

Supraleitung



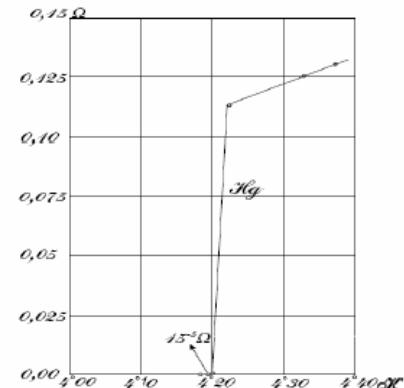
H.K. Onnes, Leiden: 1908 Helium verflüssigt

1911 Supraleitung entdeckt

Definition Supraleitung (sl):

Abfall des elektr. Widerstands bei Unterschreiten einer spezifischen kritischen Temperatur T_c auf unmessbar kleine Werte ($< 10^{-14}$)

SL weit verbreitet:



sl Phase:

- viele reine Elemente
- > 10 000 Legierungen, anorganische / organische Verbindungen (z.B. CuS, UPt₃, CeCuSi₂, ...), Halbleiter, Polymere, Gläser, Nanotubes,

keine sl:

- ferromagnetische Stoffe (Fe, Co, Ni)
- "gute" Normalleiter (Ag, Au, Cu, ...)

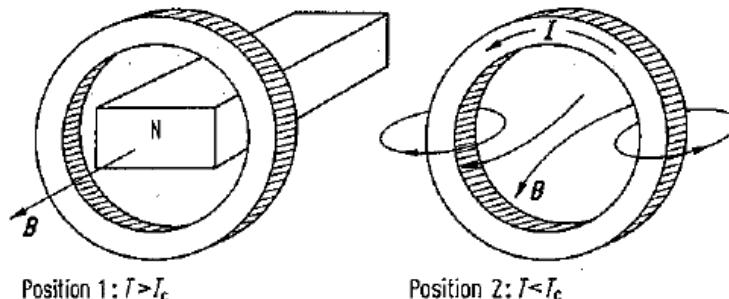
Supraleitung

Periodensystem mit Angabe Supraleitung bei Elementen unter Normalbedingungen als Dünnschicht / unter Druck

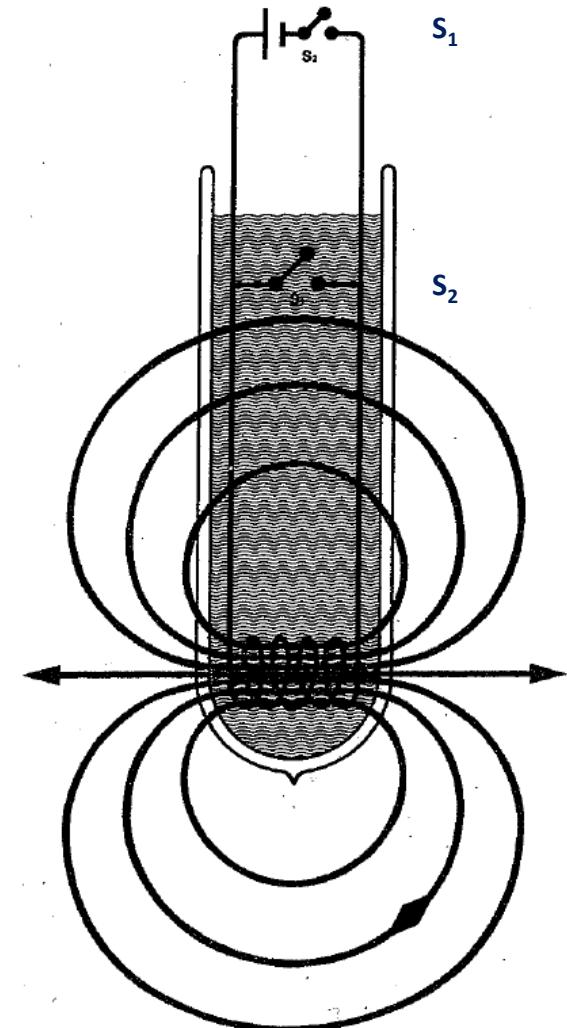
Supraleitung

direkte Widerstandsmessung schwierig (nl Zuleitungen etc.)

besser: geschlossener sl Stromkreis



induktiv erzeugter sl Ringstrom
(ungeschwächt über Wochen / Monate / Jahre...)



