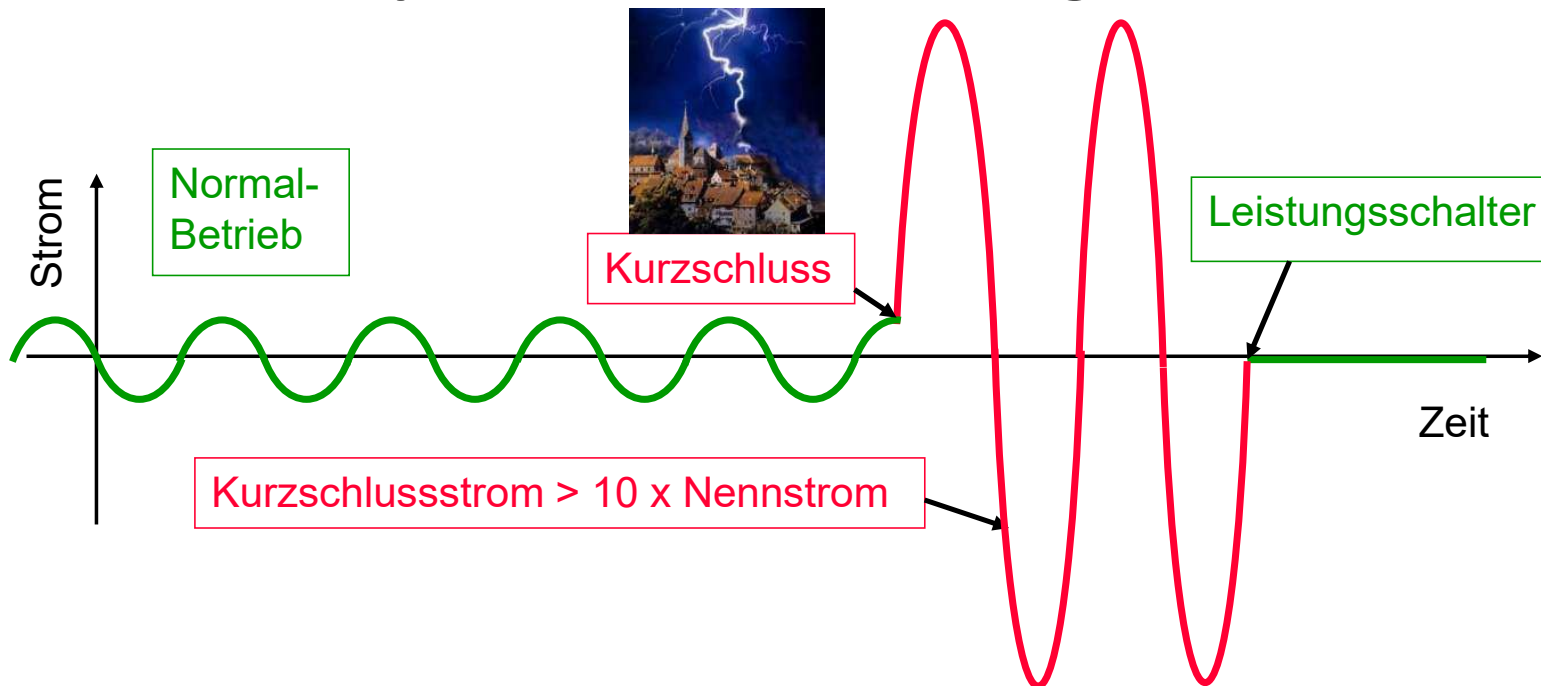
- End-users: Utilities
- Anticipated Market Size: \$100 Million / Year
- Market Drivers:
 - Protects Electrical Equipment from Uneven Power Flow
 - \$100 Million / Year Potential Savings for U.S. Utilities



- 7/93 DOE Contract with Lockheed Martin and Southern California Edison
- 8/94 Market / Design Study with RWE AG in Germany
- 12/95 Demonstrate 2 kV Current Limiter with Lockheed Martin / SCE

