

# Magnetische Induktion und Magnetfeld

## Anleitung zum Präsenz-Versuch

Nebenfachpraktikum FAU Erlangen-Nürnberg

25. Oktober 2023

### 1 Vorbereitung

Nehmen Sie die Vorbereitung (beide Teile) ernst! Sie werden es nicht schaffen, diese in einer Stunde vor Beginn ihres Versuchs zu erledigen. Sie ist etwas umfangreich, aber je besser Sie vorbereitet sind, desto schneller sind Sie am Versuchstag fertig.

Für den Versuch benötigen Sie ein Geodreieck.

#### 1.1 Vorbereitungen zum physikalischen Hintergrund des Versuchs

Mit „Magnetfeld“ ist in diesem Versuch das „B-Feld“ gemeint, also die Feldgröße, die für eine Kraft auf bewegte Ladungen verantwortlich ist. In der (insbesondere älteren) Literatur wird diese mit „magnetischer Flussdichte“ oder gar mit „magnetischer Induktion“ bezeichnet, wohingegen mit „magnetischer Feldstärke“ das „H-Feld“ bezeichnet wird.

Für den Versuch ist die Unterscheidung zwischen H und B unerheblich, da im Vakuum (Luft) der Zusammenhang:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

mit der magnetischen Feldkonstanten  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$  gilt. Und selbst in der im dritten Versuchsteil verwendeten Kupfersulfatlösung ist die Abweichung von diesem Zusammenhang wegen der geringen Ionenkonzentration unerheblich.

- 1. Technische Stromrichtung:** Definieren Sie, was „Technische Stromrichtung“ bedeutet. Welche Art von Ladungsträger bewegen sich tatsächlich in einem Festkörper (z.B. in einem Metall)? In welche Richtung relativ zur technischen Stromrichtung bewegen sich die Ladungsträger demnach? Im folgenden sei mit „Richtung des Stroms“ immer die technische Stromrichtung gemeint.  
*Bemerkung: in p-dotierten Halbleitern verhalten sich die Elektronen tatsächlich so, als würde der Strom von positiv geladenen Teilchen erzeugt werden. In einer Ionenlösung gibt es natürlich offensichtlich sowohl positive wie auch negative Ladungsträger.*
- 2. Erzeugung von Magnetfeldern:** Skizzieren Sie das Magnetfeld (also insbesondere die Richtung) um einen geraden stromdurchflossenen Draht unter Beachtung der Stromrichtung. Leiten Sie für den Grenzfall eines unendlich langen, geraden Leiters die Formel für den Absolutwert des Magnetfelds als Funktion des Abstands von der Leiterachse sowohl innerhalb als auch außerhalb des Leiters her. Benutzen Sie dafür das Ampèresche Gesetz (Durchflutungsgesetz).
- 3. Stromdurchflossene Spule:** Beschreiben Sie in Worten, was das Charakteristikum des Magnetfelds im Inneren einer „langgestreckten Spule“, idealerweise einer unendlich langen Spule, ist. Skizzieren Sie qualitativ, wie das magnetische Feldlinienbild einer endlichen Spule im Innen- und Außenraum tatsächlich aussieht.
- 4. Erdmagnetfeld:** Skizzieren Sie das Magnetfeld der Erde, geben Sie an, wo der magnetische Nord- und Südpol liegen. Deuten Sie an in welche Richtung vermutlich das Erdmagnetfeld in Erlangen zeigen muss. Was bedeuten die Begriffe „Deklination“ und „Inklination“ des Magnetfelds. Wie berechnet man die Inklination aus der Vertikalkomponente und dem Maximum der Horizontalkomponente des Felds? Wie berechnet man den Betrag des Erdmagnetfelds aus den beiden Komponenten?

