



FAKULTÄT
FÜR
MATHEMATIK
UND
PHYSIK

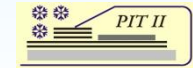
Fortgeschrittenen-Praktikum in Experimentalphysik (Physikalisches Praktikum III)

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Dieter Kölle

Physikalisches Institut – Experimentalphysik II
(Festkörperphysik)



1. allgemeine Informationen zum F-Praktikum
2. Versuch: Josephson-Kontakte
 - Einführung
 - Demonstration

1. Allgemeine Informationen zum F-Praktikum

10 ausgewählte Versuche aus der Kern-/Teilchen- Atom- und Festkörperphysik

- **MOS** **Mößbauer-Effekt**
- **nAK** **Neutronenaktivierung**
(Aktivierung von Ag und In durch langsame Neutronen)
- **NMR** **magnetische Kernresonanz**
- **ZEE** **Zeeman-Effekt**
- **SSP** **Sättigungsspektroskopie**
- **SRS** **selektive Reflexionsspektroskopie**
und Faraday-Effekt in Gasen
- **RBE** **Röntgenbeugung an Kristallen**
- **MOKE** **magneto-optischer Kerr-Effekt**
- **SUP** **Supraleitung**
- **JKO** **Josephson-Kontakte**

*detaillierte Informationen zu den einzelnen Versuchen:
→ Poster im Foyer des Hörsaalzentrums
→ Besichtigung der Praktika am Donnerstag ab 13:30 Uhr*

Lernziele

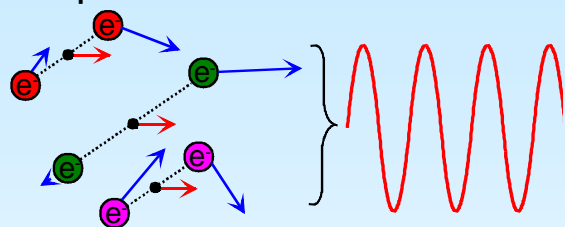
- **gezielte Aufbereitung/Suche der Literatur**
- **Kennenlernen klassischer/aktueller Experimente**
- **Kennenlernen verschiedener experimenteller Techniken & Arbeiten mit komplexeren Versuchsanordnungen**
- **Auswertung von Experimenten (Ausarbeitung)**
- **Teamwork**
- **Kontakt mit Betreuern/Arbeitsgruppen**

Ablauf/Durchführung

- **10 Versuche, ganztägig** (Dienstags, 10 – 17 Uhr)
- **typischerweise 3-er Gruppen**
- **im Winter- und Sommersemester** → ca. 60 Studierende /Jahr
- **Teilnahmevoraussetzungen:**
 - **Vordiplom/Zwischenprüfung** → durchschnittl. Fachsemester: 6.
- **Betreuer: überwiegend Doktoranden** → 2 pro Versuch
- **Räume: verteilt auf div. Praktikumsräume & Labors der Arbeitsgruppen**
- **Scheinkriterium: 50% der maximalen Punktzahl**
 - pro Versuch jeweils max. 5 Punkte für
 - Versuchsdurchführung/Testat (individuell)
 - Ausarbeitung (Gruppe)
- **keine Eingangs-/Abschlussklausur**
- **Ausarbeitungen: im Team** → Abgabe bis Beginn folgendes Semester
- **FP-Webseiten: Versuche-Status & Anleitungen**
- **Ausstattung** → s. Besichtigung

Regelmäßige Evaluation durch die Studierenden (organisiert die Fachschaft)

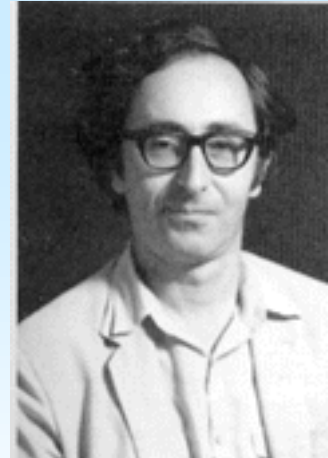
Cooper-Paare



makroskopische Wellenfunktion der Cooper-Paare:

$$\Psi = \Psi_0 \cdot e^{i\varphi}$$

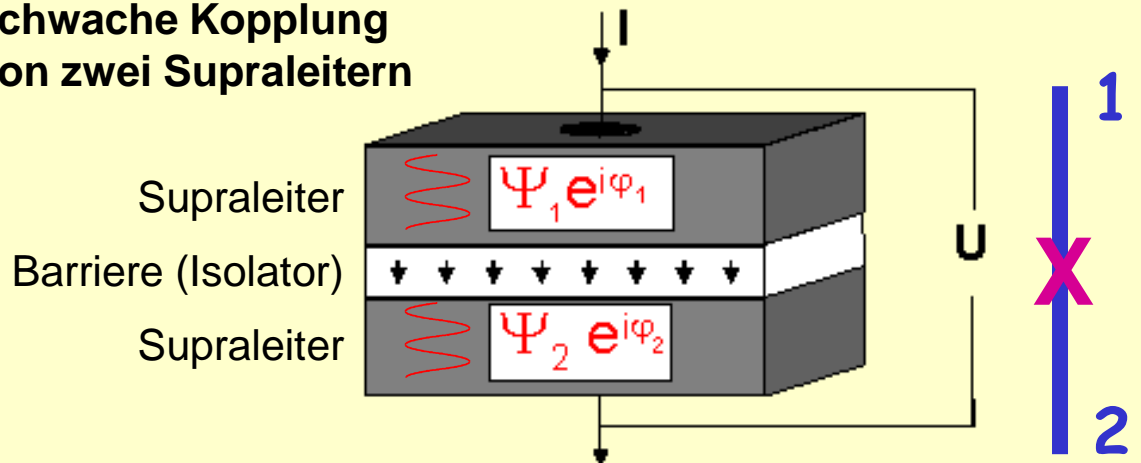
Josephson-Kontakt



B. D. Josephson (1962)

Nobelpreis Physik 1973

schwache Kopplung von zwei Supraleitern



eichinvariante Phasendifferenz

(\vec{A} : Vektorpotential):

$$\delta = \varphi_2 - \varphi_1 + \frac{2\pi}{\Phi_0} \int \vec{A} d\vec{s}$$

Suprastrom (Cooperpaar-Tunneln):

$$I = I_0 \cdot \sin \delta \quad \text{(I)}$$

1. Josephson-Gleichung

falls Phasendifferenz $\delta(t) \neq \text{const}$ Spannungsabfall über Kontakt:

