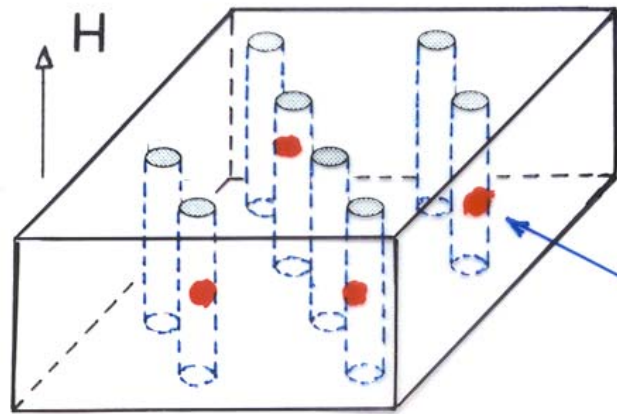


# Supraleitung

## Abhilfe: SL Typ II

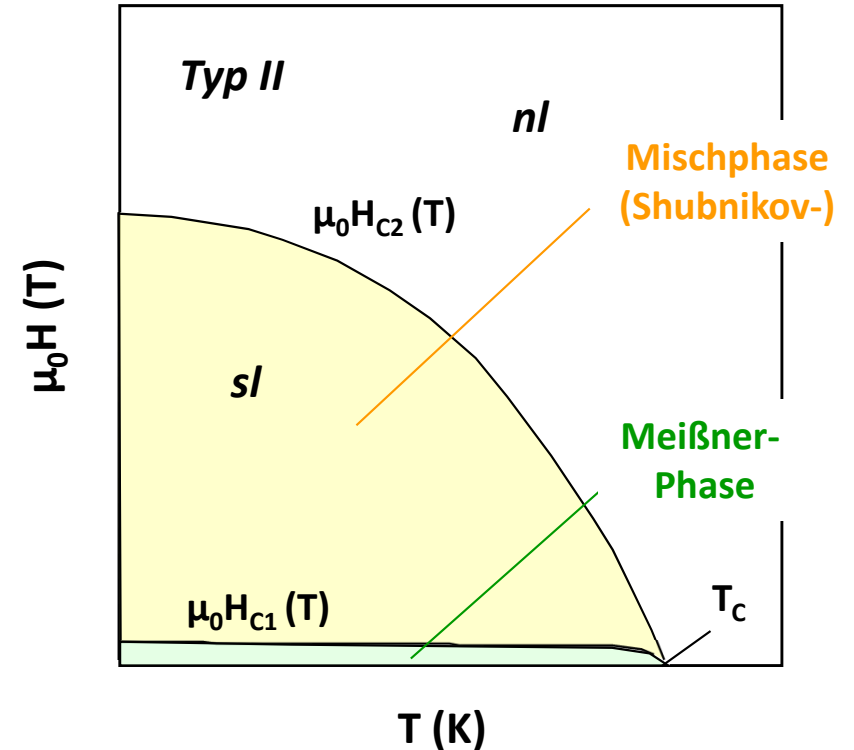
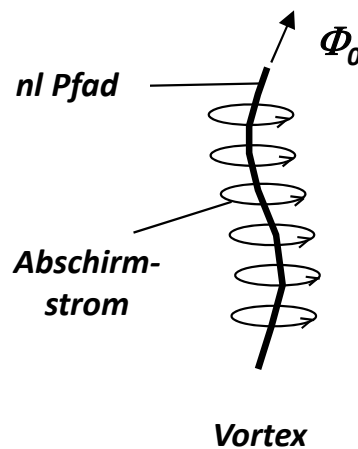
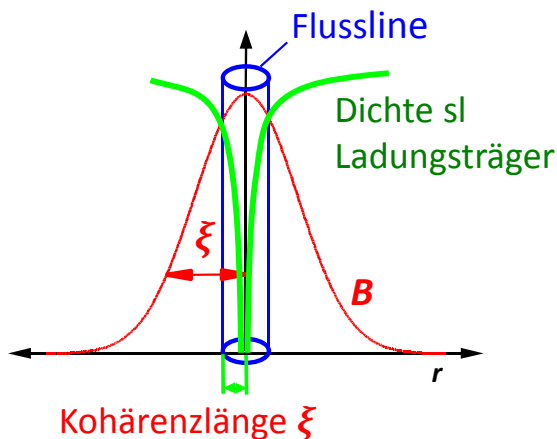
Magnetfeld wird durch nl Flußschläuche (Abrikosow-Schläuche) kanalisiert;  
zwischen oberem und unterem krit. Feld  $B_{c1}$ ,  $B_{c2}$  zunehmende  
Flussschlauch-Dichte (Vortex-Zustand)



## SL Typ III:

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

SL Typ II	$T_c \text{ (K)}$	$\mu_0 H_{c2} \text{ (T)}$
Nb	9,3	0,3
Nb <sub>3</sub> Sn	18,0	24,5
Nb <sub>3</sub> Ge	23,2	38,0
Nb <sub>3</sub> Al	18,7	26,3
Ni <sub>0.6</sub> Ti <sub>0.4</sub>	9,8	11,5



Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

# Supraleitung, Theorie

## Theoretisches Verständnis

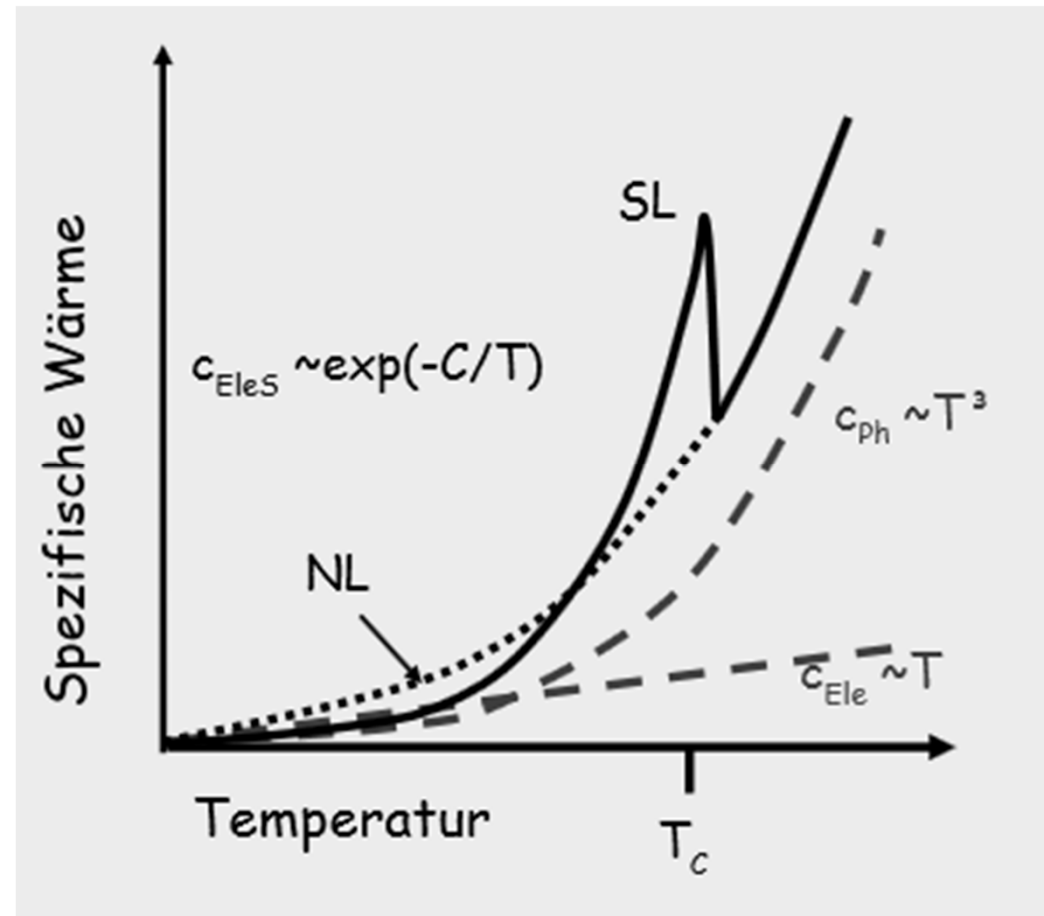
Übergang Zustand nl  $\leftrightarrow$  sl:

Änderung von  $c$

$T < T_c$ : Phasenübergang 1. Ordnung,  
höherer Ordnungszustand (S)

geringe Entropieänderung  $\rightarrow$  nur  
wenige Elektronen beteiligt

Sprunghöhe ( $c_{sl} - c_{nl}$ ) mess- und  
berechenbar (Rutgers-Formel)



# Supraleitung, Theorie

## Theoretisches Verständnis

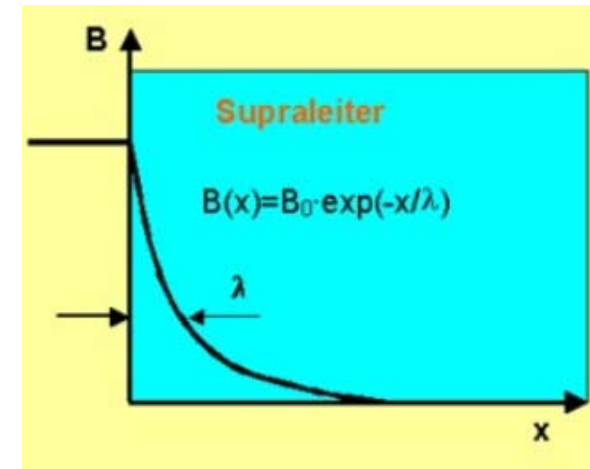
Gebrüder London, 1935:

1. **London'sche Gleichung:**  $\hat{\mathbf{J}} = \mathbf{E} \cdot n \cdot e^2 / m \Rightarrow$  Elektronen werden nicht gestreut,  
die Stromdichte  $\mathbf{J}$  kann unendlich wachsen;

$\mathbf{E}$ : elektr. Feld;  $n$ : Ladungsträgerdichte;  $e$ : elektr. Elementarladung;  $m$ : Elektronenmasse

2. **London'sche Gleichung:**  $\nabla \times \mathbf{J} = - \frac{ne^2}{m} \mathbf{B}$

Beschreibung Abschirmstrom an SL-Oberfläche  
(exponentiell abklingend mit **Eindringtiefe  $\lambda$** )

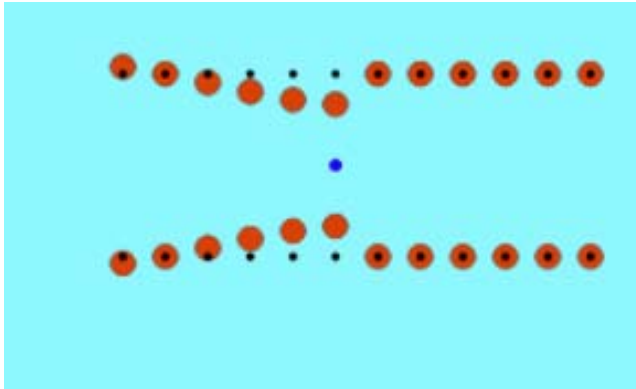


**Ginzburg-Landau-Theorie (1950):**

- phänomenologische Beschreibung
- Phasenübergang

# BCS-Theorie

Bardeen – Cooper – Schrieffer, 1957 (“**BCS theory**”, Nobelpreis 1972):



Ein durch das Atomgitter fliegendes Elektron  $e^-$  verformt das Gitter (negative Ladung zieht positiv geladene Atomrümpfe zusammen, hinterlässt eine “Trasse”)

Das Elektron  $e^-$  legt ca.  $10^3$  Atomabstände zurück, bevor das Gitter wieder relaxiert.

Ein zweites  $e^-$  wird von dieser positiv geladenen Umgebung angezogen und kann folgen, ohne die  $e^- - e^-$ -Abstoßung zu spüren

· mechanisches Analogon: zwei schwere Kugeln auf einer Membran. Wenn eine einsinkt, gesellt sich die andere dazu

jeweils zwei Elektronen entgegengesetzten Spins bilden zusammen ein  
Cooper-Paar

Abstand:  $10^2 \dots 10^4 \text{ \AA} = \text{Kohärenzlänge } \xi$  [ksi]



erstrecken sich also über Tausende von Atomen; Hunderte von Cooper-Paaren durchdringen sich wechselseitig

Die Gesamtheit der Cooperpaare bildet ein makroskopisches, quantenmechanisches System, welches nicht mit dem Gitter in Wechselwirkung treten kann und sich widerstandsfrei bewegt.

