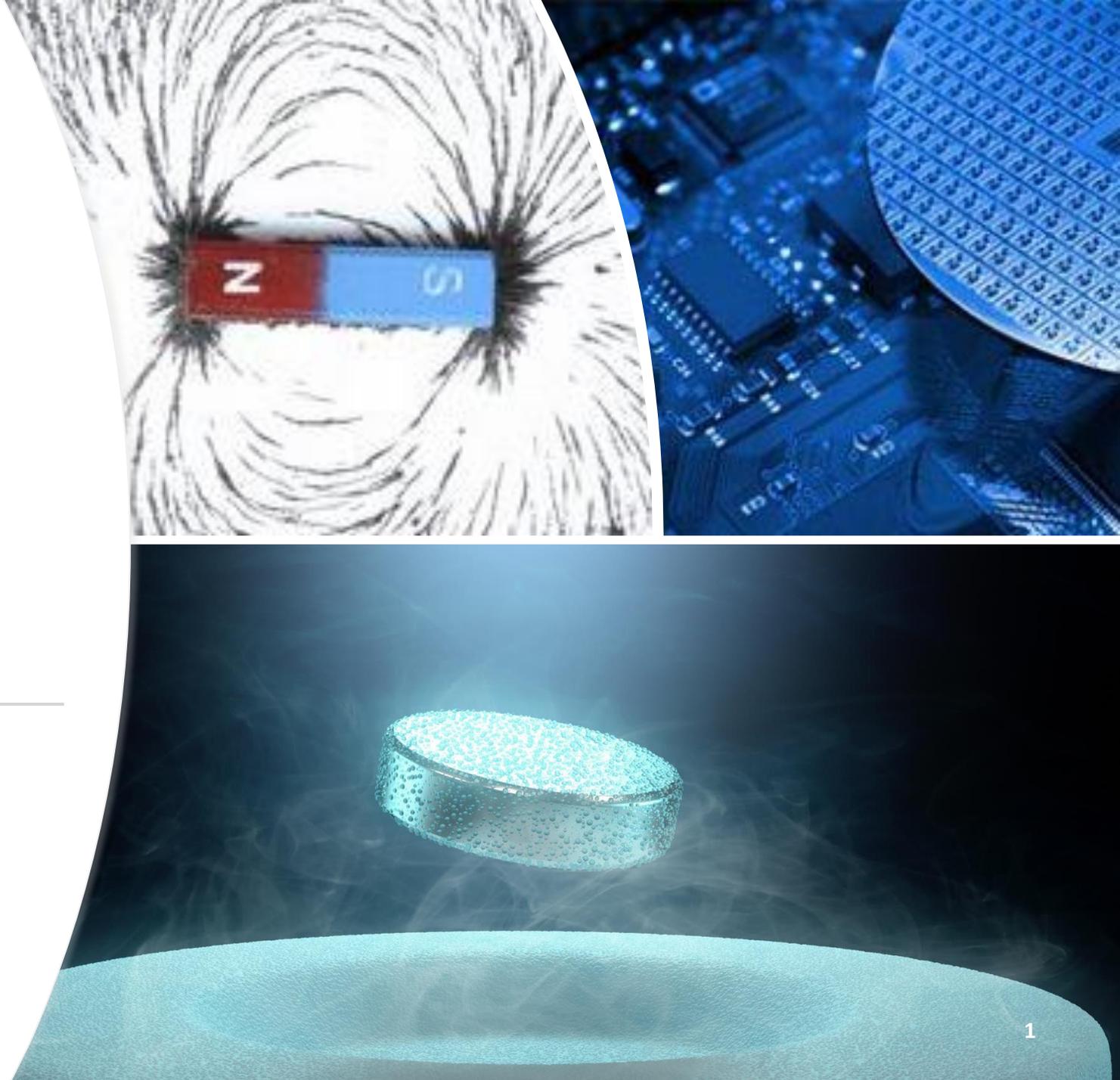




Moderne Experimentalphysik III

*Experimentelle
Festkörperphysik*

M-PHYS-106295, SoSe 2024



Ein Blick ins Modulhandbuch

M 4.39 Modul: Moderne Experimentalphysik III, Experimentelle Festkörperphysik [M-PHYS-106295]

Verantwortung: Studiendekan Physik
Einrichtung: KIT-Fakultät für Physik
Bestandteil von: Moderne Experimentalphysik (ab 01.04.2023) (Wahl Moderne Experimentalphysik III)

Leistungspunkte	Notenskala	Turnus	Dauer	Sprache	Level	Version
6	best./nicht best.	Jedes Sommersemester	1 Semester	Deutsch	3	1

Pflichtbestandteile		
T-PHYS-112764	Moderne Experimentalphysik III, Experimentelle Festkörperphysik	6 LP

Erfolgskontrolle(n)
Siehe Bestandteile dieses Moduls.

Qualifikationsziele
Der/die Studierende erlangt einführendes Verständnis zur modernen Festkörperphysik und kann physikalische Probleme aus diesem Gebiet selbständig bearbeiten.

Inhalt

- Dielektrische Eigenschaften von Isolatoren
- Halbleiter
- p-n-Übergang
- Niedrigdimensionale Elektronensysteme
- 1D- und 2D-Elektronengas
- Quanten-Hall Effekt
- Magnetische Eigenschaften
- Magnetismus der Leitungselektronen.
- Atomarer Magnetismus
- Magnetische Wechselwirkungen
- Ferro- und Antiferromagnetismus
- Grundbegriffe der Supraleitung
- London-Gleichungen
- Cooper-Paare
- Supraleiter 1. und 2. Art
- Josephson-Effekte

Anmerkungen
Die Veranstaltungen dieses Moduls werden im Sommersemester 2024 zum ersten Mal angeboten.

Arbeitsaufwand
180 Stunden bestehend aus Präsenzzeiten (60), Nachbereitung der Vorlesung und Vorbereitung der Übungen (120)

Empfehlungen
Moderne Experimentalphysik I und II

Inhalt

- Dielektrische Eigenschaften von Isolatoren
- Halbleiter
- p-n-Übergang
- Niedrigdimensionale Elektronensysteme
- 1D- und 2D-Elektronengas
- Quanten-Hall Effekt
- Magnetische Eigenschaften
- Magnetismus der Leitungselektronen.
- Atomarer Magnetismus
- Magnetische Wechselwirkungen
- Ferro- und Antiferromagnetismus
- Grundbegriffe der Supraleitung
- London-Gleichungen
- Cooper-Paare
- Supraleiter 1. und 2. Art
- Josephson-Effekte

Arbeitsaufwand

180 Stunden bestehend aus Präsenzzeiten (60), Nachbereitung der Vorlesung und Vorbereitung der Übungen (120)

~8.5 h pro Woche

Inhalt

- Supraleitung (4 Vorlesungen)
- Magnetismus (5 Vorlesungen)
- Halbleiterphysik (4 Vorlesungen)
- Wiederholung + Bonus (1 Vorlesung)

**Dienstags: 11:30 Uhr – 13:00 Uhr,
30.22 Otto-Lehmann-Hörsaal**

Mod. Th. Phys. III

- Phasenübergänge: wechselwirkende Gase, Heisenberg- und Ising-Modell, Landau-Freie-Energie-Funktional (Molekularfeldnäherung, Fluktuationen), kritische Exponenten und Universalitätsklassen
- Wechselwirkungen in Quanten-Vielteilchenphysik, Formalismus der zweiten Quantisierung
- Suprafluide: verdünnte wechselwirkende Bosonen, Goldstone-Moden
- Supraleiter: Ginzburg-Landau-Theorie, Meißner-Effekt und der Anderson-Higgs-Mechanismus
- Jenseits des thermischen Gleichgewichts: Fluktuations-Dissipations-Theorem, stochastische Prozesse, Master-Gleichung, Fokker-Planck- und Langevin-Beschreibung
- Boltzmann-Transport-Theorie: elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit, thermoelektrische Effekte, Magnetotransport, Hydrodynamik

Inhalt

- Dielektrische Eigenschaften von Isolatoren
- Halbleiter
- p-n-Übergang
- Niedrigdimensionale Elektronensysteme
- 1D- und 2D-Elektronengas
- Quanten-Hall Effekt
- Magnetische Eigenschaften
- Magnetismus der Leitungselektronen.
- Atomarer Magnetismus
- Magnetische Wechselwirkungen
- Ferro- und Antiferromagnetismus
- Grundbegriffe der Supraleitung
- London-Gleichungen
- Cooper-Paare
- Supraleiter 1. und 2. Art
- Josephson-Effekte

Festkörper- oder Astroteilchen?