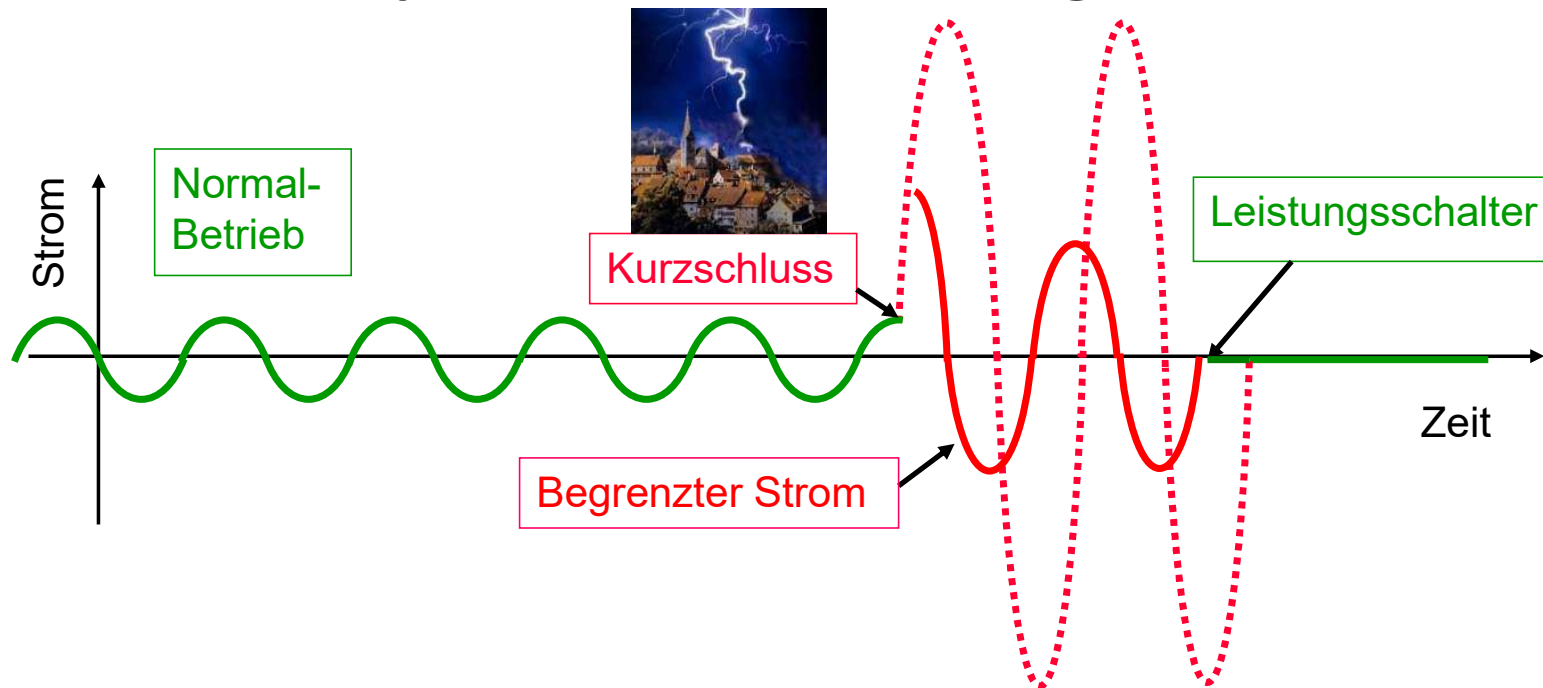


Warum Supraleitender Strombegrenzer



- 1.) Hoher mechanischer Stress $\sim \int I^2 dt$ \Rightarrow Mechanische Verstärkung in Transformatoren, Generatoren, ...
- 2.) Kurzschlussstrom ist schwer zu unterbrechen \Rightarrow Teure Leistungsschalter

Warum Supraleitender Strombegrenzer



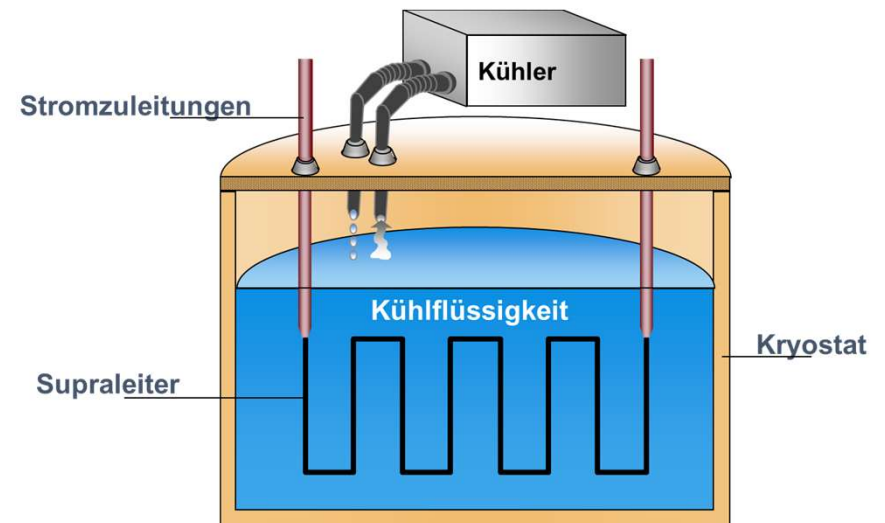
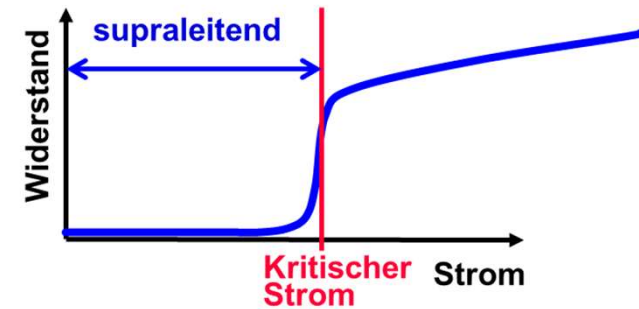
- 1.) Reduzierte mechanischer Stress $\sim \int I^2 dt$ => Keine mechanische Verstärkung in Transformatoren, Generatoren, ...
- 2.) Begrenzter Strom ist leicht zu unterbrechen => Billige Schalter