$$U = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad \text{(II)}$$

2. Josephson-Gleichung

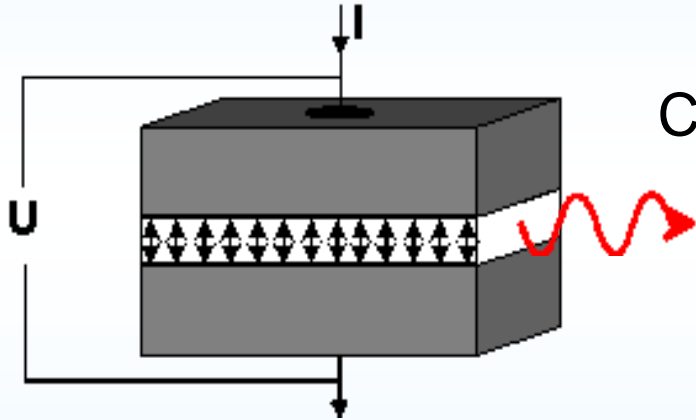
mit dem magnetischem Flussquant

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2.068 \mu\text{V}/\text{GHz}$$

ac Josephson-Effekt

mit $U = \text{const} \neq 0$ ($I > I_0$): $\Rightarrow I_s(t) = I_0 \sin\left(\delta_0 + \frac{2\pi}{\Phi_0} U \cdot t\right)$

(I) & \int (II)dt

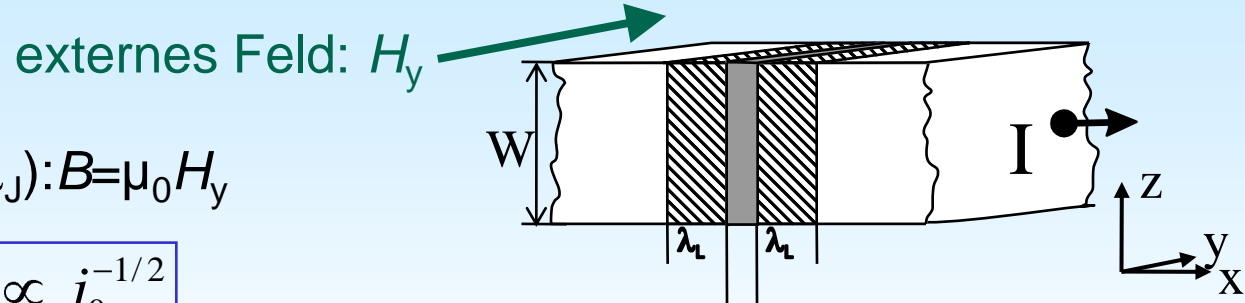


Cooper-Paar-Wechselstrom mit Frequenz

$$f_J = \frac{U}{\Phi_0}$$

$$\frac{U}{f_J} = \Phi_0 \approx 2.068 \mu\text{V}/\text{GHz}$$

Josephson-Kontakt im Magnetfeld



„kurzer“ Kontakt ($W \leq 4\lambda_J$): $B = \mu_0 H_y$

Josephson-Eindringtiefe: $\lambda_J \propto j_0^{-1/2}$

$$\delta(x) = 2\pi \frac{\Phi_J}{\Phi_0} \frac{x}{W} + \delta_0$$

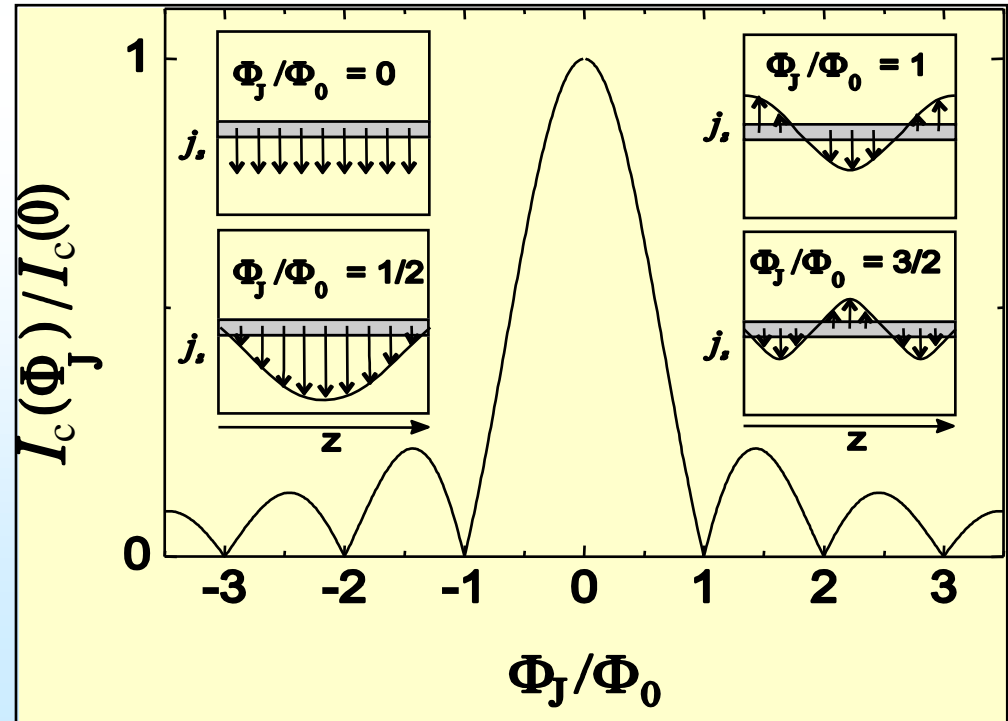
mit magnetischem Fluss durch Kontakt: $\Phi_J = B \cdot W \cdot 2\lambda_L$

Integration von $j(x)$
 und Maximierung via δ_0
 \Rightarrow **kritischer Strom vs Magnetfeld:**

$$I_c(\Phi_J) = I_c(0) \left| \frac{\sin(\pi\Phi_J / \Phi_0)}{\pi\Phi_J / \Phi_0} \right|$$

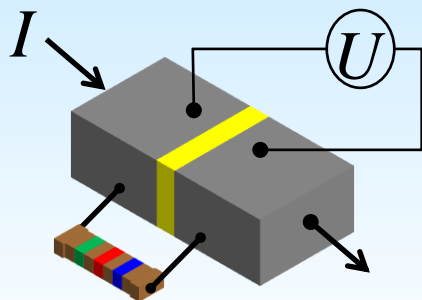
(III)

