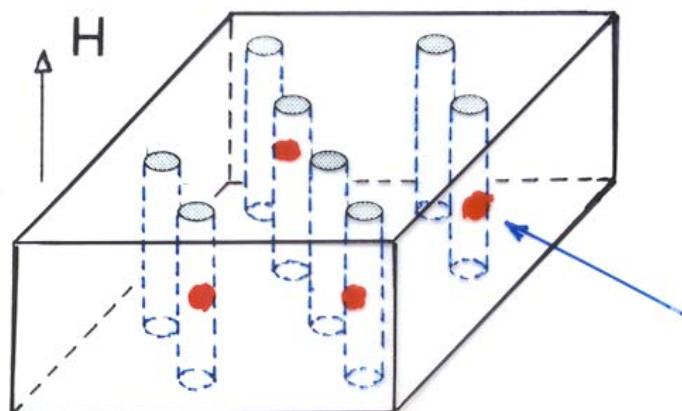


# Supraleitung

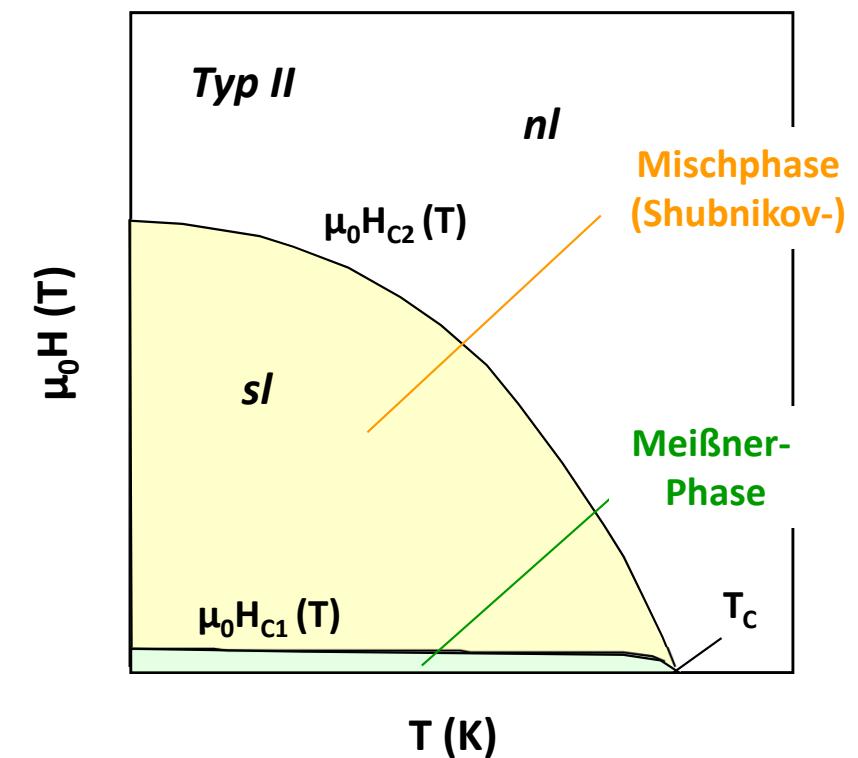
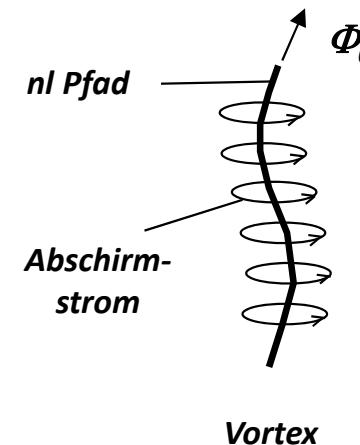
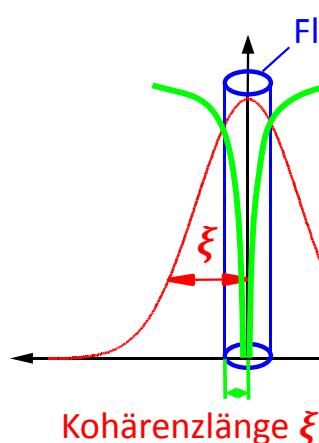
## Abhilfe: SL Typ II

Magnetfeld wird durch nl Flußschläuche (Abrikosow-Schlüsse) 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, Theorie

## Theoretisches Verständnis

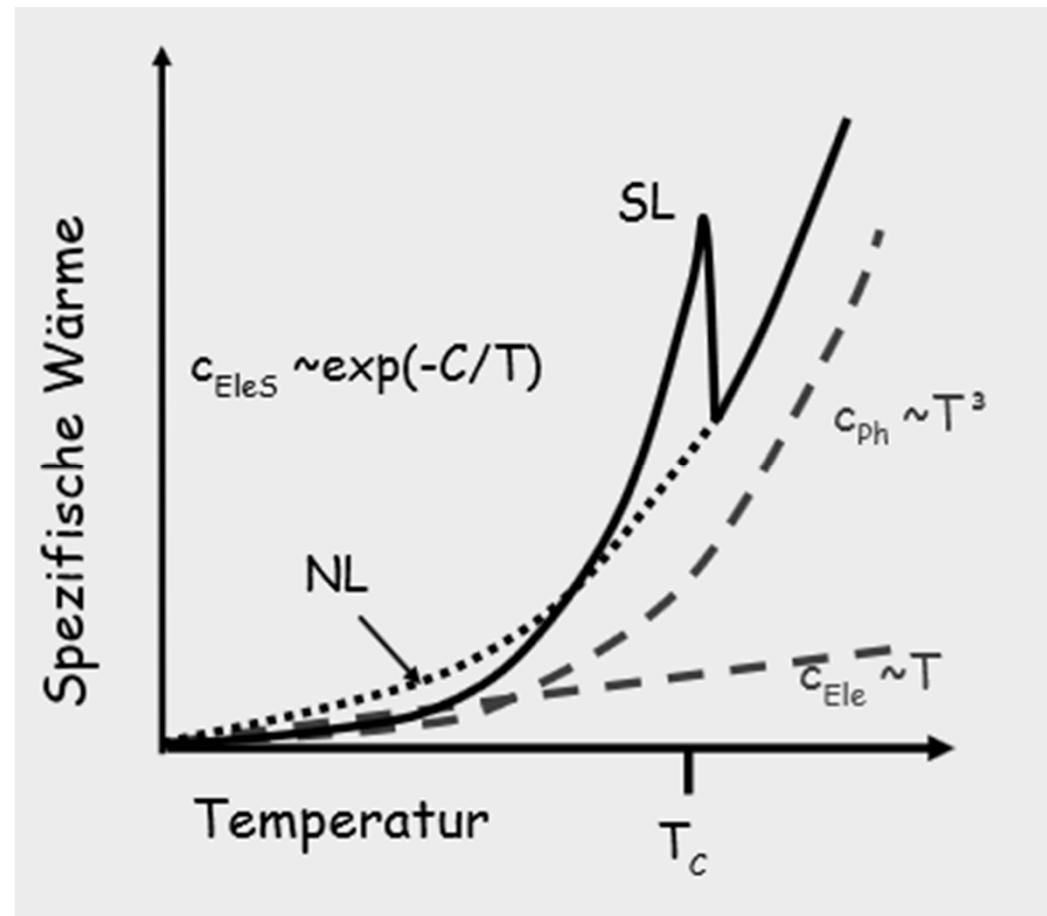
Übergang Zustand nl  $\Leftrightarrow$  sl:

