

---

# Faszination Supraleitung

Florian Gebhard



ARBEITSGRUPPE VIELTEILCHENTHEORIE  
FACHBEREICH PHYSIK  
PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee

1962

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990
- Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990



# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
  - Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
  - Von Wasserburg nach München 1981
  - Von München nach Aachen 1987
  - Von Aachen nach Karlsruhe 1990
  - Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990
  - Von New Jersey nach Marburg 1992
- halbjähriger Forschungsaufenthalt in Grenoble 1993/1994

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990
- Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990
- Von New Jersey nach Marburg 1992  
halbjähriger Forschungsaufenthalt in Grenoble 1993/1994
- Von Marburg nach Grenoble, Frankreich 1995

# Von Wasserburg nach Marburg

---

Vorab ein kurzer Lebenslauf ...

- Geboren in Tegernsee 1962
- Von Tegernsee nach Wasserburg 1976
- Von Wasserburg nach München 1981
- Von München nach Aachen 1987
- Von Aachen nach Karlsruhe 1990
- Von Karlsruhe nach New Jersey, USA 1990
- Von New Jersey nach Marburg 1992  
halbjähriger Forschungsaufenthalt in Grenoble 1993/1994
- Von Marburg nach Grenoble, Frankreich 1995
- Von Grenoble nach Marburg 1998  
Professur für Theoretische Physik

# Gliederung

---

# Gliederung

---

## I. Grundlegende Experimente

# Gliederung

---

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern

# Gliederung

---

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien

# Gliederung

---

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker



# Gliederung

---

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden

# Gliederung

---

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden
- VI. Stürmische Fortschritte

# Gliederung

---

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden
- VI. Stürmische Fortschritte
- VII. Zusammenfassung

# Gliederung

---

- I. Grundlegende Experimente
- II. Typen von Supraleitern
- III. Supraleitung verstehen: die Prinzipien
- IV. Quantenverstärker
- V. Supraleiter anwenden
- VI. Stürmische Fortschritte
- VII. Zusammenfassung
- VIII. Philosophisches

# I Grundlegende Experimente

---

# I Grundlegende Experimente

---

## 1. Die Entdeckung der Supraleitung

# I Grundlegende Experimente

---

## 1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert

# I Grundlegende Experimente

---

## 1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert
- Die Verflüssigung von H und He gelang Heike Kammerlingh-Onnes 1911 (Nobel-Preis 1913)



# I Grundlegende Experimente

---

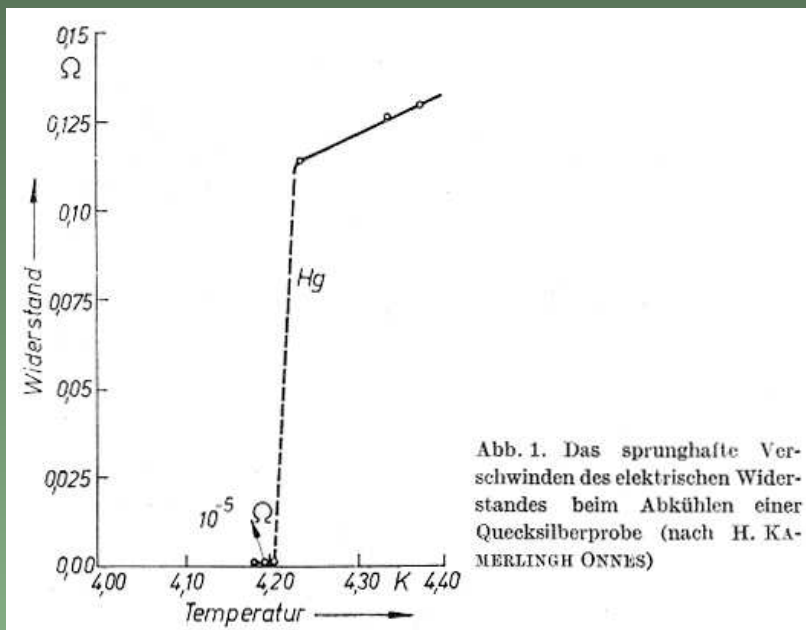
## 1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert
- Die Verflüssigung von H und He gelang Heike Kammerlingh-Onnes 1911 (Nobel-Preis 1913)
- Überraschung: der elektrische Widerstand von Quecksilber verschwindet völlig unterhalb von  $4 \text{ K} = -269^\circ\text{C}$

# I Grundlegende Experimente

## 1. Die Entdeckung der Supraleitung

- Die Verflüssigung der meisten Gase gelang im 19. Jahrhundert
- Die Verflüssigung von H und He gelang Heike Kammerlingh-Onnes 1911 (Nobel-Preis 1913)
- Überraschung: der elektrische Widerstand von Quecksilber verschwindet völlig unterhalb von  $4\text{ K} = -269^\circ\text{C}$



# I Grundlegende Experimente

---

# I Grundlegende Experimente

---

## 2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus

# I Grundlegende Experimente

---

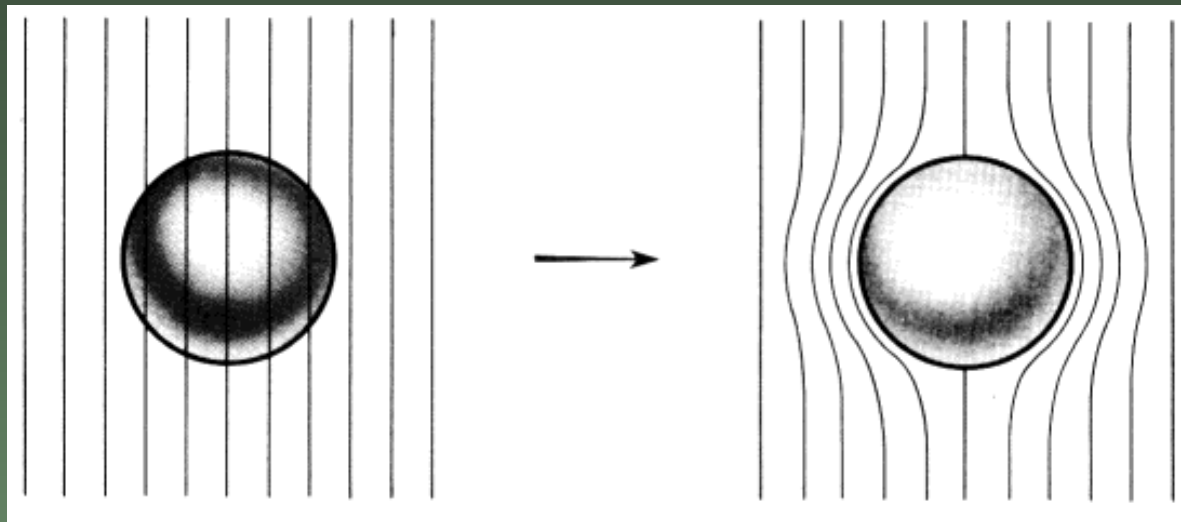
2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus
  - Ein Magnetfeld wird aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt

# I Grundlegende Experimente

---

## 2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus

- Ein Magnetfeld wird aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt

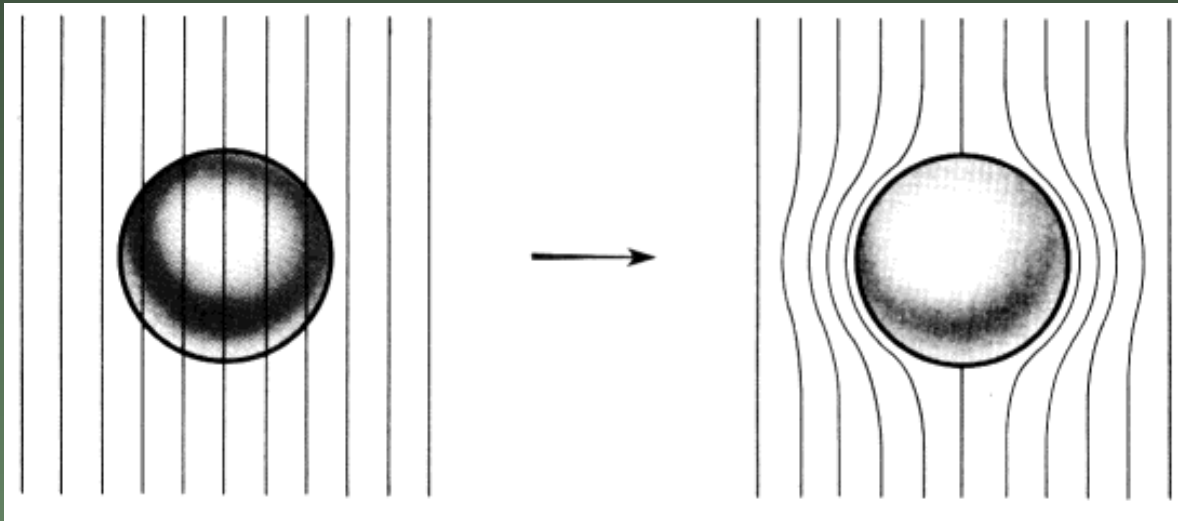


- **Abb. 2.** Meissner Effekt einer supraleitenden Kugel im Magnetfeld

# I Grundlegende Experimente

## 2. Mehr als ein Super-Leiter: Der ideale Diamagnetismus

- Ein Magnetfeld wird aus dem Inneren des Supraleiters verdrängt



- **Abb. 2.** Meissner Effekt einer supraleitenden Kugel im Magnetfeld

- Schwebender Magnet (Meissner Effekt)



# I Grundlegende Experimente

---



# I Grundlegende Experimente

---

Mein besonderer Dank gilt

Privatdozent Dr. Rudi Hackl  
Walter-Meissner-Institut (WMI) der  
Bayerischen Akademie der Wissenschaften  
Garching

für die experimentelle Ausrüstung!

# I Grundlegende Experimente

---

Mein besonderer Dank gilt

Privatdozent Dr. Rudi Hackl  
Walter-Meissner-Institut (WMI) der  
Bayerischen Akademie der Wissenschaften  
Garching

für die experimentelle Ausrüstung!

Am WMI kann jedermann noch weitere interessante Experimente zu  
Supraleitung und Suprafluidität besichtigen.

# I Grundlegende Experimente

---

Mein besonderer Dank gilt

Privatdozent Dr. Rudi Hackl  
Walter-Meissner-Institut (WMI) der  
Bayerischen Akademie der Wissenschaften  
Garching

für die experimentelle Ausrüstung!

Am WMI kann jedermann noch weitere interessante Experimente zu Supraleitung und Suprafluidität besichtigen.

Ich danke auch Dipl.-Chem. Martin Paech für sein Seiten-Layout und seine Unterstützung bei der Erstellung der Folien.

# II Typen von Supraleitern

---

# II Typen von Supraleitern

---

## 1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter

# II Typen von Supraleitern

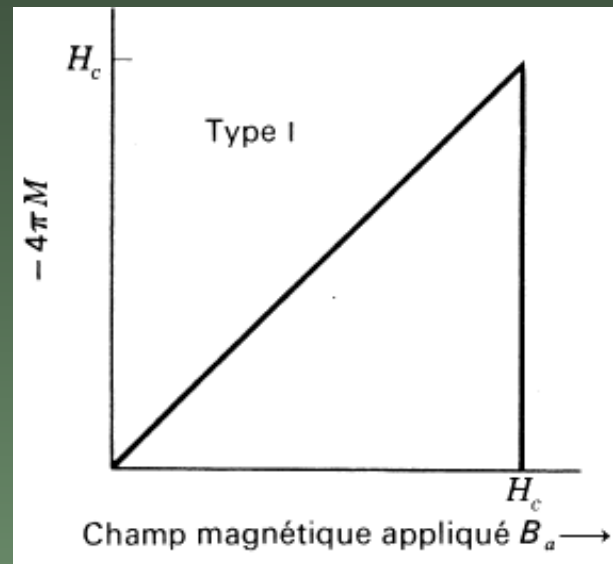
---

1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter
  - Ein zu starkes Magnetfeld zerstört die Supraleitung

# II Typen von Supraleitern

## 1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter

- Ein zu starkes Magnetfeld zerstört die Supraleitung

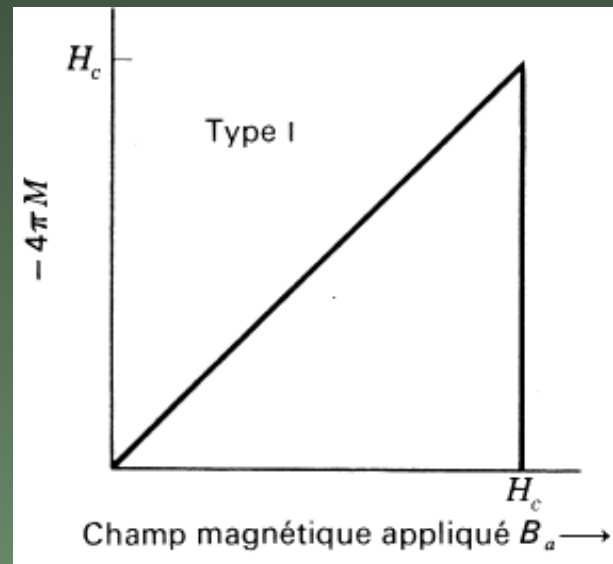


**Abb. 4.** Magnetisierung als Funktion des angelegten Magnetfelds in einem massiven Supraleiter vom Type I.  
Oberhalb des kritischen Feldes ist die Probe normalleitend.

