



Dieser Versuch beschäftigt sich mit den Wirkungen des Magnetfeldes auf elektrische Ströme. Aus makroskopischen Beobachtungen, Messungen von Spannungen bzw. Strömen, soll versucht werden, einen Einblick in das mikroskopische Verhalten von Ladungsträgern im Inneren eines Leiters unter dem Einfluß eines Magnetfeldes zu gewinnen.

In der Physik werden solche Versuche als *Halleffektmessungen* bezeichnet. Historisch halfen sie anfänglich (1879), die Stromleitung in Metallen zu verstehen. Später, nach der Entdeckung des Elektrons, verwarfen Halleffektmessungen an Halbleitern die Theorie, daß ausschließlich Elektronen, und zwar genau eines pro Metallatom, für die Stromleitung zuständig sind. Auch heute dienen kombinierte Hallspannungs- und Leitfähigkeitsmessungen zur Ermittlung von Ladungsträgerkonzentrationen und Beweglichkeiten.

Prinzipiell läßt sich der Halleffekt an jedem Leiterstück im Magnetfeld messen. Damit aber einigermaßen große Hallspannungen meßbar sind, müssen die Leiter extrem dünn sein, wie sich aus der Formel für die Hallspannung ablesen läßt. Solche speziell geformten und kontaktierten Leiter werden Hallsonden oder Hallgeneratoren genannt. Sie werden industriell gefertigt und haben viele Anwendungen, z.B. zur Messung der Stärke und Ausdehnung von Magnetfeldern, als berührungsloser Schalter (verschleißfreier Geber anstelle eines mechanischen Unterbrecherkontakts beim Ottomotor oder Kontakt einer Tastatur) oder zur analogen Multiplikation zweier elektrischer Größen.

Zur Erzeugung des Magnetfeldes in den folgenden Aufgaben wird ein recht großer Elektromagnet verwendet. Er besteht aus einem Eisenkern mit einem 12 mm breiten Luftspalt, der von ebenen Polflächen begrenzt wird. Auf dem Eisenkern sitzen zwei Spulen mit je 2400 Windungen in Serie. Das maximale Magnetfeld von 1,4T wird erreicht, wenn durch die Spulen ein Erregerstrom I_{er} von etwa 5A fließt. Die angelegte Spannung beträgt dann etwa 160V.

Wichtige Hinweise zu diesem Magneten: Die hohe Versorgungsspannung beachten! Keine spannungsführenden Anschlüsse anfassen! Vor jeder Änderung der Schaltung erst die Stromversorgung herunterregeln und ausschalten! Wegen der großen Induktivität des Elektromagneten und der in ihm gespeicherten Energie darf der Erregerstrom nicht abrupt unterbrochen werden, weder durch Ziehen einer Versorgungsleitung noch durch Ausschalten des Netzteils mit dem Schalter. **Also immer erst mit dem Regler den Strom auf Null drehen** und dann mit dem Schalter ausschalten. Auch beim Einschalten muß der Regler auf Null gedreht sein. Ansonsten treten gefährlich hohe und zerstörerische Induktionsspannungen auf.

Aufgaben:

1. Messung des magnetischen Feldes mit einer Feldplatte

1.1 Für die folgenden Aufgaben muß die Größe des Magnetfeldes B an der Stelle der Hallsonden, also im Luftspalt des Elektromagneten, bekannt sein. Prinzipiell könnte der Wert von B aus dem Aufbau des Elektromagneten und aus der Größe des Stromes I_{er} durch seine Spulen ausgerechnet werden, doch wird hier die $B(I_{er})$ -Abhängigkeit mit Hilfe einer *Feldplatte* bestimmt. Die Feldplatte ist ein Bauelement, dessen Widerstand R_f vom Magnetfeld B abhängt.

Fragen: Warum wird hier nicht der rechnerische Weg zur Bestimmung von B benutzt? Wie kommt die Feldabhängigkeit des Widerstands einer Feldplatte zustande?