- Sie können, wenn Sie mögen beide Vorlesungen, hören

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Sommersemester 2024 finden ja zum ersten Mal die Wahlangebote in Mod. Experimentalphysik III und Mod. Theor. Physik III statt.

Studierende müssen in ihrem Studiengang eine Wahl treffen, welchen Kurs sie in ihrem Curriculum im BSc-Physik absolvieren möchten.

Mit dieser Mail möchte ich Sie als Dozierende informieren, dass **Studierende bei Interesse auch beide MEP-Kurse oder beide MTP-Kurse absolvieren können.**

Sie können die Studierenden auch gerne darauf hinweisen.

Um die Leistung des "zweiten" Kurses belegbar zu machen, sind alle Module nochmals zusätzlich in den wählbaren Zusatzleistungen verankert und können dort durch die Studierenden gewählt werden.

Für Sie als Dozierende stellt dies kein Mehraufwand in der Verwaltung dar, da alle Prüfungsanmeldungen unabhängig von der curricularen Verankerung (regulärer Studienplan oder Zusatzleistung) immer in genau das eine Prüfungsobjekt eingehen, das Sie ohnehin bearbeiten.

Freundliche Grüße
Achim Mildenberger

Prüfung

- Unbenotet
- Prüfungsleistung ist die bestandene Übung
- Sie müssen sich trotzdem für die Prüfung anmelden

Abmeldebeginn: 11.04.2024 00:00

Abmeldeschluss: 26.07.2024 23:59

Übungsgruppen

Übungsleitung: TTProf. Dr. Philip Willke

Termine:

Donnerstags, 14.00 Uhr, 15.45 Uhr oder 17.30 Uhr

Beginn:

Erste Übung am Donnerstag, den 18. April 2024 (kurze Auftaktbesprechung)

ILIAS (alle Informationen zur Vorlesung und zur Übung):

Anmeldung ab jetzt möglich über SignMeUp: <https://plus.campus.kit.edu/signmeup/go/kVTy4r>

Bis Mittwoch (MORGEN), **17.4.2024, 16:00**

- Eine spätere Anmeldung zur Übung oder ein Wechsel der Übungsgruppe nach der endgültigen Einteilung ist nur nach Rücksprache mit der Übungsleitung möglich.

Übungsgruppen

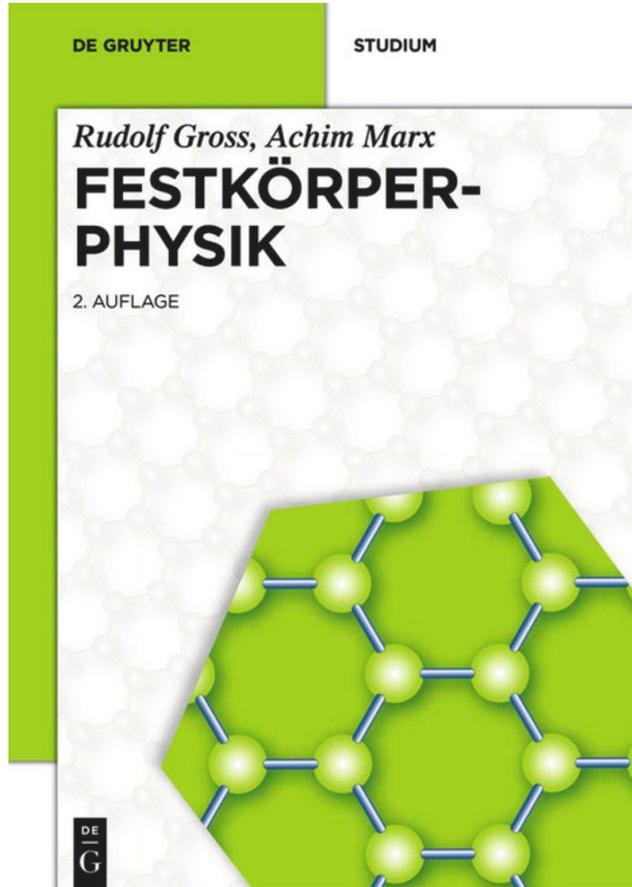
- Es gibt ungefähr gleich viele Übungen wie Vorlesungen
- Aufgaben in den Übungen dienen der Wiederholung und selbstständig erarbeiteten Themen neben der Vorlesung
- **Übungsblätter** bestehen aus
 1. Quiz/Wiederholungs-Übungsaufgaben (wie im letzten Semester, nur als Übungsaufgabe, relative einfach)
 2. Übungsaufgaben, die ein neues Thema erarbeiten
 3. Standard-Übungsaufgaben (Herleitungen/Rechnen)
- Kurzvorträgen (Wie in Mod. Phys. II, 1-2 mal im Semester)

Scheinvergabe

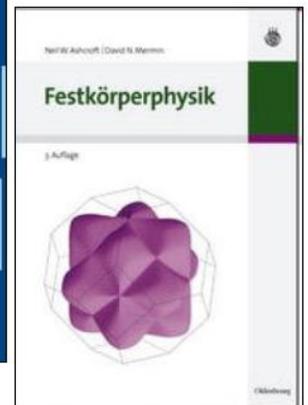
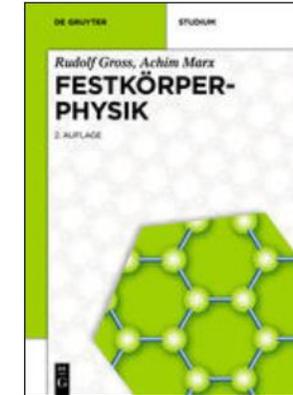
- Ausgabe der Aufgaben jeweils Mittwochs ca. 13h auf ILIAS (in der Veranstaltung der Vorlesung)
- In der Übung ankreuzen, welche Aufgaben Sie erklären/rechnen können (Vertrauensbasis!)
- **Leistung 1:** 50% der Gesamtpunktzahl der Aufgaben müssen vollbracht/angekreuzt werden (Bearbeitete Teilaufgaben werden anteilig bewertet) in der 1. und 2. Semesterhälfte (Übung 1-5 und 6-11)
- **Vertrauensbasis:** Wenn Sie ankreuzen, aufgerufen werden, aber nicht vorrechnen können, wird Ihnen das komplette Übungsblatt gestrichen (Beim 1. Mal). Beim zweiten Mal mehr...
- Besprechung der Aufgaben in den Übungsgruppen. **Leistung 2: Mind.** einmal vorrechnen.
- **Leistung 3:** Kurze Präsentation eines Vorlesungsthemas (ca. 1x, zwei Themen auf jedem Übungsblatt, Dauer ca. 15 Min.)
- Nebeneffekt: Sie können in Teams die Übungen bearbeiten. Es zählt nur, dass jeder die Übung eigenständig vorstellen kann.