mit $I_c(0) = I_0$

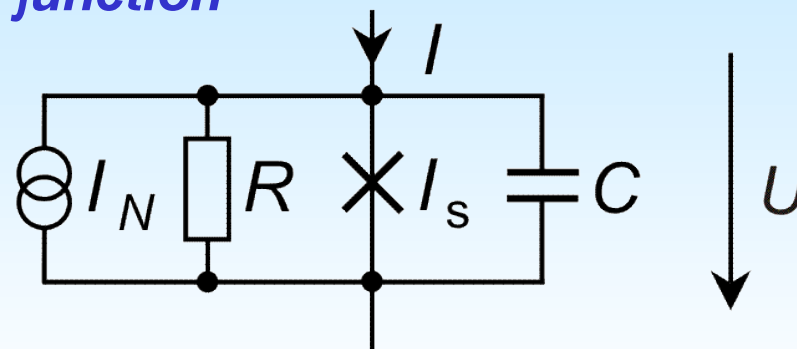


RCSJ-Modell

resistively & capacitively shunted junction



Josephson-Kontakt mit resistivem „Shunt“



Ersatzschaubild

Kirchhoff:
$$I + I_N = \frac{U}{R} + I_S + C\dot{U}$$

I_N : Rauschstrom aus Nyquist-Rauschen

(I) und (II) einsetzen liefert Bewegungsgleichung für δ :

$$C \frac{\Phi_0}{2\pi} \ddot{\delta} + \frac{\Phi_0}{2\pi R} \dot{\delta} = -I_0 \sin \delta + I + I_N$$

dimensionslose Form:

$$\beta_C \ddot{\delta} + \dot{\delta} = -\sin \delta + i + i_N$$

$\beta_C < 1$: überdämpfter Kontakt
 $\beta_C > 1$: unterdämpfter Kontakt

mit den normierten Größen:

$$i = \frac{I}{I_0}, \quad \tau = t \frac{2\pi I_0 R}{\Phi_0}, \quad \beta_C = \frac{2\pi}{\Phi_0} I_0 R^2 C$$

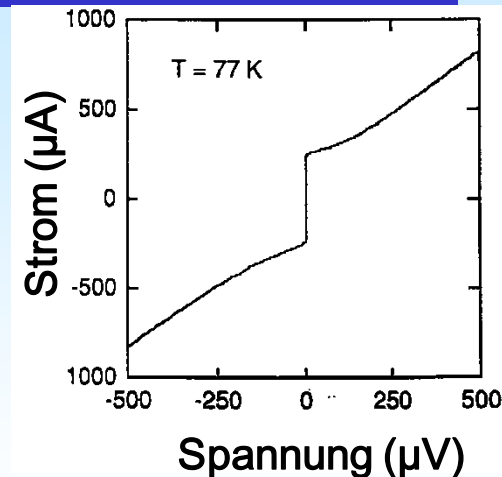
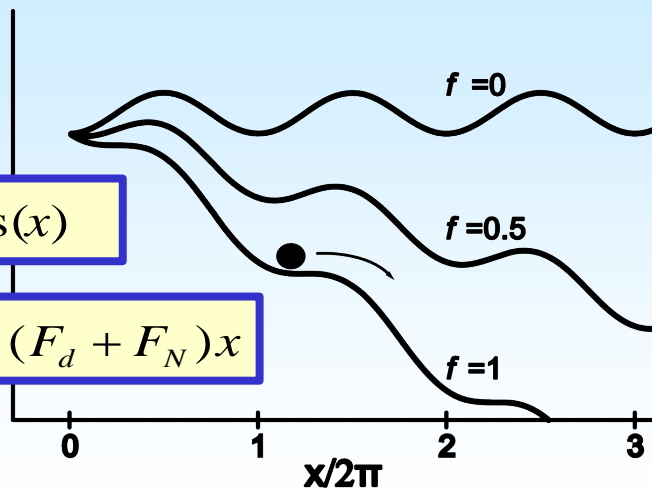
McCumber-Parameter

Teilchen im gekippten Waschbrettpotential

Potential:

$$w(x) = 1 - \cos(x)$$

$$u(x) = w(x) - (F_d + F_N)x$$



RCSJ-Modell:

$$u_J = 1 - \cos \delta - (i + i_N) \delta$$

$$\begin{aligned} \beta_C \ddot{\delta} + \dot{\delta} &= -\sin \delta + i + i_N \\ &= -\frac{\partial [1 - \cos \delta - (i + i_n) \delta]}{\partial \delta} \end{aligned}$$

Phasendifferenz δ
 Spannung $u = \frac{U}{I_0 R} = \dot{\delta}$
 Ströme i, i_N
 Kapazität C
 inv. Widerstand $1/R$

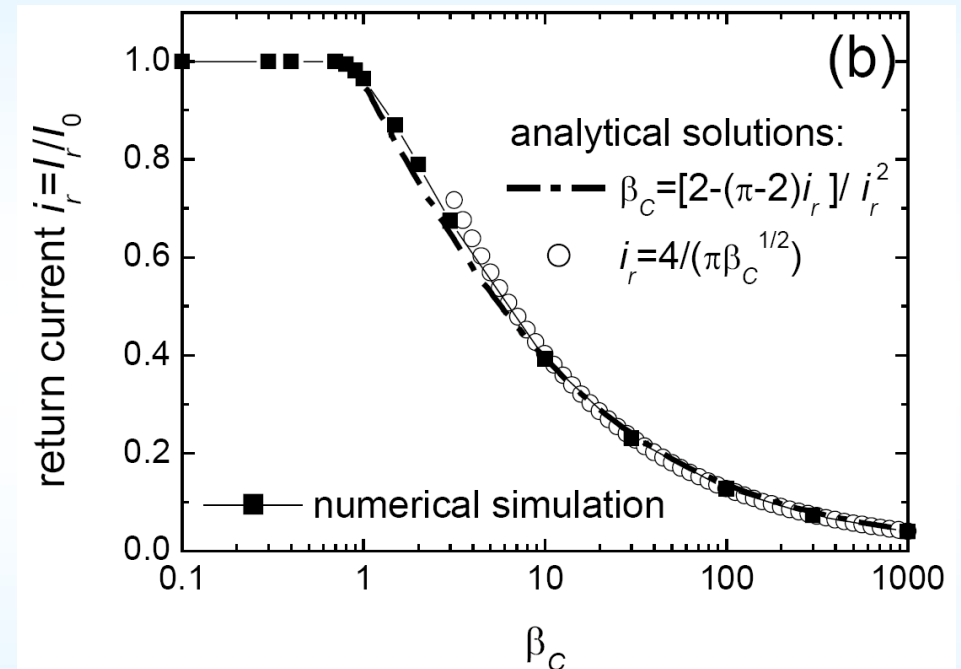
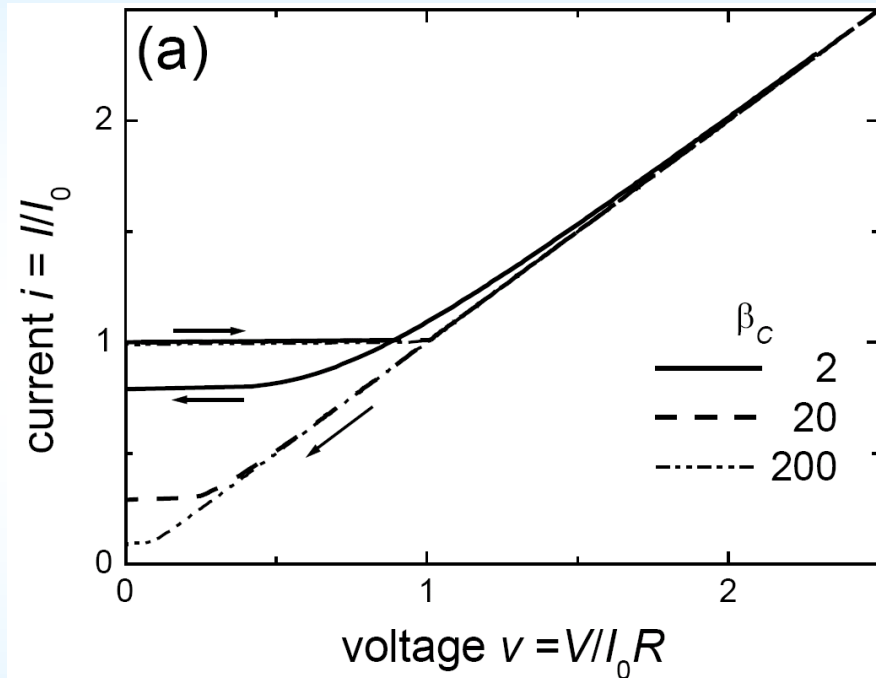
$$\begin{aligned} m\ddot{x} - \xi\dot{x} &= -\frac{\partial w(x)}{\partial x} + F_d + F_n \\ &= -\frac{\partial [w(x) - (F_d + F_n)x]}{\partial x} \end{aligned}$$