5. **Messung von Magnetfeldern Teil 1:** Im Versuch werden Sie Magnetfelder mit zwei unterschiedlichen Sensoren messen: einem Hall-Sensor und einer Induktionsspule (für ein (sinusförmiges) Wechselfeld). Skizzieren Sie den Versuchsaufbau zum klassischen Halleffekt. Zeichnen Sie die Kräfte ein, die sich im Gleichgewicht auf ein positiv geladenes Teilchen, welches sich gemäß der technischen Stromrichtung bewegt, wirken. Erklären Sie, wie es zur Ausbildung der Hall-Spannung kommt und leiten Sie die Formel für die ermittelte Feldstärke  $B$  als Funktion der Stromstärke  $I$ , der Dichte der Ladungsträger  $n$ , der Abmessungen der Hall-Sonde und der Hall-Spannung  $U_H$  her. (D.h.  $B = B(U_H, I, n, \dots)$ )
6. **Messung von Magnetfeldern Teil 2:** Nehmen Sie ein sich cosinusförmig zeitlich änderndes B-Feld mit Amplitude  $B_0$ , also  $B(t) = B_0 \cos(\omega t)$  an und leiten Sie den Zusammenhang zwischen der Amplitude  $U_0$  der in einer Spule mit  $N$  Windungen und Fläche  $A$  induzierten Spannung  $U_{ind}(t)$  und der Amplitude  $B_0$  her.  
*Anmerkung: Mit beiden Sensoren misst man immer die Projektion des Magnetfelds  $\vec{B}$  auf die Normalenrichtung  $\vec{n}$  (Einheitsvektor) der Fläche des Hall-Sensors (aufgespannt durch Stromrichtung und der senkrecht dazu stehenden Richtung des Hall-Felds) bzw. der Fläche der Induktionsspule. Ist  $\phi$  der Winkel zwischen  $\vec{B}$  und  $\vec{n}$  misst man also  $\vec{B} \cdot \vec{n} = B_0 \cos \phi$*
7. **SI-Einheit des B-Felds:** Das B-Feld wird in der Einheit Tesla (Einheitenzeichen: T) gemessen, die sich in verschiedener Art und Weise durch Kombination anderer Einheiten des SI Einheitensystems ausdrücken lässt. Zeigen Sie, dass die von ihnen ermittelten Formeln für das B-Feld beim Hall-Sensor bzw. der Induktionsspule zu derselben Einheit des B-Felds führen, wie die, die Sie aufgrund der Lorentzkraft auf eine bewegte Ladung ermitteln würden.
8. **Lesen Sie** den Rest der Anleitung durch. Falls Sie irgendwelche der benutzten Begriffe nicht kennen, dann recherchieren Sie diese selbständig!

## 1.2 Vorbereitungen explizit für die Versuchsdurchführung

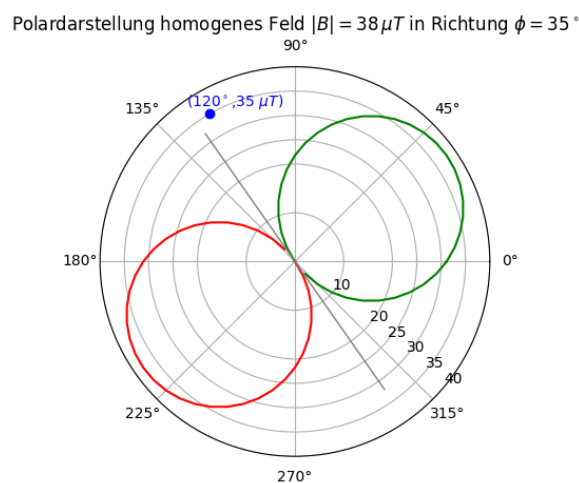


Abbildung 1: Polardarstellung eines homogenen magnetischen Felds, wie es mit dem im Versuch verwendeten Hall-Sensor durch Drehung des Sensors um eine Achse senkrecht zur Papierebene gemessen würde. Grün ist dabei die Richtung zu einem magnetischen Nordpol (positive Messwerte). Der blaue Punkt ist ein Beispiel für das Eintragen eines bestimmten Messwerts. Die graue Linie zeigt die Ausrichtung der Minimalmesswerte (idealerweise Null), die um  $90^\circ$  verdreht zur Ausrichtung der Maximalwerte liegt.

1. Verwenden Sie den online Rechner <https://isdc.gfz-potsdam.de/igrf-declination-calculator/> und bestimmen die erwartete Magnetfeldstärke, die Inklination und Deklination des Magnetfelds in dem Monat, in dem Sie ihren Versuch durchführen (Ort: lat:  $49^\circ 36'$ , long:  $11^\circ 2'$ , h=280 m). Rechnen Sie die Winkelangaben von Grad-Minute in eine Dezimalzahl um. Bestimmen Sie mit Hilfe von Google Maps oder Openstreetmap, unter welchem Winkel die Achse des Versuchgebäudes in der Paul-Gordan-Str. 10 zur Nord-Süd-Richtung orientiert ist.