Literatur

■ Gross & Marx



- **R. Gross, A. Marx**
Festkörperphysik
Oldenbourg-Verlag 2014 (2. Auflage)
- **S. Hunklinger**
Festkörperphysik
Oldenburg-Verlag 2009 (2. Auflage)
- **C. Kittel**
Einführung in die Festkörperphysik
Oldenbourg-Verlag 2005 (14. Auflage)
- **N. W. Ashcroft, N. D. Mermin**
Festkörperphysik
Oldenbourg-Verlag 2005 (3. Auflage)



Supraleitung

■ 1 Supraleitung

VL 1

- Historisches, Anwendungen, Phasendiagramm (SL 1. + 2. Art)
- Meissner Effekt
- Magnetische Flußquantisierung

VL 2

- London'sche Eindringtiefe
- Ginzburg Landau Theorie

VL 3

- Mikroskopische Theorie der Supraleitung, BCS

VL 4

- Josephson Effekt

Lernziele

- Historie und Anwendungen der Supraleitung
- Temperatur-Abhängige Widerstände
- Meissner Effekt
- Magnetische Flußquantisierung

1.1 Einführung: Historie der Supraleitung

Entdeckung und Erklärung der Phänomene Supraleitung & Suprafluidität wurden mit vielen Nobelpreisen ausgezeichnet

- **1908**: Verflüssigung von Helium, 4.2 K (**Kamerlingh Onnes**)
- **1911**: Entdeckung der Supraleitung (**Kamerlingh Onnes**)
- **1933**: Meißner-Ochsenfeld-Effekt (Meißner & Ochsenfeld)
- **1935**: London Theorie (phänomenologische Beschreibung der SL (Fritz & Heinz London))
- **1936**: Typ-II Supraleitung (Shubnikov)
- **1939**: Entdeckung von suprafluidem ^4He (**Kapitza**, Allen & Misener)
- **1952**: Ginzburg-Landau-Theorie (**Ginzburg & Landau**)
- **1957**: Abrikosov-Theory für Typ-II SL (**Abrikosov**)
- **1957**: BCS Theorie (**Bardeen, Cooper & Schrieffer**)
- **1961**: Entdeckung der Fluss-Quantisierung (Doll & Näbauer, Deaver & Fairbank)
- **1962**: Vorhersage von Cooper-Paar Tunneln: Josephson-Effekt (**Josephson, Giaever**)
- **1966**: Entwicklung von supraleitenden Quanteninterferometern (Clarke)
- **1971**: Entdeckung von suprafluidem ^3He (**Lee, Richardson & Osheroff**)
- **1975**: Theoretische Beschreibung von ^3He (**Leggett**)
- **1979**: Entdeckung der Schwere-Fermionen-Supraleiter (Steglich)
- **1981**: Entdeckung der organischen Supraleiter (Bechgaard)
- **1986**: Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (**Bednorz & Müller**)
- **2006**: Entdeckung der FeAs-Supraleiter (Hosono)

1.1 Einführung: Historie der Supraleitung



Heike Kamerlingh
Onnes (1853-1926)

Neue Experimente unter extremen Bedingungen
→ Neue Phänomene

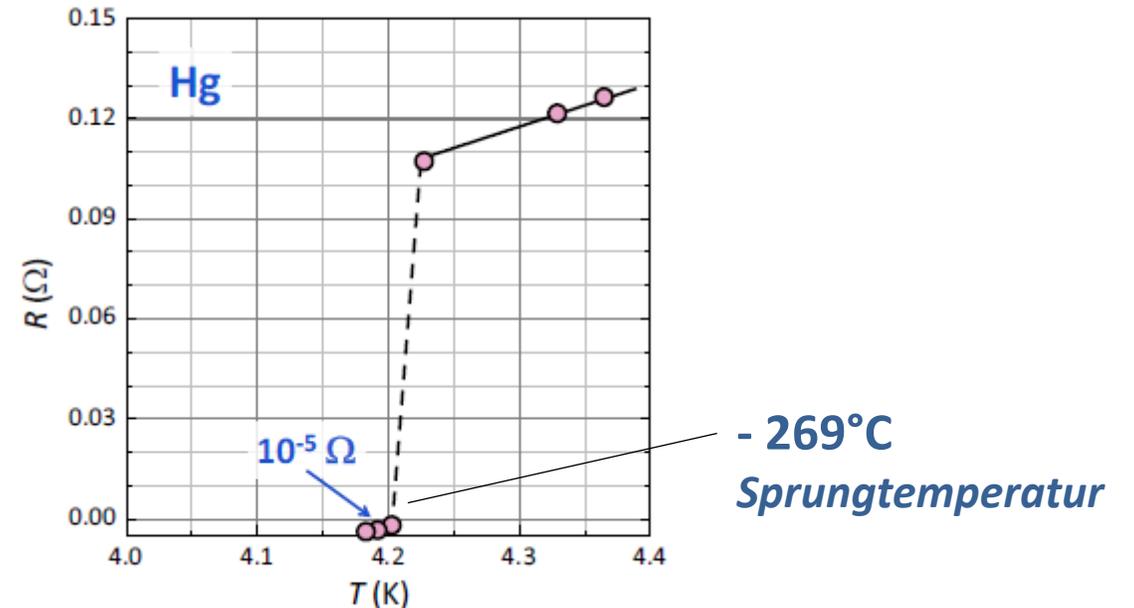
Verflüssigung von Gasen:

- H₂ (20 K)
- Ne (27 K)
- N₂ (77 K)

- Heliumverflüssigung: 1908 (4,2 K)
- Entdeckung der Supraleitung: 1911

Elektrischer Widerstand Quecksilber

- Vorher war unklar, wie sich Widerstand von Metallen bei tiefen Temperaturen verhält



Namensgebung: *unendlich hohe Leitfähigkeit*

→ **Supraleitung**

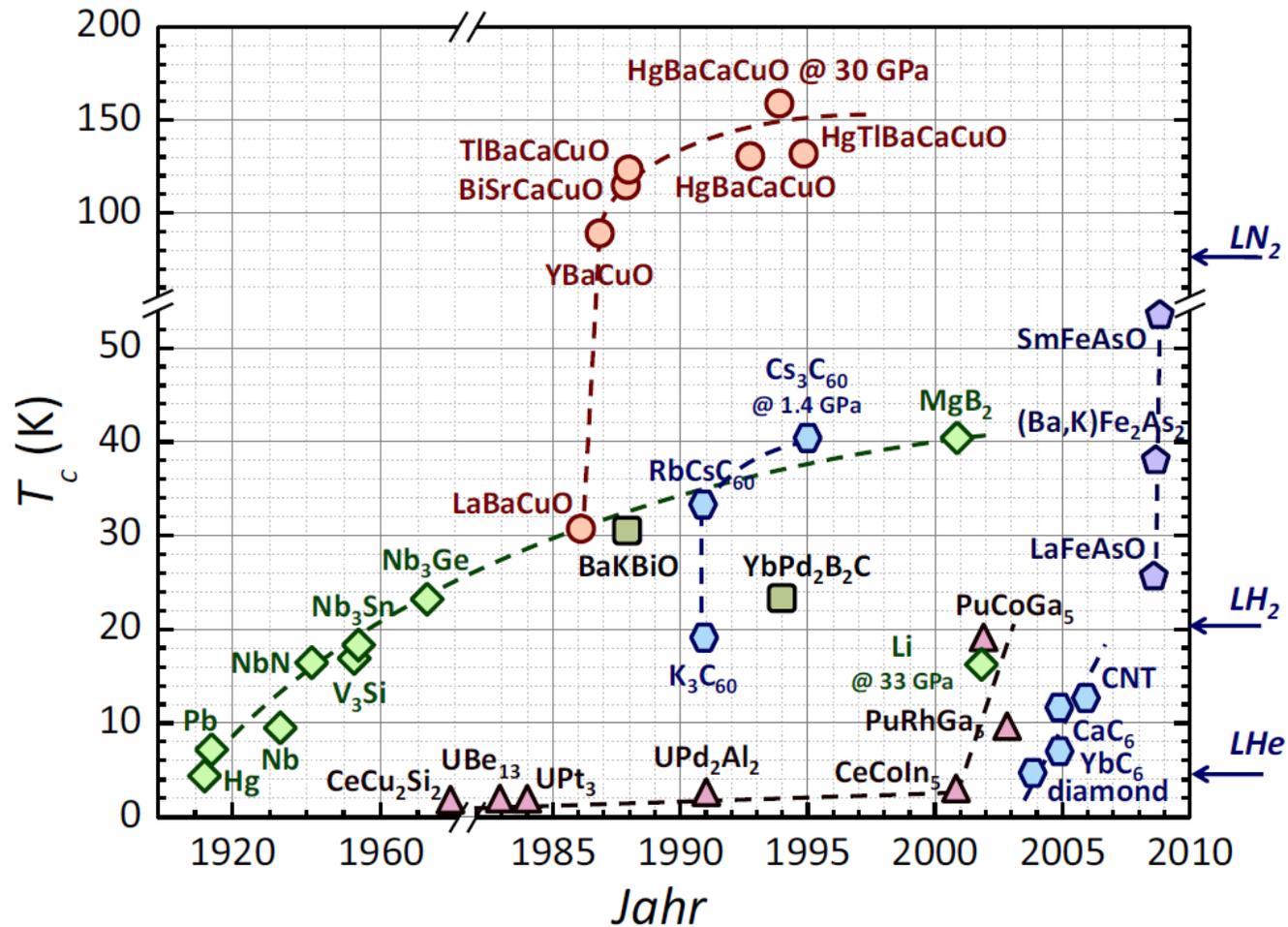
1.1 Einführung: Supraleitende Elemente

30 Elemente werden supraleitend + 23 unter Druck

supraleitend bei $p = 1 \text{ bar}$		supraleitend bei $p \gg 1 \text{ bar}$		nichtsupleitend		magnetisch ordnend	
¹ H							
³ Li	⁴ Be						
	20	0.03					
¹¹ Na	¹² Mg						
¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe
	15	0.35	0.4	5.3			2.0
³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru
	4.0	2.7	0.55	9.2	0.923	7.8	0.5
							320 μK
⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ La	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os
	5.1	5.9	0.16	4.4	0.01	1.7	0.65
⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm
			1.7				
			⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu
			1.37	1.3	0.2		0.8

