

Supraleitung

Alex Weiß

Universität Bielefeld

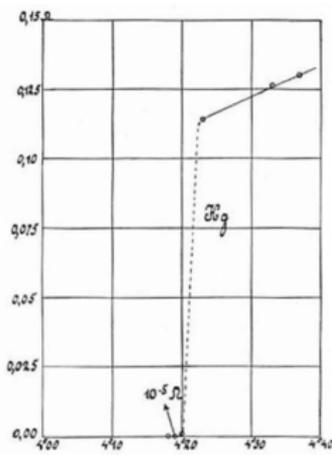
10. Juli 2013

Überblick

- 1 Einleitung
- 2 BCS-Theorie
- 3 Meißner-Ochsenfeld-Effekt
- 4 Supraleiter
- 5 Josephson Effekt

Supraleitung

- Leiter ohne elektrischen Widerstand
- Zustand unter charakteristischer Sprungtemperatur T_c

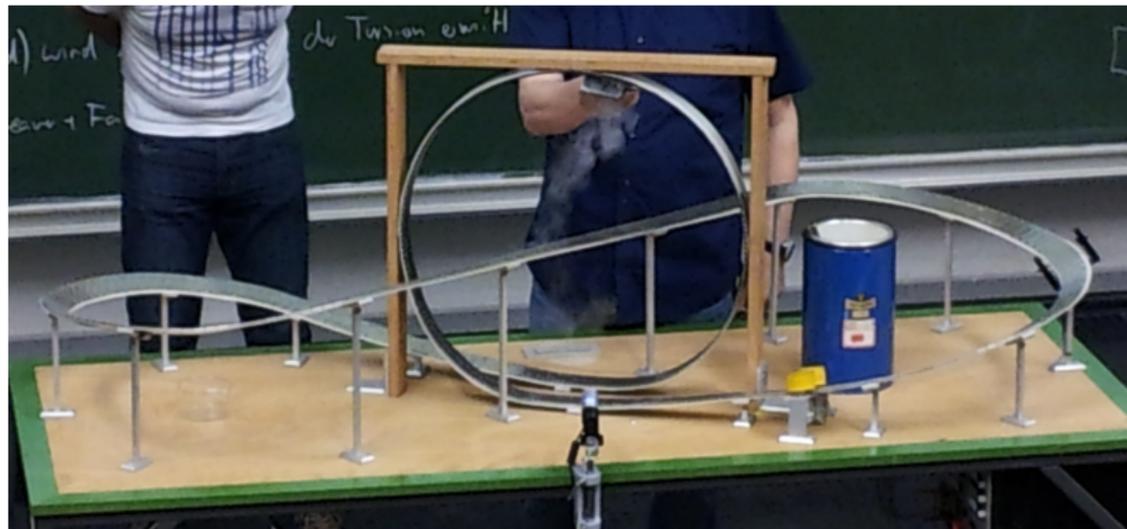


Nobel Lecture, Physik 1913, Kammerlingh Onnes

Motivation



Motivation



Motivation

Maglev

- Teststrecke: 18,4 km
- Höchstgeschwindigkeit:
581 km/h



geschichtlicher Verlauf

- **1911:** Heike Kammerlingh Onnes entdeckt Supraleitung



- **1933:** Entdeckung Meißner-Ochsenfeld Effekt
- **ende 1950er:** BCS-Theorie



John **B**ardeen, Leon Neil **C**ooper, John Robert **S**chrieffer

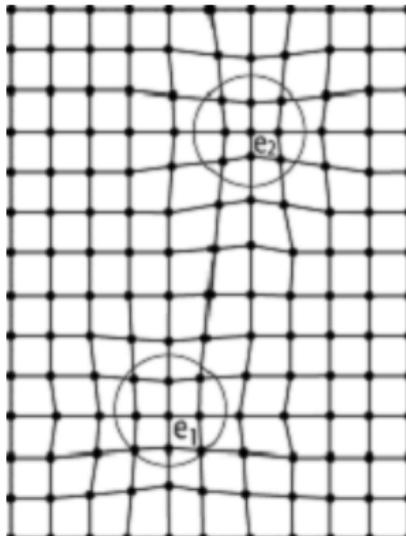
geschichtlicher Verlauf

- **1986:** Hochtemperatursupraleiter (Keramik)
 T_c zwischen $30k - 40k$
kurz darauf $T_c > 100k$
- **2013:** Noch immer keine vollständige Theorie

BCS-Theorie

Cooperpaar

- Elektron durchläuft Metallgitter, zieht pos. Ionen an
- Elektron fliegt weiter, Ionen schwingen langsam zurück
→ positive Polarisationswolke