**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:

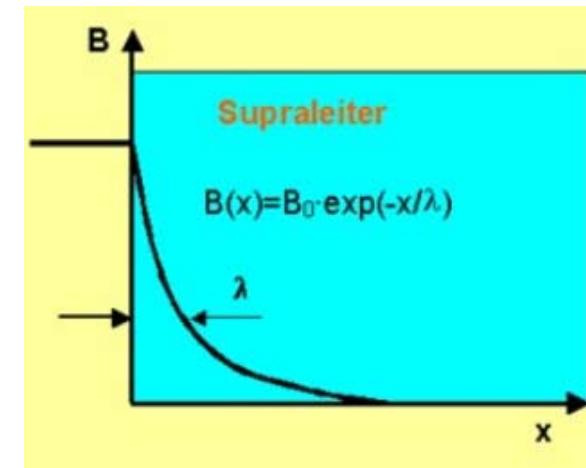
- London'sche Gleichung:**  $\hat{J} = E \cdot n \cdot e^2 / m \Rightarrow$  Elektronen werden nicht gestreut,  
die Stromdichte  $J$  kann unendlich wachsen;  
E: elektr. Feld; n: Ladungsträgerdichte; e: elektr. Elementarladung; m: Elektronenmasse

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

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

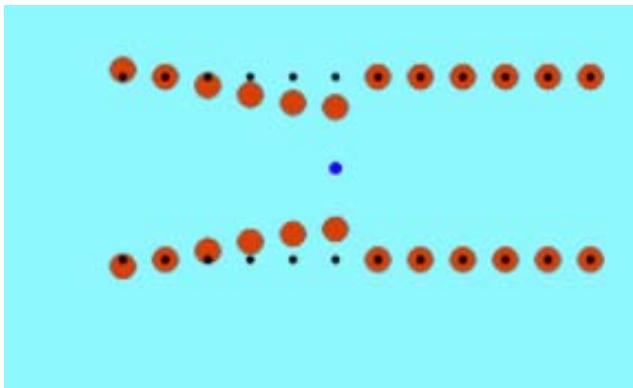
**Ginzburg-Landau-Theorie (1950):**

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



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

Die Gesamtheit der Cooperpaare bildet ein makroskopisches, quantenmechanischen System, welches nicht mit dem Gitter in Wechselwirkung treten kann und sich widerstandslos 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

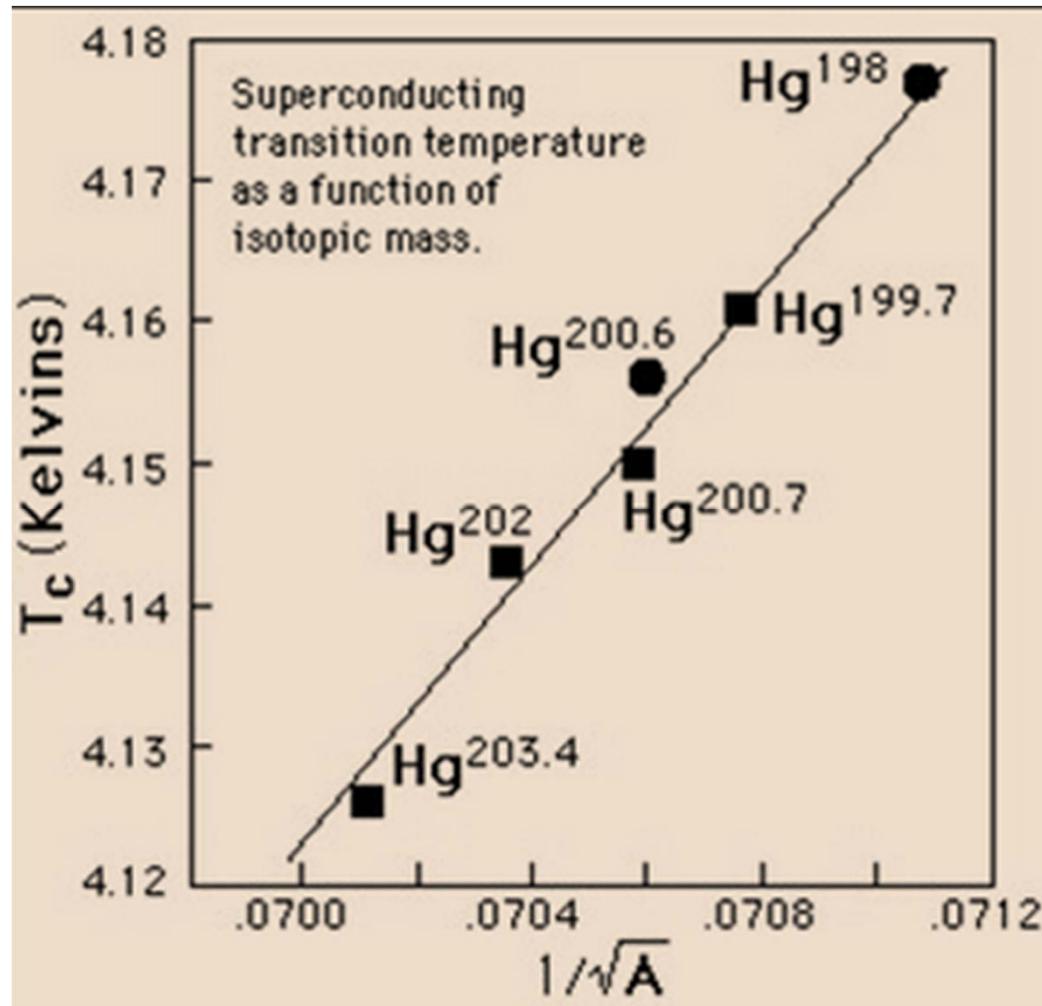
e<sup>-</sup> - e<sup>-</sup> - Bindungsenergie f. Cooper-Paare wird