Im Versuch wird die Feldplatte mit praktisch konstantem Strom betrieben. Die Feldplatte liegt in Reihe mit einem Vorwiderstand R_v an einer Spannungsquelle. R_v ist etwa 40 mal so groß wie der größtmögliche Wert des Widerstandes der Feldplatte in diesem Versuch. Daher wird der Strom I_f , der durch R_v und die Feldplatte fließt, im wesentlichen von R_v bestimmt. Die Spannung U_f , die an der Feldplatte abfällt, ist daher ein direktes Maß für das Magnetfeld B . Die Eichkurve $B(U_f)$ liegt am Versuchsplatz aus und ist auch am Ende dieses Aufgabenblattes aufgeführt.

Bestimmen Sie über die Messung von U_f , welchen Erregerstrom I_{er} für die verschiedenen Werte von B , die in den folgenden Aufgaben gebraucht werden, Sie einstellen müssen. Tragen Sie B über I_{er} auf, und deuten Sie qualitativ den Kurvenverlauf.

1.2 Um eine Vorstellung von der Größe des Widerstands R_f der Feldplatte und ihrer Abhängigkeit vom Magnetfeld B zu bekommen, sollen jetzt diese Werte aus den Meßwerten von Aufgabe 1.1, dem Widerstandswert $R_v=25k\Omega\pm 1\%$ und der Versorgungsspannung $(6,35\pm 0,05)V$ ausgerechnet werden.

Tragen Sie den Widerstand $R_f(B)$ sowie die Widerstandsänderung gegenüber dem feldfreien Fall: $\{[R_f(B) - R_f(0)] / R_f(0)\}$, gegen B auf.

2. Messungen an einer Metallhallsonde

2.1 Die Goldhallsonde, die hier als Beispiel für eine Hallsonde aus einem Metall dient, wurde selbst hergestellt, indem Gold durch eine Blende auf eine Unterlage aufgedampft wurde. Nur so konnte die geringe Dicke $d = (61\pm 3)nm$ erreicht werden. Die Breite der Hallsonde ist $b = (9,0\pm 0,1)mm$. Damit die Hallspannung fehlerfrei meßbar ist, müssen die Anschlüsse, an denen die Hallspannung an der Hallsonde abgegriffen wird, sich exakt gegenüberstehen. Schon bei kleinen Abweichungen in Richtung des Steuerstromes würde der Strom I_s zwischen den beiden Anschlüssen eine Spannung erzeugen, die sich der Hallspannung überlagert. Da bei der Herstellung solche Geometriefehler nicht zu vermeiden sind, muß diese Fehlerquelle auf andere Weise beseitigt werden: Auf einer Seite der Hallsonde befinden sich zwei Anschlüsse, die zu dem gegenüberliegenden symmetrisch angeordnet sind. Werden diese zwei Anschlüsse an ein Potentiometer (oder an zwei Potis für den Grob- und den Feinabgleich; siehe Schaltbild) gelegt, so kann ein 'elektrischer Geometrieabgleich' vorgenommen werden. Ohne Magnetfeld darf keine Hallspannung zu messen sein. Also muß bei jeder Änderung von I_s die Hallspannung bei $B = 0T$ mit den Potentiometern auf $U_h = 0V$ eingestellt werden.

Messen Sie bei verschiedenen Werten des Stromes I_s und des Magnetfeldes B die Hallspannung U_h . Tragen Sie $U_h(B)$ mit I_s als Parameter und $U_h(I_s)$ mit B als Parameter auf. Überlegen Sie sich, welche und wieviele Werte von I_s und B innerhalb der erlaubten Bereiche ($0A \leq I_s \leq 0,15A$) und ($0T \leq B \leq 1,4T$) am sinnvollsten sind, um die Linearität von $U_h(I_s)$ und $U_h(B)$ nachweisen zu können.

