

Physikalisches Anfängerpraktikum (P1)

P1-73: Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld, Halleffekt

Matthias Ernst (Gruppe Mo-24)

Karlsruhe, 25.1.2010

Ziel des Versuchs ist das Verständnis des Verhaltens stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld, insbesondere des Halleffekts und dessen Anwendungen.

0 Grundlagen

0.1 Hall-Effekt

In einem Magnetfeld wirkt auf bewegte Ladungsträger die Lorentzkraft $F_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$. Da sich in einem stromdurchflossenen Leiter dessen Ladungsträger bewegen, kommt es im im Magnetfeld befindlichen Leiter zu einer Polarisation senkrecht zu Strom- und Magnetfeldrichtung, indem die Ladungsträger sich auf der einen Seite des Leiters sammeln, während die andere Seite verarmt. Dadurch entsteht eine Potentialdifferenz innerhalb des Leiters, die als Hallspannung bezeichnet wird. Es baut sich somit ein elektrisches Querfeld im Leiter auf, bis dieses die Lorentzkraft gerade kompensiert, also $-q\vec{E}_H = q(\vec{v} \times \vec{B})$. Der Leiter kann näherungsweise als Plattenkondensator der Dicke d und Breite b aufgefasst werden, damit gilt für das elektrische Feld $|E| = \frac{U}{d}$. Ist das Magnetfeld senkrecht zu b und parallel zu d , so lässt sich das Kreuzprodukt einfach auflösen und für die Hallspannung gilt $U_H = -vdB$. Über die Gesamtstromdichte $j = -qnv$ und den Strom $I = dbj = -dbqnv$ kann v eliminiert werden, damit gilt für die Hallspannung mit der materialabhängigen Hallkonstanten $A_H = \frac{1}{nq}$:

$$U_H = \frac{IB}{qnd} := A_H \frac{IB}{d} \quad (1)$$

0.2 Feldplatte

Eine Feldplatte besteht aus einem nichtleitenden Trägermaterial, auf dem eine Schicht Indiumantimonid aufgebracht ist. Innerhalb dieser Schicht befinden sich Nadeln aus Nickelantimonid, die eine deutlich höhere Leitfähigkeit aufweisen als das umgebende Indiumantimonid. Liegt kein Feld an, so kann der Strom direkt durch die Platte fließen. Wird jedoch ein magnetisches Feld angelegt, so werden die Elektronen durch die Lorentzkraft zu einer Seite hin abgelenkt. Sie fließen jedoch nur bis zur nächsten Nadel, von der sie aufgrund der hohen Leitfähigkeit wieder homogen über die

gesamte Breite verteilt werden. Je größer die Feldstärke ist, desto größer ist auch die Ablenkung der Elektronen und damit der Widerstand der Platte. Somit stellt die Feldplatte unter Nutzung der Proportionalität der Länge eines Widerstands zum Leiter einen magnetfeldabhängigen Widerstand dar. Die genaue Abhängigkeit des Widerstands vom Magnetfeld liegt in Form einer Eichkurve vor.

1 Durchführung

1.1 Messung des magnetischen Felds mit einer Feldplatte

1.1.1 Messung der Hallspannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom

Mit der Feldplatte soll die Abhängigkeit des Magnetfelds der später verwendeten Spule vom Erregerstrom gemessen werden, da dieses später genau eingestellt werden muss. Theoretisch könnte dieses berechnet werden, jedoch ist aufgrund der Spulengeometrie die Näherung einer langen Spule unzulässig, daher wird die Berechnung sehr kompliziert. Die Messung der an der Feldplatte abfallenden Spannung U_F wird mit einem großen Vorwiderstand und einer kleinen Spannung durchgeführt, damit sie möglichst wenig durch den schwanken Widerstandswert der Feldplatte beeinflusst wird. Es sollen die Werte von U_F und I_{er} gemessen werden, die zu den später benötigten Magnetfeldstärken führen. Außerdem soll B über I_{er} aufgetragen und der Verlauf diskutiert werden.

1.1.2 Bestimmung des Widerstands der Feldplatte

Es soll der Widerstand der Feldplatte für verschiedene Feldstärken berechnet und dargestellt werden. Der Gesamtwiderstand R_{ges} , an dem die Versorgungsspannung U_0 abfällt, setzt sich aus dem Widerstand der Feldplatte und dem Vorwiderstand zusammen: $R_{ges} = R_F + R_V$. Am Vorwiderstand fällt eine Spannung ab, $U_V = R_V I$, während die Versorgungsspannung an der gesamten Schaltung abfällt: $U_0 = R_{ges} I$. Da derselbe Strom fließt, kann die Stromstärke also bei gegebener Versorgungsspannung berechnet werden und aus dieser nach Messung von U_F dann R_F berechnet werden, wobei U_F und damit R_F vom vom Magnetfeld abhängen:

$$R_F(B) = \frac{U_F(B)}{U_0 - U_F(B)} R_V \quad (2)$$

Laut Vorbereitung soll die relative Widerstandsänderung $\Delta R_F = \frac{R_F(B) - R_F(0)}{R_F(0)}$ gegenüber dem feldfreien Fall, also bei $I_{er} = 0$ aufgetragen werden.

