

SQUID

Superconducting QUantum Interference Device

ein Vortrag von und mit
Lukas Gathmann,
gehalten am
25. Oktober 2011

- 1 Motivation
- 2 Wichtiges Basiswissen
- 3 Josephson-Effekt
- 4 dc-SQUID
- 5 rf-SQUID
- 6 Anwendung

Wozu ein SQUID?

Wozu ein SQUID?

Messung kleiner Magnetfelder im Bereich von $\mu_0 H \simeq \text{fT}$

Grundzüge der Supraleitung

Grundzüge der Supraleitung

- Unterhalb einer materialabhängigen Sprungtemperatur werden manche Materialien supraleitend.

Grundzüge der Supraleitung

- Unterhalb einer materialabhängigen Sprungtemperatur werden manche Materialien supraleitend.
- Ladungsträger in SL's sind bosonische Cooper-Paare.

Grundzüge der Supraleitung

- Unterhalb einer materialabhängigen Sprungtemperatur werden manche Materialien supraleitend.
- Ladungsträger in SL's sind bosonische Cooper-Paare.
- Man unterscheidet Tieftemperatur- (Helium-Kühlung) und Hochtemperatursupraleiter (Stickstoff-Kühlung).

Grundzüge der Supraleitung

- Unterhalb einer materialabhängigen Sprungtemperatur werden manche Materialien supraleitend.
- Ladungsträger in SL's sind bosonische Cooper-Paare.
- Man unterscheidet Tieftemperatur- (Helium-Kühlung) und Hochtemperatursupraleiter (Stickstoff-Kühlung).
- Ab einem gewissen kritischen Magnetfeld wird einer Supraleiter ein normaler Leiter.

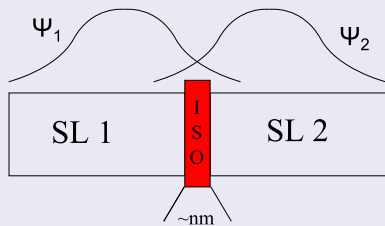
Grundzüge der Supraleitung

- Unterhalb einer materialabhängigen Sprungtemperatur werden manche Materialien supraleitend.
- Ladungsträger in SL's sind bosonische Cooper-Paare.
- Man unterscheidet Tieftemperatur- (Helium-Kühlung) und Hochtemperatursupraleiter (Stickstoff-Kühlung).
- Ab einem gewissen kritischen Magnetfeld wird einer Supraleiter ein normaler Leiter.
- Der Magnetische Fluss Φ durch eine Schleife aus einem Supraleitenden Material kann nur ganzzahlige Vielfache eines magnetischen Flussquant Φ_0 annehmen.

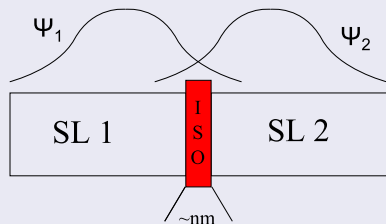
Magnetisches Flussquant:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}$$

Aufbau:



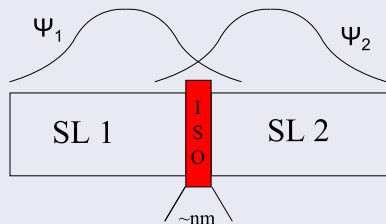
Aufbau:



Resultat:

Tunnelstrom I_S der Cooper-Paare, da Wellenfunktionen $\Psi_{1/2}$ der beiden Supraleiter überlappen.

Aufbau:



Resultat:

Tunnelstrom I_S der Cooper-Paare, da Wellenfunktionen $\psi_{1/2}$ der beiden Supraleiter überlappen.

Supraleiter können auch anders getrennt sein (z.B. Normalleiter, Punktkontakt,...)

1. Josephson-Gleichung:

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi$$

1. Josephson-Gleichung:

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi$$

2. Josephson-Gleichung:

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{E_1 - E_2}{\hbar}$$

1. Josephson-Gleichung:

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi$$

2. Josephson-Gleichung:

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{E_1 - E_2}{\hbar}$$

- 1.Fall: $SL\ 1 = SL\ 2$ und $U_S = 0$:

1. Josephson-Gleichung:

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi$$

2. Josephson-Gleichung:

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{E_1 - E_2}{\hbar}$$

- 1.Fall: $SL\ 1 = SL\ 2$ und $U_S = 0$:
 $\Rightarrow \hat{H}_1 |\Psi_1\rangle = e^{\Delta\varphi} \hat{H}_2 |\Psi_2\rangle$