# Cooper-Paare

**Cooper-Paare:** energetisch tieferer (günstigerer) Zustand

Bewegung Ladungsschwerpunkt → elektr. Strom (2 Elementarladungen)

$$T_c = \frac{U_{nl} - U_{sl}}{S_{nl} - S_{sl}}$$

$U_{nl} - U_{sl}$  : innere Energie inkl. Magnetisierungsenergie (Stabilisierungsenergie)

$S_{nl} - S_{sl}$  : ca.  $10^{-3}$  J/mol·K (Bindungskraft sehr gering, entsprechen therm. Anregungsenergie von wenigen K)

⇒ SL nur bei tiefen Temperaturen möglich, sonst Aufbrechen der Cooper-Paare durch thermische Anregung

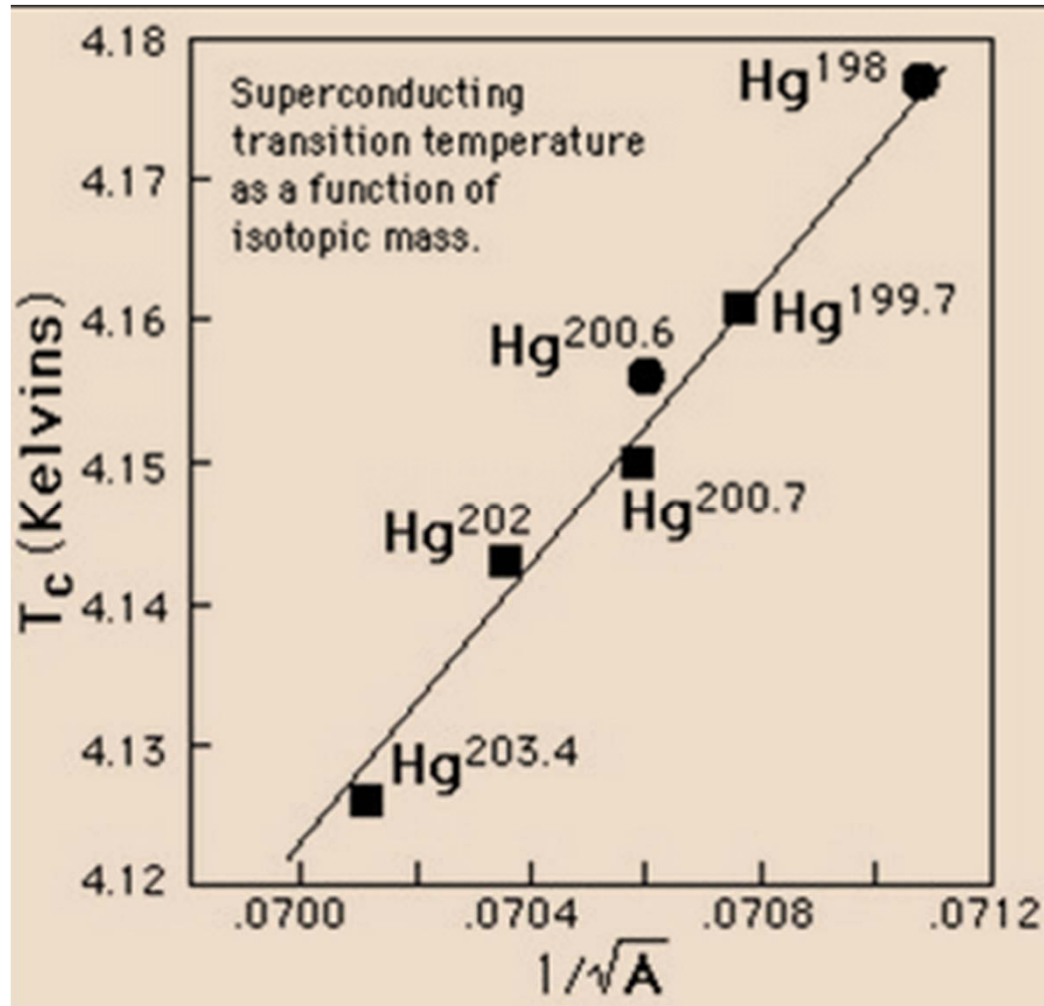
$e^- - e^-$  - Bindungsenergie f. Cooper-Paare wird

über deren Wechselwirkung mit dem Atomgitter erzeugt (Indiz: Isotopieffekt)

⇒ gute  $e^-$  - Gitter – Wechselwirkung nötig

⇒⇒ gute NL daher schlechte bzw. keine SL

# Supraleitung, Theorie

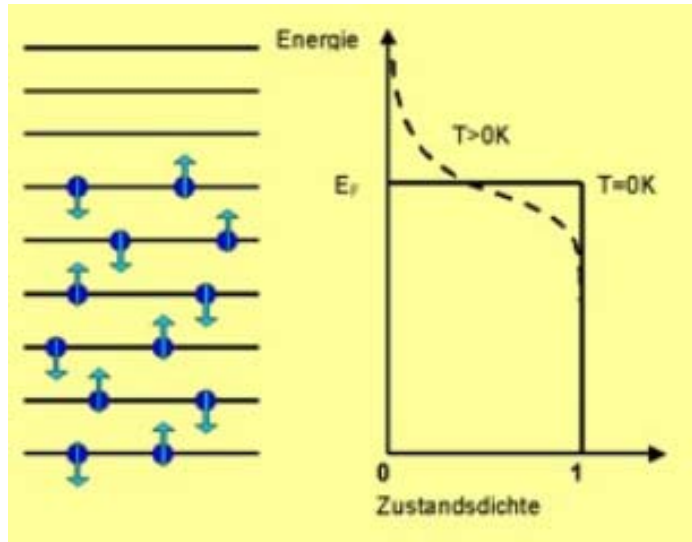


**Isotopie-Effekt:**

$T_c$  proportional zu  $m^\alpha$

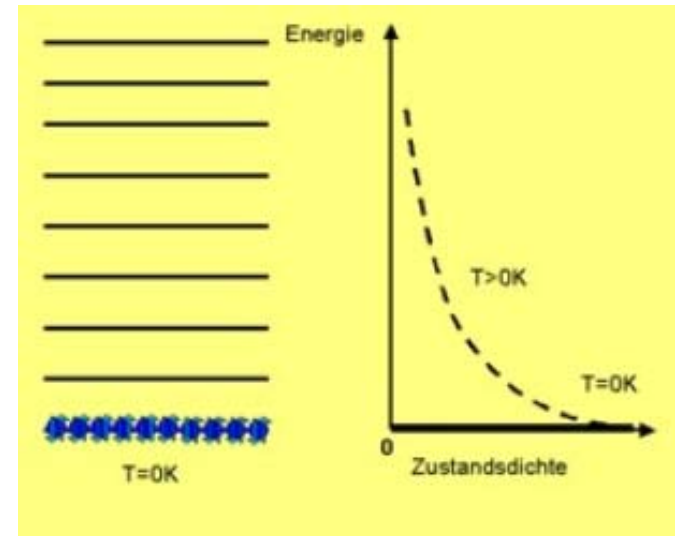
mit  $\alpha \approx 0,5$

# Supraleitung, Theorie



**Einzel-Elektronen:** Spin  $\frac{1}{2}$

→ Fermionen / Fermi-Statik  
unterliegen dem Pauli-Prinzip  
Energieniveaus bis ca.  
Fermikante mit je 2  $e^-$  gefüllt



