

# Supraleitung / Quanten-Hall-Effekt

Version 1.3

17. Juni 2015

## 1 Versuchsdurchführung

### 1.1 Austauschgas in den Probenraum einbringen

1. Evakuieren Sie den Probenraum des Kryostaten mit Hilfe der Drehschieberpumpe.
2. Trennen Sie nach einer angemessenen Pumpzeit den Probenraum von der Drehschieberpumpe ab und fluten Sie ihn mit Helium-Austauschgas. Spülen Sie das System noch mindestens zweimal, indem sie den Probenraum erneut evakuieren und anschließend mit He-Gas fluten.
3. Nach Einbringen des Austauschgases können sie die Temperaturmessung im Probenraum nutzen, um den Fortschritt des Vorkühlens zu überwachen.

### 1.2 Vorkühlen mit Flüssig-Stickstoff (LN)

1. Schließen Sie unter Aufsicht(!) den Flüssig Stickstoff-Dewar an den Kryostaten an und füllen Sie den Helium-Tank mindestens bis oberhalb des Magneten mit flüssigem Stickstoff. Beginnen Sie mit einem minimalen Stickstoff-Durchfluss. Solange das System noch nicht auf Stickstofftemperatur ist, wird vergleichsweise viel Abgas erzeugt. Sobald das Sammeln von Flüssigkeit im Tank beginnt, nimmt die Abgasmenge ab und man kann den Durchfluss erhöhen. Werden Flüssigkeitströpfchen im Abgas sichtbar, ist der Tank vollständig gefüllt.
2. Lassen Sie das System so einige Stunden (bis Mittag) durchkühlen.

### 1.3 Lockin-Verstärker

Machen Sie sich in der Zwischenzeit mit der Funktion und Arbeitsweise eines Lockin-Verstärkers vertraut.

#### Hinweis zur externen Referenz

Sie können die externe Referenz der Lockin-Verstärker entweder aus dem Signal-Ausgang (Output) oder aber auch aus dem Sync-Ausgang des Funktionsgenerators speisen.

1. Sync-Ausgang:  
Der Sync-Ausgang liefert ein unipolares TTL-Signal, d.h. diese Signalform hat keine Nulldurchgänge! Stellen sie daher bei Benutzung des Sync-Ausgangs den Lockin-Referenz-Threshold über den untersten DIP-Schalter auf 2V (siehe Abbildung 1).
2. Signal-Ausgang:  
Bei Benutzung des Signalausgangs liegt fast immer ein Sinussignal mit kleiner Amplitude (einige 100 mV<sub>pp</sub>) vor. Stellen sie dann den Lockin-Referenz-Threshold auf 0V (siehe

Abbildung 1), um die Nulldurchgänge zum Synchronisieren zu benutzen. Für kleine Sinus-Amplituden kann die Referenz verloren gehen. Die Benutzung des Sync-Ausgangs ist dann vorzuziehen.

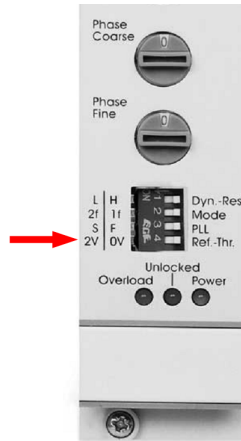


Abbildung 1: Position des Schalters zur Umschaltung des Lockin-Referenz-Threshold-Wertes.

### Grundlegende Funktionen

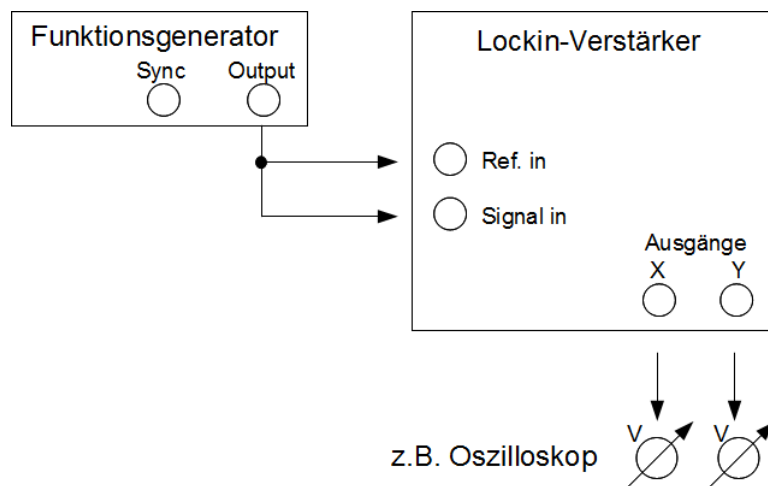


Abbildung 2: Anschlusschema zur Messung grundlegender Lockin-Funktionen.