1. Josephson-Gleichung:

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi$$

2. Josephson-Gleichung:

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{E_1 - E_2}{\hbar}$$

- 1.Fall: $SL\ 1 = SL\ 2$ und $U_S = 0$:
 $\Rightarrow \hat{H}_1 |\Psi_1\rangle = e^{\Delta\varphi} \hat{H}_2 |\Psi_2\rangle$
 $\Rightarrow E_1 = E_2$

1. Josephson-Gleichung:

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi$$

2. Josephson-Gleichung:

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{E_1 - E_2}{\hbar}$$

- 1. Fall: SL 1 = SL 2 und $U_S = 0$:
 $\Rightarrow \hat{H}_1 |\Psi_1\rangle = e^{\Delta\varphi} \hat{H}_2 |\Psi_2\rangle$
 $\Rightarrow E_1 = E_2$
- 2. Fall: SL 1 = SL 2 und $U_S \neq 0$:

1. Josephson-Gleichung:

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi$$

2. Josephson-Gleichung:

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{E_1 - E_2}{\hbar}$$

- 1. Fall: SL 1 = SL 2 und $U_S = 0$:
 $\Rightarrow \hat{H}_1 |\Psi_1\rangle = e^{\Delta\varphi} \hat{H}_2 |\Psi_2\rangle$
 $\Rightarrow E_1 = E_2$
- 2. Fall: SL 1 = SL 2 und $U_S \neq 0$:
 $\Rightarrow E_1 - E_2 = e_S U_S$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{e_s U_S}{\hbar}$$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{esU_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

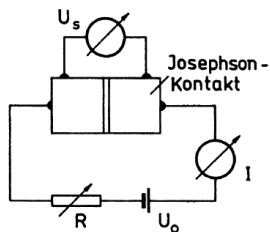


Abbildung: Quelle:[Kop]

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{esU_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

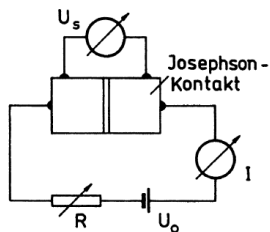


Abbildung: Quelle: [Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{e_s U_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

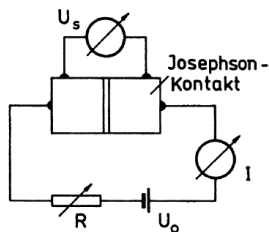


Abbildung: Quelle: [Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S = 0$$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{esU_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

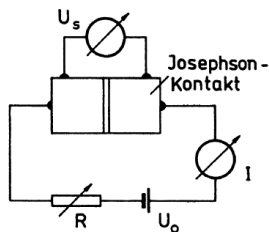


Abbildung: Quelle:[Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S = 0$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi = \text{const.}$$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{e s U_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

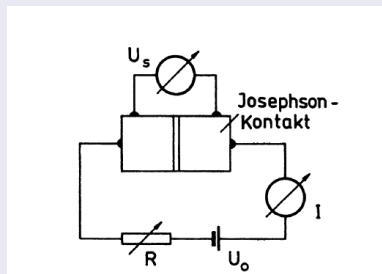


Abbildung: Quelle:[Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S = 0$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi = \text{const.}$$

$$\Rightarrow I_S = \text{const.}$$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{esU_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

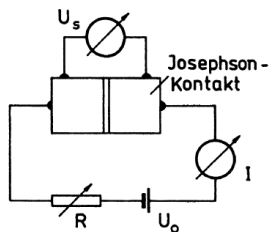


Abbildung: Quelle: [Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S = 0$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi = \text{const.}$$

$$\Rightarrow I_S = \text{const.}$$

$$U_0 > R * I_{S,max}:$$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{e s U_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

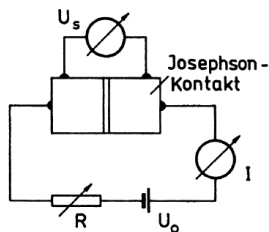


Abbildung: Quelle: [Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S = 0$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi = \text{const.}$$

$$\Rightarrow I_S = \text{const.}$$

$$U_0 > R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S \neq 0$$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{e_s U_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

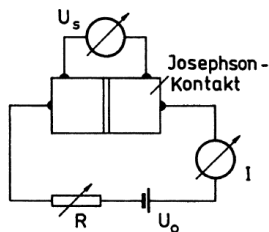


Abbildung: Quelle: [Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

- $\Rightarrow U_S = 0$
- $\Rightarrow \Delta\varphi = \text{const.}$
- $\Rightarrow I_S = \text{const.}$

$$U_0 > R * I_{S,max}:$$

- $\Rightarrow U_S \neq 0$
- $\Rightarrow \Delta\varphi = \frac{e_s U_S}{\hbar} t + \varphi_0$

$$I_S = I_{S,max} \sin \Delta\varphi \quad \cup \quad \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{e s U_S}{\hbar}$$

Schaltung zum Josephson-Effekt:

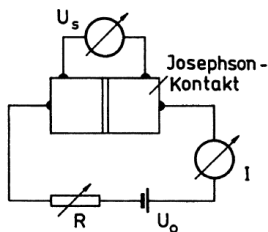


Abbildung: Quelle: [Kop]

$$U_0 < R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S = 0$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi = \text{const.}$$

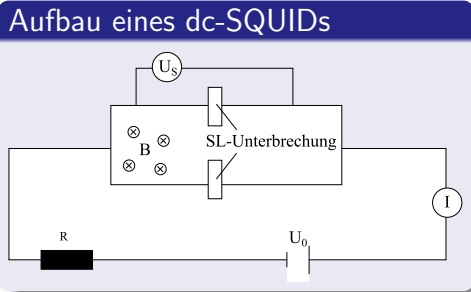
$$\Rightarrow I_S = \text{const.}$$

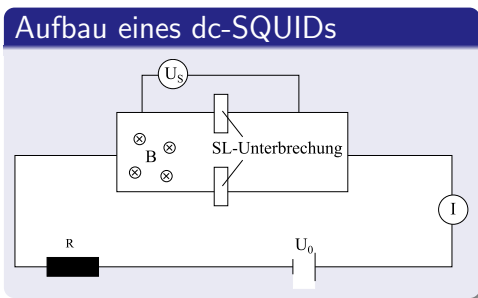
$$U_0 > R * I_{S,max}:$$

$$\Rightarrow U_S \neq 0$$

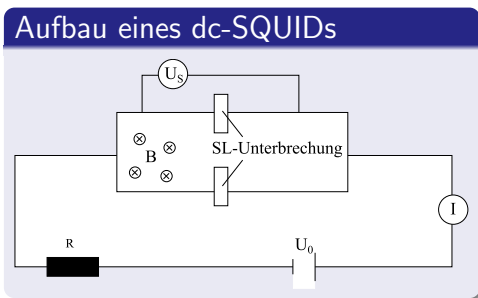
$$\Rightarrow \Delta\varphi = \frac{e s U_S}{\hbar} t + \varphi_0$$

$$\Rightarrow I_S = I_{S,max} \sin \frac{e s U_S}{\hbar} t + \varphi_0$$

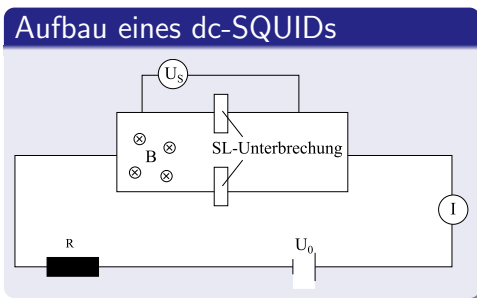




- Strom im SL-Ring fließt so, dass für den Fluss gilt: $\Phi = n\Phi_0$



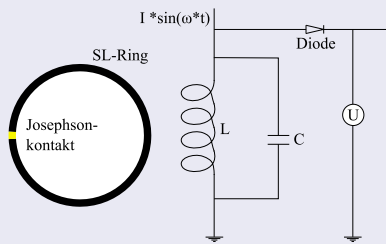
- Strom im SL-Ring fließt so, dass für den Fluss gilt: $\Phi = n\Phi_0$
- Zusätzlicher Einfluss des Vektorpotentials \vec{A} auf $\Delta\varphi$



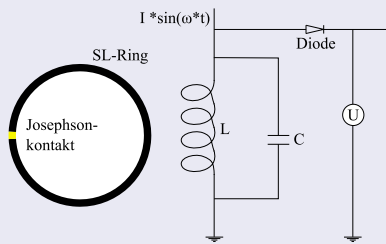
- Strom im SL-Ring fließt so, dass für den Fluss gilt: $\Phi = n\Phi_0$
- Zusätzlicher Einfluss des Vektorpotentials \vec{A} auf $\Delta\varphi$
- Insgesamt kann man zeigen, dass:

$$I_S = 2I_{S,max} \sin \varphi^+ \cos \frac{\pi\Phi}{\Phi_0}$$

Aufbau eines rf-SQUID:

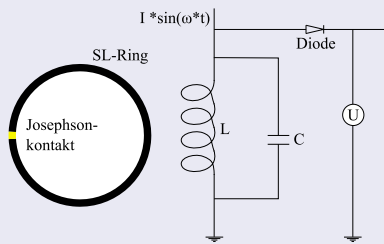


Aufbau eines rf-SQUID:



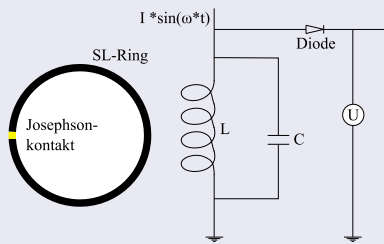
- Hochfrequenter magnetischer Fluss wird zusätzlich induziert (100 MHz bis 1 GHz).