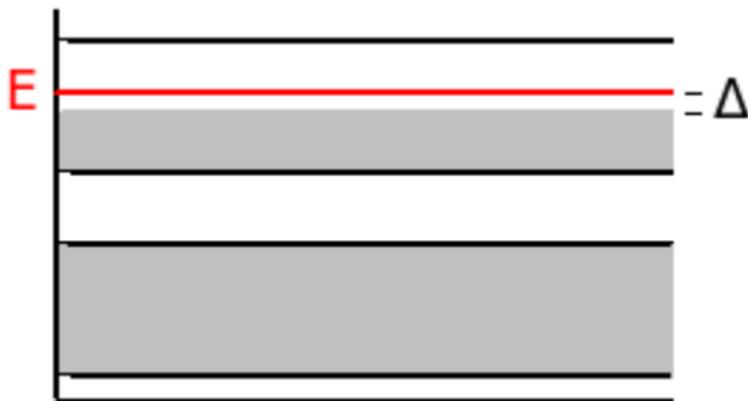
BCS-Theorie

Cooperpaar

- dynamische Bindung
- Impuls und Spin Antiparallel
 - $p_{ges} = 0, s_{ges} = 0$
 - Boson
- nur noch eine Wellenfunktion

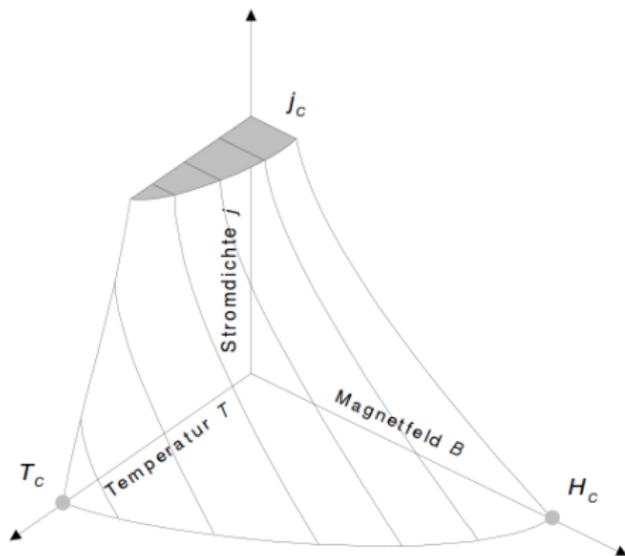
BCS-Theorie

- E_{kin} der Elektronen fließt teilweise in Verbindungsenergie
→ Energielücke Δ im Leitungsband
- Streuung am Gitter würde Cooper-Verbindung aufheben
mögliche Energien durch Streuung $\ll \Delta$
- → Widerstandslose Leitung



Grenzen der Supraleitung

- kritische Temperatur (Sprungtemperatur): T_c
- kritische Feldstärke : H_c
- kritische Stromdichte: j_c



Grenzen der Supraleitung

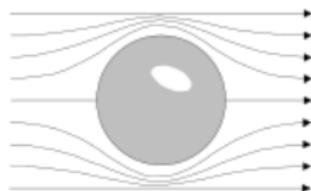
- mögliche Anwendung: Kurzschlussstrombegrenzer
- Kurzschluss $\rightarrow j_c$ überschritten
 \rightarrow normalleitend \rightarrow Widerstand
- Strombegrenzung bis zur Aufhebung des Kurzschlusses

perfekter Diamagnetismus

- Magnetfeldlinien werden aus dem Supraleiter herausgedrängt
- unabhängig von Vorgeschichte!



$$T > T_c$$



$$T < T_c$$

Londonsche Eindringtiefe

- postulierte London-Gleichung soll Ohm'sches Gesetz ablösen
-

$$\partial_t \vec{j} = \frac{nq^2}{m} \vec{E} \quad (1)$$

$$\vec{\Delta} \times \vec{j} = -\frac{nq^2}{m} \vec{B} \quad (2)$$

- Mit Maxwellgleichungen folgt:

$$B(x) = B_0 \cdot e^{-x/\lambda} \quad (3)$$

Londonsche Eindringtiefe

- λ : Londonsche Eindringtiefe

$$\lambda = \sqrt{\frac{m_e}{\mu_0 n q^2}} \quad (4)$$

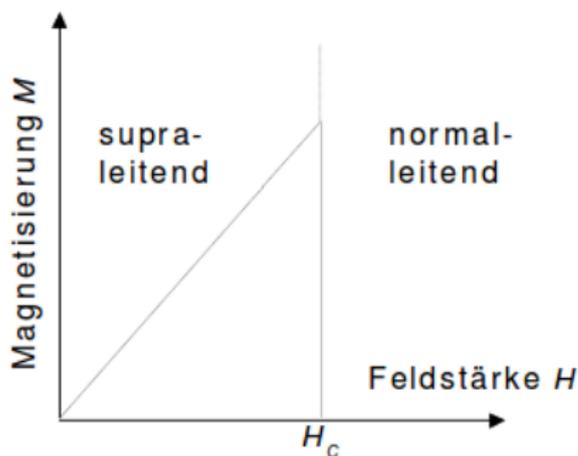
- Erzeugt Supraleitenden Strom an der Oberfläche
→ lenzsche Regel: Magnetfeld wird kompensiert

Anwendungen des Meißner-Ochsenfeld Effekts

- selbststabilisierende Magnetlager
- z.B. Schwungrad Energiespeicher
 - Bremsenergie für Massenverkehrsmittel
 - Energiezwischenspeicherung von Solar/Windanlagen (?)