**Cooper-Paare:** Gesamtspin  $\frac{1}{2} + (-\frac{1}{2}) = 0$

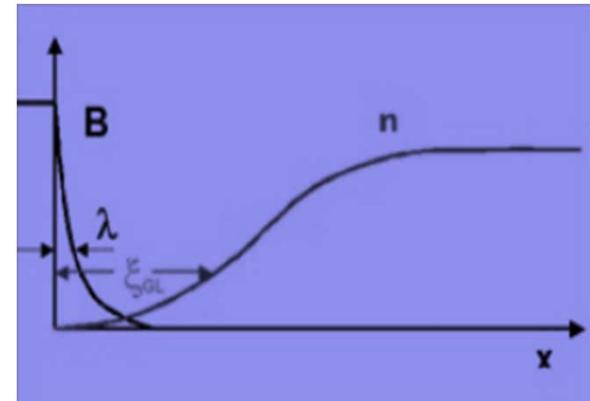
→ Bose-Einstein-Statik  
bei  $T = 0$  alle auf unterstem  
Energieniveaus  $\Rightarrow$  energetisch günstiger

# Supraleitung Typ I, II

Ginzburg-Landau-Parameter:  $\kappa := \frac{\lambda}{\xi}$

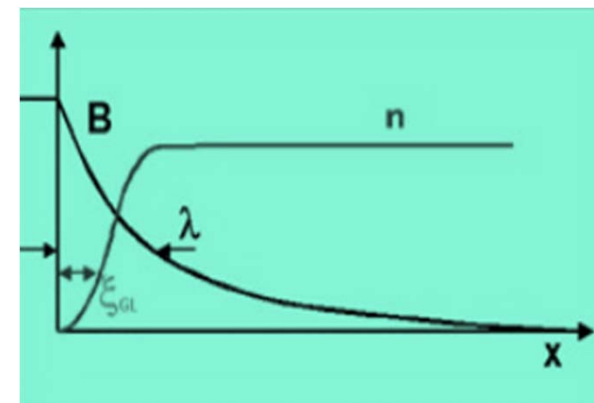
$\kappa < 0,71$ : Supraleiter Typ I

	$T_c$ [K]	$\lambda$ [nm]	$\xi$ [nm]	$\kappa$
Al	1,2	16	1600	0,01
Sn	3,7	34	230	0,16
Pb	7,2	37	83	0,47



$\kappa > 0,71$ : Supraleiter Typ II

	$T_c$ [K]	$\lambda$ [nm]	$\xi$ [nm]	$\kappa$
Nb	9,3	39	38	1
Nb <sub>3</sub> Sn	18	80	3	27
YBCO	93	150	1,5	100
Bi-2223	110	200	1,4	143

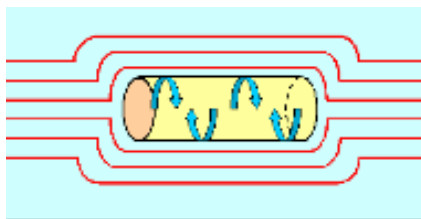
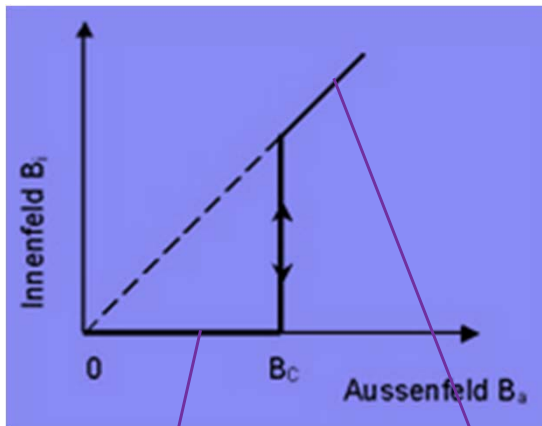




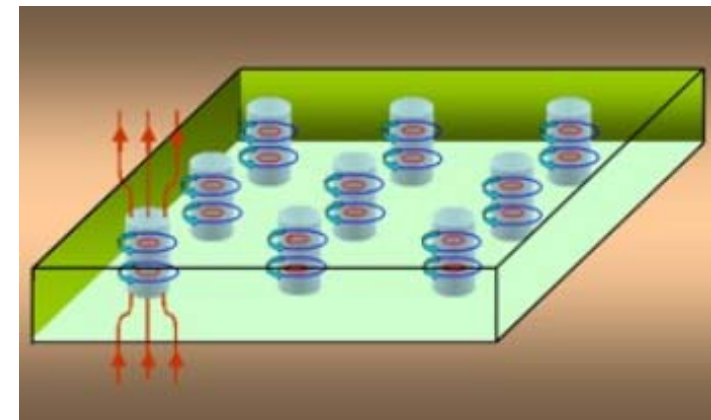
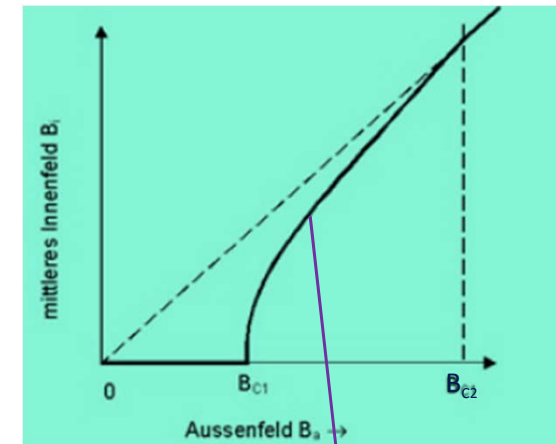
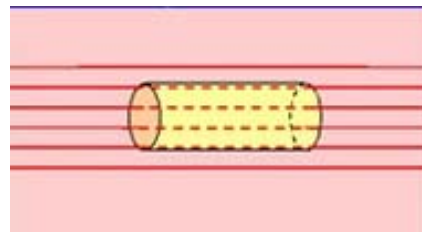
# Supraleitung Typ I, II

**Supraleiter im äußeren Magnetfeld  $B_a$ :**

Abschirmung des Innenbereichs durch Gegenfeld  $B_i$



**Supraleiter Typ I**



**Supraleiter Typ II**

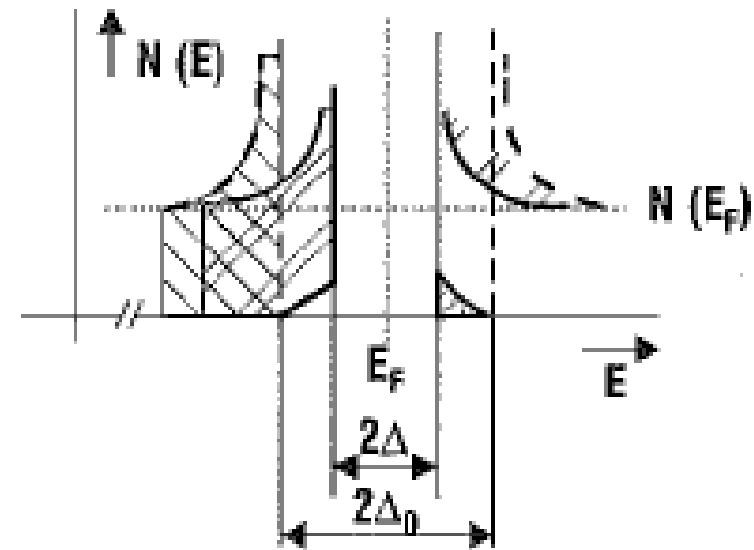
# Josephson-Effekt

Cooper-Paare: Energielücke  $2\Delta$

max. bei  $T = 0 \text{ K}$  ( $E = 2\Delta_0$ )