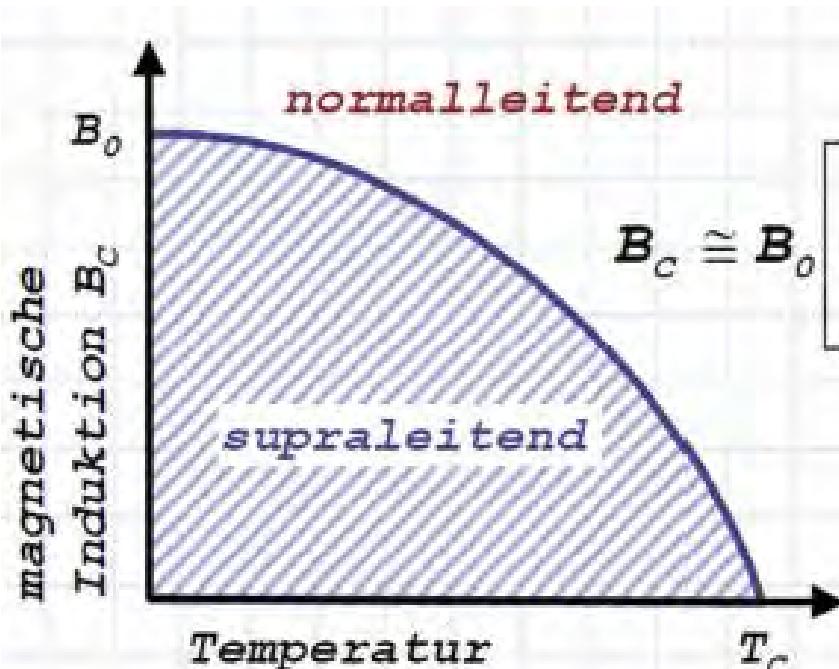
Stromkreis mit sl Kurzschluss-Schalter \Rightarrow

laden / entladen: S_1 geschlossen, S_2 offen

Dauerstrom: S_2 geschlossen, S_1 offen/demontiert

Detektion Stromfluss via erzeugtem Magnetfeld

Supraleitung



$$B_C \approx B_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

Kritische magnetische Induktion als Funktion der Temperatur definiert eine Grenzkurve, die die supraleitende Phase von der normal-leitenden trennt. Der Verlauf ist nahezu parabolisch.