# II Typen von Supraleitern

## 1. Die große Enttäuschung: Typ-I Supraleiter

- Ein zu starkes Magnetfeld zerstört die Supraleitung



**Abb. 4.** Magnetisierung als Funktion des angelegten Magnetfelds in einem massiven Supraleiter vom Type I.  
Oberhalb des kritischen Feldes ist die Probe normalleitend.

- Kritische Felder  $H_c$  sind uninteressant klein, um daraus supraleitende Magnete oder elektrische Kabel zu bauen



# II Typen von Supraleitern

---

# II Typen von Supraleitern

---

## 2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

# II Typen von Supraleitern

---

## 2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

- Der Klügere gibt nach: oberhalb eines kritischen Magnetfelds  $H_{c,1}$  dringt dieses teilweise ein, ohne die Supraleitung zu zerstören.

# II Typen von Supraleitern

---

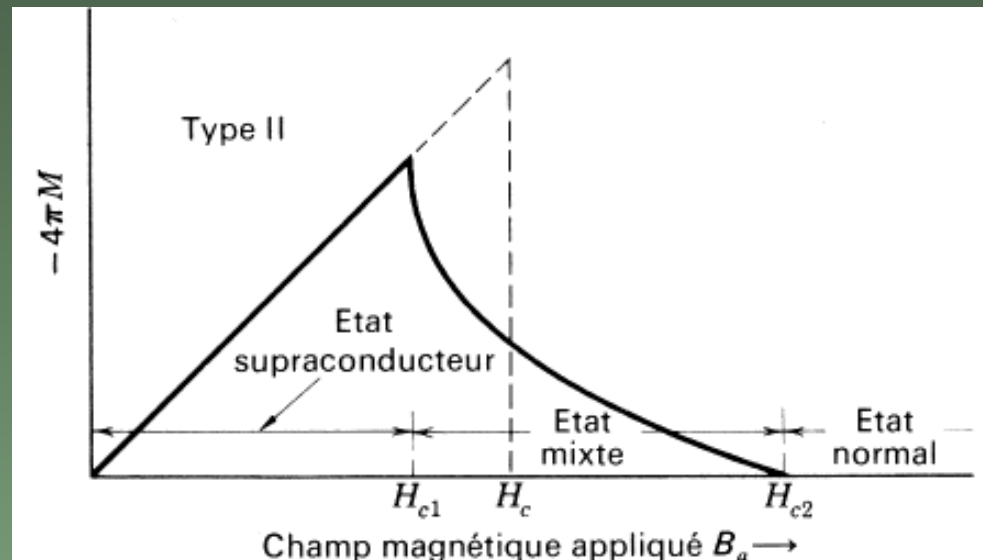
## 2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

- Der Klügere gibt nach: oberhalb eines kritischen Magnetfelds  $H_{c,1}$  dringt dieses teilweise ein, ohne die Supraleitung zu zerstören.
- Dies geschieht erst bei  $H_{c,2}$ .

# II Typen von Supraleitern

## 2. Die große Hoffnung: Typ-II Supraleiter

- Der Klügere gibt nach: oberhalb eines kritischen Magnetfelds  $H_{c,1}$  dringt dieses teilweise ein, ohne die Supraleitung zu zerstören.
- Dies geschieht erst bei  $H_{c,2}$ .



**Abb. 5.** Magnetisierung als Funktion des angelegten Magnetfelds in einem massiven Supraleiter vom Type II.

- Zwischen  $H_{c1}$  und  $H_{c2}$  dringt das Magnetfeld ein [Schubnikov-Phase].

# II Typen von Supraleitern

---

# II Typen von Supraleitern

---

- In Type-II Supraleitern dringt das Magnetfeld in Form von Flußschläuchen ein

# II Typen von Supraleitern

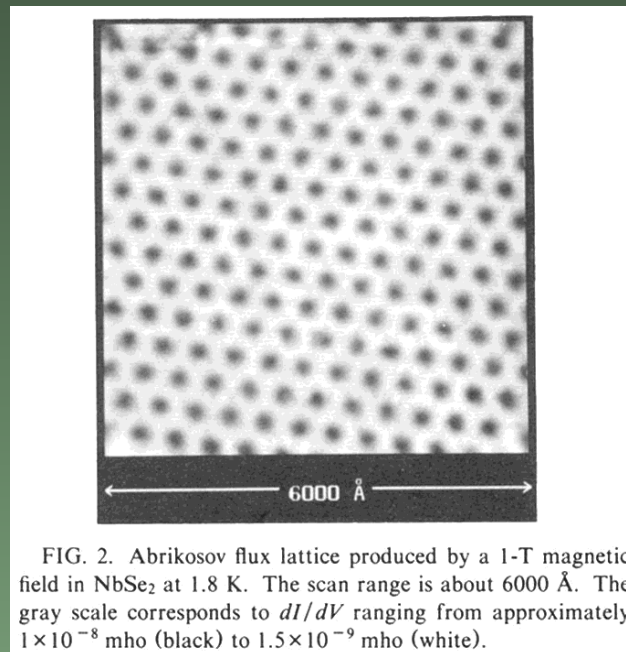
---

- In Type-II Supraleitern dringt das Magnetfeld in Form von Flußschläuchen ein
- Für die theoretische Erklärung erhält Abrikosov den Nobel-Preis 2003



# II Typen von Supraleitern

- In Type-II Supraleitern dringt das Magnetfeld in Form von Flußschläuchen ein
- Für die theoretische Erklärung erhält Abrikosov den Nobel-Preis 2003



- Abrikosov Flußliniengitter in NbSn<sub>2</sub> bei 1.8 K nahe der oberen kritischen Feldstärke von einem Tesla

# II Typen von Supraleitern

---

# II Typen von Supraleitern

---

## 3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

# II Typen von Supraleitern

---

## 3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:  
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms  $\vec{j}$  wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

# II Typen von Supraleitern

---

## 3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:  
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms  $\vec{j}$  wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

- Diese Kraft läßt die Flußschläuche wandern, dabei verbrauchen sie Energie, verursachen also Reibung: Widerstand Null – ade!