x Ortskoordinate
 \dot{x} Geschwindigkeit
 F, F_N Kräfte
 m Masse
 ξ Reibungskoeffizient

Einfluss von McCumber-Parameter β_C

$$\beta_C = \frac{2\pi}{\Phi_0} I_0 R^2 C$$

numerische Simulation ($T=0$ K)



$\beta_C < 1$: überdämpfter Kontakt



nicht hysteretische I/V -Kennlinie

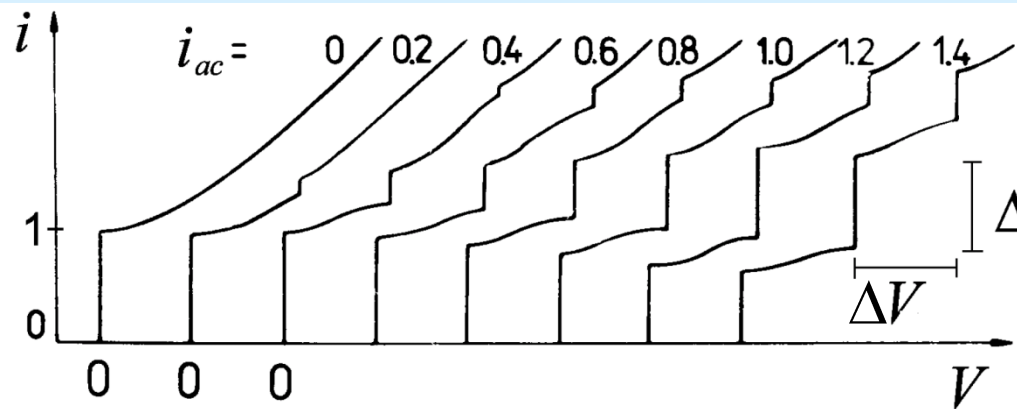
$\beta_C > 1$: unterdämpfter Kontakt



hysteretische I/V -Kennlinie

Shapiro-Stufen

Einstrahlung von Mikrowellen (Frequenz f)



↪ Stufen konstanter Spannung
In der I/V -Kennlinie

Geschwindigkeit des „Teilchens“ im Waschbrettpotential:

(bei Synchronisation mit externer Frequenz)

„Teilchen“ rollt pro Anregungsperiode T um n Potentialmulden weiter

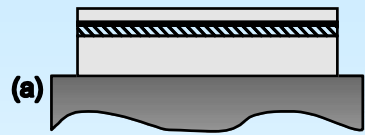
↪
$$\dot{\delta} = \frac{n \cdot 2\pi}{T} = n \cdot 2\pi \cdot f$$

mit (II):
$$\dot{\delta} = \frac{2\pi V}{\Phi_0} \Rightarrow \frac{2\pi V_n}{\Phi_0} = n \cdot 2\pi \cdot f \quad \rightsquigarrow \quad \boxed{V_n = n\Phi_0 f}$$

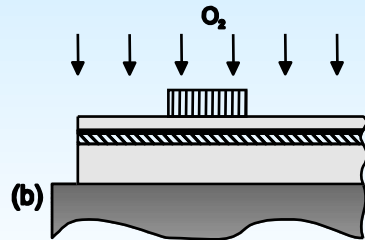
($n=1,2,3,\dots$)

aus Abstand ΔV benachbarter Stufen: $\Phi_0 = \Delta V / f$

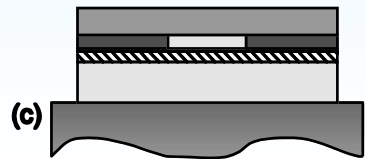
Probenherstellung: Nb-Al/ AlO_x -Nb Kontakte



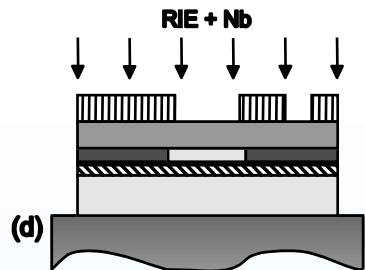
Nb(200nm)/Al(7nm)/ AlO_x (2nm)/Nb(100nm) Trilage



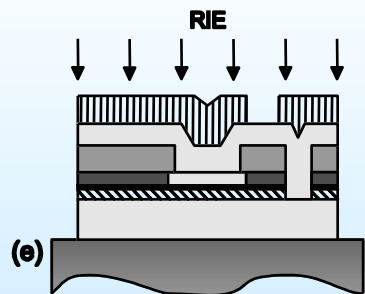
anodische Oxidation der inaktiven Region zu **Nb_2O_5**



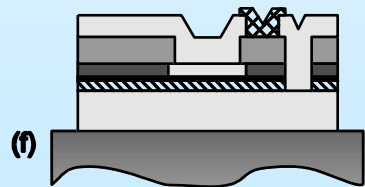
SiO_2 -Isolation (300nm) als Schutz vor Kurzschlüssen



Kontaktierung: reaktives Ionenätzen (RIE) + Nb-Deposition



Trennung der Elektroden (RIE)