Helmut Krauth, Hanau;
Prof. B. Büchner, IFW

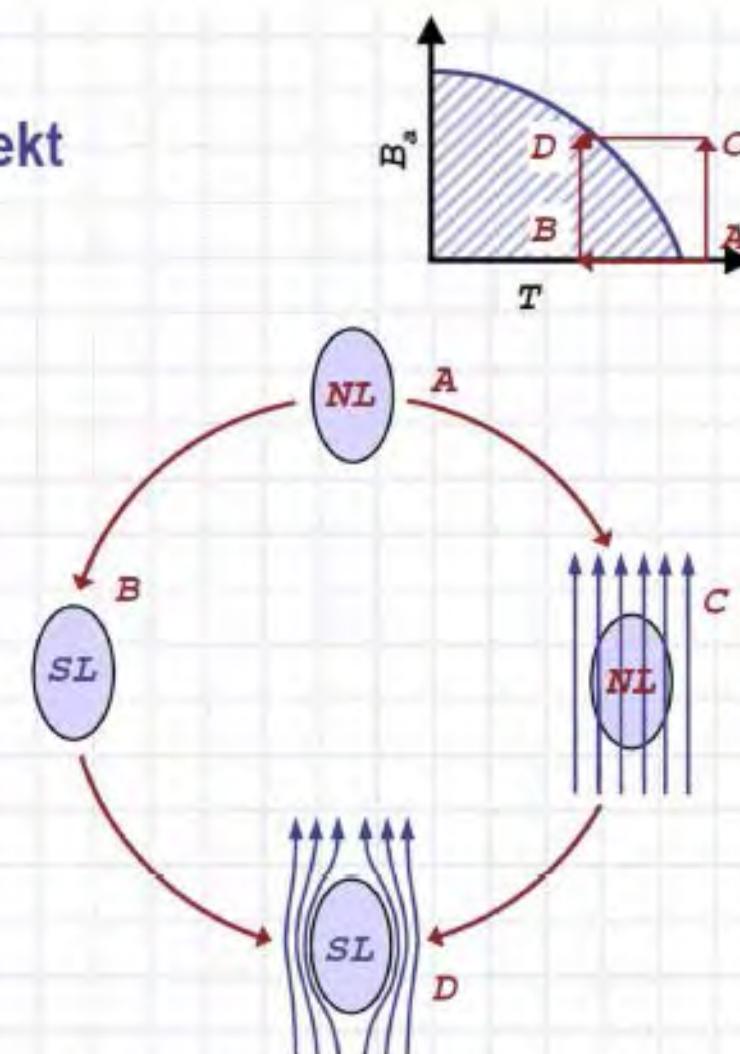
Supraleitung

Der Meissner-Ochsenfeld Effekt



1933 Walter Meissner und Robert Ochsenfeld entdecken in Berlin die fundamentale Eigenschaft der Supraleiter, die Verdrängung äußerer Magnetfelder (idealer Diamagnetismus)

Der supraleitende Zustand ist ein Zustand im Sinne der Thermodynamik, der Übergang zwischen Normalleitung und Supraleitung ist reversibel!



unabhängig von der Vorgeschichte ist das Innere eines Supraleiters feldfrei

Supraleitung

Fritz und Heinz London

1935 Fritz und Heinz London,
Elektromagnetische Theorie der Supraleitung
(bereits in Oxford)

Zwei-Flüssigkeits-Modell,
London-Eindringtiefe λ_L , Abschirmstrom,
Erklärung des Meissner-Ochsenfeld-Effektes,
Flussquantisierung



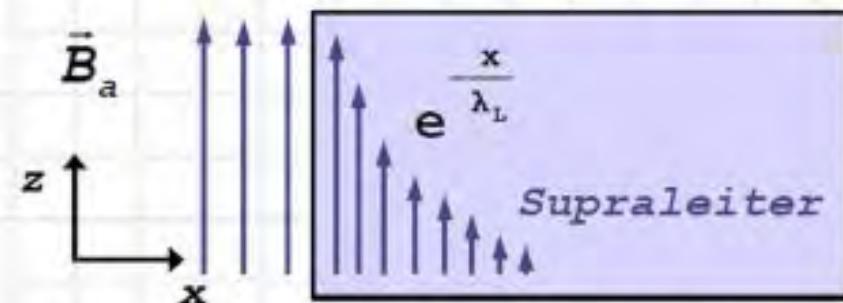
Fritz London
1900 – 1954

Heinz London
1907 – 1970

$$\vec{j}_N = \sigma_N \vec{E}$$

$$\partial_t \vec{j}_s = \frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \vec{E}$$

$$\text{rot} \vec{j}_s = -\frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \vec{B}$$

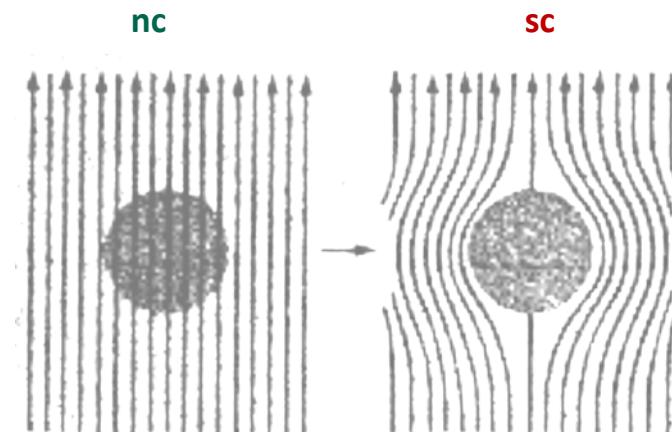


Elektrodynamische Begründung des Meissner-Ochsenfeld-Effektes. Magnetische Felder klingen im Supraleiter über die Eindringtiefe λ_L ab.