# II Typen von Supraleitern

---

## 3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:  
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms  $\vec{j}$  wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

- Diese Kraft läßt die Flußschläuche wandern, dabei verbrauchen sie Energie, verursachen also Reibung: Widerstand Null – ade!
- Lösung: Flußschläuche müssen festgenagelt werden ('pinning')

# II Typen von Supraleitern

---

## 3. Der Durchbruch: 'Harte' Supraleiter (Typ III)

- Problem bei Magneten und Stromkabeln:  
in Anwesenheit eines elektrischen Stroms  $\vec{j}$  wirkt die Lorentz-Kraft auf die magnetischen Flußschläuche

$$\vec{F} \propto \vec{j} \times \vec{B}$$

- Diese Kraft läßt die Flußschläuche wandern, dabei verbrauchen sie Energie, verursachen also Reibung: Widerstand Null – ade!
- Lösung: Flußschläuche müssen festgenagelt werden ('pinning')
- Kommerzielle supraleitende Magnete im Tesla-Bereich werden bei Beschleunigerringen eingesetzt (CERN, Genf) und bei der Plasmafusion (Tokamak)

# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---



# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar

# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar
  - Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie

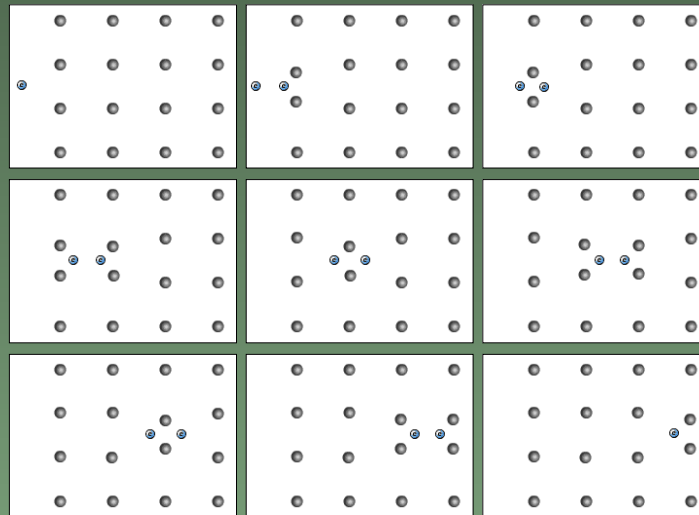
# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar
  - Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie
  - Ein *zweites* Elektron kann im Verzerrungskanal des *ersten* Elektron leichter vorankommen und Energie sparen

# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

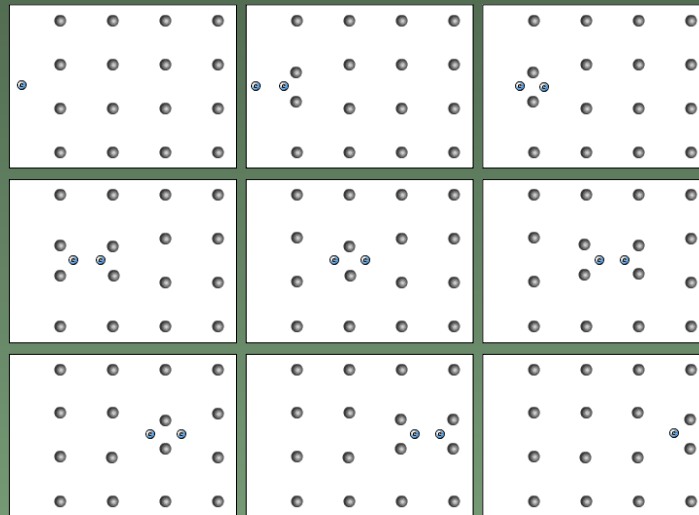
1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar
  - Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie
  - Ein *zweites* Elektron kann im Verzerrungskanal des *ersten* Elektron leichter vorankommen und Energie sparen



# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

## 1. Wenn Elektronen sich attraktiv finden: das Cooper-Paar

- Bei der Bewegung durch den Kristall verzerrt ein Elektron das Ionengitter: das kostet Energie
- Ein *zweites* Elektron kann im Verzerrungskanal des *ersten* Elektron leichter vorankommen und Energie sparen



- Die Abbildung zeigt schematisch, wie man zu zweit leichter durch's Leben kommt ...

# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat

# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat
  - Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten die geniale Idee (Nobel-Preis 1972):  
*alle* Elektronen paaren sich (Temperatur  $T = 0$ )



# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat
- Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten die geniale Idee (Nobel-Preis 1972):  
*alle* Elektronen paaren sich (Temperatur  $T = 0$ )
  - Resultat: ein supraleitendes Kondensat entsteht, das durch eine Welle beschrieben werden kann,

$$\Psi(\vec{r}) = \sqrt{n_s(\vec{r})} \cos[\phi(\vec{r})]$$

Die Amplitude  $n_s(\vec{r})$  beschreibt die Dichte der Cooper-Paare,  $\phi(\vec{r})$  ist die Phase der Welle.

# III Supraleitung verstehen: die Prinzipien

---

## 2. Wenn alle dasselbe tun: das supraleitende Kondensat

- Bardeen, Cooper und Schrieffer hatten die geniale Idee (Nobel-Preis 1972):

*alle* Elektronen paaren sich (Temperatur  $T = 0$ )

- Resultat: ein supraleitendes Kondensat entsteht, das durch eine Welle beschrieben werden kann,

$$\Psi(\vec{r}) = \sqrt{n_s(\vec{r})} \cos[\phi(\vec{r})]$$

Die Amplitude  $n_s(\vec{r})$  beschreibt die Dichte der Cooper-Paare,  $\phi(\vec{r})$  ist die Phase der Welle.