Metall	T _c (K)	H _c (mT)	Jahr
Al	1,2	10,5	1933
In	3,4	28	
Sn	3,7	30,5	
Pb	7,2	80,5	1913
Nb	9,2	206	1930
NbN	15	14 T	1940
Nb ₃ Ge	23	37 T	1971
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₄ O ₈	140	?	1993

1.1 Einführung: Sprungtemperaturen



Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (1986)



Karl Alexander Müller

J. Georg Bednorz

Nobelpreis für Physik 1987

"for their important break-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials"

https://en.wikipedia.org/wiki/Woodstock_of_physics

1.1 Einführung: Anwendungen

- Magnetische Felder $\sim 20 \text{ T}$ (Erdfeld $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$)
- Stromzuleitungen
- Magnetische Felddetektoren SQUID
- Photonen und Teilchen-Zähler
- Quantencomputer

Supraleiter-Teststrecke AmpaCity

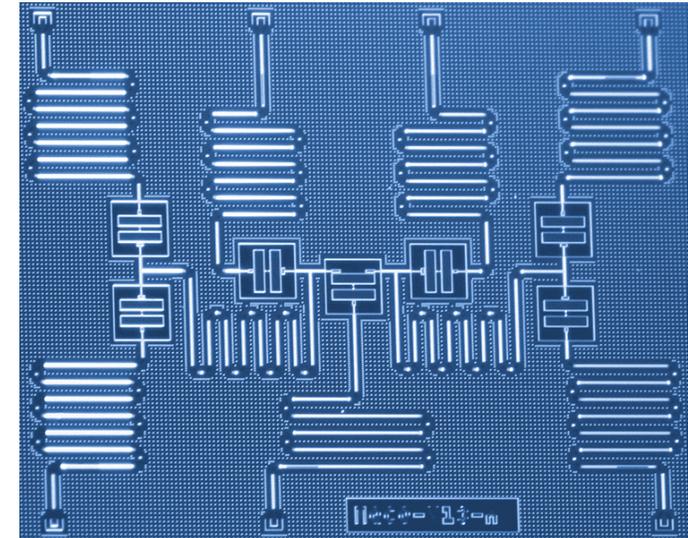


https://www.klimaexpo.nrw/supraleiter_ampacity#:~:text=2014%20sorgte%20innogy%20f%C3%BCr%20eine,einem%20Kilometer%20nahezu%20verlustfrei%20Strom.

Hohe Magnetfelder

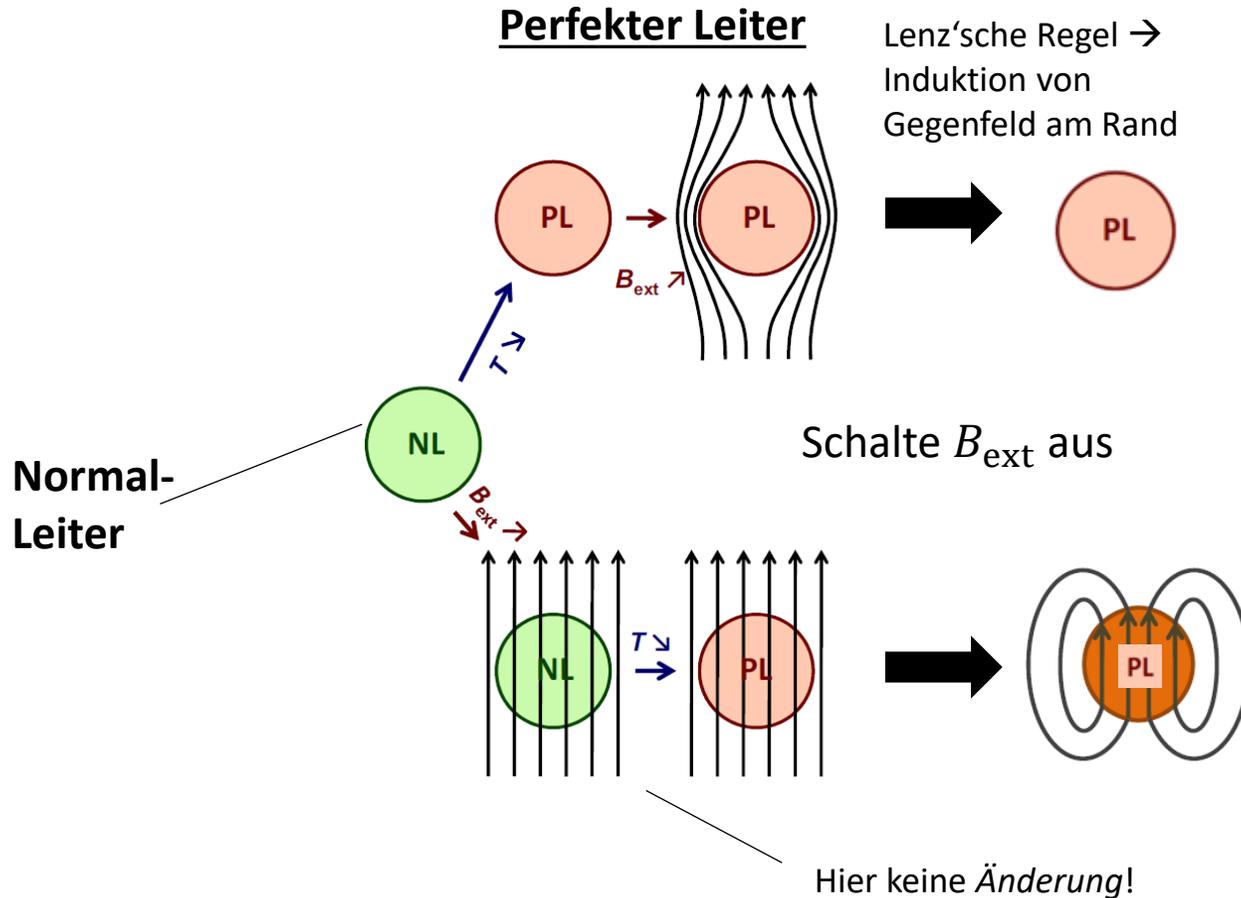


Supraleitende Quantum Bits



1.2. Meissner Effekt

- **1933:** Walther Meissner und Robert Ochsenfeld: perfekte Feldverdrängung
- Ist ein Supraleiter ein „nur ein idealer Leiter“?
- Gedankenexperiment: *Perfekter Diamagnetismus*



