

Supraleitung



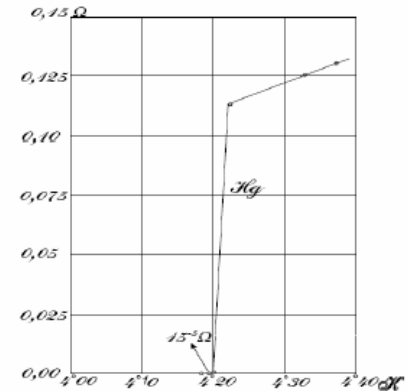
H.K. Onnes, Leiden: 1908 Helium verflüssigt

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:	keine sl:
<ul style="list-style-type: none"> ➤ viele reine Elemente ➤ > 10 000 Legierungen, anorganische / organische Verbindungen (z.B. CuS, UPt₃, CeCuSi₂, ...), Halbleiter, Polymere, Gläser, Nanotubes, 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ferromagnetische Stoffe (Fe, Co, Ni) ➤ "gute" Normalleiter (Ag, Au, Cu, ...)

Supraleitung

1	H																	2	He																		
3	Li	4	Be																	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne						
11	Na	12	Mg																	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar						
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr		
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe		
55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn		
87	Fr	88	Ra	89	Ac																																
						58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu				
						90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr				

Atomic number

Symbol

T_c of bulk under normal pressure

T_c under certain conditions

Condition type

Ca

15 K

150 GPa

Periodensystem mit Angabe Supraleitung bei Elementen

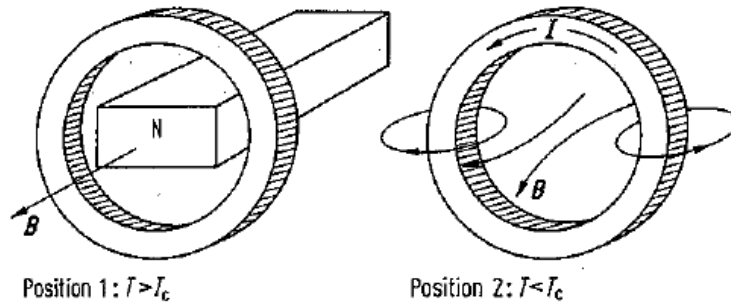
unter Normalbedingungen

als Dünnschicht / unter Druck

Supraleitung

direkte Widerstandsmessung schwierig (nl Zuleitungen etc.)

besser: geschlossener sl Stromkreis



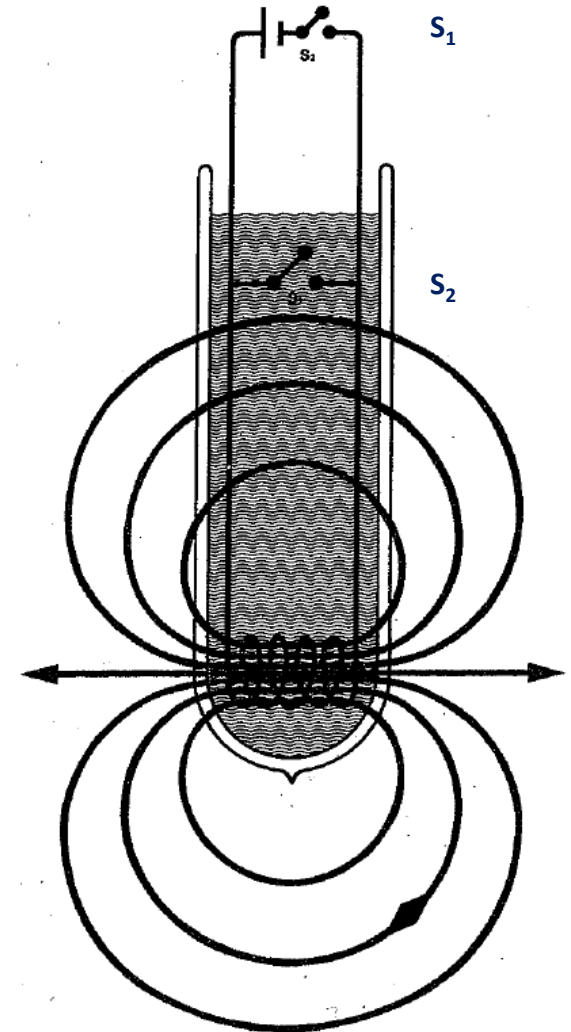
induktiv erzeugter sl Ringstrom
(ungeschwächt über Wochen / Monate / Jahre...)