Alternativen zu Strombegrenzer

- Luftspulen (Reaktoren)
 - Künstlich erhöhte Kurzschluss-Reaktanzen in Transformatoren und Generatoren
- } => erhöht Verluste und verringert Netz-Stabilität
- Auftrennung von Netzwerken (weniger Einspeisequellen)
- => Reduzierte Spitzenleistung und Redundanz
- Spreng-Sicherungen
- => Nicht reversibel,
(technisch nur für Mittelspannung möglich)

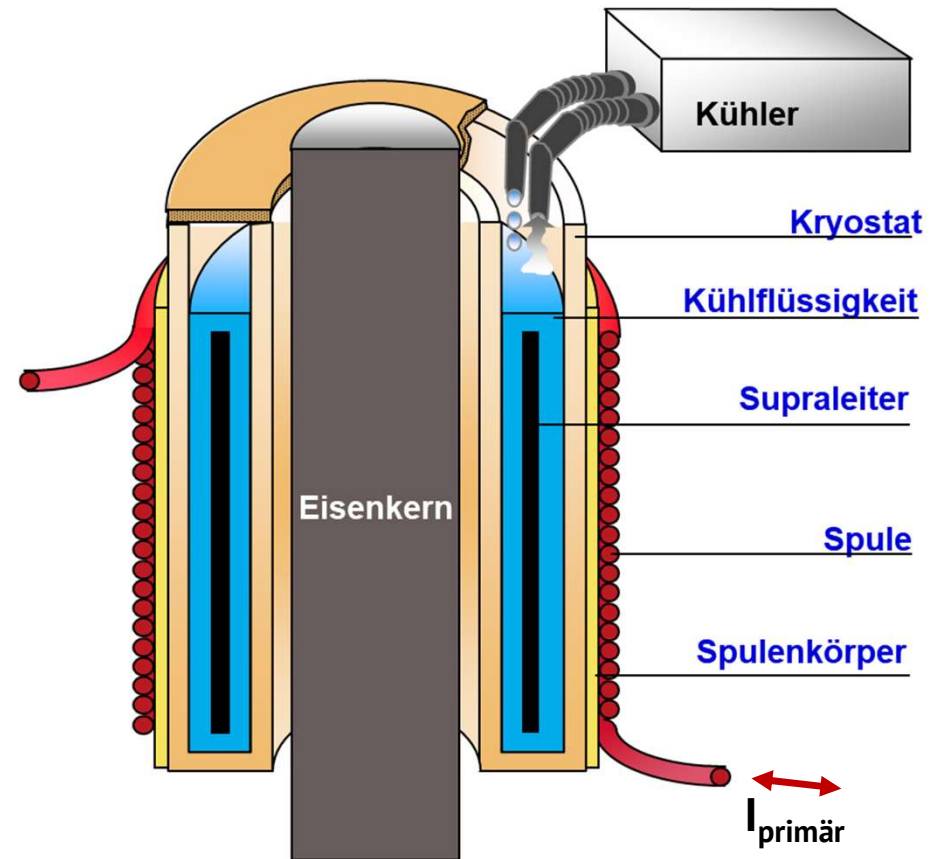
Supraleitender Strombegrenzer

- **Supraleiter ist fast perfekter Strombegrenzer**
 - => Kein Widerstand im Normalbetrieb
 - => Widerstand baut sich mit überschreiten des kritischen Stromwertes automatisch auf
 - => Selbsterholend
- Powder-In-Tube Drähte sind wegen Silber-Bypass ungeeignet
- **Beste Optionen: Filme und Massiv-Teile**