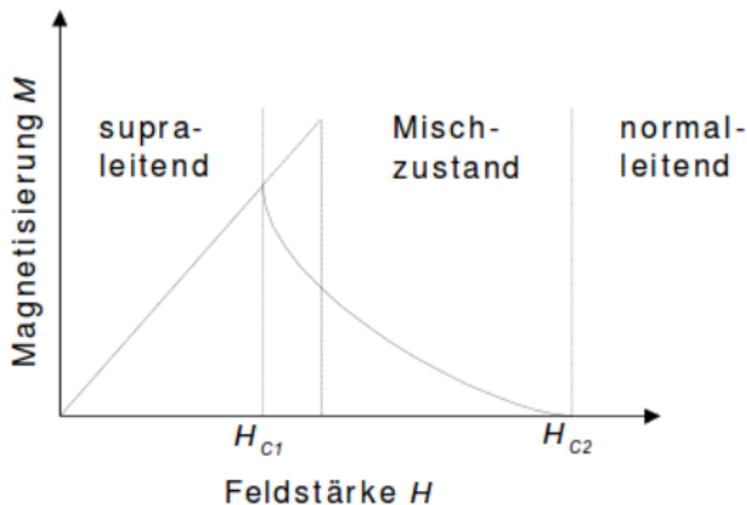
Supraleiter 1. Art

- Überschreitung kritische Feldstärke H_c
→ schlagartig wieder normalleitend
- H_c sehr klein
→ für praktische Anwendungen kaum zu gebrauchen



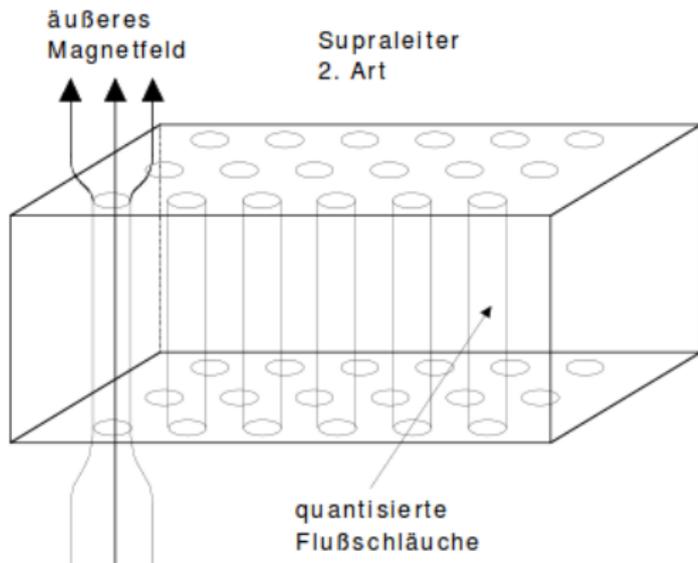
Supraleiter 2. Art

- zwischen H_{c1} und H_{c2} : *Shubnikov-Phase*
- In dieser Phase weiterhin Supraleitend
- H_{c2} wesentlich größer als H_{c1}



Supraleiter 2. Art

- normalleitende magnetische *Flussläuche*
- Aus Quantenmechanik: *Flußquant* $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$
- Strom \rightarrow Kraft \rightarrow Driftbewegung \rightarrow elektrischer Widerstand



Supraleiter 3. Art

- 2. Art + „Pinning“
- Durch Dotierung anheften der Flußschläuche
- Sehr hohe H_{c2} , bis zu $50T$
Vgl. 2. Art: $\approx 0,2T$
- Spulen dennoch maximal bis $20T$, da kritische Stromdichte nicht hoch genug

Hochtemperatur-Supraleiter

- statt metallische Leiter: Keramik (Kupferoxid-Verbindungen)
- Sprungtemperatur T_c teilweise über T -flüssig-Stickstoff (77k)
- Supraleitung durch Cooperpaare
- Entstehung der Cooperpaare unklar