Stromkreis mit sl Kurzschluss-Schalter \Rightarrow

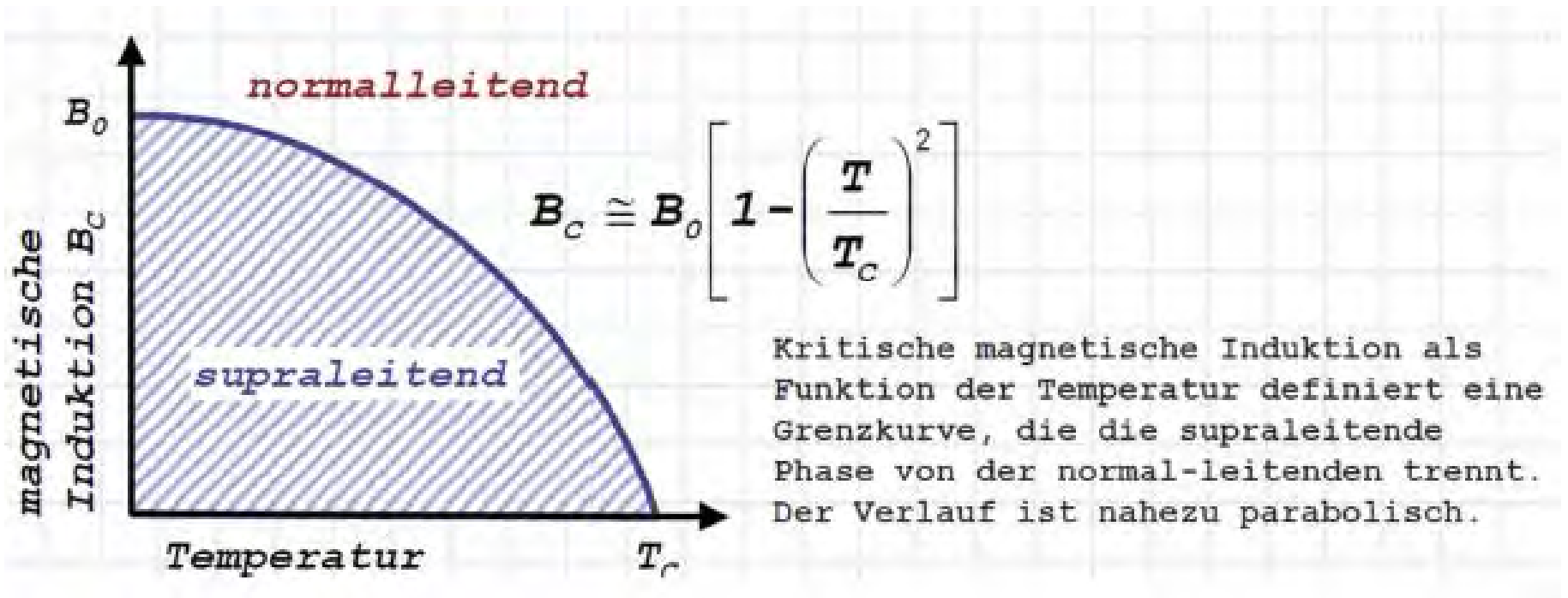
laden / entladen: S_1 geschlossen, S_2 offen

Dauerstrom: S_2 geschlossen, S_1 offen/demontiert

Detektion Stromfluss via erzeugtem Magnetfeld



Supraleitung



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

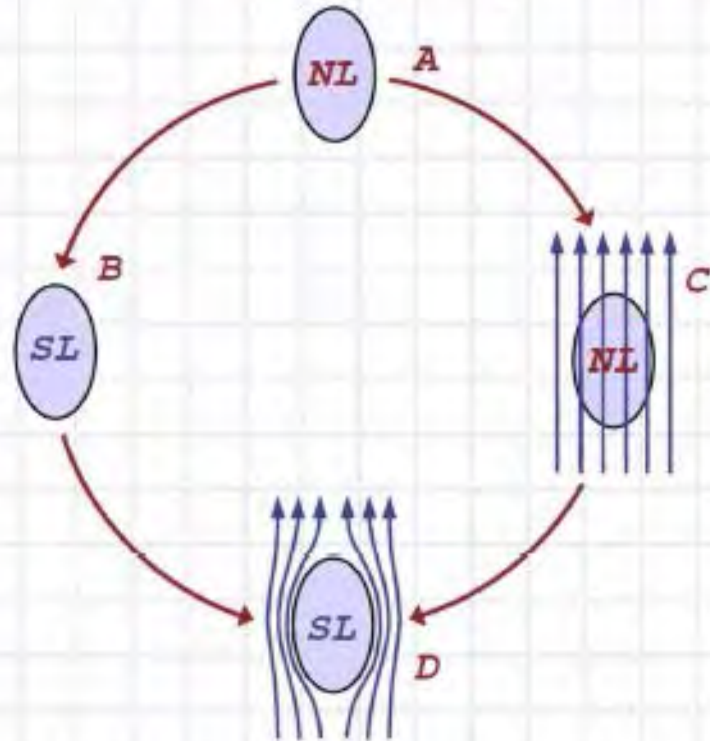
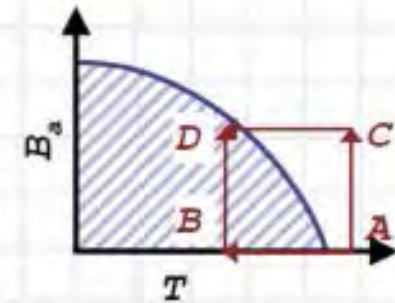
Supraleitung