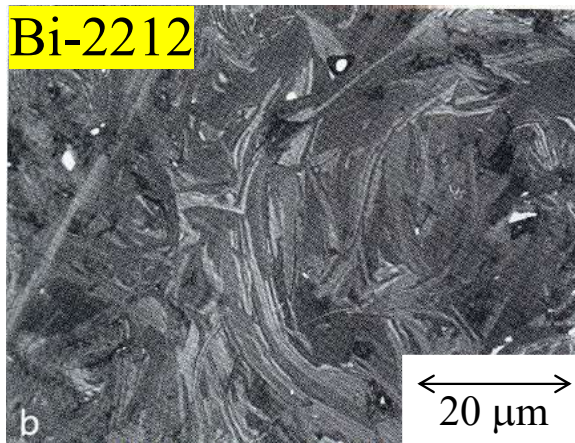
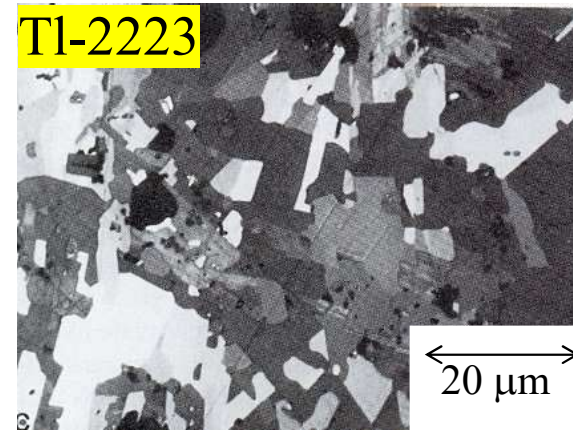
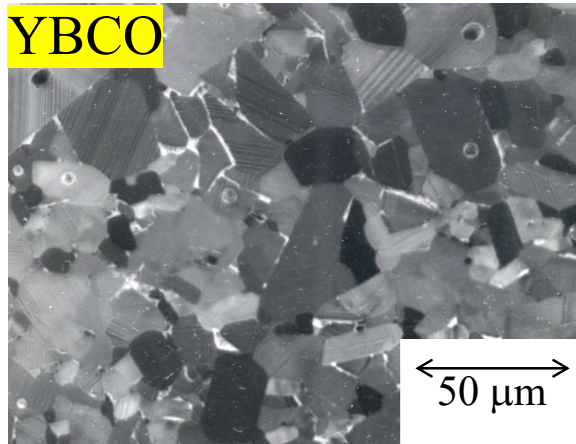


Induktiver Supraleitender Strombegrenzer

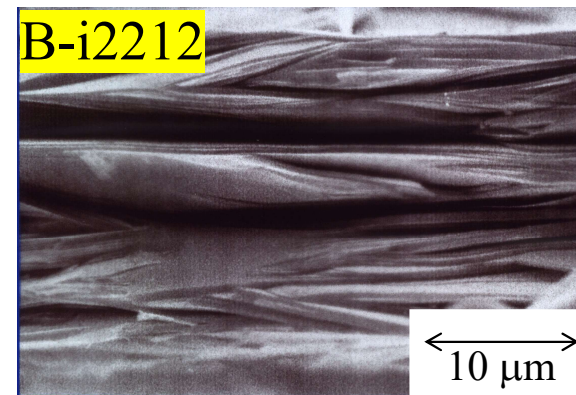
- Transformator, dessen Sekundärseite als Strombegrenzer ausgelegt ist
- Primäre Windungszahl = N
Sekundäre Windungszahl = 1
- $I_{\text{sekundär}} = N \times I_{\text{primär}}$
- $U_{\text{sekundär}} = U_{\text{primär}} / N$
- **Technischer Aufwand entspricht mindestens dem eines Transformators**
- **keine Wärmeverluste über Stromzuführungen**
- **Massiv Keramik ist als Rohr relativ leicht herstellbar**