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

⇒ gute e<sup>-</sup> - Gitter – Wechselwirkung nötig

⇒⇒ gute NL daher schlechte bzw. keine SL

# Supraleitung, Theorie

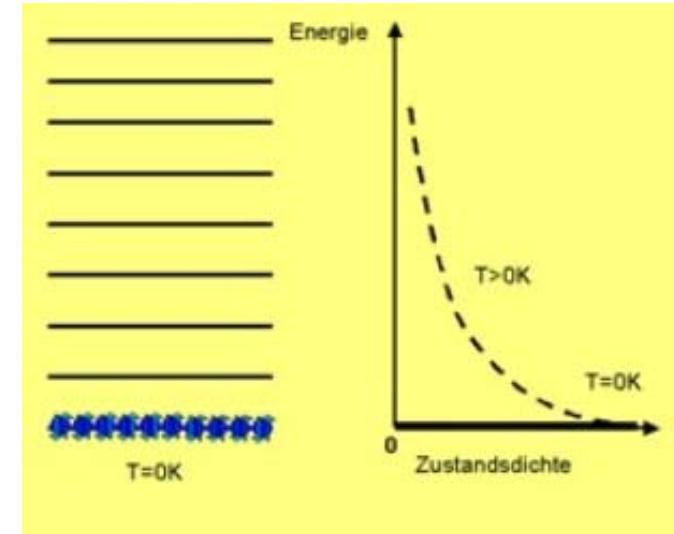
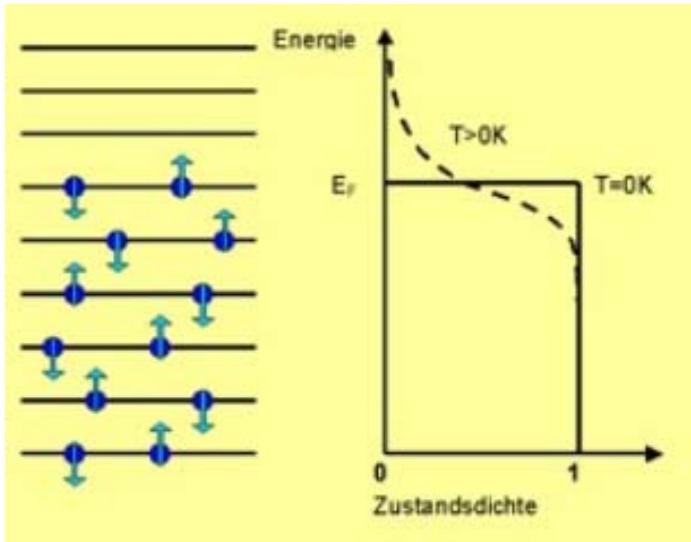


Isotopie-Effekt:

$T_c$  proportional zu  $m^\alpha$

mit  $\alpha \approx 0,5$

# Supraleitung, Theorie



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

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

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

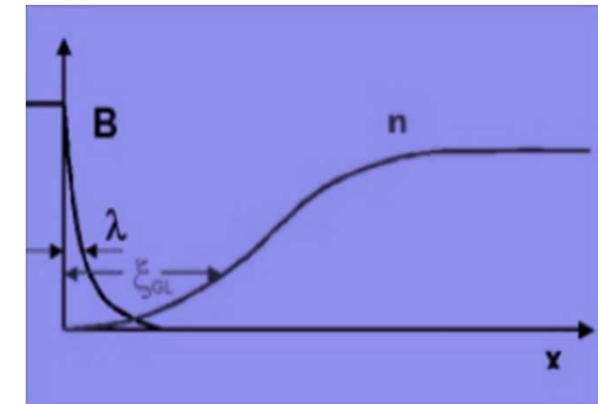
→ Bose-Einstein-Stastik  
bei  $T = 0$  alle auf unterstem  
Energieniveaus ⇒ energetisch günstiger