- Dies entspricht dem phänomenologischen Ansatz von Landau und Ginzburg (Nobel-Preise 1962 und 2003)

# IV Quantenverstärker

---

# IV Quantenverstärker

---

Kondensat =  $10^{22}$  Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)  
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

# IV Quantenverstärker

---

Kondensat =  $10^{22}$  Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)  
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

1. *Makroskopisches Objekt:*

Streuungen an Verunreinigungen können ihm nichts mehr anhaben: der Suprastrom fließt verlustfrei

# IV Quantenverstärker

---

Kondensat =  $10^{22}$  Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)  
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

1. *Makroskopisches Objekt:*

Streuungen an Verunreinigungen können ihm nichts mehr anhaben: der Suprastrom fließt verlustfrei

2. *Makroskopisches Objekt:*

Magnetfelder werden aus ihm verdrängt: idealer Diamagnetismus

# IV Quantenverstärker

---

Kondensat =  $10^{22}$  Elektronen (Zehntausend Milliarden Milliarden)  
verhalten sich als

makroskopisches *und* mikroskopisches Objekt!

1. *Makroskopisches Objekt:*

Streuungen an Verunreinigungen können ihm nichts mehr anhaben: der Suprastrom fließt verlustfrei

2. *Makroskopisches Objekt:*

Magnetfelder werden aus ihm verdrängt: idealer Diamagnetismus

3. *Makroskopisches Objekt:*

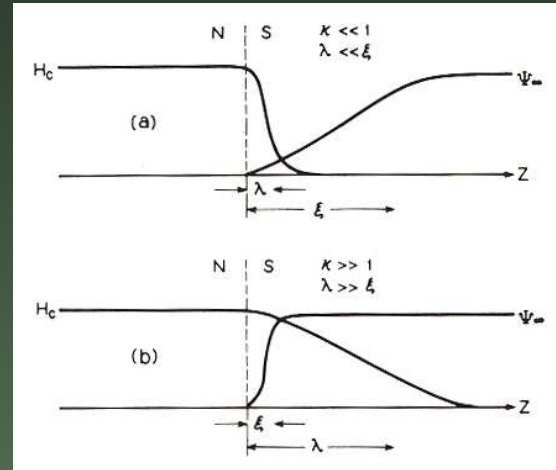
Am Rande des Supraleiters bauen sich das Kondensat und die Supraströme auf einer Skala  $\xi$  auf, das Magnetfeld wird auf einer Skala  $\lambda$  abgeschwächt ( $\xi$ ,  $\lambda$  sind auf der Mikrometer-Skala).

# IV Quantenverstärker

---

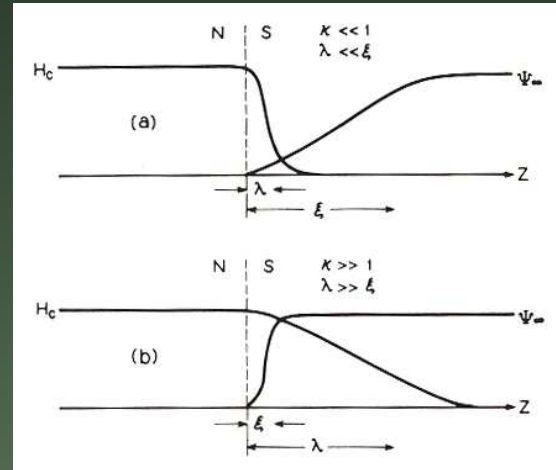


# IV Quantenverstärker



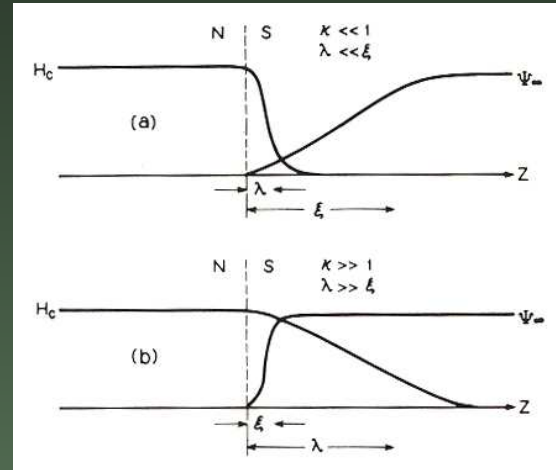
- 
- Dichte der Paare und Magnetfeld nahe einer Grenzschicht

# IV Quantenverstärker



- 
- Dichte der Paare und Magnetfeld nahe einer Grenzschicht
- Typ I Supraleiter ( $\xi \gg \lambda$ ): eine Grenzfläche kostet viel Kondensationsenergie, bringt aber wenig Magnetfeldenergie; das Magnetfeld wird verdrängt, bis die Supraleitung zusammenbricht

# IV Quantenverstärker



- 
- Dichte der Paare und Magnetfeld nahe einer Grenzschicht
- Typ I Supraleiter ( $\xi \gg \lambda$ ): eine Grenzfläche kostet viel Kondensationsenergie, bringt aber wenig Magnetfeldenergie; das Magnetfeld wird verdrängt, bis die Supraleitung zusammenbricht
- Typ II Supraleiter ( $\xi \ll \lambda$ ): Eine Grenzfläche bringt viel Magnetfeldenergie, kostet aber wenig Kondensationsenergie; das Magnetfeld dringt oberhalb von  $H_{c,1}$  in Flußschläuchen ein, die Supraleitung bleibt bis  $H_{c,2}$

# IV Quantenverstärker

---

# IV Quantenverstärker

---

Das Kondensat ist zugleich ein *Mikroskopisches Objekt!*

# IV Quantenverstärker

---

Das Kondensat ist zugleich ein *Mikroskopisches Objekt!*

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron:

# IV Quantenverstärker

---

Das Kondensat ist zugleich ein *Mikroskopisches Objekt!*

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron:  
umkreist ein Elektron ein Magnetfeld der Stärke  $B$ , dann ist das  
Produkt  $\Phi = B\pi r^2$  ein ganzzahliges Vielfaches von  $\Phi_0 = hc/e$ ,

$$\Phi = n \frac{hc}{e} = n\Phi_0 \quad \text{für Elektronen}$$

$\Phi_0$ : doppeltes Flußquantum

$h$ : Planck'sches Wirkungsquantum

$c$ : Lichtgeschwindigkeit

$e$ : Elementarladung

# IV Quantenverstärker

---

## 1. *Mikroskopisches Objekt:* Flußquantisierung

Für den Fluß durch einen supraleitenden Ring gilt dasselbe:



# IV Quantenverstärker

---

## 1. *Mikroskopisches Objekt*: Flußquantisierung

Für den Fluß durch einen supraleitenden Ring gilt dasselbe:

$$\Phi = n \frac{hc}{2e} = n \frac{\Phi_0}{2} \quad \text{für Cooper-Paare}$$

Achtung:  $2e$  statt  $e$ !