Induktionsgesetz

$$-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E}$$

Ohmschen Gesetz

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

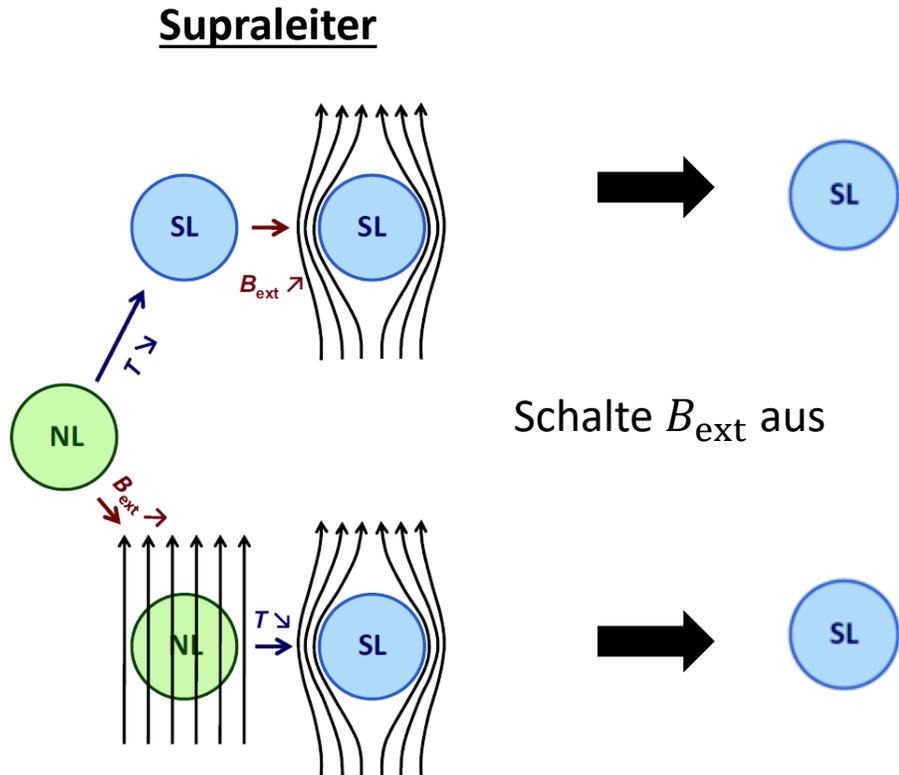
$$\sigma = \infty \Rightarrow \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

→ im Inneren eines perfekten Leiters ändert sich die magnetische Flussdichte nicht

→ dauerhafter Kreisstrom in einer dünnen Oberflächenschicht (Lenz'sche Regel)

→ Wegabhängiger Endzustand des perfekten Leiters

1.2. Meissner Effekt



- Ein Supraleiter verdrängt also nicht nur wie ein perfekter Leiter zeitlich veränderliche Felder aus seinem Inneren, sondern auch zeitlich konstante Felder.

Im Inneren des Supraleiters gilt: $\mathbf{B} = 0$

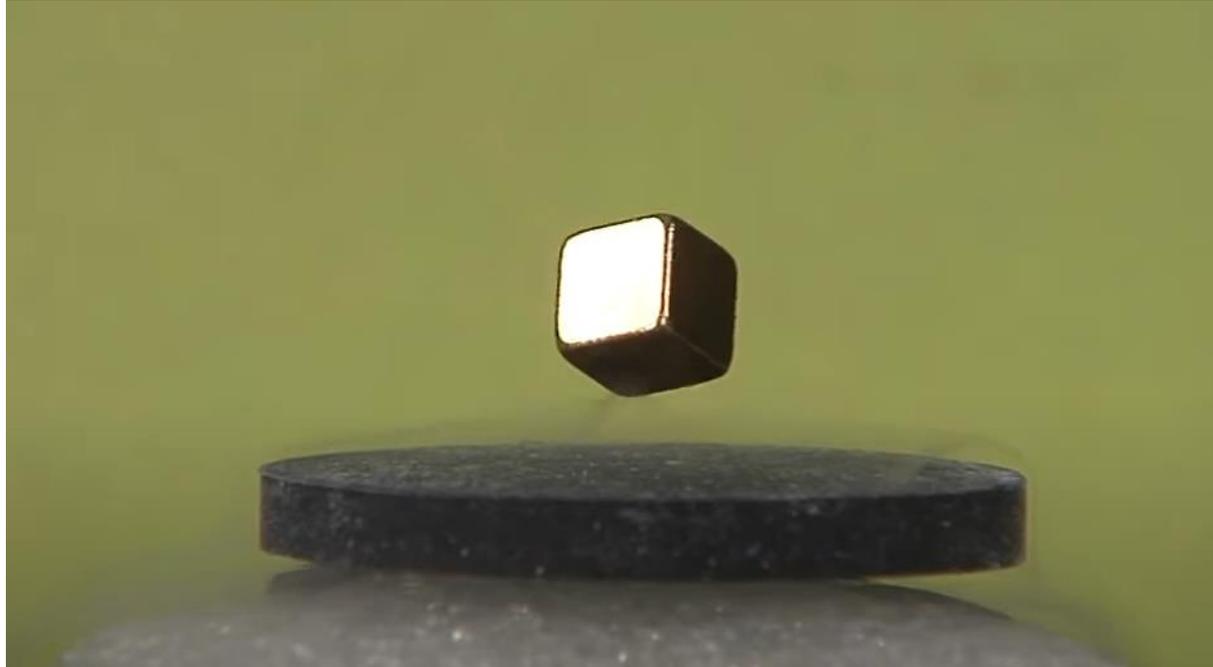


Weg-unabhängiger
Endzustand des
perfekten Leiters



Supraleitung ist eine
Thermodynamische Phase

1.2. Meissner Effekt



<https://www.youtube.com/watch?v=ASAvF60tdnE>

1.2. Meissner Effekt

- Ein Supraleiter zeigt sich also nicht nur als idealer Leiter, sondern darüber hinaus auch als idealer Diamagnet.
- Induktion von Abschirmströmen
→ Feldausstoßung /Feldverdrängung
- Im Inneren eines Supraleiters ist sowohl \mathbf{j} als auch \mathbf{B} gleich null