# Supraleitung Typ I, II

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

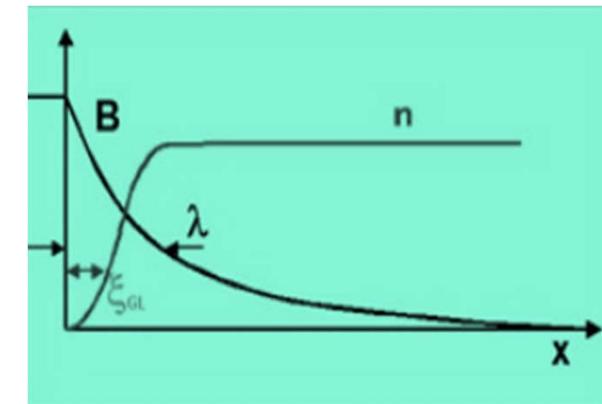
$\kappa < 0,71$ : Supraleiter Typ I

	$T_c$ [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

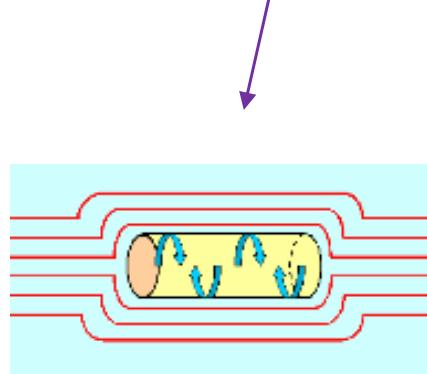
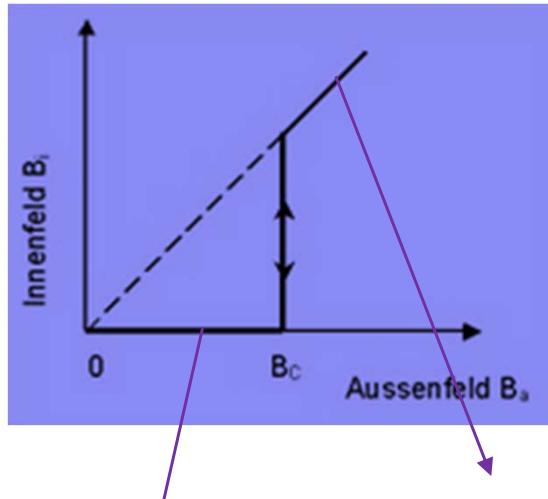
	$T_c$ [K]	$\lambda$ [nm]	$\xi$ [nm]	$\kappa$
Nb	9,3	39	38	1
$Nb_3Sn$	18	80	3	27
YBCO	93	150	1,5	100
Bi-2223	110	200	1,4	143



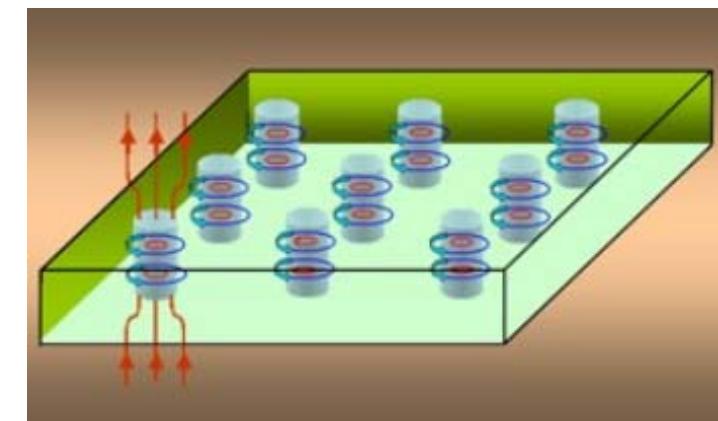
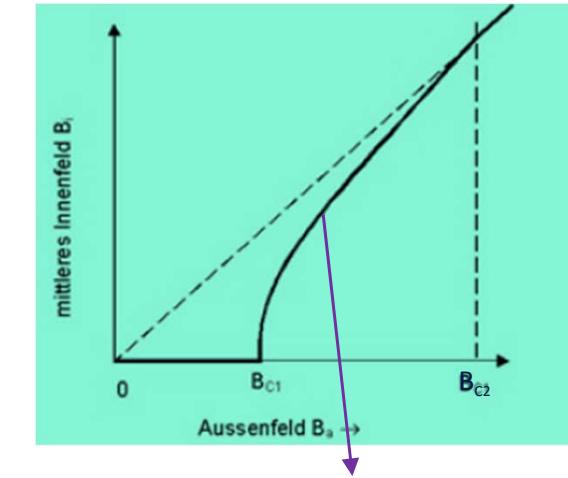
# Supraleitung Typ I, II

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

Abschirmung sl Innenbereich durch Gegenfeld  $B_i$



Supraleiter Typ I



Supraleiter Typ II

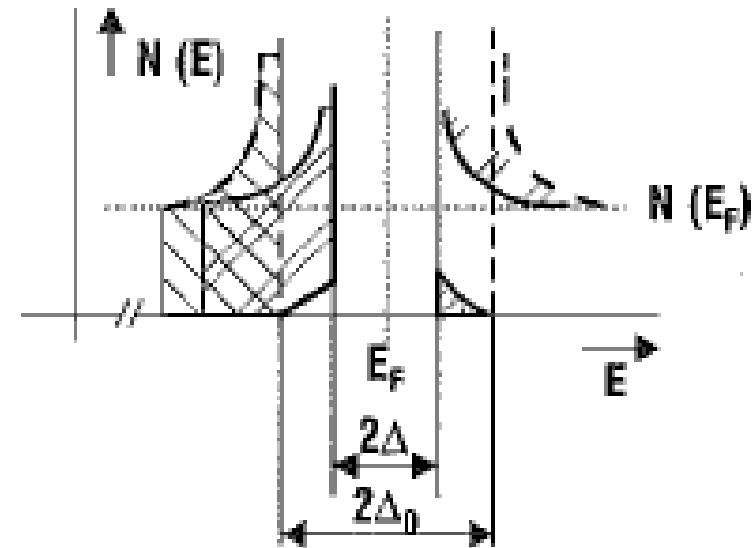
# Josephson-Effekt

Cooper-Paare: Engerielücke  $2\Delta$

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

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

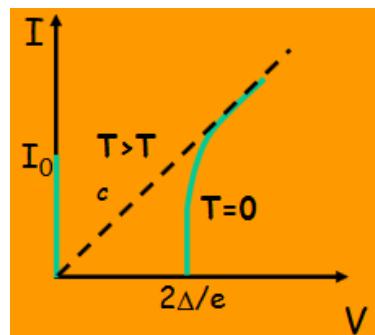
⇒ je höher  $T_c$ , desto größer die Engerielücke  
(verbotener Energiezustand)