Bestimmen Sie aus den Ausgleichsgeraden die Hallkonstante R_h , die Konzentration freier Elektronen n_{Au} von Gold und die mittlere Zahl freier Elektronen je Goldatom ξ_{Au} . Überlegen Sie sich, wie die starken Ausschläge des Millivoltmeters für die Messung von U_h beim Verändern des Magnetfeldes zustande kommen.

2.2 Auf einer Seite der Goldhallsonde sind zusätzlich zu den Anschlüssen für die Messung der Hallspannung zwei weitere Anschlüsse in einem Abstand $l = (29,0\pm 0,1) mm$ angebracht. Über die Messung der Spannung U_r , die zwischen diesen Anschlüssen bei einem bekannten Steuerstrom I_s abfällt, kann der Widerstand dieses Leiterstücks berechnet werden. Zusammen mit den Angaben über die Geometrie dieses Leiterstücks kann die elektrische Leitfähigkeit σ , und mit der Hallkonstanten die Elektronenbeweglichkeit μ berechnet werden.

Messen Sie bei verschiedenen Steuerströmen I_s die zwischen den beiden zusätzlichen Anschlüssen abfallende Spannung U_r . Berechnen Sie die elektrische Leitfähigkeit σ_{Au} und die Elektronenbeweglichkeit μ_{Au} von Gold.

Prüfen Sie bei einem Wert von I_s , ob und ggf. wie stark der Widerstand der Goldschicht vom Magnetfeld abhängt.

3. Messungen an einer Halbleiterhallsonde

Um einen Eindruck von dem Unterschied zwischen einem Halbleiter und einem Metall zu bekommen, sollen sämtliche Messungen und Berechnungen, die für das Metall Gold angestellt wurden, an dem Halbleiter Indiumarsenid wiederholt werden. Ein wesentlicher Unterschied des Halbleiters zu einem Metall ist das Vorhandensein zweier Arten von Ladungsträgern: Negative Elektronen und Löcher (fehlende Elektronen im Kristallgitter), die sich wie positive Ladungsträger benehmen. Wären ihre Konzentrationen und ihre Beweglichkeiten gleich groß, würde keine Hallspannung meßbar sein. Bei InAs ist das nicht der Fall. Die Beweglichkeit der Löcher ist hier vernachlässigbar gegenüber der der Elektronen.

Die verwendete Halbleiterhallsonde ist aus industrieller Fertigung. Seitlich hat sie nur zwei Anschlüsse. Ein elektrischer Geometrieabgleich ist nicht möglich, aber auch nicht nötig, denn die Hallspannung ist in der Regel groß im Vergleich zur Fehlspannung.

Die Abmessungen der InAs-Hallsonde sind $d = (2,5\pm 0,5)\mu m$; $b = (1,5\pm 0,05)mm$; $l = (3,0\pm 0,05)mm$.

3.1 Messen Sie bei verschiedenen Werten des Steuerstromes I_s und des Magnetfeldes B die Hallspannung U_h . (Für die spätere Auswertung der Aufgabe 3.2 sollte die Spannung U_s an den Anschlüssen für den Steuerstrom hier gleich mitgemessen werden.) Überprüfen Sie, ob die bei der Metallhallsonde gefundenen Proportionalitäten auch hier gelten. Bestimmen Sie aus einer möglichen Ausgleichsgeraden

einen Wert von R_h und einen Wert der Ladungsträgerkonzentration n_{InAs} und vergleichen Sie die Werte mit den Ergebnissen aus Aufgabe 2.1.

Überlegen Sie sich, welche und wieviele Werte von I_s und B innerhalb der erlaubten Bereiche ($0\text{mA} \leq I_s \leq 25\text{mA}$) und ($0\text{T} \leq B \leq 1,4\text{T}$) für die Auswertung sinnvoll sind.

3.2 Wie schon bei den Aufgaben 1.2 und 2.2 soll auch hier wieder die Abhängigkeit des Widerstandes vom Magnetfeld B betrachtet werden.