$$B_i = \mu_0(H_{ext} + M) = 0$$

$$M = \chi H_{ext}$$

$$\chi = -1$$

H_{ext} : Externes Feld

M : Magnetisierung

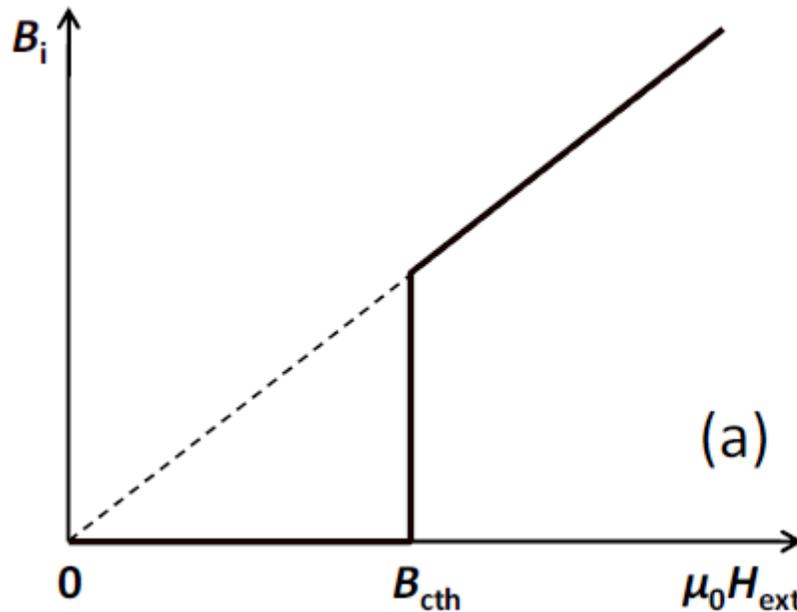
$H_c = H_c/\mu_0$: kritische Feldstärke

1.3. kritisches Magnetfeld

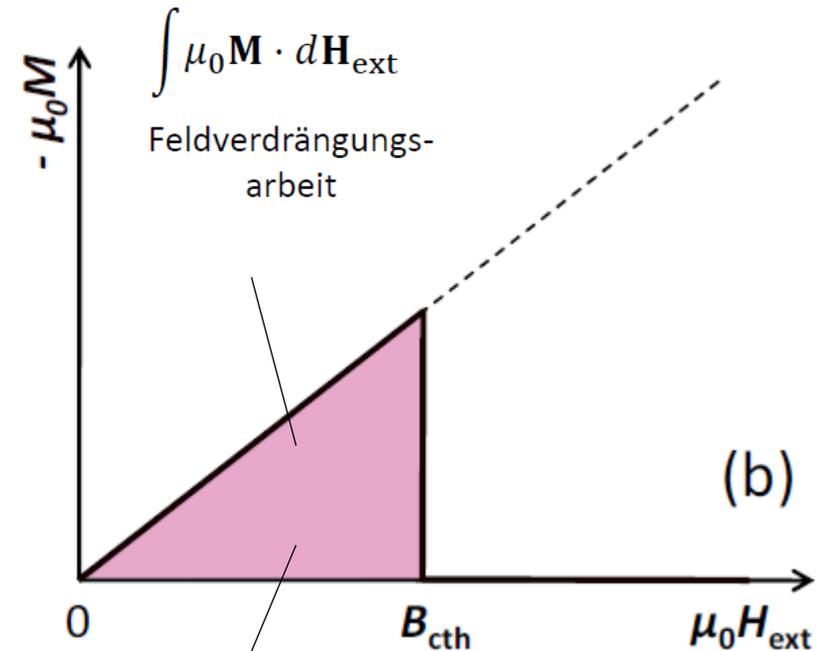
- perfekter Diamagnetismus existiert nur bis zu T-abhängigem kritischem Feld $B_{\text{cth}}(T)$ (falls nicht könnte unendlich hohe Abschirmung geben...)

Meißner & Ochsenfeld:

$$B_i = 0$$
$$M = -H_{\text{ext}}$$



(a)



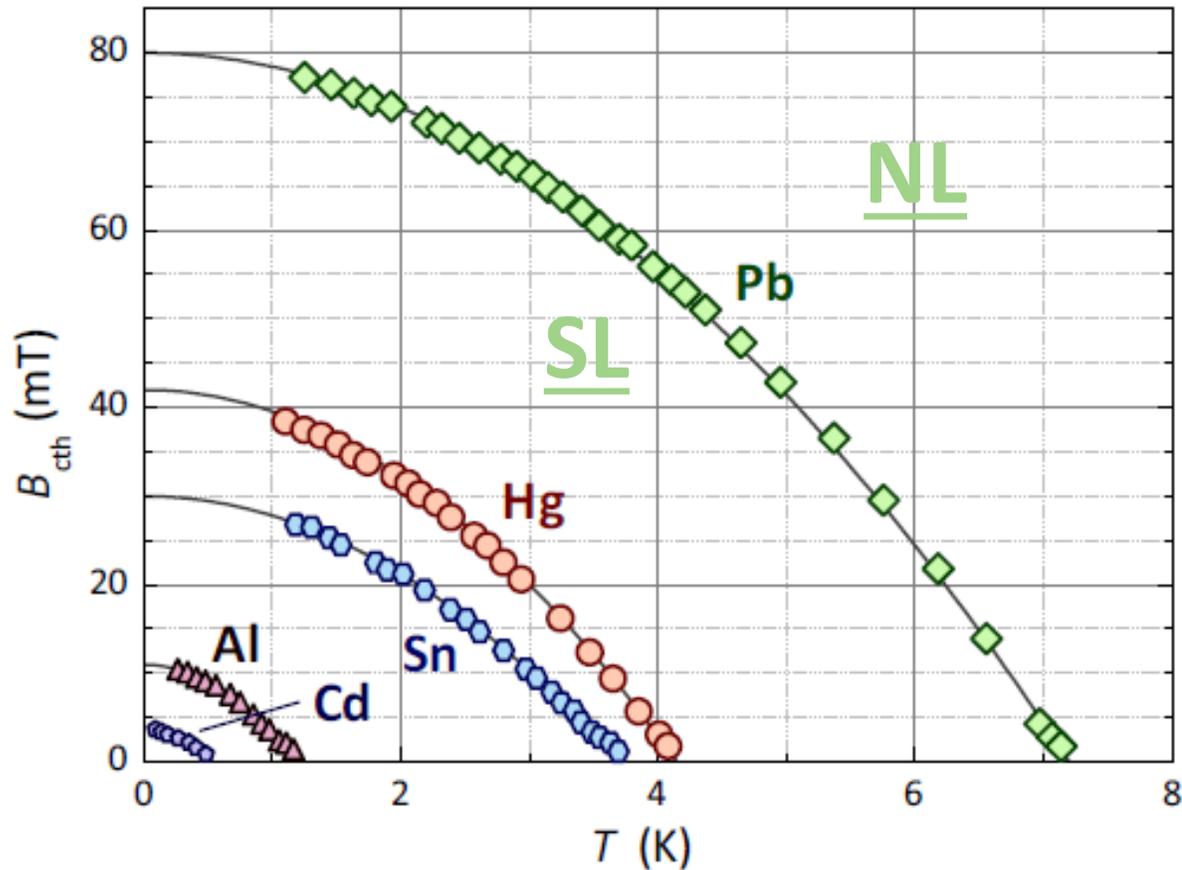
(b)

Meissner-Phase

- ➔ *Feldverdrängungsarbeit kann nicht größer als Energiegewinn beim Übergang in supraleitenden Zustand werden*
- ➔ *Kondensationsenergie*

1.3. kritisches Magnetfeld

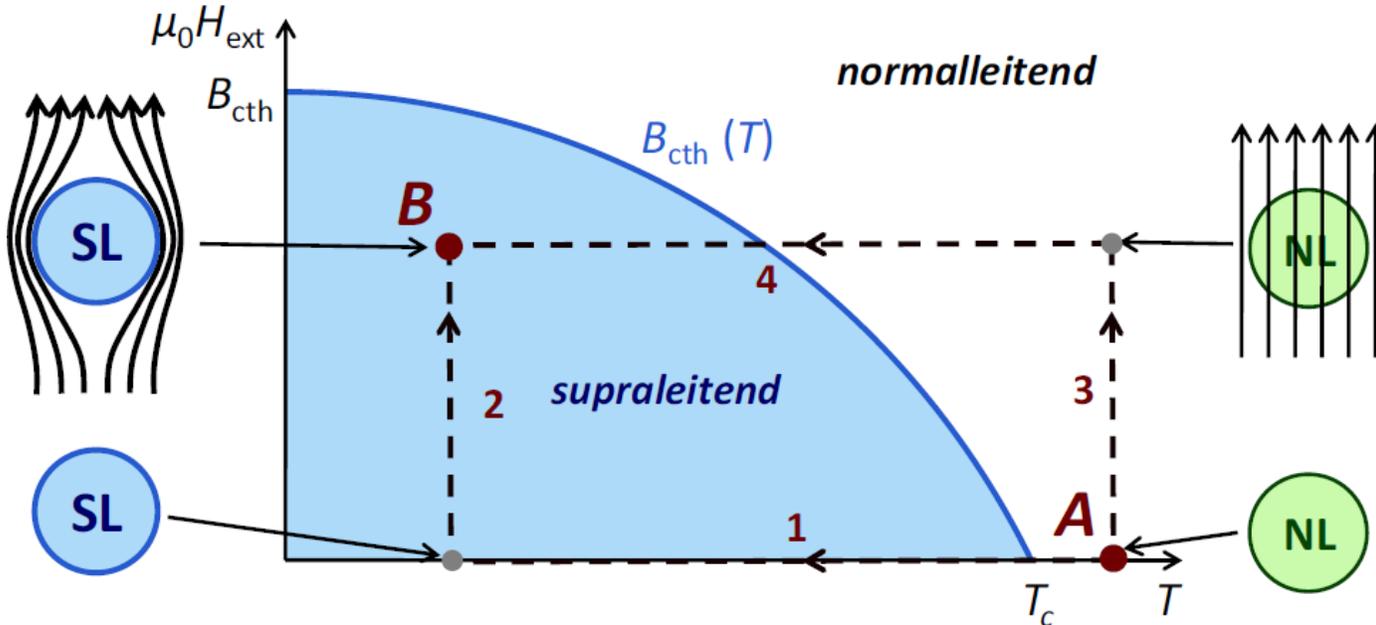
- Supraleitung für $T < T_C$ und $H < H_C$
- Phasenübergang 2. Ordnung



- Empirisch findet man:

$$B_{cth}(T) = B_{cth}(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

1.3. kritisches Magnetfeld



Interpretation von B_{cth} :