## Josephson-Effekt

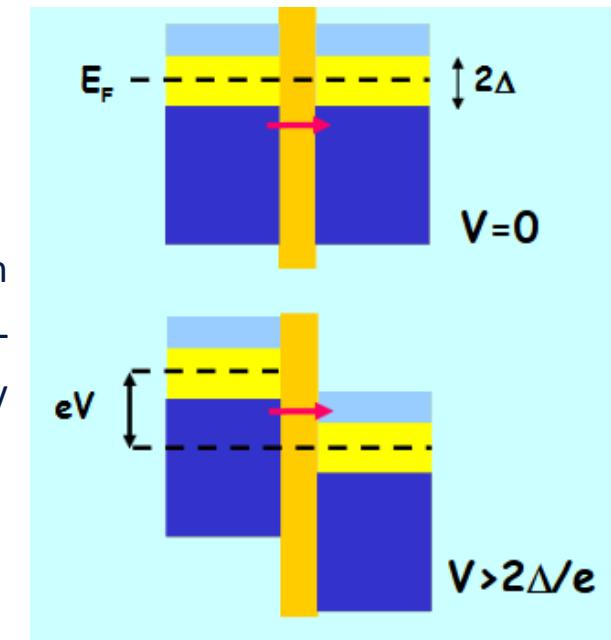
(Brian Josephson, 1962; Nobelpreis 1973)

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



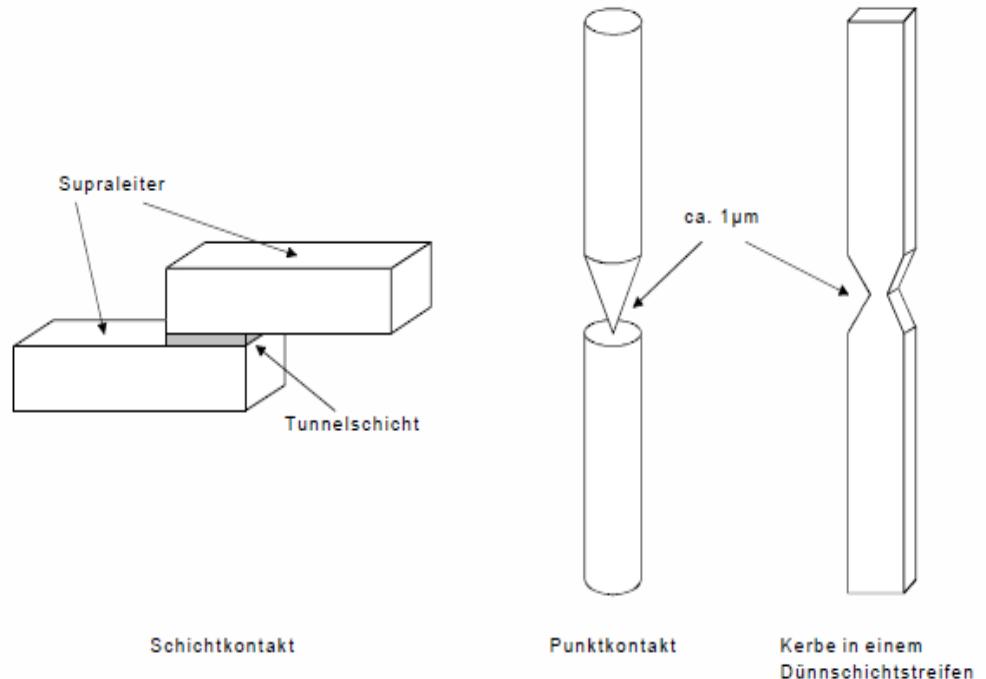
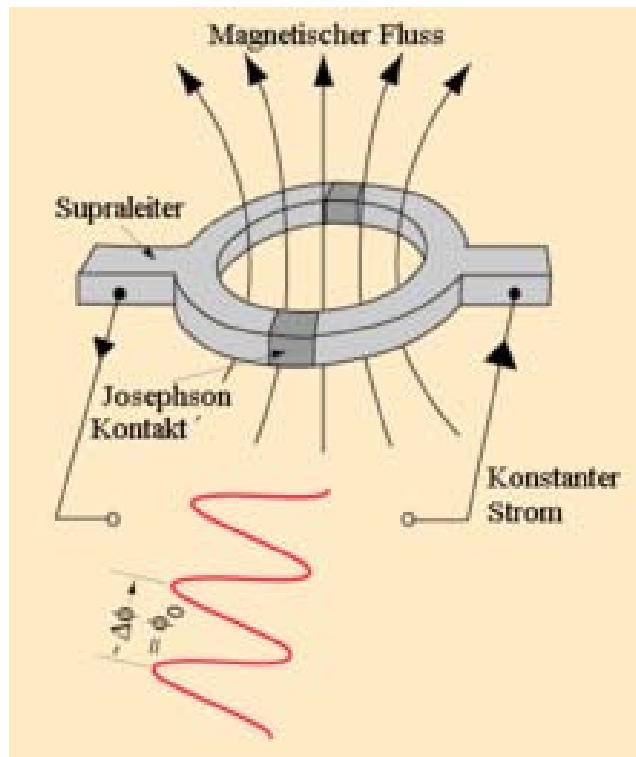
bemerkenswerte  
elektr. Kennlinie