Optionen für Massiv-Teile

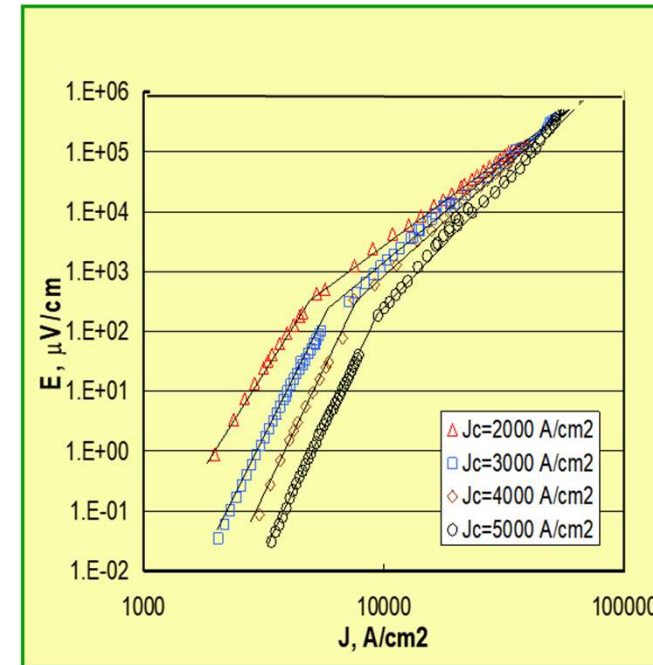
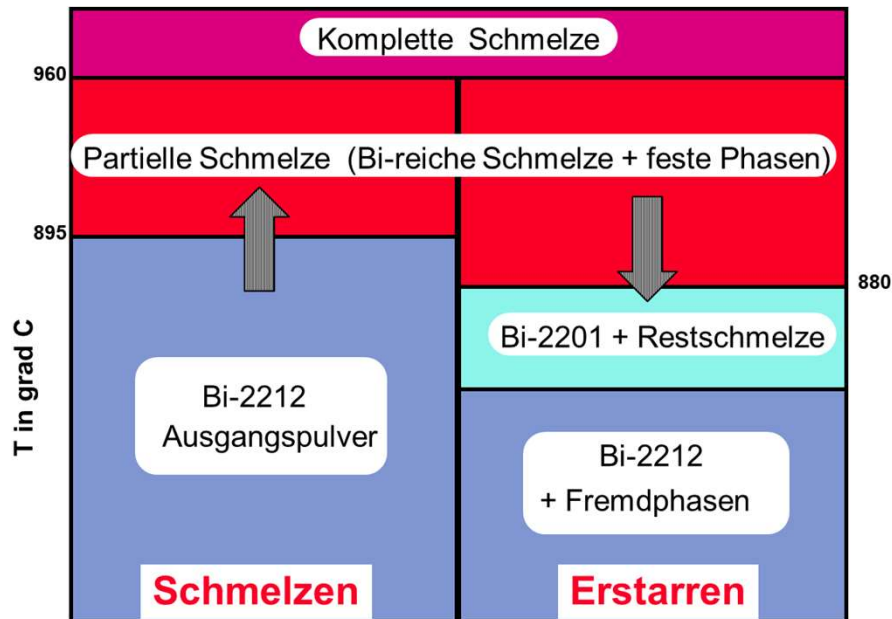


schmelz-prozessiert



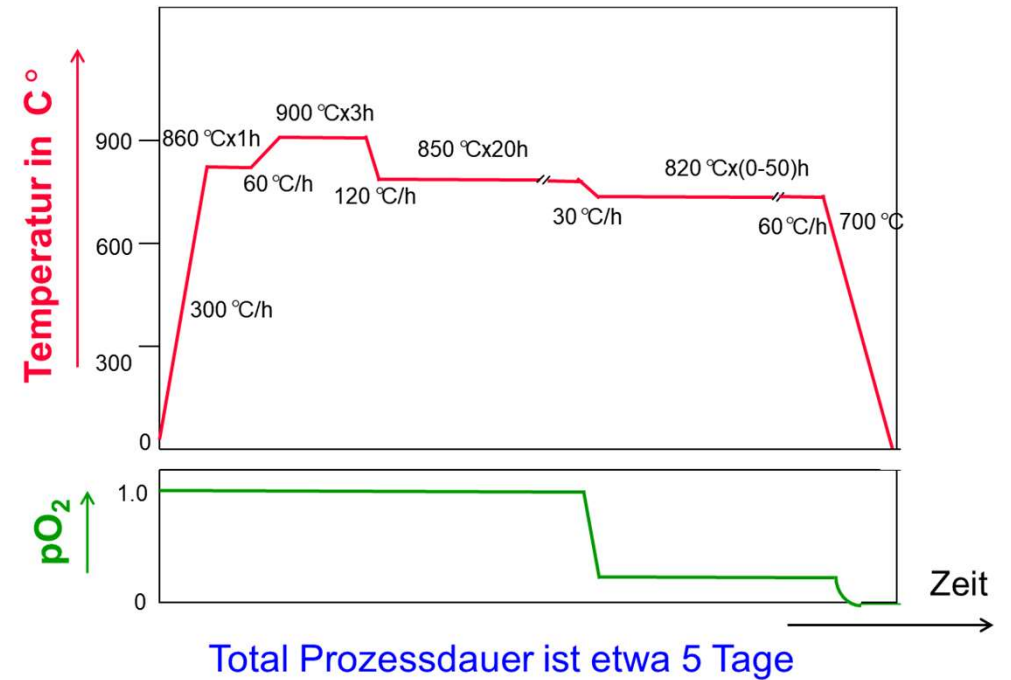
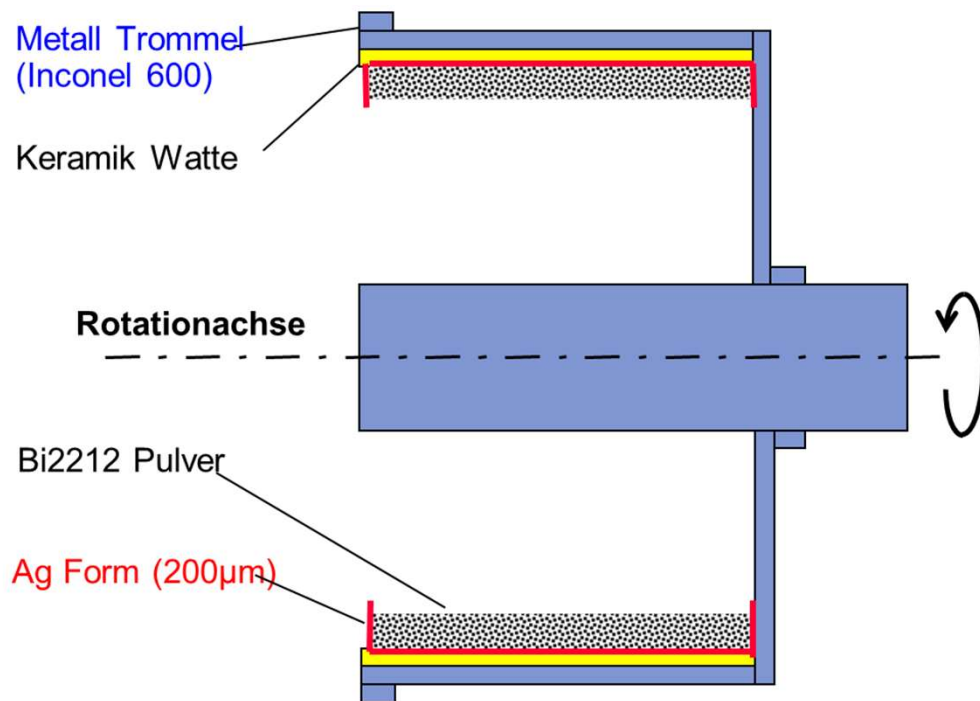
schmelz-prozessiert, texturiert