BCS-Theorie:  $2\Delta = 3,5 \cdot k_B \cdot T_c$

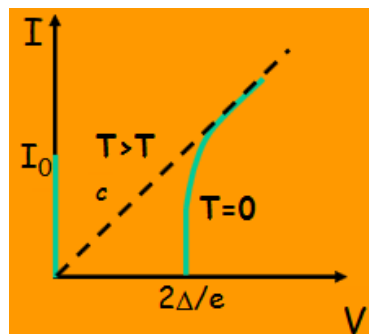
$\Rightarrow$  je höher  $T_c$ , desto größer die Energielücke  
(verbotener Energiezustand)



## Josephson-Effekt

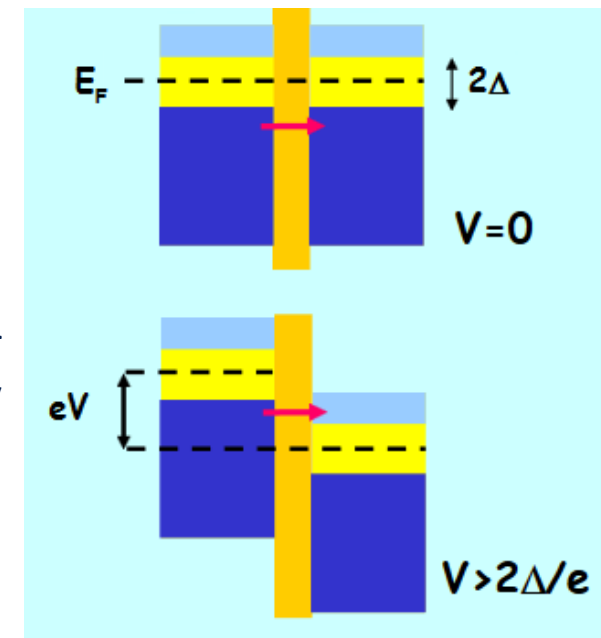
(Brian Josephson, 1962; Nobelpreis 1973)

Cooperpaare können Isolationsschicht überwinden, falls  $d < \xi$



bemerkenswerte  
elektr. Kennlinie

**Josephson-Kontakt:** Kombination  
SL – Isolator – SL  
von außen angelegte Spannung  $V$

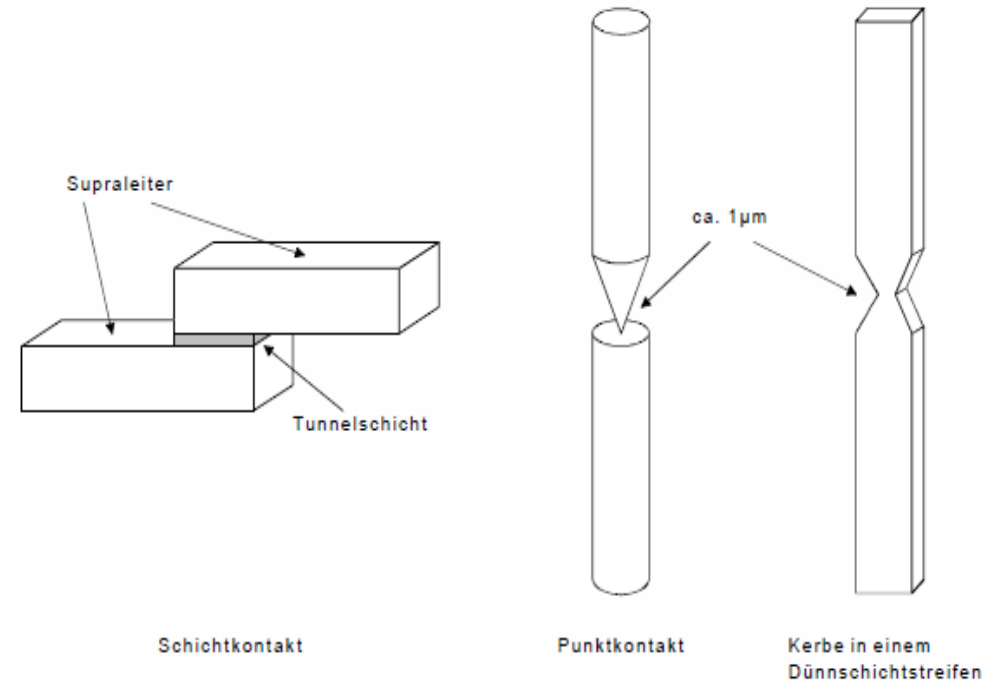
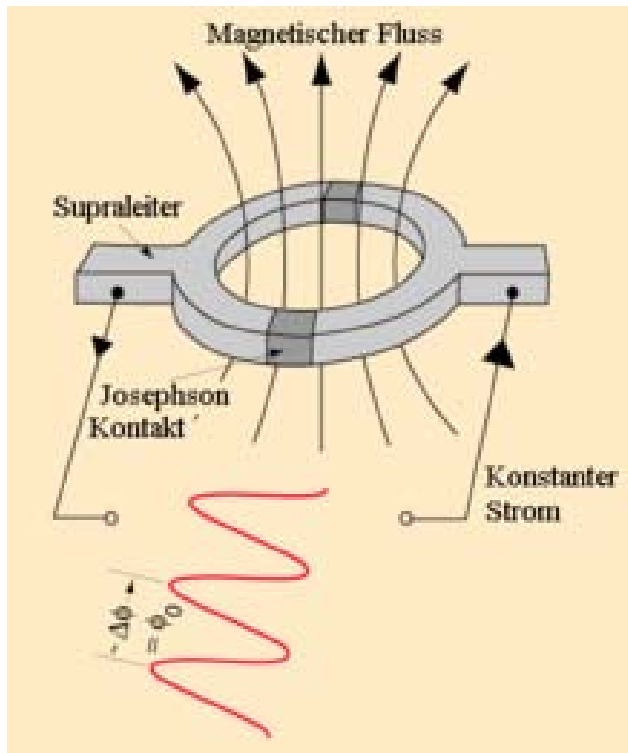


# SQUID

## Josephson-Kontakt:

unterschiedliche mögliche Bauformen

(“weak link”)



## Anwendung:

## SQUID – sc quantum interference device

extrem empfindlicher Magnetfeldsensor

elektr. detektierbar:

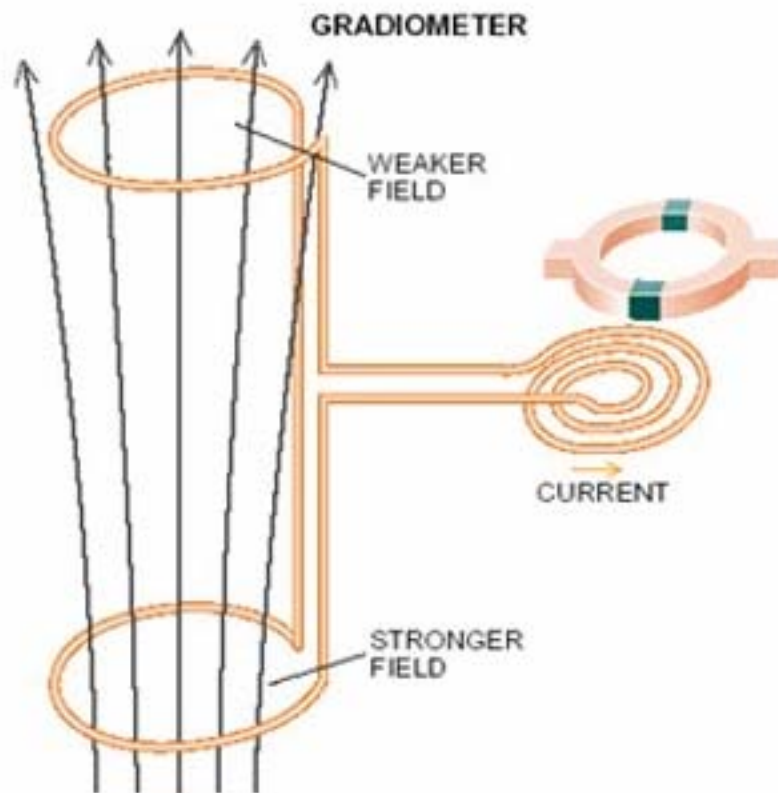
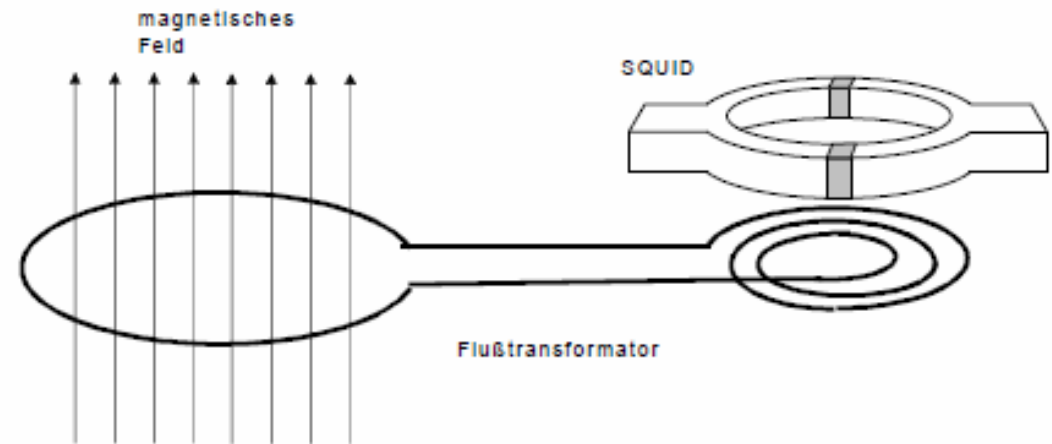
kleinstmögliche B-Änderung in eingeschlossener Fläche

(magnetisches Flussquantum  $\Phi_0 = h/2 \cdot e = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2$ )