**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:

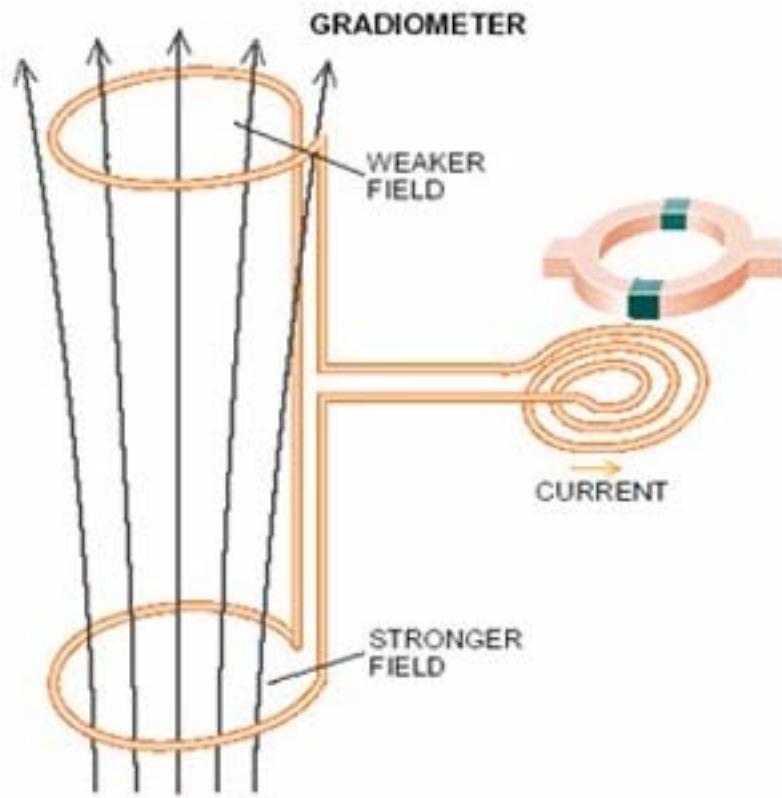
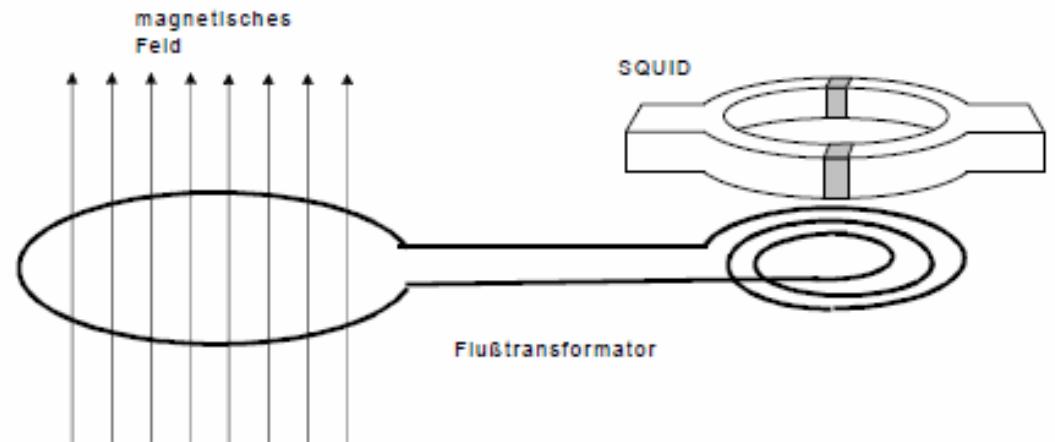
kleinstmögliche B-Änderung in eingeschlossener Fläche