Partielles Schmelzen von Bi-2212



- Kopplung zwischen Körner (Plättchen) ist sehr gut \Rightarrow kein granulares Verhalten
- Weicher S-N-Übergang: $E = j^a$
- Material kann mit grossen Querschnitten ($> 1 \text{ cm}^2$) hergestellt werden

Herstellung von Rohren aus Bi-2212



Herstellung von Rohren aus Bi-2212



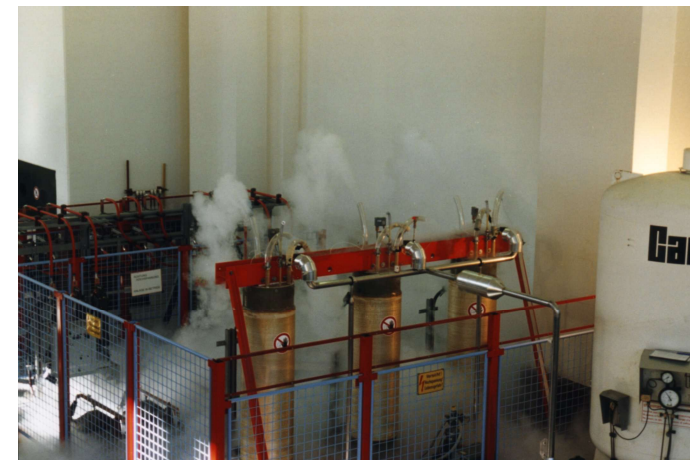
Endprodukt mit:

1. Stahlbandage als elektrischer Bypass und Mechanische Verstärkung
2. Glasfaser-Epoxy Bandage als zusätzliche mechanische Stabilisierung

Ag, wird entfernt wegen hoher Leitfähigkeit

Strombegrenzer-Feldtest: 1.2 MVA (70A / 10.5 kV) Prototyp, 1996

- Hersteller: ABB
Materialentwicklung: zusammen mit Prof. Gauckler, ETHZ
- 1 Jahr in Betrieb im NOK Kraftwerk am Löntsch, Glarus
 - Mehrere Kurzschluss tests
 - Weltweit erste HTS- Anwendung im Feldtest
- Technische Probleme:
 - hot-spots
 - mechanische Belastung der HTS-Keramik
- Kommerzielle Probleme
 - Kühlung (Kosten/Zuverlässigkeit)
 - Herstellungskosten



Transformator-Feldtest: 630 MVA (18,7/ 0,42 kV) Prototyp, 1997

- Hersteller: ABB
PIT-Drähte: American Superconductor
- 1 Jahr in Betrieb bei SIG, Genf
- Technische Probleme:
 - AC-Verluste im HTS
- Kommerzielle Probleme
 - Kühlung (Kosten/Zuverlässigkeit)
 - HTS Materialkosten (hauptsächlich Silberanteil)
 - Herstellungskosten