Aufbau eines rf-SQUID:



- Hochfrequenter magnetischer Fluss wird zusätzlich induziert (100 MHz bis 1 GHz).
- U misst den Kompensationsstrom im SL-Ring.

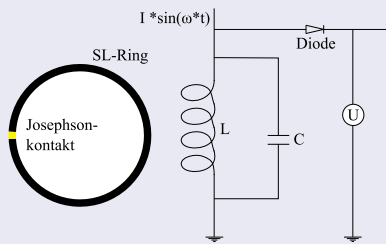
Aufbau eines rf-SQUID:



- $\Phi_{ext} = n\Phi_0$:

- Hochfrequenter magnetischer Fluss wird zusätzlich induziert (100 MHz bis 1 GHz).
- U misst den Kompensationsstrom im SL-Ring.

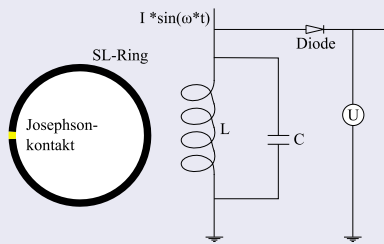
Aufbau eines rf-SQUID:



- Hochfrequenter magnetischer Fluss wird zusätzlich induziert (100 MHz bis 1 GHz).
- U misst den Kompensationsstrom im SL-Ring.

- $\Phi_{ext} = n\Phi_0$: Solange Stromanstieg I_S im Ring $\simeq I_{rf}$ bis $I_S = I_C$.

Aufbau eines rf-SQUID:



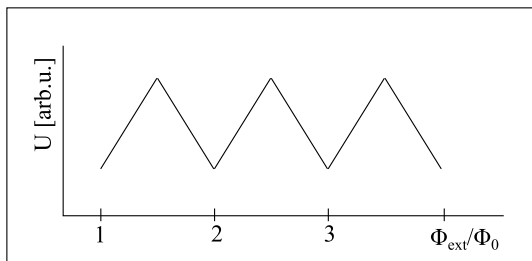
- Hochfrequenter magnetischer Fluss wird zusätzlich induziert (100 MHz bis 1 GHz).
- U misst den Kompensationsstrom im SL-Ring.

- $\Phi_{ext} = n\Phi_0$: Solange Stromanstieg I_S im Ring $\simeq I_{rf}$ bis $I_S = I_C$.
- Dann Energiedissipation, bis diese groß genug, um auf $(n + 1)\Phi_0$ zu wechseln.

- Ähnliche Betrachtung für $\Phi_{\text{ext}} = \frac{2n+1}{2}\Phi_0$.

- Ähnliche Betrachtung für $\Phi_{\text{ext}} = \frac{2n+1}{2}\Phi_0$.
- Daraus folgt eine Minimalspannung für $\Phi_{\text{ext}} = n\Phi_0$ und eine Maximalspannung für $\Phi_{\text{ext}} = \frac{2n+1}{2}n\Phi_0$.

- Ähnliche Betrachtung für $\Phi_{\text{ext}} = \frac{2n+1}{2}\Phi_0$.
- Daraus folgt eine Minimalspannung für $\Phi_{\text{ext}} = n\Phi_0$ und eine Maximalspannung für $\Phi_{\text{ext}} = \frac{2n+1}{2}n\Phi_0$.
- Insgesamt folgt:



- Medizin: z.B. Vermessung von Hirnströmen.

- Medizin: z.B. Vermessung von Hirnströmen.
- Geologie: Oberflächliche Untersuchung von Erdschichten.

- Medizin: z.B. Vermessung von Hirnströmen.
- Geologie: Oberflächliche Untersuchung von Erdschichten.
- Archäologie: Oberflächliche Untersuchung an Ausgrabungsstätten.

- Medizin: z.B. Vermessung von Hirnströmen.
- Geologie: Oberflächliche Untersuchung von Erdschichten.
- Archäologie: Oberflächliche Untersuchung an Ausgrabungsstätten.
- Industrie: Zerstörungsfreie Materialprüfung.

- Medizin: z.B. Vermessung von Hirnströmen.
- Geologie: Oberflächliche Untersuchung von Erdschichten.
- Archäologie: Oberflächliche Untersuchung an Ausgrabungsstätten.
- Industrie: Zerstörungsfreie Materialprüfung.
- Technologie: Qubits für Quantencomputer (nur rf-SQUIDs).

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit
(lukas.gathmann@uni-due.de)

Quellen:

[Kop]: Konrad Kopitzki, Peter Herzog; Einführung in die Festkörperphysik

[Ram]: Diplomarbeit von Robert Ramchal