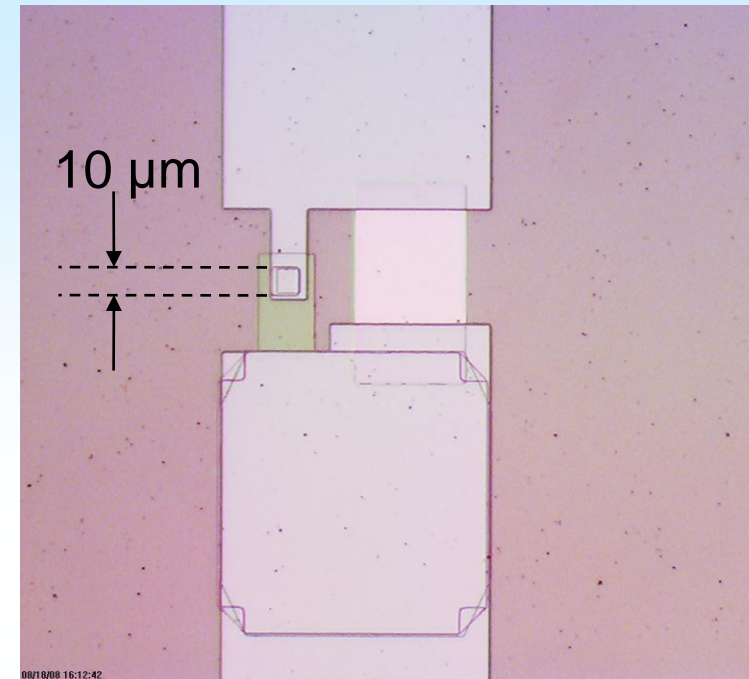
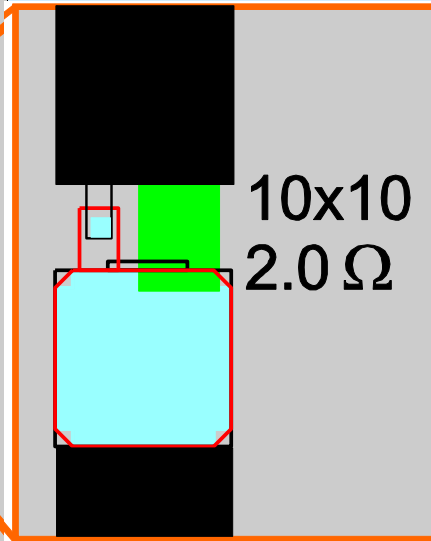
Aufbringen der **AuPd Shunt-Widerstände**

Si-Wafer	Nb	AlO_x	Al
Nb_2O_5	SiO_2	Photolack	AuPd

Proben-Design

Praktikum JoK 2003

Praktikum JoK 2003



- SiO_2 Substrat
- Obere Niob-Elektrode
- Untere Niob-Elektrode
- AuPd Shunt Widerstand
- Nb/Al/AlO_x/Nb Josephson Kontakt

5 x 5 mm² chip:
20 Nb-Al/AlO_x-Nb
Kontakte

Stromdichte	$j_0 = I_0/A \sim 150 \text{ A/cm}^2$;
spez. Kapazität	$C/A \sim 30 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$
Kontaktfläche	$A = W \cdot L = 10 \cdot 10 \mu\text{m}^2$
Shuntwiderst.	$R \sim 0.3 - 10 \Omega$ (z.T. ohne Shunt)

Probenhalter & Einbau

unteres Ende des Probenhalters

Platine mit Probenaufnahme und

elektrische Kontaktierung mit Chip-Sockel

Cryoperm-
Becher

Cu-Spule

Semi-
Rigid-
Antenne

Chip-
Sockel

Anschluss
f. Spule

Probe
(5x5mm²)