Supraleitung

Meißner-Ochsenfeld-Effekt:

Im sl Zustand werden äußere Magnetfelder vollständig aus dem sl Volumen verdrängt



SC Typ I	T_c (K)	$\mu_0 H_c$ (mT)
Hg	4,15	41,1
Pb	7,20	80,3
Al	1,2	

Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

sl durch zu hohes Magnetfeld unterdrückt
(auch durch selbsterregtes !)

kritische magnetische Flussdichte: $\mu_0 H_c = B_c$

$j_{\max} \approx 1 \text{ A/mm}^2 \Rightarrow$ technisch uninteressant

Supraleitung

Supraleiter 1. und 2. Art

1936 L. V. Shubnikov, V. I. Khotkevich, G. D. Shepelev, Yu. N. Ryabinin, Entdeckung der **Supraleiter 2. Art**

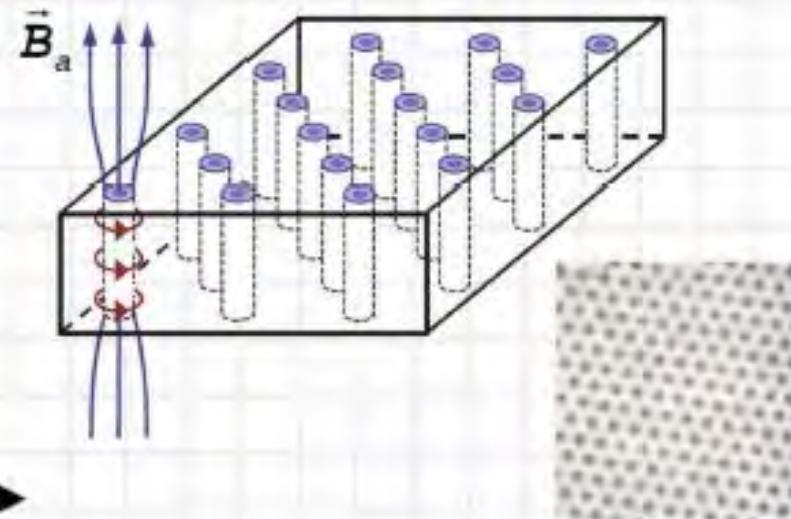
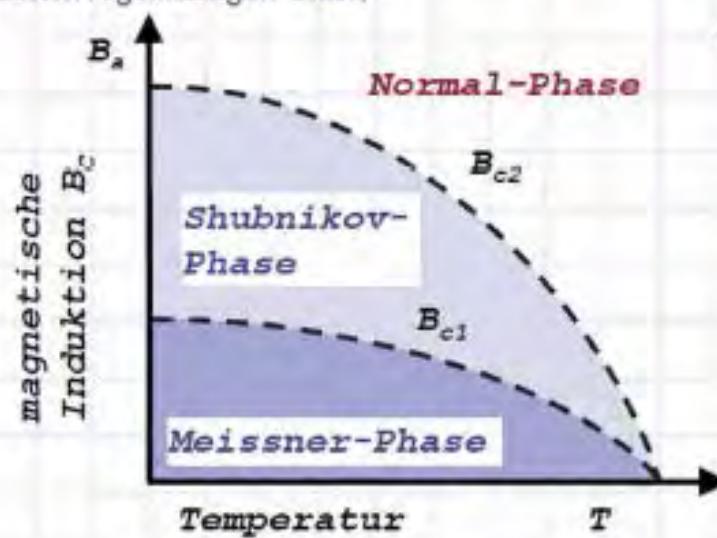


Shubnikov-Phase

1952/1957 A. A. Abrikosov, findet Lösung der Ginsburg-Landau-Gleichungen mit negativer Oberflächenenergie **magnetische Flussschläuche mit quantisiertem magnetischen Fluss** in einem regelmäßigen Gitter.

Lev V. Shubnikov
1901-1937?