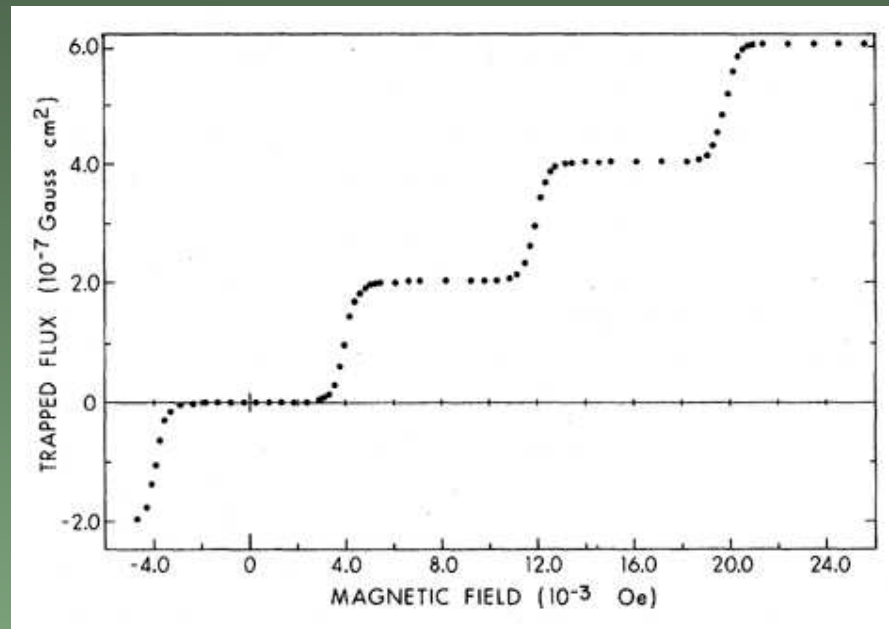
# IV Quantenverstärker

## 1. *Mikroskopisches Objekt*: Flußquantisierung

Für den Fluß durch einen supraleitenden Ring gilt dasselbe:

$$\Phi = n \frac{hc}{2e} = n \frac{\Phi_0}{2} \quad \text{für Cooper-Paare}$$

Achtung:  $2e$  statt  $e$ !



Magnetischer Fluß in einem dünnen Hohlzylinder aus Zinn.

# IV Quantenverstärker

---

# IV Quantenverstärker

---

## 2. *Mikroskopisches Objekt:* Josephson-Effekt

# IV Quantenverstärker

---

## 2. *Mikroskopisches Objekt*: Josephson-Effekt

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron:  
ändert sich die Phase der Welle, so resultiert dies in einem *Strom*.

# IV Quantenverstärker

---

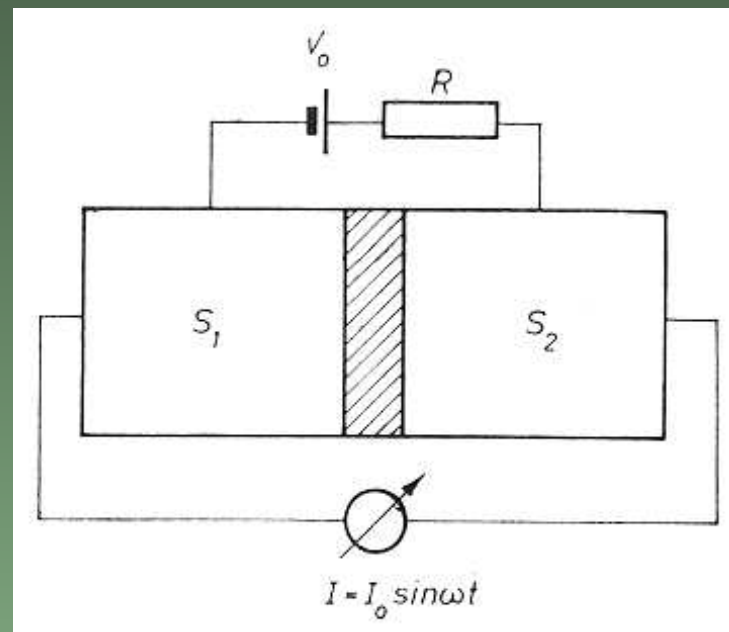
## 2. *Mikroskopisches Objekt*: Josephson-Effekt

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron: ändert sich die Phase der Welle, so resultiert dies in einem *Strom*. Betrachten wir zwei Supraleiter, die über eine dünne isolierende Barriere hinweg gekoppelt sind:

# IV Quantenverstärker

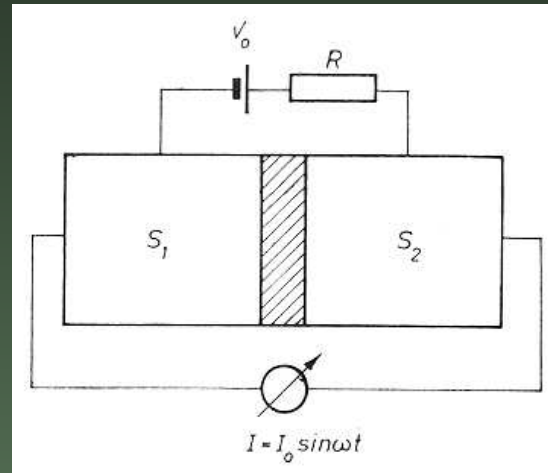
## 2. *Mikroskopisches Objekt*: Josephson-Effekt

Die Quantenmechanik bestimmt für ein *einzelnes* Elektron: ändert sich die Phase der Welle, so resultiert dies in einem *Strom*. Betrachten wir zwei Supraleiter, die über eine dünne isolierende Barriere hinweg gekoppelt sind:



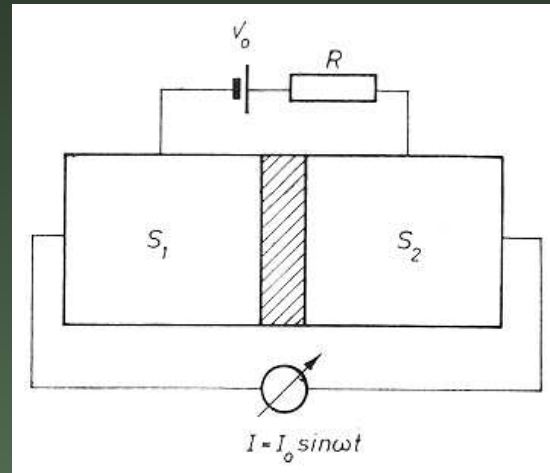
SNS oder Josephson Kontakt

# IV Quantenverstärker



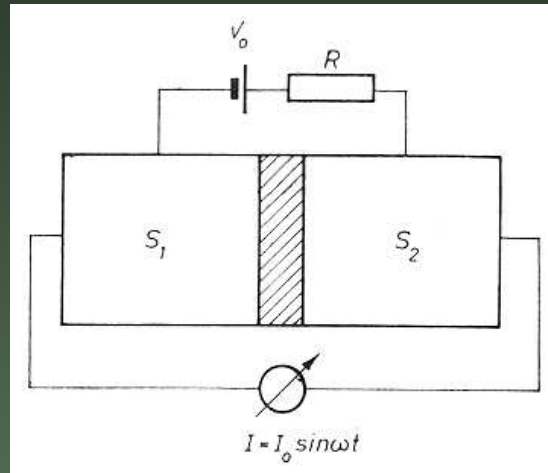


# IV Quantenverstärker



Die *Phasen*  $\phi_1$  und  $\phi_2$  der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

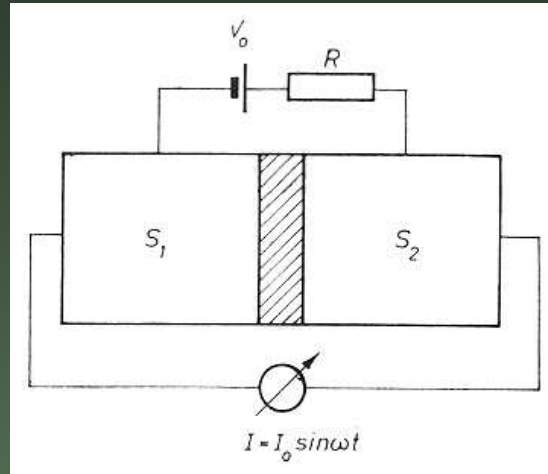
# IV Quantenverstärker



Die *Phasen*  $\phi_1$  und  $\phi_2$  der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

$$J = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{Gleichstrom Josephson Effekt})$$

# IV Quantenverstärker



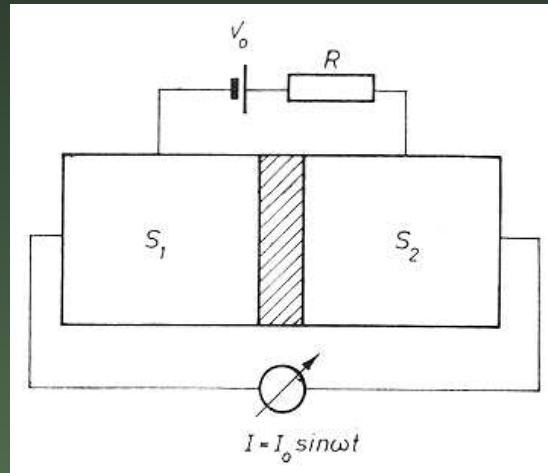
Die *Phasen*  $\phi_1$  und  $\phi_2$  der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

$$J = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{Gleichstrom Josephson Effekt})$$

Legt man eine (kleine) Spannung  $V$  an die Barriere:

$$J(t) = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2 - 4\pi e V t / h) \quad (\text{Wechselstrom Josephson Effekt})$$

# IV Quantenverstärker



Die *Phasen*  $\phi_1$  und  $\phi_2$  der Supraleiter auf beiden Seiten sind nicht gleich. Also fließt ein Strom über die Barriere:

$$J = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{Gleichstrom Josephson Effekt})$$

Legt man eine (kleine) Spannung  $V$  an die Barriere:

$$J(t) = J_0 \sin(\phi_1 - \phi_2 - 4\pi e V t / h) \quad (\text{Wechselstrom Josephson Effekt})$$

Nobel-Preis für Josephson 1973

# V Supraleiter anwenden

---

# V Supraleiter anwenden

---

## 1. Metrologie: Bestimmung von Naturkonstanten

Durch die enorme Quantenverstärkung kann die Josephson-Konstante  $K_J = 2e/h$  mit einer Genauigkeit von 1 in 10 Millionen bestimmt werden:

# V Supraleiter anwenden

---

## 1. Metrologie: Bestimmung von Naturkonstanten

Durch die enorme Quantenverstärkung kann die Josephson-Konstante  $K_J = 2e/h$  mit einer Genauigkeit von 1 in 10 Millionen bestimmt werden:

$$K_J = 483597,879(41)10^9 \frac{1}{Vs}$$

Anwendung: Bestimmung des Spannungsnormals Volt (V)

# V Supraleiter anwenden

---

## 1. Metrologie: Bestimmung von Naturkonstanten

Durch die enorme Quantenverstärkung kann die Josephson-Konstante  $K_J = 2e/h$  mit einer Genauigkeit von 1 in 10 Millionen bestimmt werden:

$$K_J = 483597,879(41)10^9 \frac{1}{V_s}$$

Anwendung: Bestimmung des Spannungsnormals Volt (V)

## 2. Industrie: Magnetfeldmessung

Durch die enorme Quantenverstärkung können kleinste Änderungen im Magnetfeld detektiert werden.



# V Supraleiter anwenden

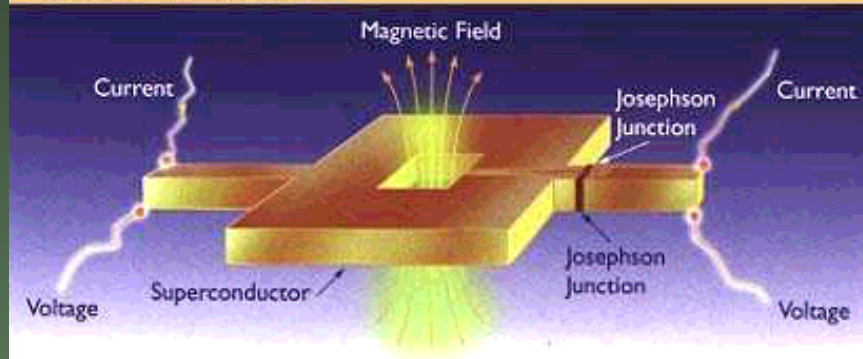
---

Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)