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



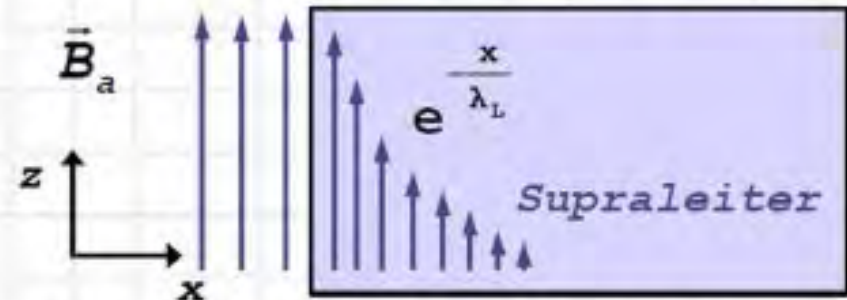
Fritz London
1900 – 1954

Heinz London
1907 – 1970

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

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

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

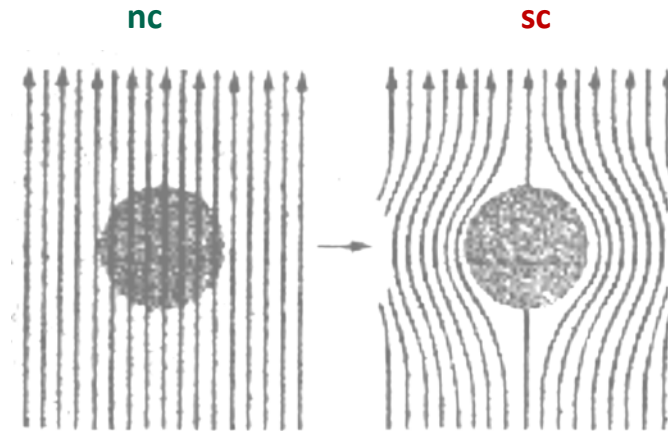


Elektrodynamische Begründung des Meissner-Ochsenfeld-Effektes. Magnetische Felder klingen im Supraleiter über die Eindringtiefe λ_L ab.

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

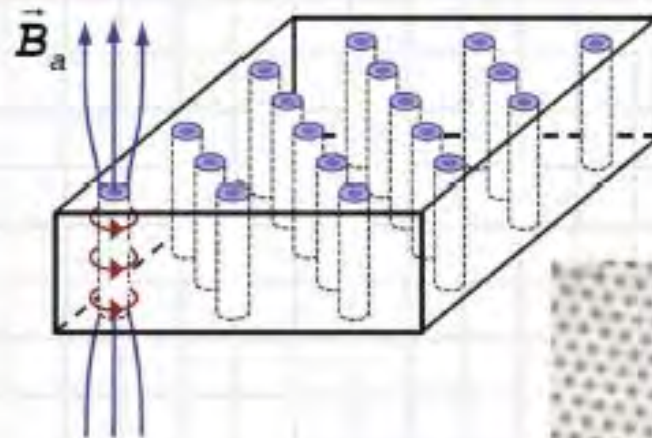
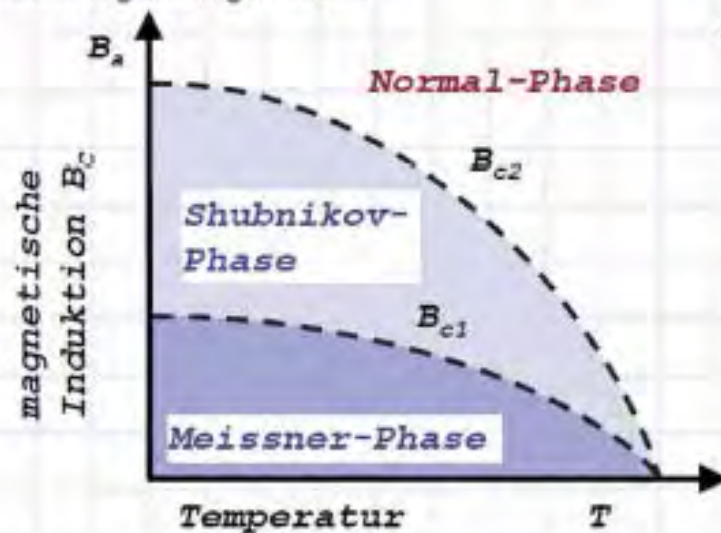
1952/1957 A. A. Abrikosov, findet Lösung der Ginsburg-Landau-Gleichungen mit negativer Oberflächenenergie **magnetische Flussschläuchen** mit **quantisiertem magnetischen Fluss** in einem regelmäßigen Gitter,



Lev V. Shubnikov
1901-1937?



