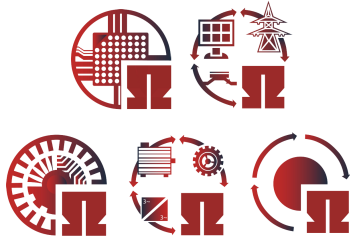


ELSYS Note



Eine Luftnummer

Wir zeigen eine Demonstration der Supraleitung bei Normaldruck: Ein Hochtemperatur-Supraleiter (YBCO) schwebt bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff (77 K) stabil über einem Permanentmagnet-Track (Meißner-Ochsenfeld-Effekt und Flux Pinning). Zur Einordnung geben wir eine kurze historische Übersicht der Sprungtemperaturen bei Normaldruck. Mit FEMM wird das Verhalten qualitativ simuliert modelliert.

Supraleiter in Kürze

Unterhalb der Sprungtemperatur T_c verschwindet der elektrische Widerstand, und der Supraleiter verdrängt Magnetfelder – dieser Effekt wird als **Meißner-Ochsenfeld-Effekt** bezeichnet. Das Material zeigt dabei vollständigen Diamagnetismus. Man unterscheidet zwei Klassen: **Typ I**-Supraleiter, wie Quecksilber (Hg) mit einer Sprungtemperatur von nur 4 K, und **Typ II**-Supraleiter wie Yttrium-Barium-Kupferoxid (YBCO) mit $T_c \approx 90$ K. Bei Typ II müssen zusätzlich magnetische Flussröhren entstehen, deren Verankerung im Material zum sogenannten *Flux Pinning* führt und eine stabile Schwebhaltung ermöglicht. Abb. 1 zeigt die Entwicklung der Sprungtemperaturen bei Normaldruck bis 1993 [1].

Material	T_c /K
Hg, 1911	4
NbC, 1930	11
NbN, 1941	16
V ₃ Si, 1952	17
Nb ₃ Sn, 1954	18
Nb(AlGe) ₃ , 1966	20
Nb ₃ Ge, 1973	23
(LaBa) ₂ CuO ₄ , 1985	35
(LaSr) ₂ CuO ₄ , 1986	47
YBa ₂ Cu ₃ O ₇ , 1987	90
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₅ O ₈ , 1993	135

Versuchsaufbau

Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt sowie das sogenannte Flux Pinning lassen sich sehr gut mit einem Hochtemperatur-Supraleiter des Typs II (YBCO) demonstrieren [2], wie in Abb. 2 gezeigt. Dieser 1987 entdeckte Supraleiter besitzt eine Sprungtemperatur von etwa 90 K und kann daher einfach mit flüssigem Stickstoff unter T_c gekühlt werden. Der historische Kontext dieser Entwicklung ist in Abb. 1 dargestellt.

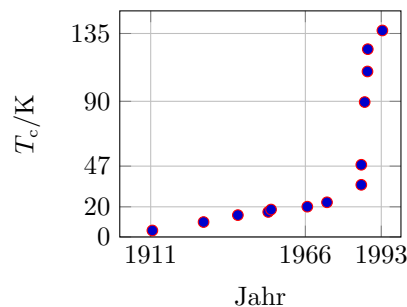


Abb. 1: Sprungtemperaturen

Ein einfacher und zugleich spektakulärer Nachweis von Meißner-Ochsenfeld-Effekt und Flux Pinning gelingt mit folgendem Aufbau:

Materialien: YBCO-Puck (25 mm bis 30 mm Durchmesser), Styroporschale oder Dewar, flüssiger Stickstoff, Kunststoffpinzette sowie ein Magnet-Track. Dieser besteht hier aus drei nebeneinander platzierten Neodym-Eisen-Bor-

(NdFeB)-Magneten.

Durchführung: Den Puck mit flüssigem Stickstoff vorkühlen, auf den Magnet-Track setzen und leicht andrücken (Pinning). Anschließend schwebt der Puck frei. Die Schwebhöhe kann mit Abstandshaltern variiert werden; ein leichter seitlicher Stoß zeigt die „eingefrorene“ Bahn.

Beobachtungen: Unterhalb von T_c schirmt der Supraleiter das Magnetfeld nahezu vollständig ab. Materialdefekte führen zur Verankerung einzelner Flussröhren (Flux Pinning), wodurch der Puck stabil schwebt und nicht von der Bahn abrutscht. Die Styroporschale reduziert die Verdampfung des Stickstoffs und verlängert die Dauer der Demonstration.

Das in der Höhe schwebende YBCO-Plättchen ist in Abb. 2 dargestellt.