Schließen Sie den Ausgang des Funktionsgenerators an den Eingang des Lockin-Verstärkers an und versorgen Sie den Lockin mit einem Referenzsignal (siehe Abbildung 2). Erzeugen Sie mit dem Funktionsgenerator ein Sinussignal mit einer Frequenz zwischen  $100 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ kHz}$ . Notieren Sie die am Funktionsgenerator eingestellte Amplitude.

1. Vergewissern Sie sich, dass der Lockin-Verstärker auf die Referenz eingerastet ist. Achten Sie auf den korrekten Lockin-Referenz-Threshold (siehe Hinweis). Stellen Sie die Empfindlichkeit des Lockin-Verstärkers so ein, dass er gerade nicht übersteuert.
2. Welche Spannungen erwarten Sie an den Ausgängen X bzw. Y der beiden phasensensitiven Detektoren des Lockin-Verstärkers?

3. Welchen Einfluss hat die Phasenlage? Nehmen Sie für verschiedene Phasenlagen die Spannungen der Ausgänge X und Y des Lockin-Verstärkers auf und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem aus der Theorie zu erwartendem Verhalten.
4. Überlegen Sie sich, wie man einen Phasenabgleich zur Optimierung des Signals durchführen kann, so dass das zu messende Signal möglichst korrekt am X-Ausgang des Lockin-Verstärkers erscheint.
5. Gleichen Sie die Phase ab, und zeigen Sie, dass die Spannung am X-Ausgang der eingestellten Amplitude des Funktionsgenerators entspricht.

#### Einfluss der Zeitkonstanten

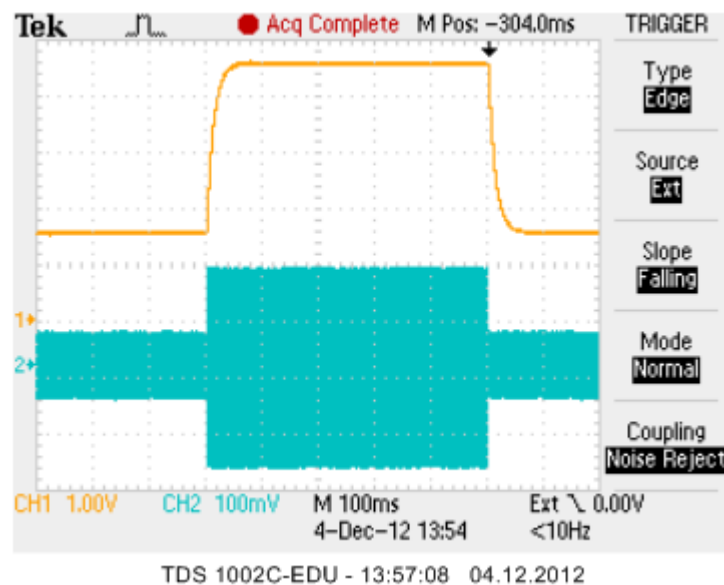


Abbildung 3: Einfluss der Zeitkonstanten: Das Oszilloskop zeigt ein Amplituden-moduliertes Signal (CH2) und den Ausgang des Lockin-Verstärkers (CH1).

Um den Einfluss der Zeitkonstanten zu untersuchen, kann ein Amplituden-moduliertes Sinussignal verwendet werden.

1. Stellen Sie dazu am Funktionsgenerator zunächst einen Sinus mit einer Frequenz von 1 kHz und einer Amplitude von 500 mV<sub>pp</sub> ein.
2. Schalten Sie über den Mod-Taster die Amplituden-Modulation zu. Stellen Sie die Modulationstiefe (Am Depth) auf 50 %, die Modulationsfrequenz (Am Freq) auf 1 Hz und die Modulationsform (Shape) auf Square.
3. Schauen Sie sich das so erzeugte Signal auf dem Oszilloskop an und dokumentieren Sie die Signalform. Vermessen Sie die Höhe der verschiedenen Amplituden sowie deren Zeitdauern. Passen die Amplituden und die Modulationstiefe zu den Einstellungen des Funktionsgenerators?
4. Geben Sie das Signal auf den Lockin-Eingang und den Referenzeingang! Benutzen Sie hier nicht den Sync-Ausgang, da dieser ein zur Modulationfrequenz (1 Hz) synchrones Signal liefert, der Lockin aber auf die Trägerfrequenz von 1 kHz einrasten soll!