(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

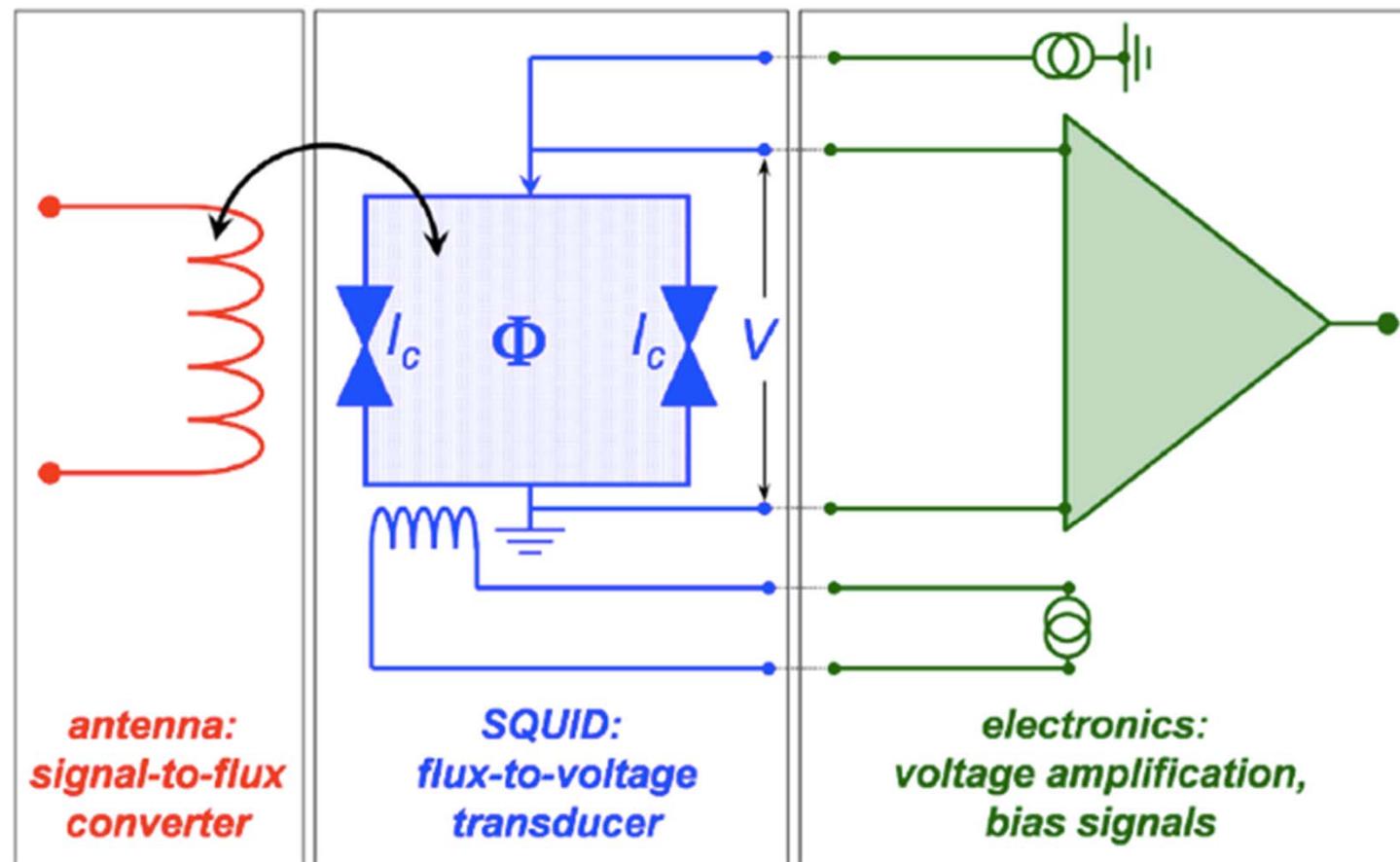


## Gradiometer-Anordnung:

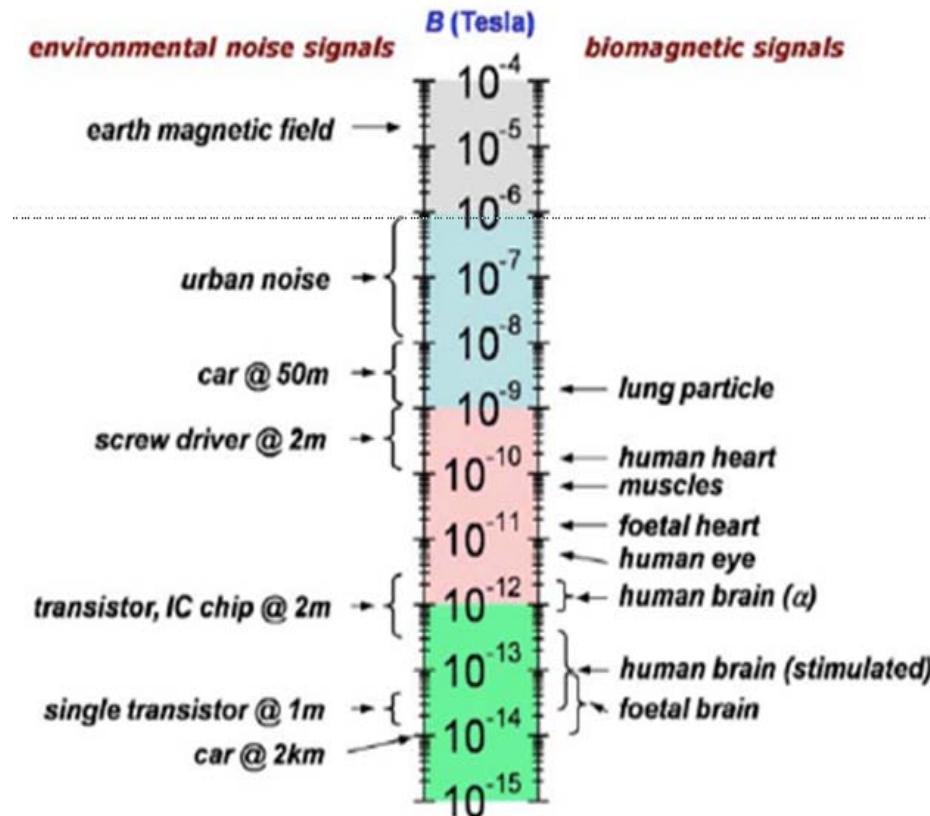
- Elimination Gleichfeld
- Messung räumliche Änderung Feldlinien

# SQUID, elektr. Verschaltung

- antenna,
- SQUID,
- room temperature electronics



# SQUID: MEG, MCG



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

## SQUID: Messung kleinster Magnetfelder

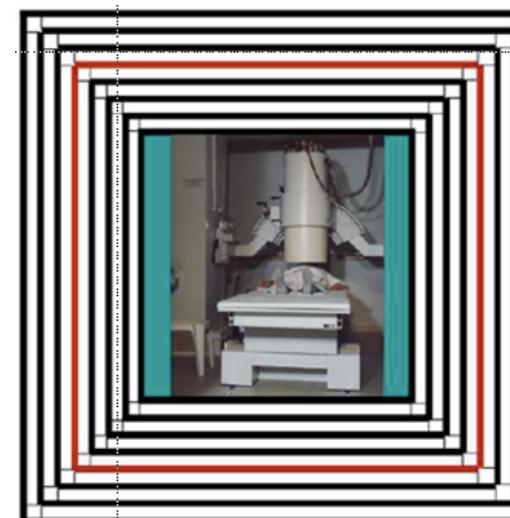
z.B. Aktivität Nervenzellen, Synapsen:

- elektr. Spannungen
- Stromfluss (-> Magnetfeld)

EEG: Abgreifen elektr. Feld

MEG: MagnetoEncephaloGramm

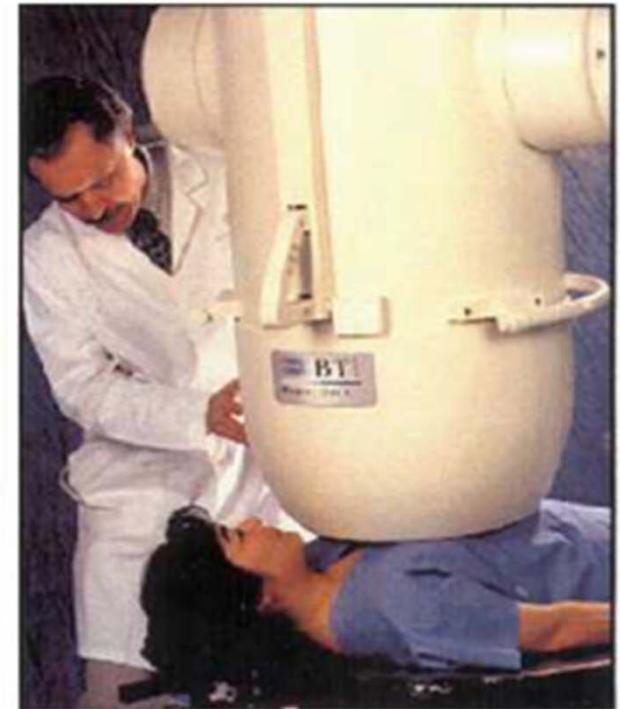
MCG: MagnetoCardioGramm



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

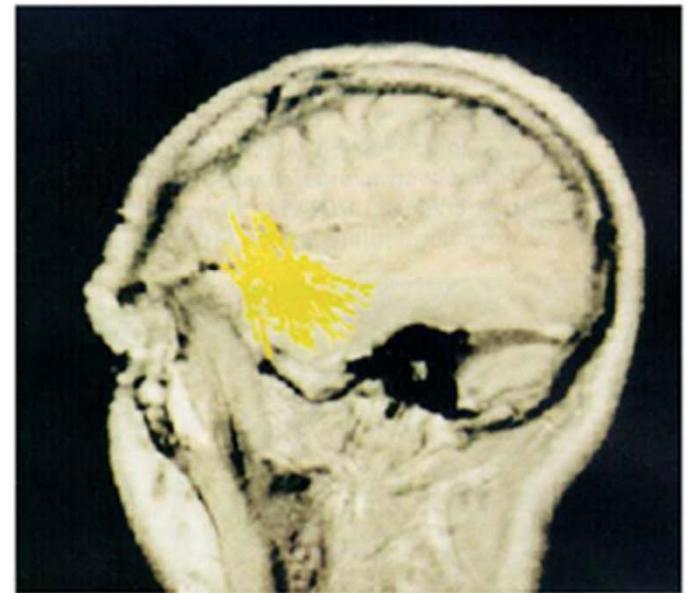
Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