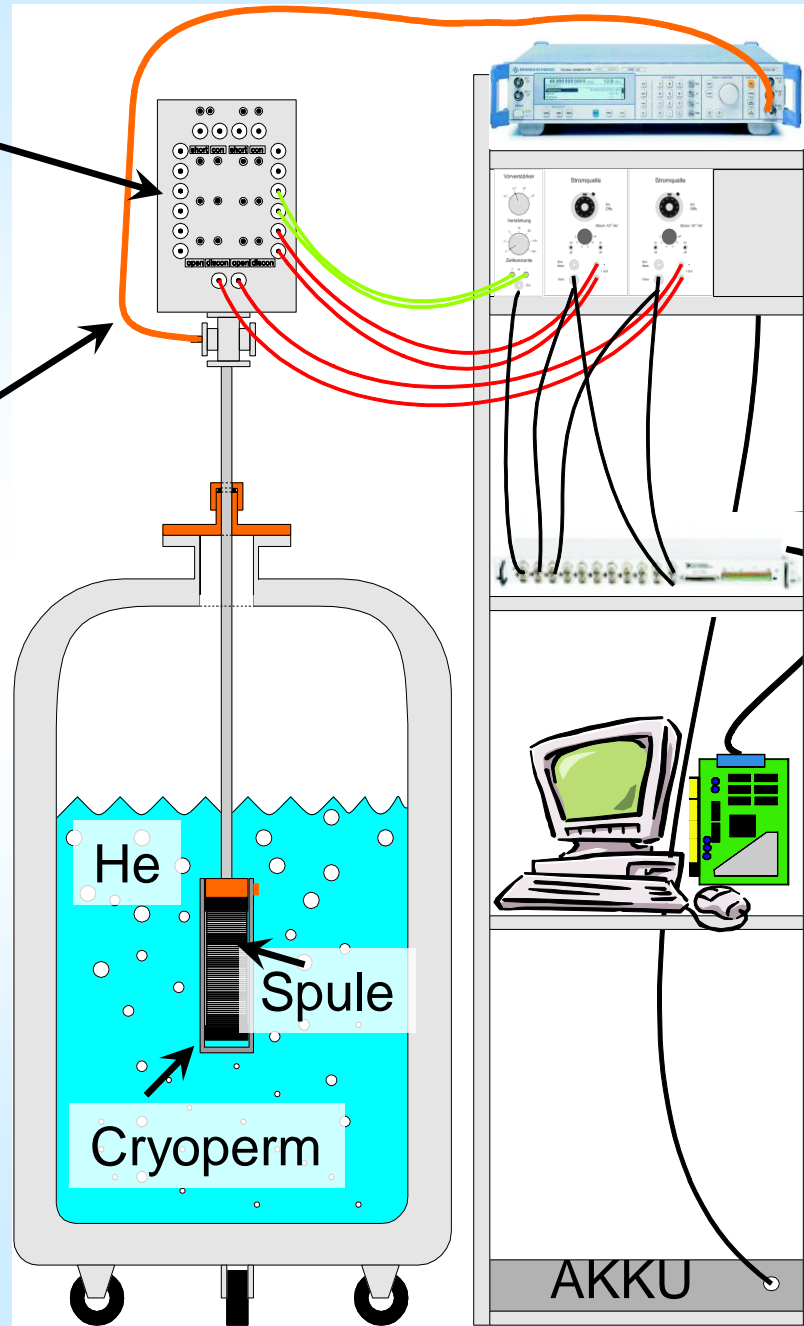
Al Bond-
Drähte

Kupfer-
Leiterbahnen

Experimenteller Aufbau

Anschlussbox mit
Kurzschluss- und
Verbindungsschalter
7 twisted pairs

semi-rigid
Kabel



Mikrowellengenerator
R&S®SMR40

Vorverstärker+
2 Stromquellen
Eigenbau

Anschlussbox
BNC2090

PC mit
Messkarte
PCI-6052e

Steuerungs-
Software: **GoldExi**

www.geocities.com/goldexi/

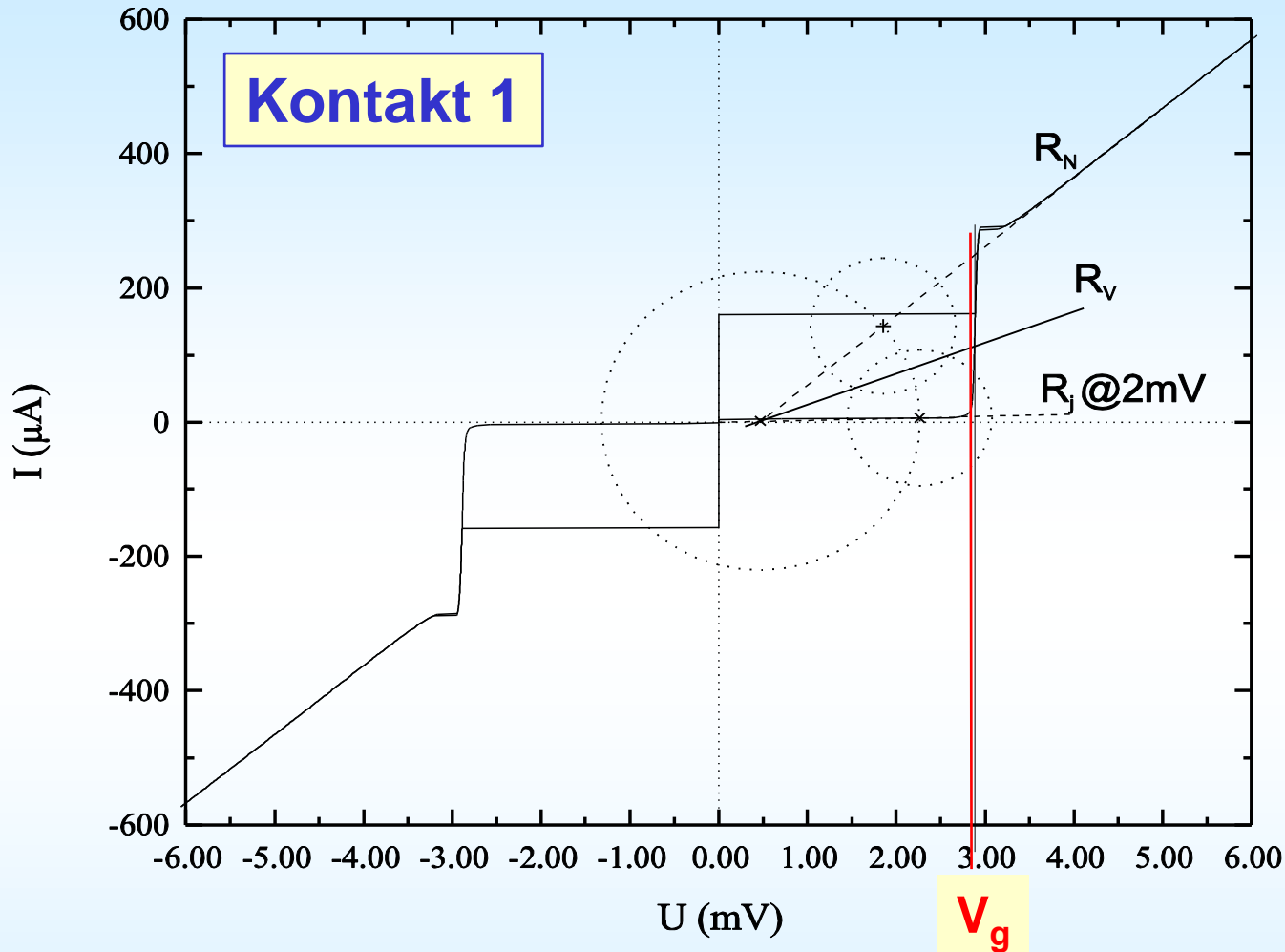
Messungen

drei Nb-Al/ AlO_x /Nb-Kontakte:

alle Messungen bei $T=4.2$ K

- Kontakt 1: ohne Shunt-Widerstand
- Kontakt 2: mit „großem“ Shunt-Widerstand
- Kontakt 3: mit „kleinem“ Shunt-Widerstand

Strom-Spannungs-Kennlinien (IVCs)



Energielücke berechnet nach BCS-Theorie

$$\begin{aligned} 2\Delta(T=0 \text{ K}) &= 3.52 k_B T_c \\ &= 2.8 \text{ meV} \end{aligned}$$

**Energielücke bestimmt aus
Quasiteilchen-Tunnelkennlinie**

$$V_g = 2\Delta/e \approx 2.9 \text{ meV}$$

Strom-Spannungs-Kennlinien (IVCs)

Kontakt 2

Bestimmung von β_C

aus Hysterese I_0/I_r der IVC

(I_r = return current)

$$I_0=167 \mu\text{A}, \quad \frac{I_r}{I_0} = \frac{4}{\pi\sqrt{\beta_C}} \Rightarrow \beta_C \approx 47.5$$
$$I_r=31.4 \mu\text{A}:$$