5. Welches Ausgangssignal mit welchen Amplituden erwarten Sie am Ausgang des Lockin-Verstärkers?
6. Nehmen Sie das Ausgangssignal des Lockins mit Hilfe des Oszilloskops auf. Wie müssen Sie das Oszilloskop triggern, um Bilder ähnlich dem in Abbildung 3 zu bekommen?
7. Welchen Einfluss hat die Zeitkonstante auf das Ausgangssignal? Welchen die Filtersteilheit? Probieren Sie verschiedene Einstellungen und dokumentieren Sie den Effekt, indem Sie Screenshots vom Oszilloskop aufnehmen.
8. Berechnen Sie, wie lange Sie bei einer bestimmten Zeitkonstante warten müssen, damit das Ausgangssignal auf 99 % des Endwerts eingeschwungen ist?
9. Stellen Sie die Vor- und Nachteile für lange bzw. kurze Zeitkonstanten zusammen.

### Extrahieren von Signalen

Mit Hilfe von Lockin-Verstärkern können kleinste Signale aus einem deutlich größeren Rauschen (Signalgemisch) extrahiert werden. Hierzu moduliert man das zu messende Signal mit der Referenzfrequenz und „markiert“ so gleichsam die zu messende Komponente. Der Lockin mißt dann die Sinus-Fourier-Komponente des Signalgemisches bei der Referenzfrequenz und kann dadurch z.B. Rauschen auf (nahezu) allen anderen Frequenzen eliminieren.

Für eine einfachen Test kann man ein Rechtecksignal als Frequenzgemisch benutzen und mit Hilfe des Lockin-Verstärkers die 1f- und 2f-Fourierkomponenten des Rechtecksignals messen. Verschalten Sie Funktionsgenerator und Lockin-Verstärker wieder, wie in Abbildung 2 gezeigt.

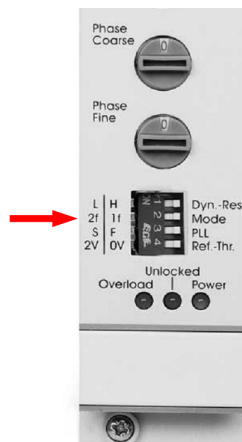


Abbildung 4: Umschalten des Lockin-Verstärkers auf die 2f-Komponente.

1. Erzeugen Sie am Funktionsgenerator ein geeignetes Rechtecksignal und stellen Sie dies dem Lockin-Verstärker als Eingangs- und Referenzsignal zur Verfügung.
2. Notieren Sie die Eckdaten ihres Rechtecksignals (Amplitude, Frequenz,...).
3. Führen Sie einen Phasenabgleich durch und messen Sie die 1f-Komponente des Rechtecksignals. Durch Umschalten am Lockin-Verstärker läßt sich auch die 2f-Komponente messen (siehe Abb. 4). Notieren Sie jeweils die Ausgangsspannungen des Lockin-Verstärkers.
4. Berechnen Sie die Amplituden der Fourierkomponenten für ein Rechtecksignal mit der von Ihnen benutzten Amplitude. Vergleichen Sie die Resultate mit Ihren Messergebnissen. Beachten Sie, dass der Lockin-Verstärker immer Effektivwerte ausgibt!

### 1.4 Ausblasen des Flüssig-Stickstoffs (LN)

1. Schließen Sie einen Schlauch vom Flüssig-Einlass des Kryostaten an einen leeren Dewar an. Geben Sie mit Hilfe des Präzisionsdruckreglers einen Helium-Überdruck von 80 - 100 mbar auf die Abgasleitung des Tanks. Dadurch wird der flüssige Stickstoff in den leeren Dewar gedrückt.
2. Wenn der Helium-Überdruck zusammenbricht oder deutliche Gasgeräusche zu hören sind, ist der flüssige Stickstoff aus dem Tank entfernt. Stoppen Sie dann die He-Gaszufuhr.
3. Um die letzten Tropfen flüssigen Stickstoffs zu entfernen, warten Sie eine weitere Stunde. In dieser Zeit sollte die Temperatur der Probenkammer von 77K um einige Kelvin steigen.
4. Lassen Sie die Temperatur mindestens um 5 K steigen, bevor sie mit dem Füllen von Flüssig-Helium beginnen! Sollte sich noch Stickstoff im Tank befinden, kann dies dazu führen, dass der Supraleitende Magnet nicht betrieben werden kann!