Daten einiger Supraleiter

Supraleiter	Element/Verbindung	$T_c[k]$	$H_{c1}[T]$	$H_{c2}[T]$
1. Art	Quecksilber, Hg	4,153	0,0412	/
	Blei, Pb	7,193	0,0803	/
	Aluminium, Al	1,140	0,0105	/
2. Art	Niob, Nb	9,50	0,198	0,2
	Vanadium, V	5,38	0,142	0,34
3. Art	$PbMo_{5,1}S_6$	14,4	/	50
	Nb_3Sn	18,5	/	26
Hochtemp.	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110	/	100 – 200
	$YBa_2Cu_3O_7$	93	/	30 – 60

Josephson-Kontakt

- Idee: tunnelt Cooper-Paar durch Isolierschicht zwischen zwei Supraleiter?
- Isolierschicht kleiner als $2nm$ (≈ 5 Atomschichten)
- tunneln möglich, wenn die Phasen passen

Josephson-Gleichstrom

- Tunneln \rightarrow Phasensprung $\Delta\phi$
- gilt $\phi_1 + \Delta\phi = \phi_2$, so ist tunneln von 1. zu 2. Wahrscheinlich
- da aber dann $\phi_1 \neq \phi_2 + \Delta\phi$, Rückrichtung unwahrscheinlich
- \rightarrow Gleichstrom kann fließen (Josephson Gleichstrom I_T)

Josephson-Wechselstrom

- Richtung und Größe von I_T ist von der Phasendifferenz abhängig

$$I_T = I_{Tmax} \cdot \sin(\phi_2 - \phi_1) \quad (5)$$

- Gleichspannung an Tunnelstrecke U_T
 - Energiezustände verschieben sich um $2 \cdot e \cdot U_T$
 - zeitliche Veränderung der Phasendifferenz

-

$$\frac{d(\phi_2 - \phi_1)}{dt} = \frac{2eU_T}{h} \quad (6)$$

Josephson-Wechselstrom

- Frequenz

$$f = \frac{2e}{h} \cdot U_T \quad (7)$$

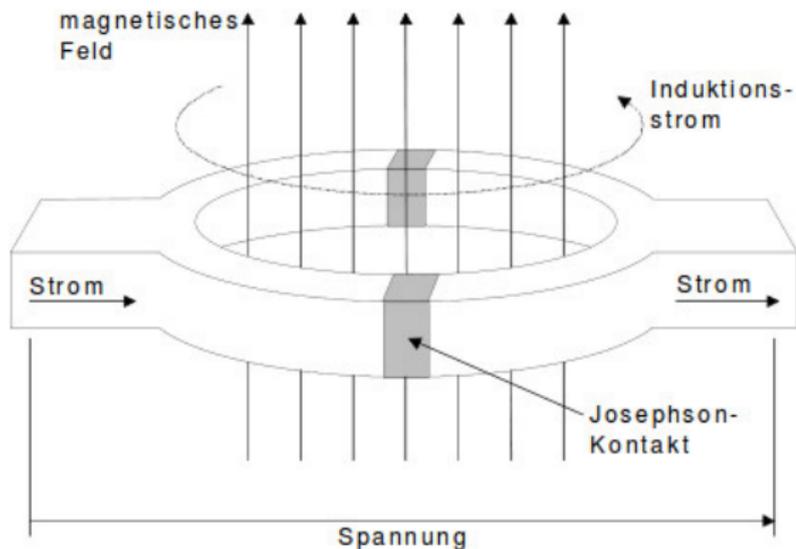
- Cooper-Paare nehmen im Tunnelkontakt eine Energie von $2eU_T$ auf
- diese ist größer als deren Bindungsenergie
→ zerbrechen in Einzelektronen
- beim Eintritt in 2. Supraleitung erneute Verbindung
- „überschüssige“ Energie in Form von elektromagnetische Welle abgegeben

Josephson-Wechselstrom

- Frequenz der Strahlung stimmt mit der Josephson Frequenz überein
- sehr hoch (bis etwa 300GHz)
- aber Strahlungsleistung sehr klein (unter $1\ \mu\text{W}$)
→ Umkehr dieses Effekts in der Praxis sehr nützlich

Superconducting Quantum Interference Device

- nutzt die Umkehr des Josephson Effekts
- Magnetfeldmessung bis zu $10^{-15} T$ möglich
im Vergleich: Erdmagnetfeld $10^{-6} T$
- Anwendung in Medizin, z.B. Gehirnstrommessungen



Quellen



Michael Kathke

Supraleitung, eine Einführung

<http://theory.gsi.de/vanhees/faq-pdf/supraleitung.pdf>



Uni München.

Vorlesung, Supraleitung.

http://www.physik.uni-muenchen.de/lehre/vorlesungen/sose_06/plvi/downloads/10_supraleit



www.nobelprize.org



<http://www.physik.fh-aachen.de/startseite/physik-fuer-informatik/praktikum/supraleiter00/10/>