Abb. 2: Schwebender YBCO-Supraleiter (Fa. Quantum Levitation)

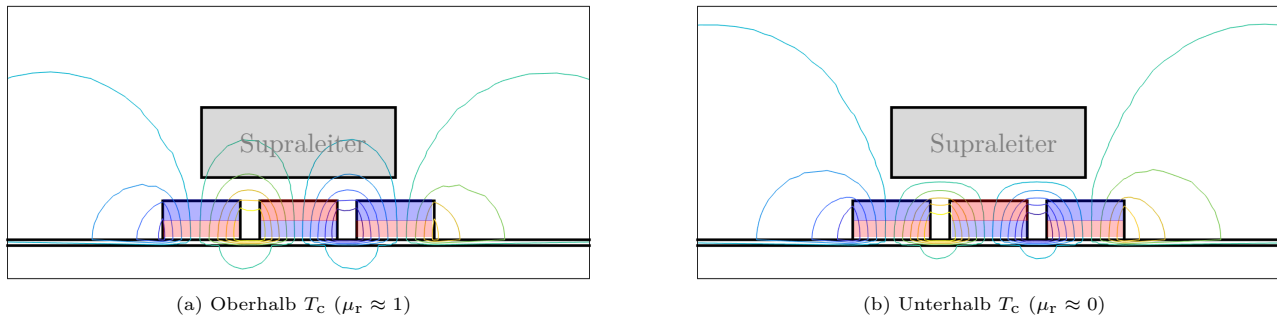


Abb. 3: Feldlinienverlauf eines Supraleiters: (a) oberhalb T_c normales Verhalten, (b) unterhalb T_c zeigt sich der Meißner-Ochsenfeld-Effekt mit nahezu vollständigem Herausdrängen des Magnetfeldes (durch verlustfrei intern fließende Kreisströme).

Simulation (FEMM)

Das Verhalten eines Supraleiters lässt sich gut mit einem zweidimensionalen, magnetostatischen Finite-Elemente-Modell darstellen. Dadurch wird der aus dem Supraleiter verdrängte Fluss sehr anschaulich sichtbar, was die visuelle Interpretation des Meißner-Ochsenfeld-Effekts erleichtert. Für die Simulation wird das frei verfügbare FEMM-Tool verwendet, in dem der Supraleiter als Material mit temperaturabhängiger relativer Permeabilität modelliert wird. Oberhalb der Sprungtemperatur gilt $\mu_r \approx 1$, unterhalb T_c setzen wir $\mu_r \approx 10^{-5}$, wie in Abb. 4 dargestellt.

Die Permanentmagnete werden im Modell mit ihrer Remanenz (z. B. NdFeB, $B_r \approx 1,2$ T) und der jeweiligen Magnetisierungsrichtung parametrisiert. Damit lässt sich das qualitative Verhalten der Feldlinien gut nachbilden, wie in Abb. 3.

Einsatzgebiete

Der wesentliche Einsatzbereich von Supraleitern liegt in der Physik, et-

wa in *Teilchenbeschleunigern* und in der *Kernfusion*. Hier werden Magnetfelder im Bereich von etwa 20 T erreicht. Mit solch starken Magnetfeldern lassen sich Teilchen äußerst präzise lenken und Plasmen stabil einschließen. Es ist jedoch zu unterscheiden von der *Magnetschwebetechnik*, bei der stromerregte Systeme eingesetzt werden [3].

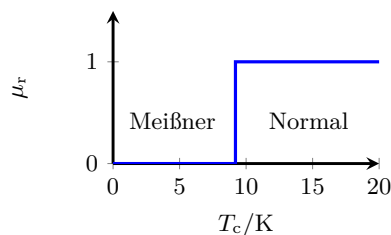


Abb. 4: Relative Permeabilität

Die Feldstärke von rund 20 T markiert heute die praktisch erreichbare Grenze, weil supraleitende Materialien bei noch höheren Magnetfeldern an ihr kritisches Feld stoßen und die enormen Lorentzkräfte die Wicklungen mechanisch stark belasten. Auch wenn kein ohmscher Widerstand vorhanden ist, können kleine Störungen (z. B. Vibrationen, Materialbewegungen oder Inhomogenitäten) lokale Wärmeeinträge er-

zeugen. Solche Wärmeinseln führen leicht zu einem „Quench“, also zum plötzlichen Verlust der Supraleitung. Deshalb benötigen Hochfeldmagnete eine sehr aufwändige Kühlstabilisierung mit flüssigem Helium oder – bei HTS – tiefkaltem Stickstoff.

Zusammenfassung

Die Demonstration zeigt Supraleitung bei Normaldruck mit flüssigem Stickstoff gekühltem YBCO: Meißner-Ochsenfeld-Effekt und Flux Pinning ermöglichen dabei eine stabile Levitation. Die historische Entwicklung der Sprungtemperaturen bei Normaldruck kulminiert bei etwa 135 K. Technische Magnetschwebetechnik nutzt hingegen stromerregte Systeme und keine kryogenen Supraleiter. Das FEMM-Modell mit $\mu_r(T)$ bildet die beobachteten Effekte didaktisch anschaulich nach. Zudem erklärt der mögliche *Quench* die praktische Feldstärkengrenze von etwa 20 T bei supraleitenden Hochfeldmagneten.

Verweise

- [1] Olaf Ziemann. *Supraleitung. Vorlesungs-Skript zum FWPF EFI-115*. 2024.
- [2] C. P. Strehlow und M. C. Sullivan. „A classroom demonstration of levitation and suspension of a superconductor over amagnetic track“. *American journal of physics* 77.9 (2009), S. 847–851. DOI: 10.1119/1.3095809.
- [3] C. Albrecht und G. Bohn. „Neue spurgeführte Transportmittel (Teil II): Elektrodynamische Schwebetechnik“. *Physikalische Blätter* 33.3 (1977), S. 103–118. DOI: 10.1002/phb1.19760320704.