Supraleiter hat nur endliche Energie für Feldverdrängung zur Verfügung

$$\frac{B_{\text{cth}}^2(T)}{2\mu_0} = g_n(T) - g_s(T)$$

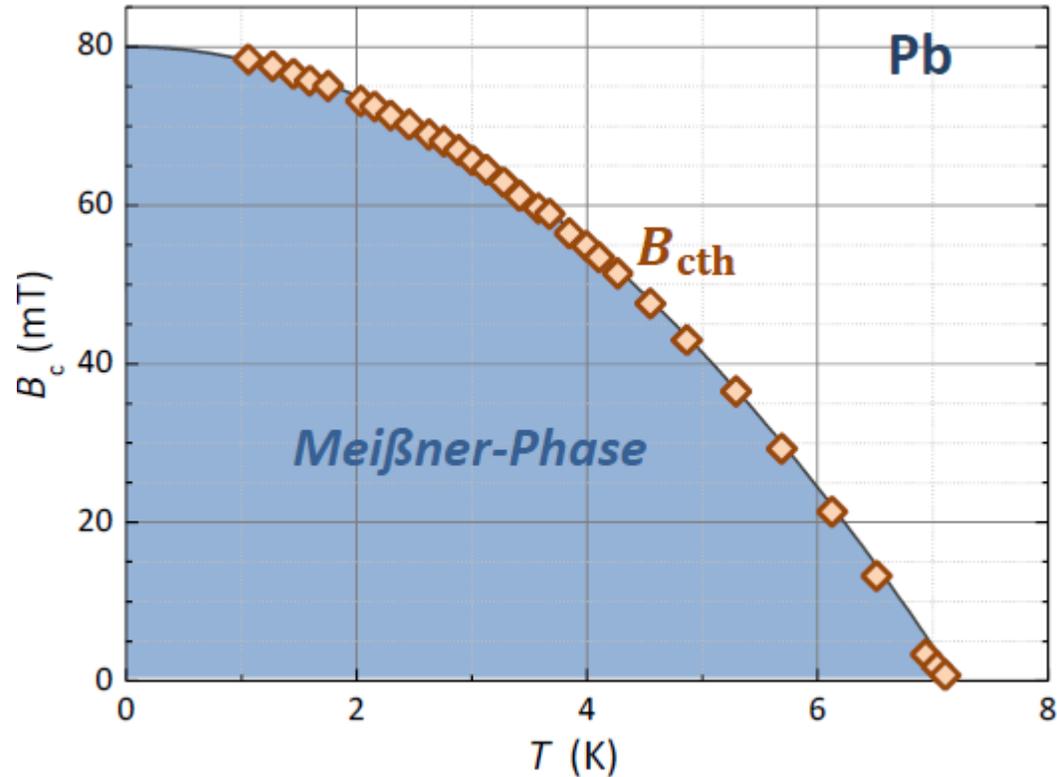
Kondensationsenergie

Differenz der freien Enthalpiedichten von N- und S-Zustand

- Supraleiter: $B_i = 0$ unabhängig von Weg zu Punkt **B**
- ➔ supraleitender Zustand ist *thermodynamische Phase*

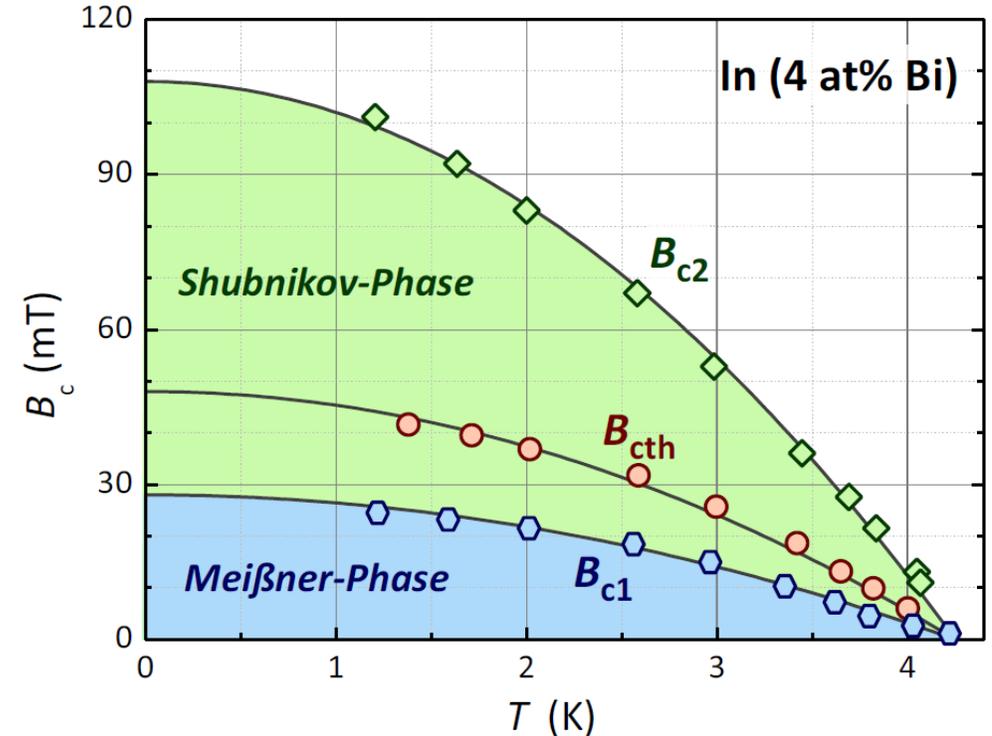
1.4. Typ-I und Typ-II Supraleitung (Shubnikov, 1936)

Typ I Supraleiter



- Meißner-Phase für $B_{ext} < B_{cth}$
- keine Shubnikov-Phase

Typ II Supraleiter



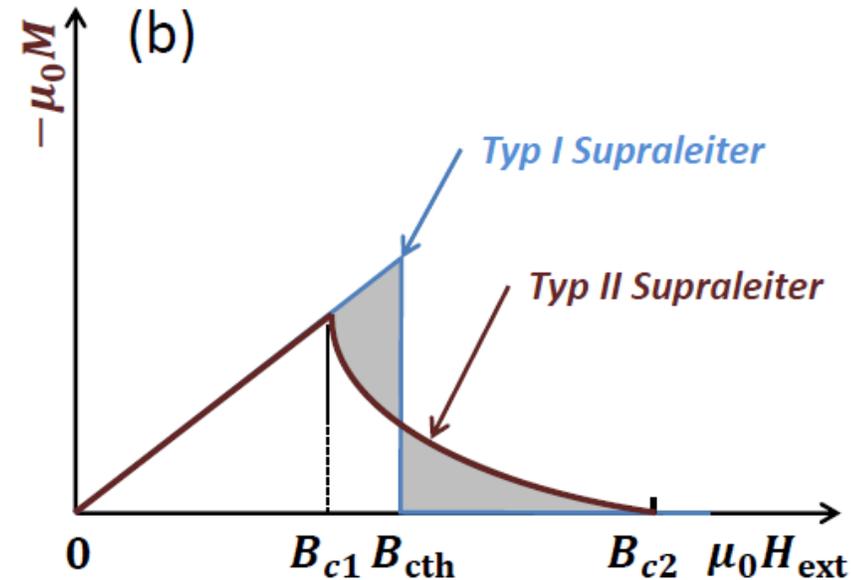
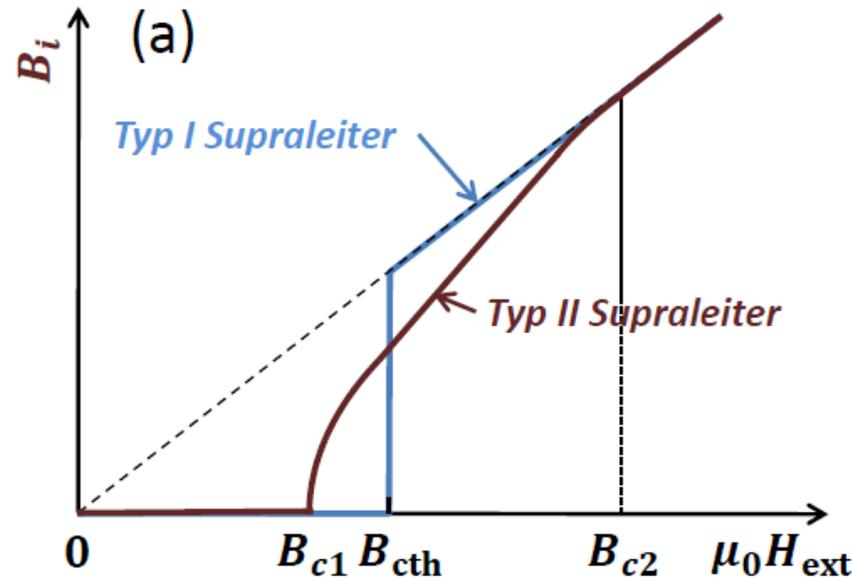
- Meißner-Phase für $B_{ext} < B_{c1}$
- Shubnikov-Phase oder Mischzustand für $B_{c1} < B_{ext} < B_{c2}$