Anwendungen – Stand 2024

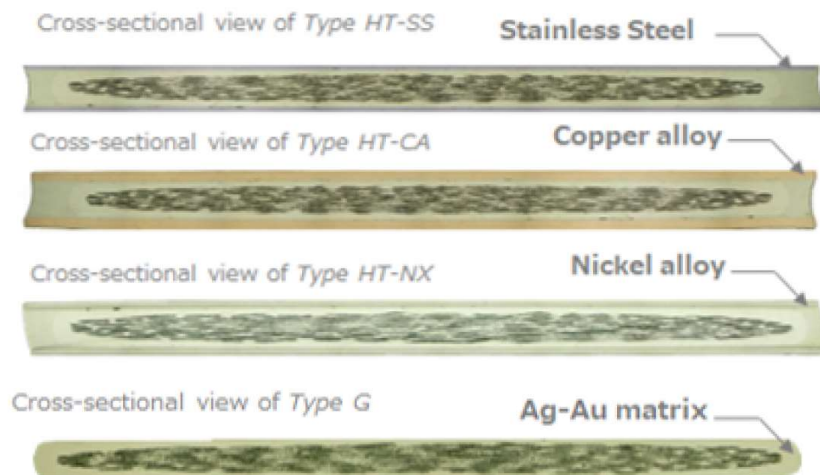
- **ABB beendet Entwicklung von HTS Materialien und Anwendungen in 2005**
 - Kühlungskosten zu hoch (auch wegen Anforderung an Zuverlässigkeit)
 - Materialentwicklung hat noch sehr langen Weg zu gehen (Sprödigkeit, AC-Verluste, Kosten)

- **HTS-Prototypen (keine signifikante kommerziellen Anwendungen):**
 - Kabel (AMSC, Pirelli, Siemens, Sumitomo, NKT, Nexan, Southwire,...)
 - Motoren, Generatoren (Siemens, AMSC, GE...)
 - SMES (ABB, AMSC, ASIPP, ...)
 - Strombegrenzer (ABB, Siemens, Nexan, AMSC, ...)
 - Transformatoren (ABB, Siemens, SuperOx....)
 - Schwebebahn (China, Japan,...)

- **Einzigste kommerziellen Produkte:**
 - Stromzuführungen zu LTS (HTS-110, Fujikura...)
 - Inserts für LTS Labor-Magnete (Brucker: Bi2212 Rund-Drähte,..)

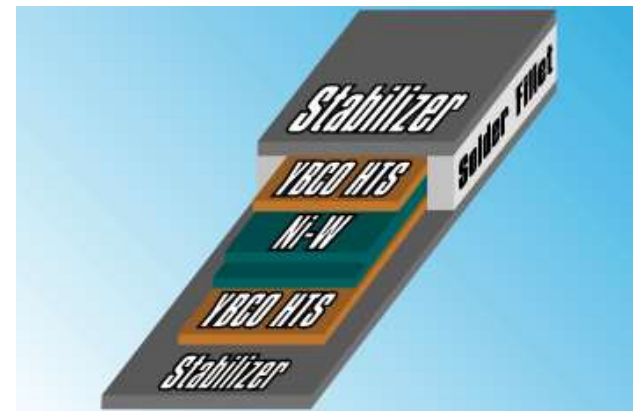
Draht-Entwicklung (2024)

Generation 1: Bi-2223 PIT (Sumitomo, ...)



Querschnitt: 4.5 mm x 0,3 mm
 $I_c = 200 \text{ A} \Leftrightarrow j_{ce} = 150 \text{ A/mm}^2$