Tragen Sie den Widerstand $R(B)$ und die relative Widerstandsänderung gegenüber dem feldfreien Fall (vgl. Aufgabe 1.2) über B auf. Vergleichen Sie das Ergebnis mit denen aus den Aufgaben 1.2 und 2.2. Überlegen Sie sich Erklärungen. Bestimmen Sie die Beweglichkeit μ_{InAs} der Elektronen in InAs, und vergleichen Sie sie mit μ_{Au} . Vergessen Sie nicht, daß die Werte für R_h , n_{InAs} und μ_{InAs} des Aufgabenteils 3 wegen des Vorhandenseins zweier Ladungsträgerarten (auch wenn sie sehr unterschiedliche Beiträge liefern) nur Näherungswerte sind.

Hinweise zur Fehlerrechnung:

Bei diesem Versuch ist eine ausführliche Fehlerrechnung möglich. Überlegen Sie sich generell bei allen Aufgaben die möglichen Quellen systematischer Fehler und ihren Einfluß auf die Ergebnisse.

Bei den Aufgaben 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2 werden die Ergebnisse durch die Berechnung von Ausgleichsgeraden bestimmt. Messen Sie dafür genügend viele Wertepaare, um eine sinnvolle Aussage über die Standardabweichung des aus der Steigung ausgerechneten Wertes zu ermöglichen.

Stichworte:

Elektromagnet; Induktion; Ferromagnetismus; Unterschied zwischen B-Feld und H-Feld; Meßverfahren für Magnetfelder; bewegte Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern; Elektronen- und Defekt-elektronen (Löcher)-Leitung; Beweglichkeit und Konzentration der Ladungsträger; Leitfähigkeit; Unterschiede und Charakteristika von Metall und Halbleiter; Halleffekt; Widerstandsabhängigkeit vom Magnetfeld; Feldplatte; Hallsonde.

Zubehör:

Elektromagnet mit Eisenkern und ebenen parallelen Polflächen (kreisförmig, $\varnothing=85\text{mm}$) in etwa 12mm Abstand, seitlich vom Luftspalt auf dem Eisenkern zwei Spulen mit je 2400 Windungen, in Serie zu schalten, max. 5A;

Regelbares Netzgerät für den Elektromagneten (max. 160V; 6,3A) mit Amperemeter für den Magnetstrom; Plexiglasplatte zum Einschieben in den Luftspalt mit einer aufgedampften Goldhallsonde, einer InAs-Hallsonde und einer Ni+Sb-Feldplatte übereinander sowie Anschlußgerät dazu mit Umschalter zwischen den Sonden und Nullabgleichspotentiometern für die Au-Hallsonde;

Netzgerät mit regelbarer Gleichspannung (0,2V - 2,4V) für den Hallsondensteuerstrom I_s und fester Gleichspannung ($6,35 \pm 0,05$)V für den Feldplattenstrom I_f ;

2 Universalmeßinstrumente mit mehreren Gleichstrom- und Gleichspannungs-Meßbereichen, Innenwiderstand $10\text{M}\Omega/\text{V}$ in den Spannungsmeßbereichen, Genauigkeit $\pm 1,5\%$ SKE;

Millivoltmeter mit mehreren Meßbereichen von 0,15mV bis 500 mV, $\pm 0,5\%$ SKE, dazu Spannungsteiler 2:1 zur Meßbereichserweiterung;

50 Ω -Potentiometer zur Feineinstellung von I_s .