# SQUID

## Josephson-Kontakt / SQUID:

weitere Steigerung der Auflösung über  
Antenne / Flusstransformator

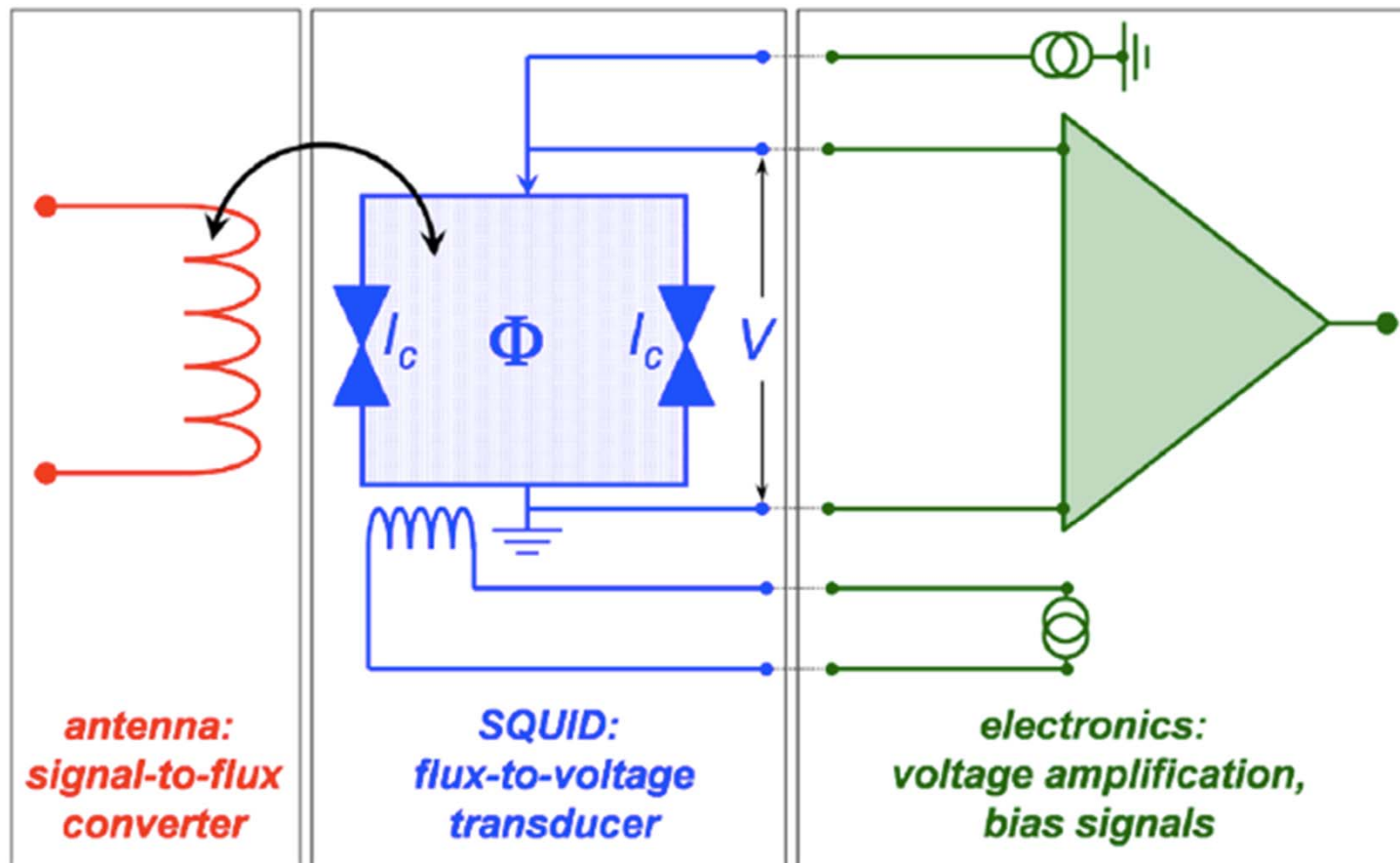


## Gradiometer-Anordnung:

- Elimination Gleichfeld
- Messung räumliche Änderung Feldlinien

# SQUID, elektr. Verschaltung

- *antenna,*
- *SQUID,*
- *room temperature electronics*



# SQUID: MEG, MCG

## SQUID: Messung kleinster Magnetfelder

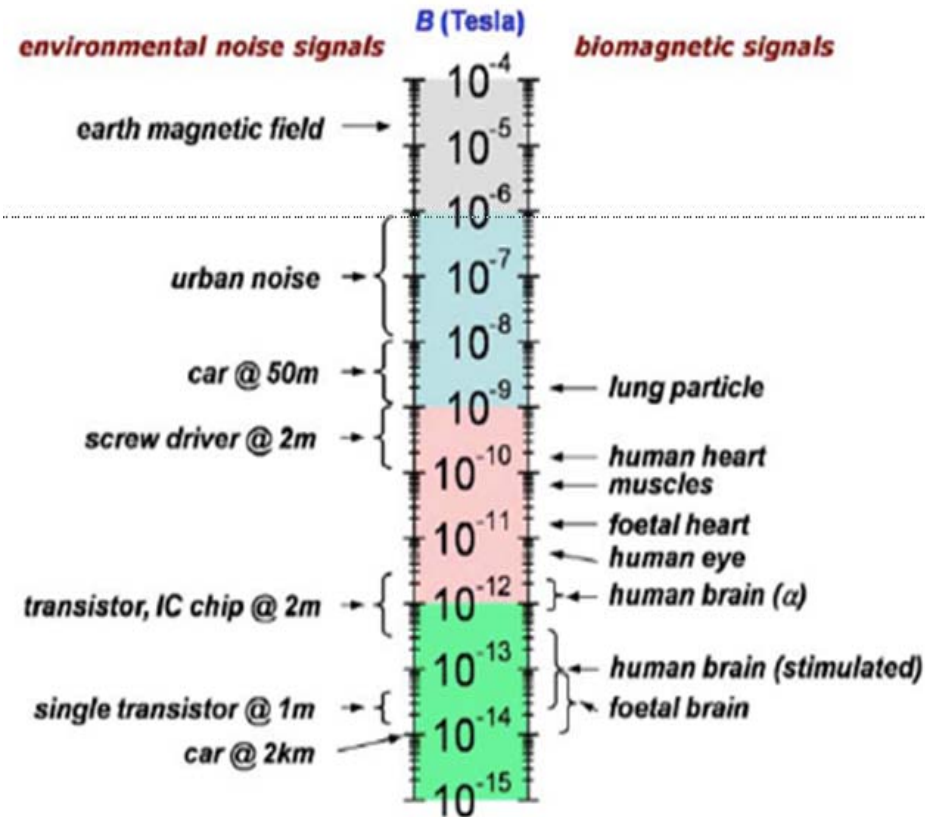
z.B. Aktivität Nervenzellen, Synapsen:

- elektr. Spannungen
- Stromfluss (-> Magnetfeld)

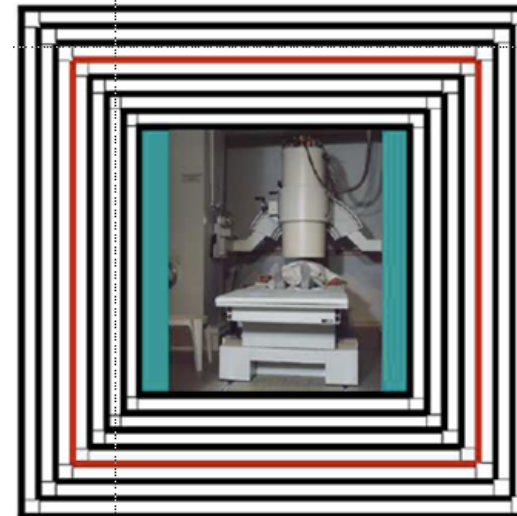
EEG: Abgreifen elektr. Feld

MEG: MagnetoEncephaloGramm

MCG: MagnetoCardioGramm



Hirnaktivitäten von ungeborenem Fötus im Mutterleib detektierbar  
(extrem gute Abschirmung gegen äußere Magnetfelder gleichzeitig nötig)



PTB Berlin:  
7  $\mu$ -metal shields  
1 Al layer  
active field reduction  
shielding factor:  
 $2 \times 10^6$  @ 0.01 Hz  
 $2 \times 10^8$  @ 5 Hz

Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT



# SQUID: MEG, MCG



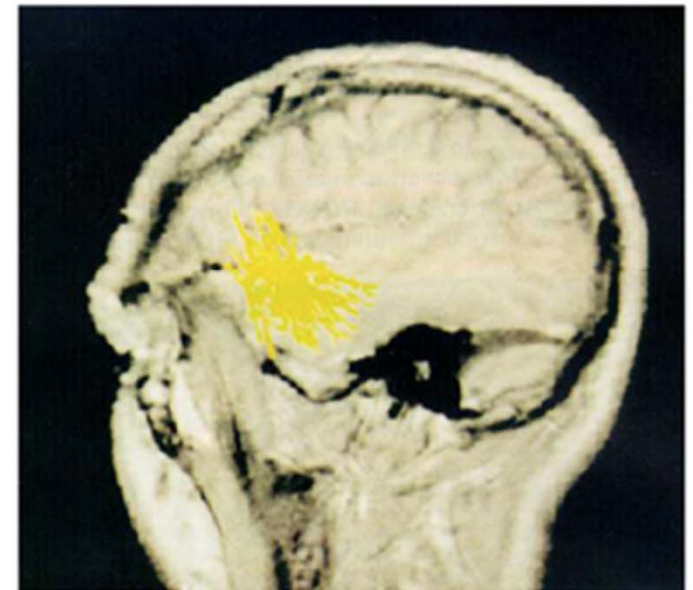
## signal reconstruction

- current distribution cannot be calculated from measured field distribution

- *inverse problem has no unique solution*

- **model assumptions**

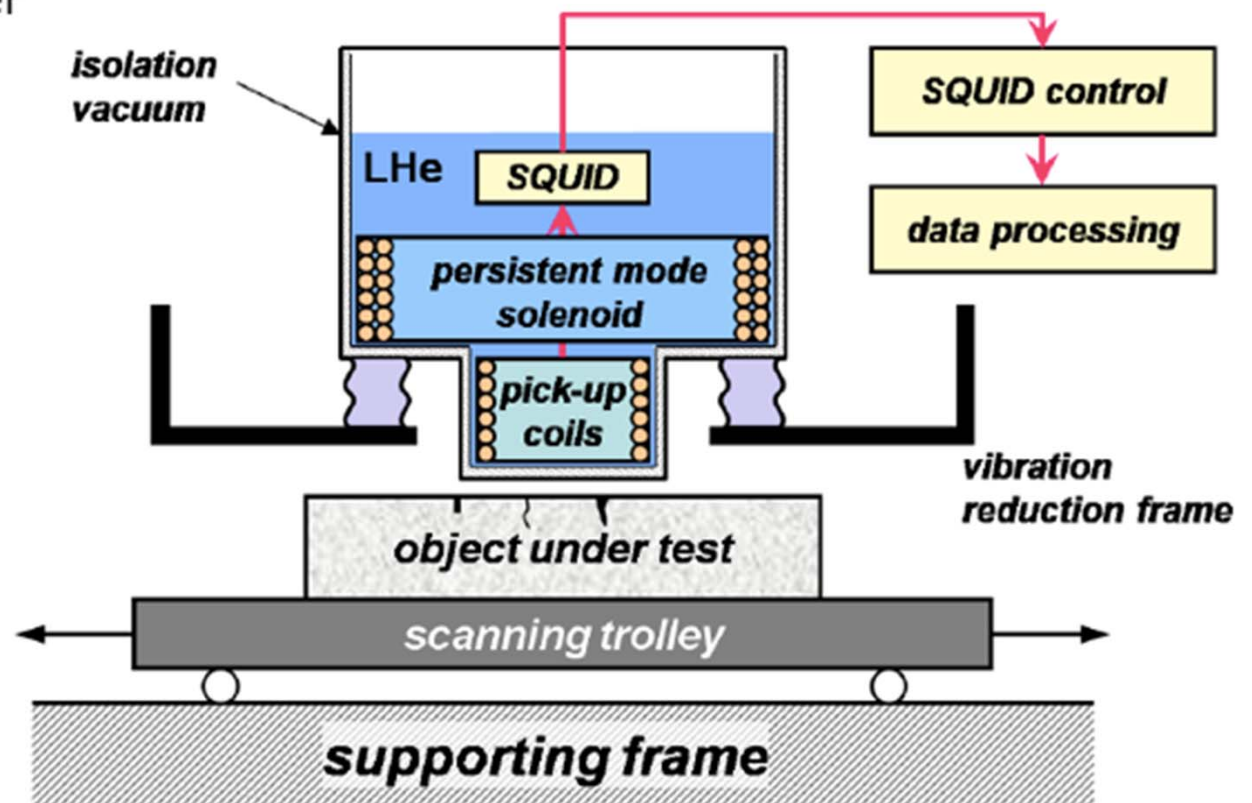
- based on elementary current dipoles  
(= short localized conductor segments & volume backflow)



Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

# SQUID, techn. Anwendung

- non-invasive identification of **structural** or **material defects**
- (sub-) surface cracks in aircrafts
- reinforcing rods in concrete strutures
- **short distance** between inner cold and out warm wall (spatial resolution)
- HTS SQUIDs (@ 77 K) advantageous



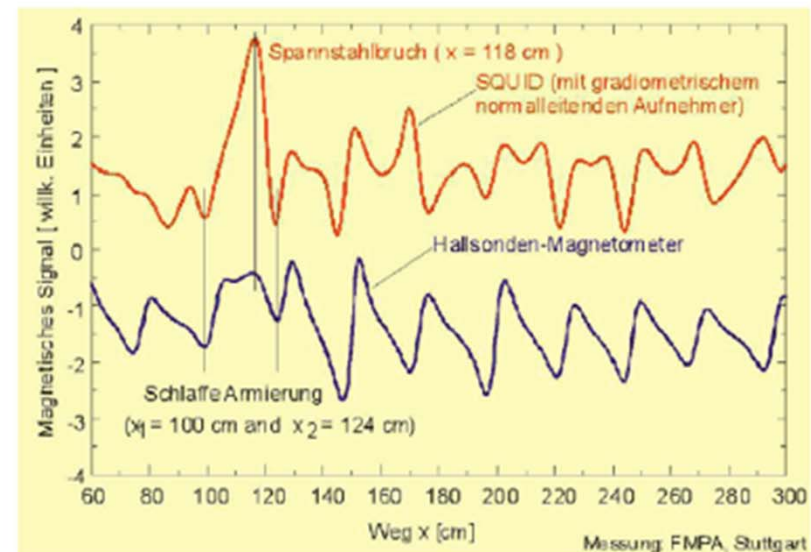
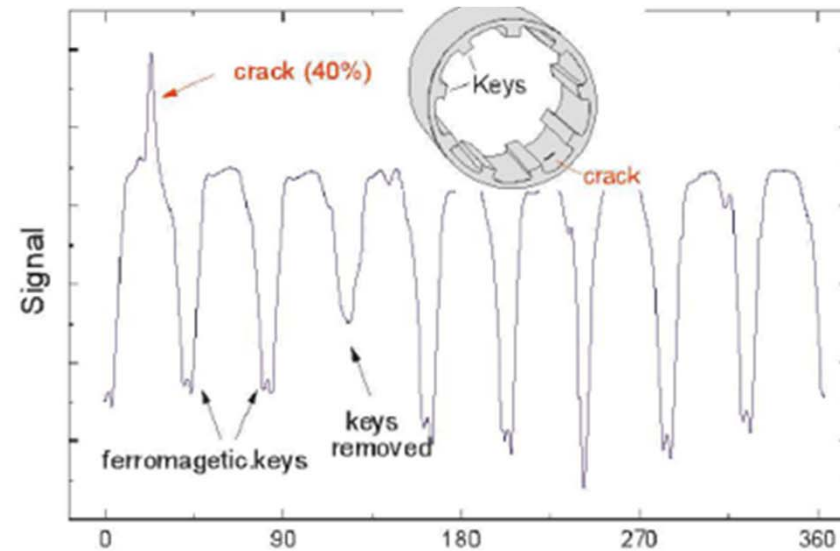
## eddy-current techniques:

- alternating field
- eddy currents disturbed by material defects

Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT



# SQUID, techn. Anwendung



Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

**SQUIDS:** bislang nur Forschungsprojekte, keine kommerzielle Anwendung  
(Ausnahme: Materialcharakterisierung Laborproben)