# V Supraleiter anwenden

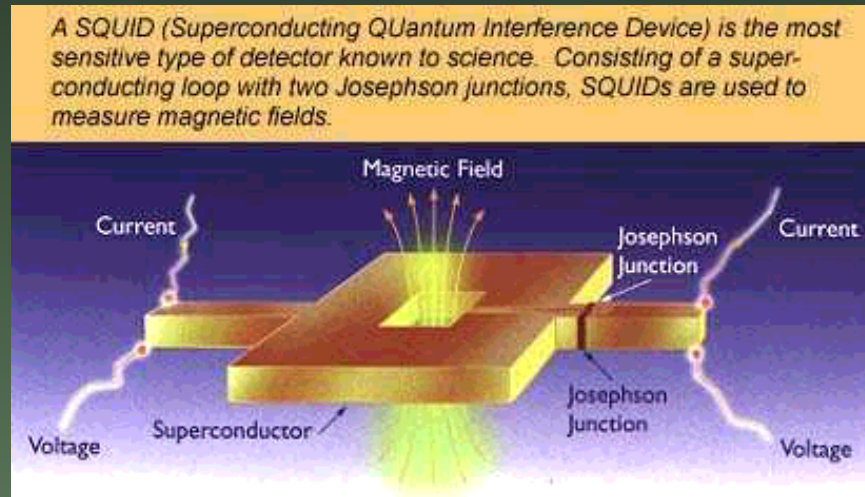
## Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)

A SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) is the most sensitive type of detector known to science. Consisting of a superconducting loop with two Josephson junctions, SQUIDs are used to measure magnetic fields.



# V Supraleiter anwenden

## Superconducting QUantum Interference Device (SQUID)



### Anwendungen:

- Magnetresonanz-Tomographie ('Kernspin')
- Detektion von Fremdkörpern in verpackten (!) Lebensmitteln, Medikamenten, etc.
- Bauwerksinspektion (Brüche von Spannstahl in Brücken)
- und vieles mehr!

# VI Stürmische Fortschritte

---

# VI Stürmische Fortschritte

---

## 1. Hochtemperatur-Supraleiter

Im Jahr 1986 gelang ein lang ersehnter Durchbruch: Bednorz und Müller fanden supraleitende Kupfer-Oxide (Nobel-Preis 1987).

Die besten Oxide erreichen Sprungtemperaturen

$$T_c \approx 100 \text{ K} = -170^\circ \text{C}.$$

Wichtig: das Material kann mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, der bei 77 K siedet und billig, in Massen herstellbar und ungefährlich ist.

# VI Stürmische Fortschritte

---

## 1. Hochtemperatur-Supraleiter

Im Jahr 1986 gelang ein lang ersehnter Durchbruch: Bednorz und Müller fanden supraleitende Kupfer-Oxide (Nobel-Preis 1987).

Die besten Oxide erreichen Sprungtemperaturen

$$T_c \approx 100 \text{ K} = -170^\circ \text{C}.$$

Wichtig: das Material kann mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, der bei 77 K siedet und billig, in Massen herstellbar und ungefährlich ist.

## 2. Industrielle Perspektiven

- Kommerzielle SQUIDs aus Hoch-Tc Material sind im Einsatz
- Stromtransport ist schwierig: die normalleitende Phase ist ein Isolator; Versuchstrassen für 50.000 Haushalte gibt es in Dänemark

# VI Stürmische Fortschritte

---

## 3. Forschungsperspektiven

# VI Stürmische Fortschritte

---

## 3. Forschungsperspektiven

Seit 1980 sind viele 'unkonventionelle' Supraleiter entdeckt worden:

1.  $\text{UPt}_3$ : Schwere-Fermionen Supraleiter
2.  $\text{K}_3\text{C}_{60}$ : Kalium-dotierte 'bucky balls'
3.  $\text{MgB}_2$ : Magnesiumdiborid
4.  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ : Ruthenate



# VI Stürmische Fortschritte

---

## 3. Forschungsperspektiven

Seit 1980 sind viele 'unkonventionelle' Supraleiter entdeckt worden:

1.  $\text{UPt}_3$ : Schwere-Fermionen Supraleiter
2.  $\text{K}_3\text{C}_{60}$ : Kalium-dotierte 'bucky balls'
3.  $\text{MgB}_2$ : Magnesiumdiborid
4.  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ : Ruthenate

Gemeinsamkeit: Kopplungsmechanismus für die Cooper-Paare unbekannt – die Theoretiker stehen vor großen Rätseln!

# VII Zusammenfassung

---

# VII Zusammenfassung

---

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.

# VII Zusammenfassung

---

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.

# VII Zusammenfassung

---

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.

# VII Zusammenfassung

---

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein mikroskopisches Objekt: der magnetische Fluß ist quantisiert, am Josephson-Kontakt treten quantenmechanisch induzierte Ströme auf.

# VII Zusammenfassung

---

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein mikroskopisches Objekt: der magnetische Fluß ist quantisiert, am Josephson-Kontakt treten quantenmechanisch induzierte Ströme auf.
- Industrielle Anwendung: Bestimmung der Spannungseinheit Volt und in SQUID Magnetfeld-Detektoren

# VII Zusammenfassung

---

- In Supraleitern paaren sich die Elektronen bei tiefen Temperaturen.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein makroskopisches Objekt: es gibt keinen elektrischen Widerstand und ein Magnetfeld wird verdrängt.
- Industrielle Anwendung: supraleitende Magnete und Stromkabel.
- Das supraleitendes Kondensat ist ein mikroskopisches Objekt: der magnetische Fluß ist quantisiert, am Josephson-Kontakt treten quantenmechanisch induzierte Ströme auf.
- Industrielle Anwendung: Bestimmung der Spannungseinheit Volt und in SQUID Magnetfeld-Detektoren
- Konventionelle Supraleiter sind gut verstanden, die neuen Supraleiter geben den Theoretikern noch große Rätsel auf.



# VIII Philosophisches

---

# VIII Philosophisches

---

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

# VIII Philosophisches

---

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

*Freilich muß, wer auf Erkenntnis ausgeht, dies um ihrer selbst Willen tun.*

# VIII Philosophisches

---

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

*Freilich muß, wer auf Erkenntnis ausgeht, dies um ihrer selbst Willen tun.*

...

# VIII Philosophisches

---

Aristoteles in *Protreptikos*, 2

*Freilich muß, wer auf Erkenntnis ausgeht, dies um ihrer selbst Willen tun.*

...

*Wer es aber verachtet, von der Wissenschaft zu kosten, der bekommt auch von der Freude nichts zu kosten, die sie bereitet.*