### 1.5 Messung der Supraleiter-Sprungtemperatur

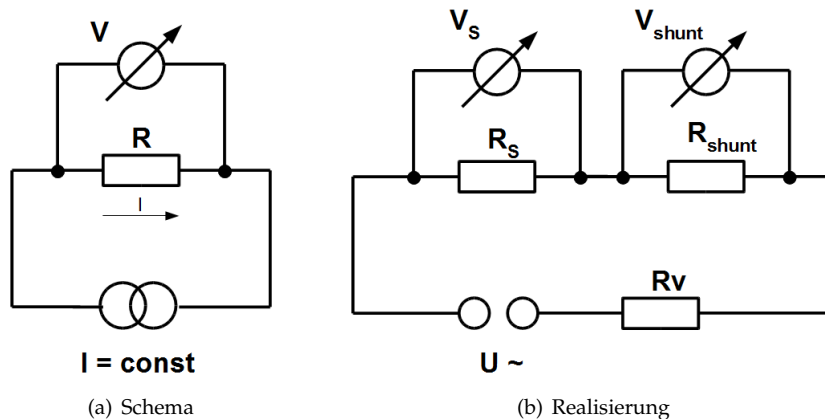


Abbildung 5: Messung des Widerstands eines Supraleiters: Schematische Messanordnung und Realisierung ohne Konstantstromquelle mit Strommessung.

Die Messung der Sprungtemperatur erfolgt durch Messen des Widerstandes  $R$  des Supraleiters als Funktion der Temperatur beim letzten Einkühlen auf Flüssig-Helium-Temperatur. Abbildung 5(a) zeigt das Schema der Widerstandsmessung. Moduliert man den Konstantstrom  $I$ , kann die Spannung  $V$  mit dem Lockin-Verstärker gemessen werden.

Statt einer modulierten Konstantstromquelle ist es einfacher, den Spannungsausgang eines Funktionsgenerators zu nutzen und über einen hochohmigen Vorwiderstand  $R_v$  eine Quasi-Konstantstrom-Quelle nachzubilden. Ist der Vorwiderstand viel größer als die Widerstandsänderung des Supraleiters  $R_v \gg R_s$ , kann der Strom als konstant angesehen werden. Im Experiment soll der Strom dennoch über einen kleinen Vorwiderstand  $R_{shunt}$  ebenfalls mit einem Lockin-Verstärker nachgemessen werden (siehe Abbildung 5(b)).

1. Bauen Sie das Experiment zur Messung der Sprungtemperatur auf und lassen Sie es vor Inbetriebnahme abnehmen.
2. Optimieren Sie die Lockin-Einstellungen für die Messung.
3. Beginnen Sie unter Aufsicht(!) mit dem letzten Einkühlen auf Flüssig-Helium-Temperatur und loggen Sie mit Hilfe des Messprogramms dabei den Widerstand des Supraleiters als Funktion der Temperatur.

### 1.6 Einkühlen mit Flüssig-Helium (LHe)

1. Schließen Sie unter Aufsicht(!) den Flüssig-Helium-Dewar an den Kryostaten an und benutzen Sie das He-Abgas zum weiteren Vorkühlen des Kryostaten. Im Idealfall sollte die Abgasleitung des Kryostaten nicht vereisen, ansonsten ist der Gasfluss zu reduzieren, um die Kühlleistung des Gases besser zu nutzen.
2. Wenn das System beginnt Flüssigkeit zu sammeln, kann der Durchfluss am Kaltventil des Hebers erhöht werden.
3. Füllen Sie den Tank bis ca. 7 cm über den Minimum-Alarm (Anzeige am Helium-Füllstandssensor: 17 cm absolut).

### 1.7 Messung des Quanten-Hall-Effekts

#### ACHTUNG:

Bei dieser Messung werden hohe Magnetfelder bis 9 Tesla erzeugt! Nähern Sie sich während der Messung nicht dem Kryostaten und entfernen Sie vorher alle magnetischen Gegenstände aus der unmittelbaren Umgebung.