Literatur:

Percell: *Berkley Physik Kurs 2*, Kapitel 6.6

Boeger et.al.: *Bauelemente der Elektronik*, 3.Aufl., Kapitel 13.6

Gerthsen: *Physik*, 12.Aufl., §§ 6.3.3, 6.4.1/2, 7.2.8/9, 7.4.4, 14.6.3

Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik, Bd.2*, 6.Aufl., §§ 35, 36, 71, 72

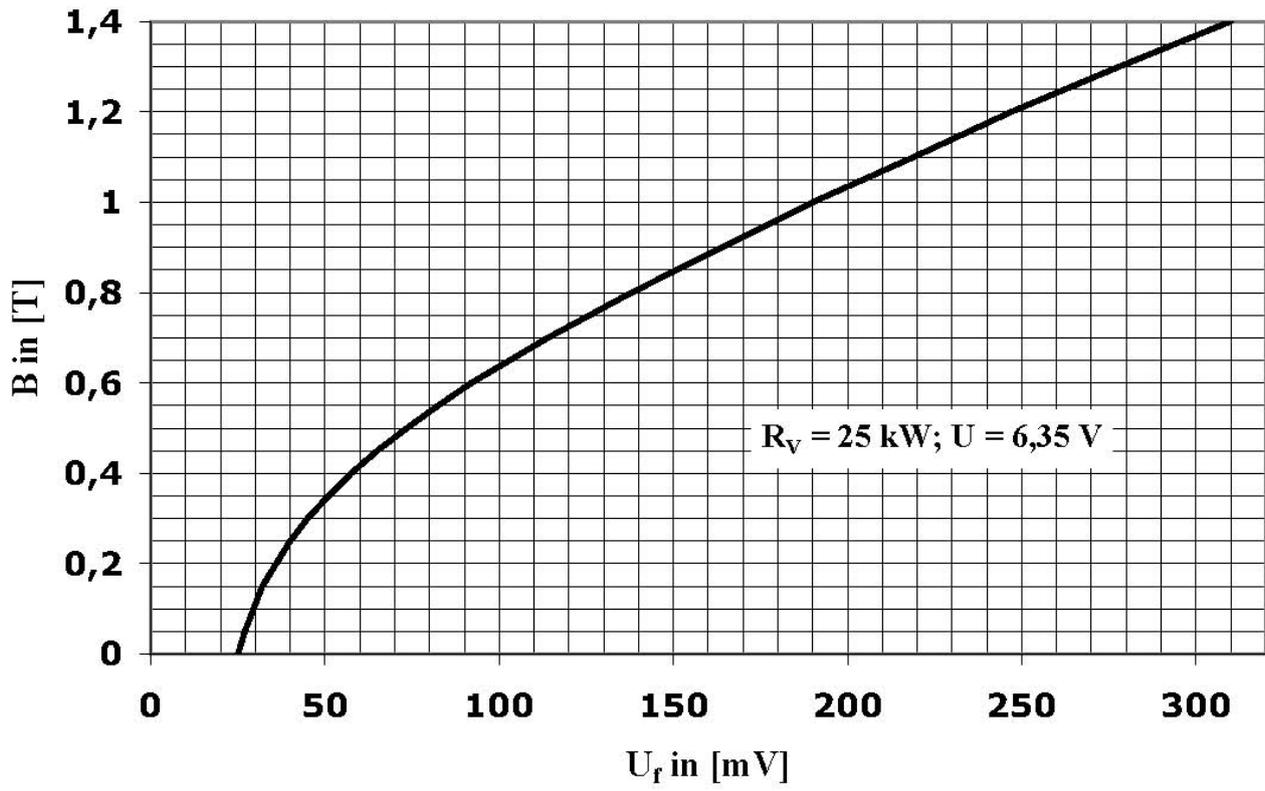
Pohl: *Elektrizitätslehre*, 21.Aufl., Kapitel 14, 25

Walcher: *Praktikum der Physik*, 2.Aufl., Kapitel 5.5.0.3

Justi: *Leitungsmechanismus und Energieumwandlung in Festkörpern*, 2.Aufl.

Kittel: *Festkörperphysik*, 2.Aufl.

Eichung der Feldplatte (Versuch: Halleffekt)



Version: Okt. 09