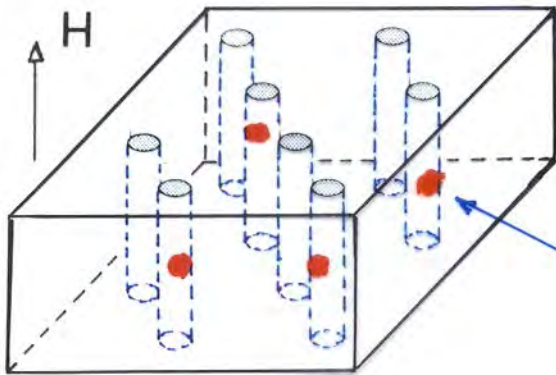
Alexei A. Abrikosov
* 1928



Supraleitung

Abhilfe: SL Typ II

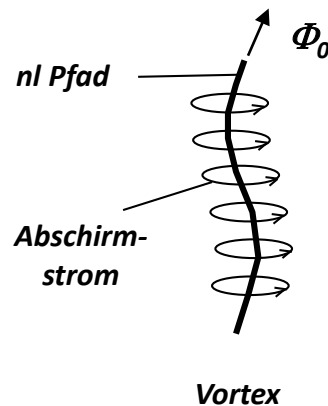
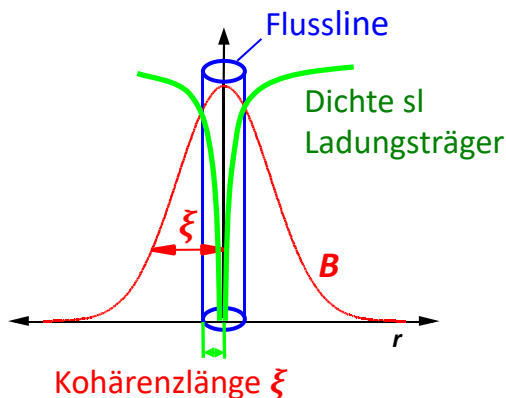
Magnetfeld wird durch nI Flußschläuche (Abrikosow-Schläuche) kanalisiert;
zwischen oberem und unterem krit. Feld B_{c1} , B_{c2} zunehmende
Flussschlauch-Dichte (Vortex-Zustand)



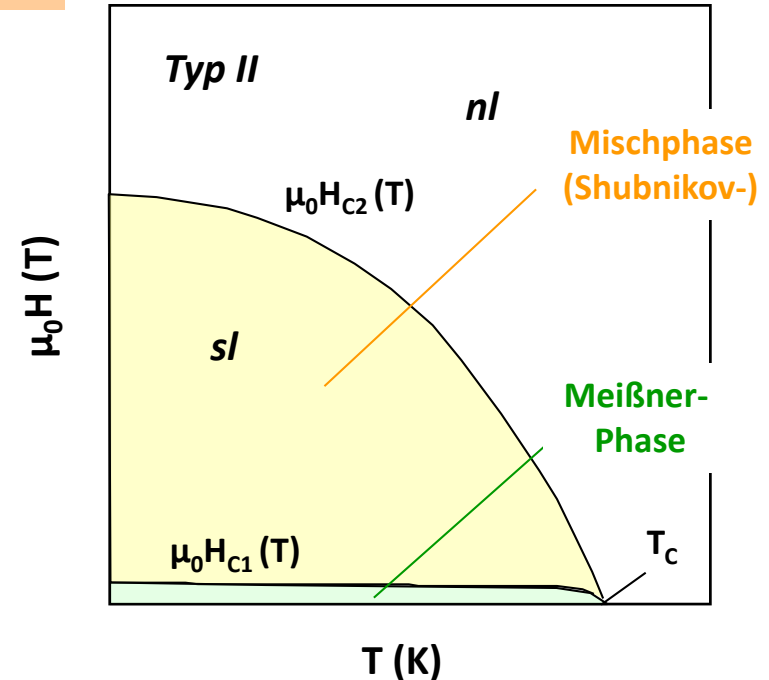
SL Typ III:

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 ₃ Sn	18,0	24,5
Nb ₃ Ge	23,2	38,0
Nb ₃ Al	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 (?)