1.2 Messungen an einer Metallhallsonde

In diesem Versuchsteil wird eine Hallsonde aus Gold verwendet. Da diese unvermeidliche bauliche Mängel aufweist, gibt es zwei zusätzliche Anschlusspaare. Über diese kann eine zusätzliche Spannung angelegt werden, die für konstante Stromstärke und ohne Magnetfeld diese Mängel kompensiert. Also muss mit entsprechenden Potentiometern bei jeder Änderung des Stroms diese Spannung so nachjustiert werden, dass die feldfreie Hallspannung genau 0V beträgt.

1.2.1 Messung der Hallspannung in Abhängigkeit von Strom und Magnetfeld

Für verschiedene Werte von Strom I_S durch die Hallsonde und Magnetfeld B soll die Hallspannung U_H gemessen werden. Da die Hallspannung zum Einen in Abhängigkeit vom Magnetfeld mit

dem Strom als Parameter und zum Anderen in Abhängigkeit vom Strom mit Magnetfeld als Parameter aufgetragen werden soll, empfiehlt es sich, mindestens zwei Messreihen mit genug Werten durchzuführen (wenn die Zeit reicht, wären ca. 10 pro Messreihe sicher kein Fehler), wobei der jeweilige Parameter etwa in der Mitte seines Intervalls gewählt und während der Messreihe konstant bleibt. Beim Verändern des Magnetfelds wird in geschlossenen Leiterschleifen eine Induktionsspannung hervorgerufen. Dies ist auch bei der Hallsonde der Fall, weshalb das Messgerät bei solcher Veränderung voraussichtlich stark ausschlägt. Dies sollte jedoch bald abklingen.

Gleichung 1 kann umgeformt werden zu

$$A_H = \frac{U_H d}{B I_S} \quad (3)$$

Damit kann mittels der Steigung der Ausgleichsgeraden die Hallkonstante berechnet werden. Aus der Definition $A_H = \frac{1}{nq}$ kann somit die Ladungsträgerdichte der freien Elektronen n_{Au} und mit der Materialdichte $\rho_{Au} = 19,3 \text{ g cm}^{-3}$ sowie der molaren Masse $M_{Au} = 197,0 \text{ g mol}^{-1}$ und der Avogadrozahl N_A die mittlere Zahl freier Elektronen je Goldatom berechnet werden:

$$\zeta_{Au} = \frac{n_{Au} M_{Au}}{N_A \rho_{Au}} \quad (4)$$

1.2.2 Bestimmung des Widerstands, der elektrischen Leitfähigkeit und der Elektronenbeweglichkeit von Gold

Um die elektrische Leitfähigkeit von Gold zu messen, sind zwei zusätzliche Kontakte in einem definierten Abstand l an der Hallsonde angebracht. Bei bekannter Stromstärke I_S kann über Messung der Spannung U_r , die an diesem Leiterstück abfällt, dessen Widerstand berechnet werden. Andererseits kann über die als konstant vorausgesetzte Stromdichte $j = \sigma E$ mit dem Strom $I = jA = jbd$ und der Spannung $U_r = El$ daraus auch die Leitfähigkeit bestimmt werden:

$$\sigma = \frac{I_S l}{U_r b d} \quad (5)$$

Die Leitfähigkeit ist dann mit der Elektronenbeweglichkeit μ folgendermaßen verknüpft:

$$\mu = \frac{\sigma}{en} = \sigma A_H \quad (6)$$

Möglicherweise ändert sich der Widerstand der Goldschicht mit dem Magnetfeld, dies soll für konstante Stromstärke qualitativ und ggf. quantitativ geprüft werden.

1.3 Messungen an einer Halbleiterhallsonde

Anstelle der Goldhallsonde wird nun eine industriell gefertigte Halbleiterhallsonde eingesetzt. Bei dieser ist keine Justierung aufgrund baulicher Mängel nötig, da die Hallspannungen deutlich größer sind. Ein Halbleiter (hier Indiumarsenid) weist neben der Elektronenleitfähigkeit noch eine Leitfähigkeit von „Elektronenlöchern“, also positiven Ladungsträgern auf. Die Beweglichkeit der Löcher ist jedoch deutlich geringer und wird daher bei diesem Versuch vernachlässigt.

1.3.1 Messung der Hallspannung in Abhängigkeit von Strom und Magnetfeld

Die Messungen und Auswertungen aus Abschnitt 1.2.1 werden mit der Halbleiterhallsonde wiederholt. Allerdings soll die Spannung U_S des Steuerstroms während der Messung für die weitere Auswertung aufgenommen werden. Die Ergebnisse werden analog wie vorher ausgewertet und verglichen.

1.3.2 Bestimmung des Widerstands und der Elektronenbeweglichkeit

Auch die Messungen aus Abschnitt 1.2.2 werden mit der Halbleitersonde wiederholt und auf analoge Weise ausgewertet. Außerdem soll, da der Widerstand des Halbleiters offenbar vom Magnetfeld abhängt (daher auch die zusätzliche Messung der Spannung im vorherigen Abschnitt), wie in Abschnitt 1.1.2 die zum feldfreien Fall relative Widerstandsänderung aufgetragen werden. Abschließend werden alle Ergebnisse mit den vorher gewonnenen verglichen.