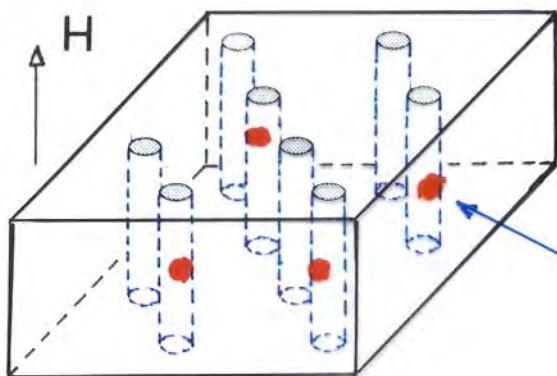
Alexei A. Abrikosov
* 1928



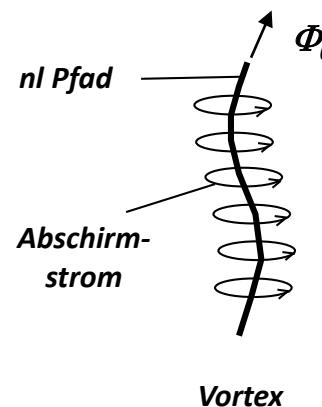
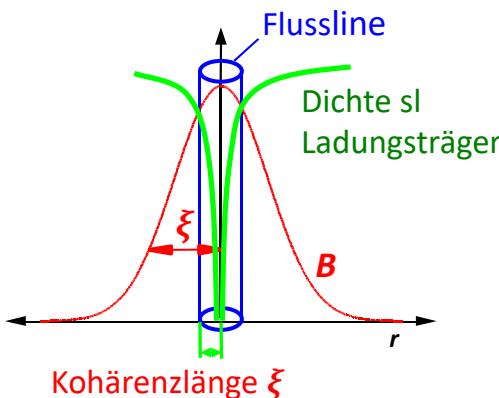
Supraleitung

Abhilfe: SL Typ II

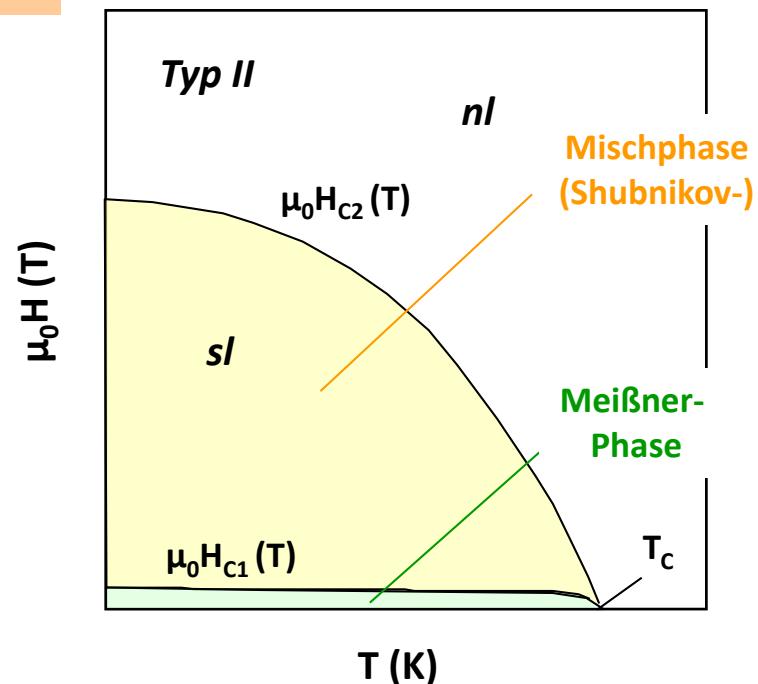
Magnetfeld wird durch nl Flußschläuche (Abrikosow-Schläuche) kanalisiert; zwischen oberem und unterem krit. Feld B_{c1}, B_{c2} zunehmende Flussschlauch-Dichte (Vortex-Zustand)



SL Typ III:
Flusslines zusätzlich an Pinning-Zentren fixiert;
 $j_{\max} \approx 10^5 \dots 10^7 \text{ A/mm}^2$



SL Typ II	T_c (K)	$\mu_0 H_{c2}$ (T)
Nb	9,3	0,3
Nb_3Sn	18,0	24,5
Nb_3Ge	23,2	38,0
Nb_3Al	18,7	26,3
$Ni_{0,6}Ti_{0,4}$	9,8	11,5



Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

Supraleitung

Geschichte der Supraleitung:

- ❖ **Die ersten Jahre (1911 – 1914): Entdeckung der Supraleitung, Nobelpreis f. H.-K. Onnes**
erste Begeisterung und schnelle Ernüchterung
- ❖ **45 Jahre “Denkpause” (1915 – 1961)**
Theoretisches Verständnis \Rightarrow 3 weitere Nobelpreise
Entdeckung Typ 2 – SL
Harte SL (Pinning der Fluß-Schläuche)
- ❖ **1961 – 2011: 50 Jahre Entwicklung konventionelle SL (metallisch, LTS)**
zweite Begeisterungswelle, Anwendungen Magnettechnik, Teilchenbeschleuniger
- ❖ **1987 – heute: 30 Jahre Entwicklung Hochtemperatur - SL (HTS);**
dritte Begeisterungswelle, Anwendungen in der Energietechnik (?)