Bestimmung der Kapazität C

aus β_C , I_0 und R

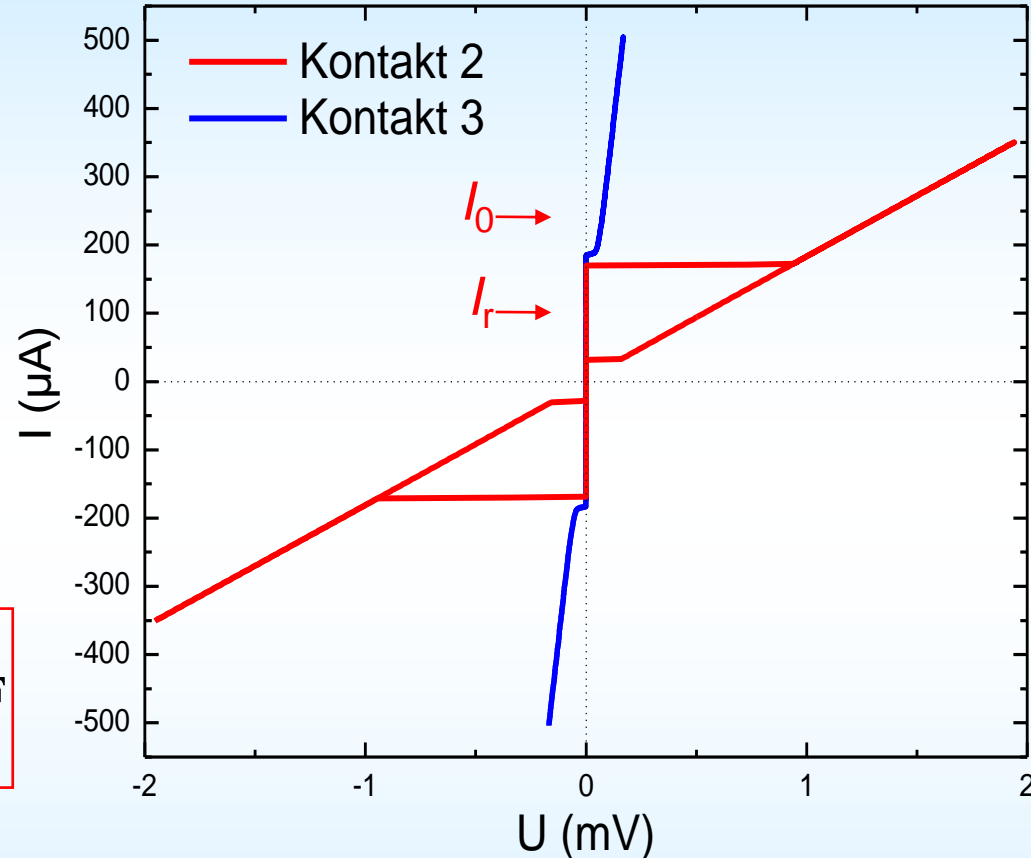
$$I_0=167 \mu\text{A}, \quad \beta_C = \frac{2\pi I_0 R^2 C}{\Phi_0} \Rightarrow C \approx 3.0 \text{ pF}$$
$$R=5.53 \text{ W}:$$

Kontakt 1 und 3

Bestimmung von β_C aus C (von Kontakt 2), I_0 und R

Kontakt 1: $C=3 \text{ pF}$, $I_0=158 \mu\text{A}$, $R=9.85 \Omega$: $\Rightarrow \beta_C \approx 141$

Kontakt 3: $C=3 \text{ pF}$, $I_0=184 \mu\text{A}$, $R=0.33 \Omega$: $\Rightarrow \beta_C \approx 0.19$



Kritischer Strom I_c vs Magnetfeld B

London-Eindringtiefe von Nb-Film:

Bedingung für n -te Nullstelle B_n in $I_c(B)$ aus (III):

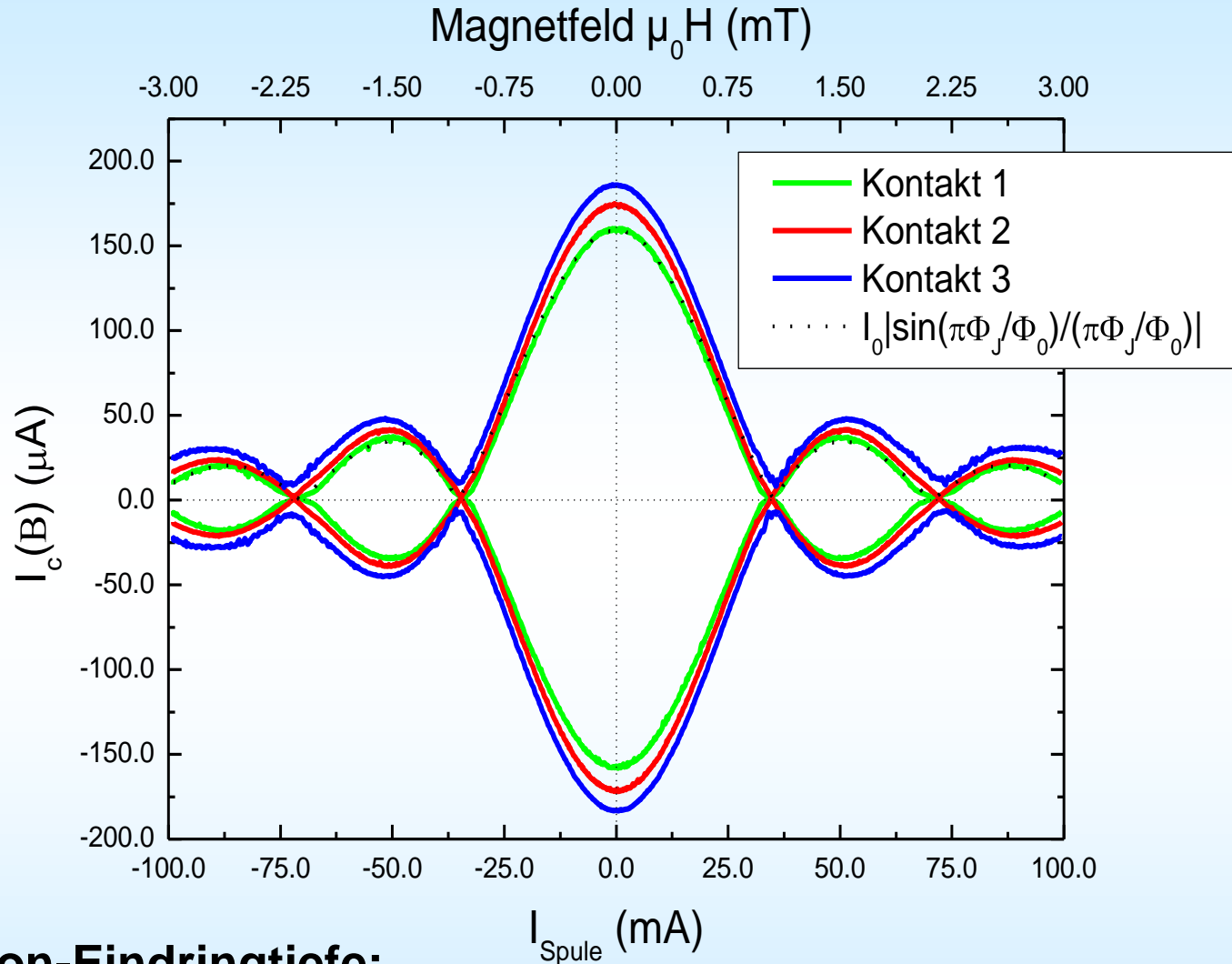
$$\Phi_J = n\Phi_0$$

$$\Leftrightarrow B_n W 2\lambda_L = n\Phi_0:$$

mit Spulenkonstante:

$$k = \frac{B}{I_{Spule}} = 0.03 \frac{\text{mT}}{\text{mA}}$$

$$\Rightarrow \lambda_L = \frac{n \cdot \Phi_0}{2B_n W} \approx 100 \text{ nm}$$



Abschätzung der Josephson-Eindringtiefe:

$$\Rightarrow \lambda_J \equiv \sqrt{\frac{\Phi_0}{2\pi\mu_0 j_0 2\lambda_L}} \approx 27 \mu\text{m}$$