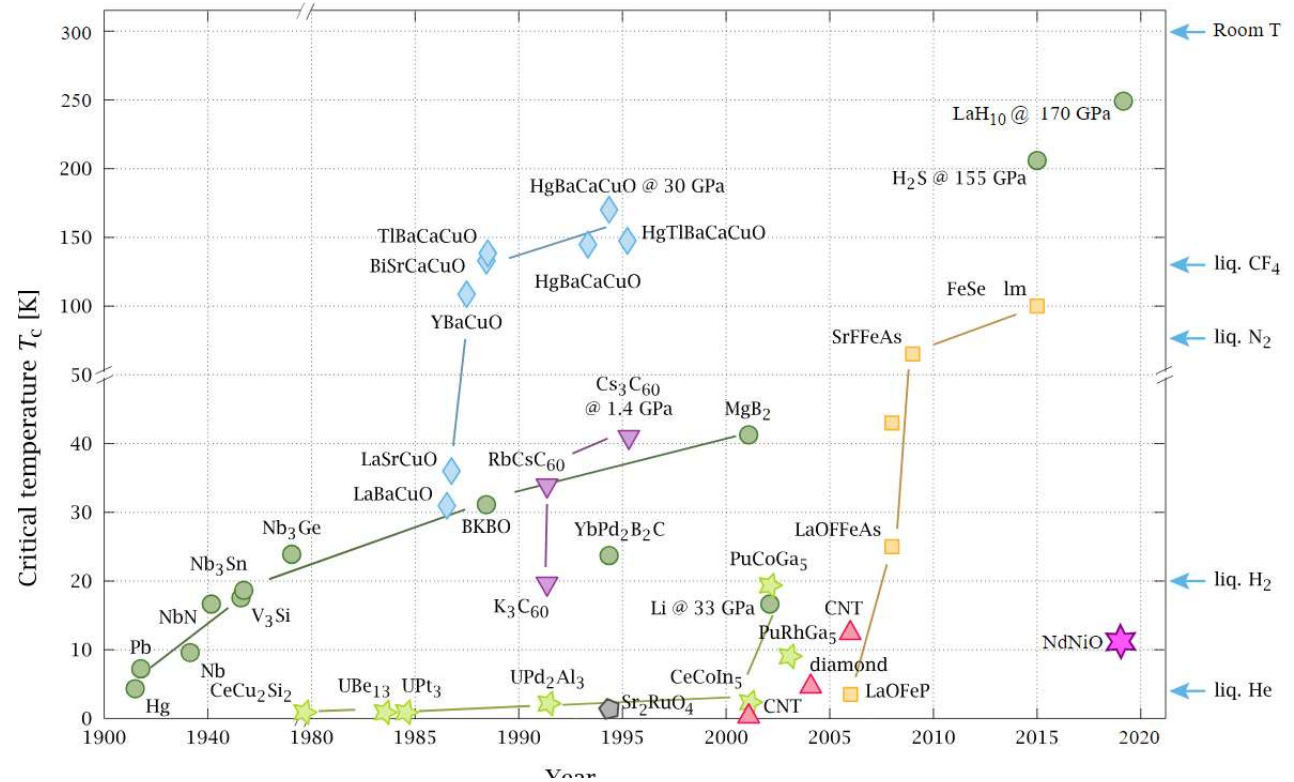
Generation 2: YBCO- Dünnsfilm (AMSC: "Amperion", THEVA, Fujikura...)



Querschnitt: 12 mm x 0,33 mm
 $I_c = 500 \text{ A} \Leftrightarrow j_{ce} = 100\text{-}130 \text{ A/mm}^2$

Neue Hochtemperatur Supraleiter (2024)

- **Viele Neue Verbindungen**
- Einige Substanzen mit $T_c > 200$ K aber nur unter sehr hohem Druck!
- Kein Ersatz für Bi-2223 und YBCO
- **Suche nach Raumtemperatur SL**



USOs - Unverifiable Superconducting Objects

LK-99

Spectrum.de, Aug. 2023

Die Supraleiter-Sensation ist verpufft, und das ist gut so

Ein Material namens LK-99 sorgte kürzlich für Begeisterung. Nun zeigt sich: Der Hype um den möglichen Raumtemperatur-Supraleiter war verfrüht. Der versprochene Heilsbringer wäre er ohnehin nicht.

SKANDAL IN DER FESTKÖRPERPHYSIK

Spectrum.de, Nov. 2023

Umstrittene Veröffentlichung zu Supraleitern wird zurückgezogen

Es ist die dritte Arbeit des Physikers Ranga Dias, die im Nachgang zurückgezogen wird. Die Forschungsgemeinschaft fürchtet um den Ruf des gesamten Fachgebiets.

Noch ein Raumtemperatur Supraleitern Kandidat

- Haben angeblich schon Raumtemperatur Supraleiter !
- Widerstand = 0 ?
oder doch nur diamagnetisches Signal ?
- Scheinbar keine wissenschaftliche Veröffentlichungen !
- Suchen nach Investoren

QDM develops room-temperature superconductors, by designing new crystals using quantum principles.

“Prof. Hoffman (Nobel laureate) and I are both convinced of the theory and of its reduction to practice”

Prof. Roger Kornberg, Stanford
Nobel laureate in chemistry 2006



Ausblick

- **YBCO und Bi-2223 basierende Anwendungen können vermutlich nur für Nischenanwendungen erwartet werden (Draht Kosten/Performance, Kühlkosten)**
- **Industrie ist in «Wartestellung», d.h. weitgehend inaktiv**
- **Kühlkosten (auch bei 77 K) sind oft zu hoch, auch wenn die Supraleiter-Kosten Null wären**
- **Bleibt die Hoffnung auf Zimmertemperatur Supraleitung**