# SQUID: MEG, MCG



## signal reconstruction

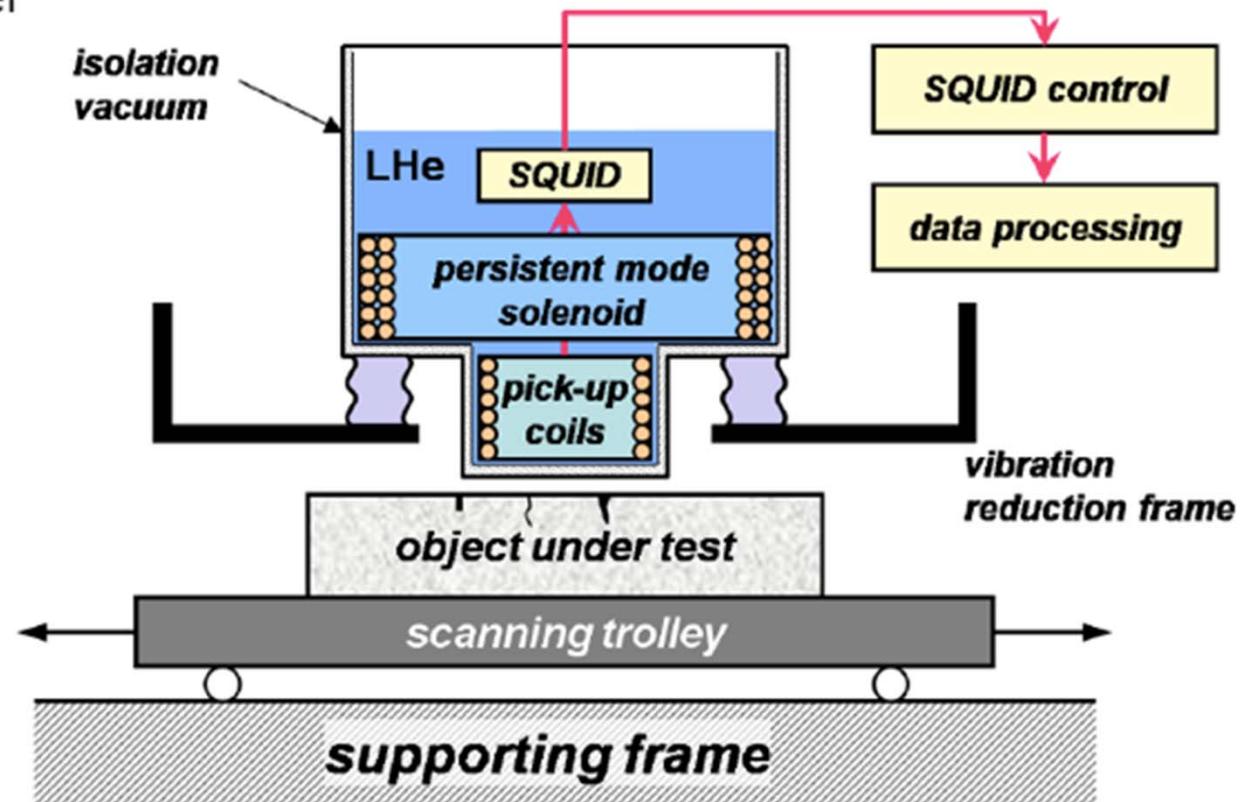
- current distribution cannot be calculated from measured field distribution
- *inverse problem has no unique solution*
- **model assumptions**
- based on elementary current dipoles  
(= short localized conductor segments & volume backflow)



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 structures
- **short distance** between inner cold and out warm wall (spatial resolution)
- HTS SQUIDs (@ 77 K) advantageous

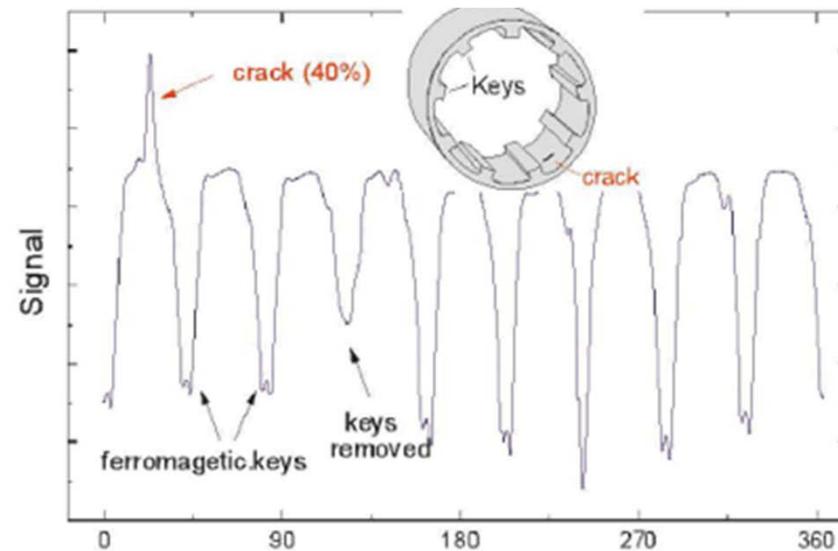


## eddy-current techniques:

- alternating field
- eddy currents disturbed by material defects

Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

# SQUID, techn. Anwendung



Quelle: B. Holzapfel, IFW Dresden; KIT