zwei kritische Felder B_{c1}, B_{c2} : $B_{c1} < B_{cth} < B_{c2}$

1.4. Typ-I und Typ-II Supraleitung (Shubnikov, 1936)

- Für Typ-I und Typ-II SL mit gleicher Kondensationsenergie gilt:

$$\int_0^{B_{cth}} \mu_0 M \, dH_{ext} = \int_0^{B_{c2}} \mu_0 M \, dH_{ext}$$



Warum verhalten sich manche Supraleiter als Typ-I und manche als Typ-II Supraleiter?
 Wie sieht die räumliche Verteilung des magnetischen Flusses in der Shubnikov-Phase aus?

➔ **Beantwortung im Rahmen der Ginzburg-Landau Theorie**

1.5 Magnetische Fluss-Quantisierung

- Wichtige Vorhersage der BCS Theorie: Quantisierung des magnetischen Flusses Φ_0

Entdeckung 1961 durch

- **Robert Doll** und **Martin Nábauer** (WMI)
- **B.S. Deaver** und **W.M. Fairbanks** (Stanford University)

Experiment von Doll und Nábauer (WMI)

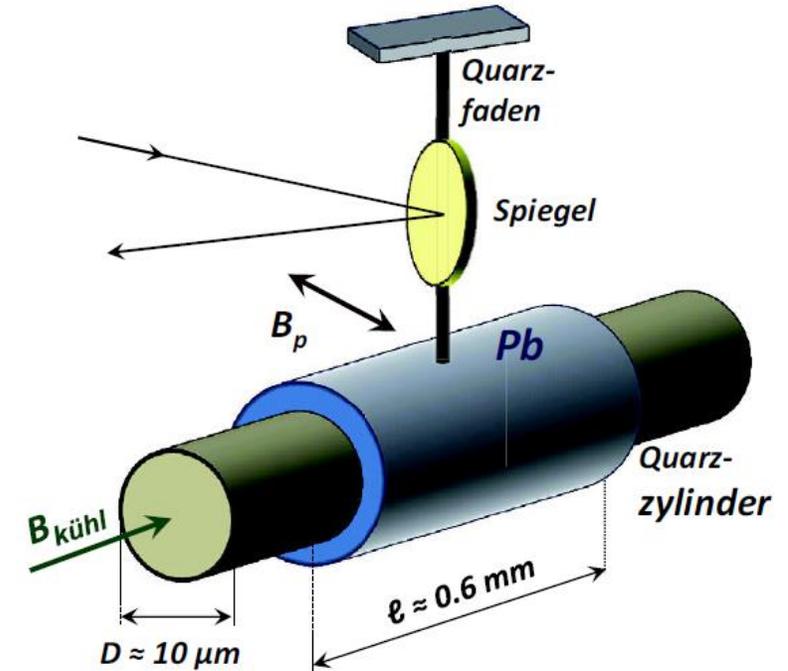
- Einfrieren von magnetischem Fluss in Hohlzylinder
- erzeuge Drehmoment $\mathbf{D} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}_p$ durch Feld \mathbf{B}_p
- erhöhte Empfindlichkeit durch Resonanztechnik

Zahl der eingefrorenen Fluss-Quanten:

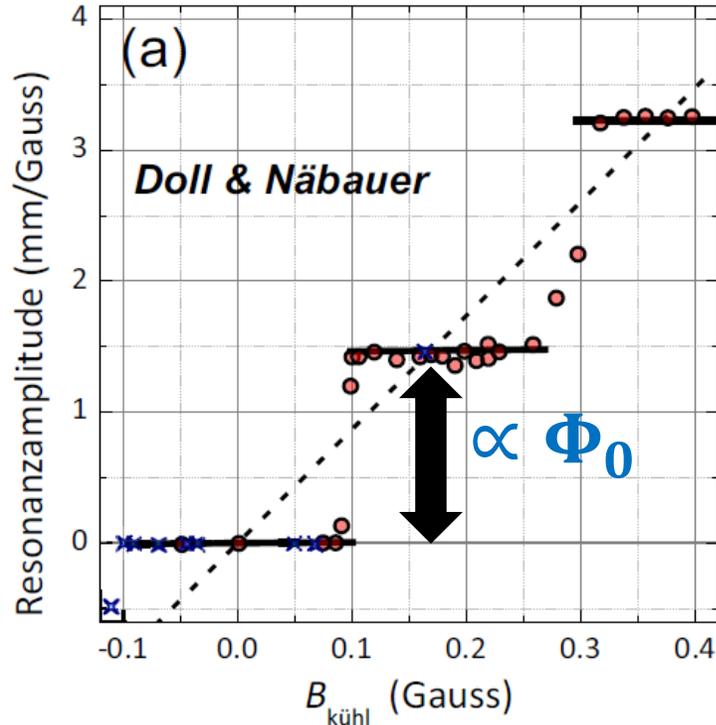
$$N = B_{\text{cool}} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 / \Phi_0$$

$$N \simeq 1 @ B_{\text{cool}} = 10^{-5} \text{ T}, d = 10 \mu\text{m}$$

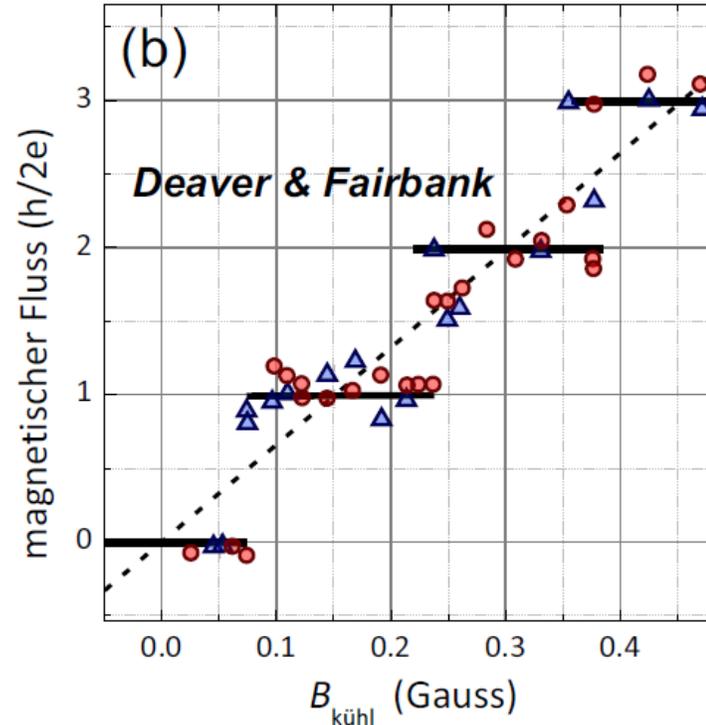
$$\text{vgl. } B_{\text{Erde}} \simeq 2 \times 10^{-5} \text{ T.}$$



1.5 Magnetische Fluss-Quantisierung



R. Doll, M. Näbauer
Phys. Rev. Lett. **7**, 51 (1961)



B.S. Deaver, W.M. Fairbank
Phys. Rev. Lett. **7**, 43 (1961)

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.067\,833\,831(13) \times 10^{-15} \text{ Vs}$$

→ **experimenteller Beleg für Existenz von Cooper-Paaren**
Vorhersage durch F. London: h/e