\Rightarrow Limit kurzer Kontakte erfüllt

Shapiro-Stufen

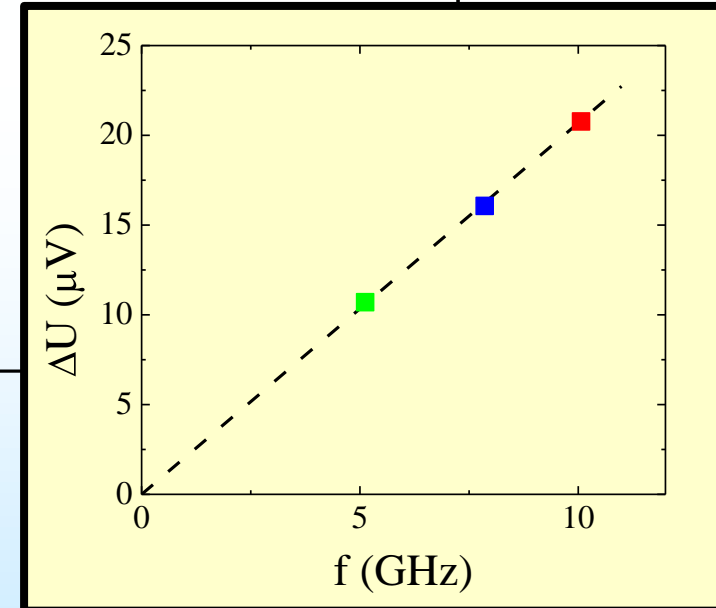
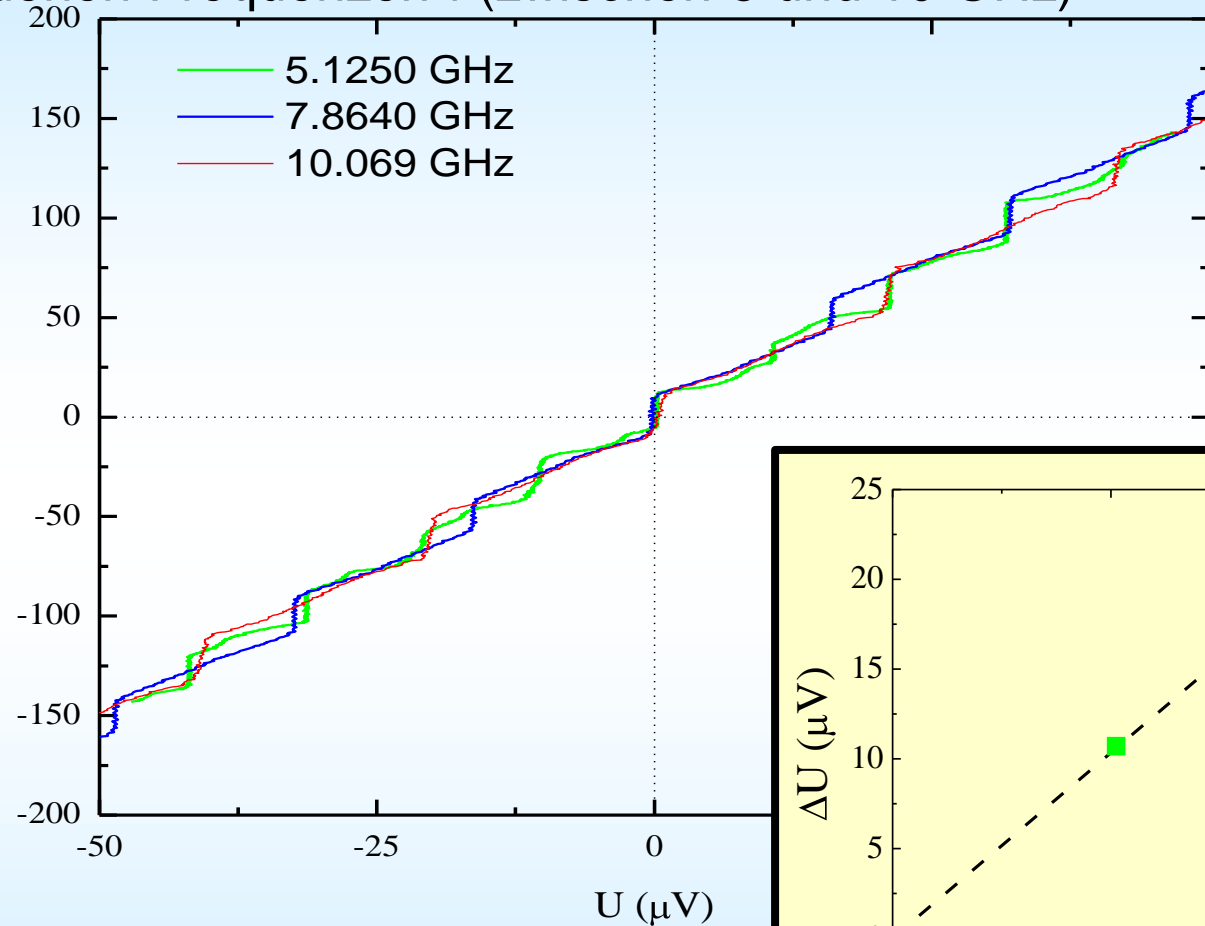
Aufnahme von IVCs (*Kontakt 3*) unter Mikrowelleneinstrahlung bei drei verschiedenen Frequenzen f (zwischen 5 und 10 GHz)

Bestimmung von Φ_0

aus Abstand ΔU
benachbarter Stufen:

$$\Phi_0 = \Delta U / f$$

I (μA)



bei $f=5.1250$ GHz: $\Delta U=10.70$ μV : $\Phi_0 = 2.087$ $\mu\text{V}/\text{GHz}$

bei $f=7.8640$ GHz: $\Delta U=16.06$ μV : $\Phi_0 = 2.042$ $\mu\text{V}/\text{GHz}$

bei $f=10.069$ GHz: $\Delta U=20.77$ μV : $\Phi_0 = 2.063$ $\mu\text{V}/\text{GHz}$