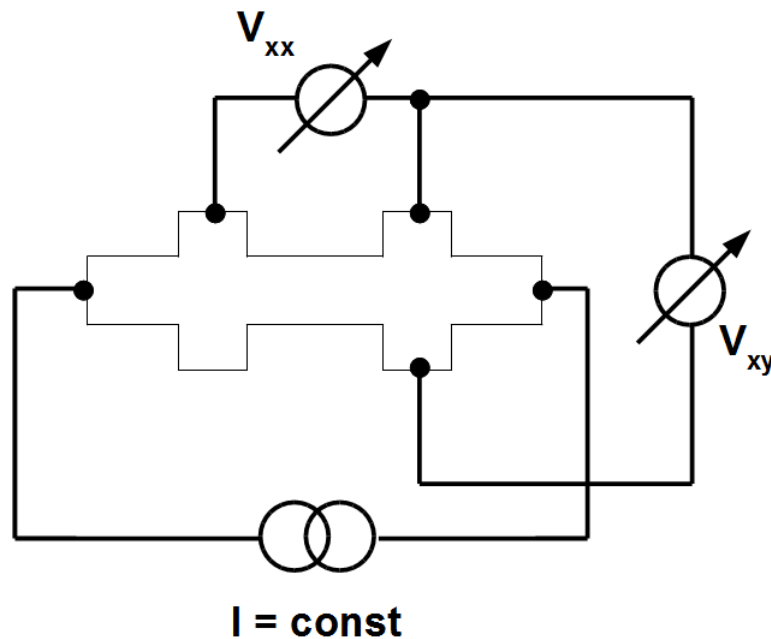


Abbildung 6: Schematische Messanordnung zur Untersuchung des Quanten-Hall-Effekts.

1. Bauen Sie das Experiment zur Messung des Quanten-Hall-Effekts nach Abbildung 6 auf und lassen Sie es vor Inbetriebnahme abnehmen. Benutzen Sie statt der Konstantstromquelle wieder die Schaltung mit dem Vorwiderstand aus Abbildung 5(b).
2. Stellen Sie die Spannung am Funktionsgenerator so ein, dass durch die Hallbar ein maximaler Strom von  $I = 1 \mu\text{A}$  fließt.
3. Optimieren Sie die Lockin-Einstellungen für die zu messenen Signale.
4. Messen Sie den Hallwiderstand und den Widerstand in Längsrichtung der Probe als Funktion des Magnetfeldes!

## 2 Auswertung

### 2.1 Lockin-Verstärker

- Dokumentieren Sie die Ergebnisse aus dem Aufgabenteil 1.3.
- Erstellen Sie insbesondere eine Grafik, die die Signale der X- und Y-Ausgänge als Funktion der Phasenlage zeigt.
- Schätzen Sie die Genauigkeit / Fehler der Messungen ab.
- Diskutieren Sie die Ergebnisse und zeigen Sie, dass sie mit den Erwartungen übereinstimmen und der Lockin-Verstärker korrekt funktioniert.

### 2.2 Messung der Supraleiter-Sprungtemperatur

- Erstellen Sie eine Grafik aus dem relevanten Teil der vom Programm geloggten Daten zur Auswertung der Sprungtemperatur.
- Bestimmen Sie die Sprungtemperatur und die Änderung des Widerstandes (Fehlerrechnung nicht vergessen).
- Diskutieren Sie das Ergebnis und vergleichen Sie die Sprungtemperatur mit typischen Literaturwerten für NbTi-Legierungen.

### 2.3 Messung des Quanten-Hall-Effekts

- Erstellen Sie eine Grafik für den Hallwiderstand  $R_{xy}$  und den Magnetowiderstand  $R_{xx}$  als Funktion des Magnetfeldes  $B$ .
- Zeichnen Sie die klassische Hall-Gerade ein und bestimmen Sie aus der Steigung die Flächenladungsträgerdichte  $n_s$ .
- Bestimmen Sie die Plateauwerte des Hallwiderstands und identifizieren Sie die Plateaus.
- Zeigt das System Spinentartung oder ist die Entartung aufgehoben?
- Tragen Sie den Längswiderstand  $R_{xx}$  als Funktion des reziproken Magnetfeldes  $1/B$  grafisch auf.
- Bestimmen Sie die Periodizität  $\Delta(1/B)$ .
- Bestimmen Sie die Flächenladungsträgerdichte  $n_s$  des zweidimensionalen Elektronengases aus den Shubnikov-de Haas-Oszillationen.
- Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse. Vergleichen Sie insbesondere die Ergebnisse aus den verschiedenen Auswerteverfahren.
- Fehlerrechnung nicht vergessen!