2. Im Versuch sollen Sie die Winkelabhängigkeit der Horizontalkomponente des gemessenen Magnetfelds  $B(\phi)$  in einer Polarkoordinatendarstellung auftragen. Machen Sie sich damit vertraut, wie das geht. Machen Sie sich auch klar, weswegen die Messung idealerweise so aussehen sollte, wie die durchgezogene Kurve in der Skizze (Abb.1). (Das Vorzeichen des angezeigten Messwerts ist dabei durch die zwei unterschiedlichen Farben wiedergegeben)

Zur Vorbereitung müssen sie entweder das Polarkoordinatensystem auf der letzten Seite der Versuchsbeschreibung ausdrucken und in ihr Protokollheft einkleben. Oder Sie zeichnen das Koordinatensystem selber: verwenden Sie für die Amplitude die Einheit  $\mu\text{T}/\text{mm}$ , d.h Sie brauchen konzentrische Kreise mit 10, 20, 30, 40 mm Radius und ein Achsenkreuz ( $0^\circ/180^\circ$  und  $90^\circ/270^\circ$  Achse). Die Eintragung der Messwerte selber kann mit einem **Geodreieck** vorgenommen werden.

3. Im Versuch vermessen Sie das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule entlang der Spulenachse. Um dieses mit der theoretisch erwarteten Feldstärke vergleichen zu können, benötigen Sie die theoretischen Werte, die Sie –am besten mit Hilfe eines (Python-)Skripts oder eines Tabellenkalkulationsprogramms– vorher ausrechnen müssen. Tragen Sie diese berechneten Werte in eine Tabelle (s.u.) und ein Koordinatensystem (Stärke B-feld auf y-Achse, Abstand von Spulenmitte auf x-Achse), die Sie beide in ihrem Protokollheft anlegen, ein. In die Tabelle und das Koordinatensystem werden dann auch die tatsächlichen Messwerte eingetragen.

Die Formel für das Spulenfeld entlang der Spulenachse im Abstand  $x$  von der Spulenmitte lautet:

$$B(x) = \mu_0 \frac{NI}{2L} \left[ \frac{x + L/2}{\sqrt{R^2 + (x + L/2)^2}} - \frac{x - L/2}{\sqrt{R^2 + (x - L/2)^2}} \right]$$

Dabei ist im Versuch der Spulenstrom  $I = 0.15 \text{ A}$ , die Zahl der Windungen  $N = 266$ , die Länge der Spule  $L = 140 \text{ mm}$  und ihr Radius  $R = 36.5 \text{ mm}$ .

Im Versuch können Feldstärken bis etwa  $300 \mu\text{T}$  mit einer Genauigkeit von  $1 \mu\text{T}$  gemessen werden. Eine geeignete Skalierung für das Koordinatensystem wäre daher, die x-Achse im Maßstab 1:1 anzulegen und die y-Achse für das Magnetfeld im Maßstab  $1 \text{ cm} \hat{=} 20 \mu\text{T}$ . Wenn man die Längen in Millimetern misst und für die Feldkonstante den Wert:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 = 400\pi \mu\text{T mm/A}$  verwendet, bekommt man die Magnetfeldstärke gleich in  $\mu\text{T}$ .

Berechnen Sie die Werte für  $x = 0, 10, 20, \dots, 160 \text{ mm}$ , runden Sie dabei auf ganzzahlige Werte in  $\mu\text{T}$ .

|                                |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| x (mm)                         | 0   | 10  | 20  | ... | ... | ... | 160 |
| B ( $\mu\text{T}$ , berechnet) | 318 | 316 | 311 | ... | ... | ... | 11  |
| B ( $\mu\text{T}$ , gemessen)  |     |     |     |     |     |     |     |

Tabelle 1: Erwartete Werte für das Magnetfeld der im Versuch verwendeten Spule. Die angegebenen Werte sollen es Ihnen erlauben zu überprüfen, ob Sie die Formel richtig umgesetzt haben.

## 2 Versuchsdurchführung und Auswertung

### 2.1 Erdmagnetfeld

Nehmen Sie den Magnetfeldsensor in Betrieb. Achtung! Die Zuleitung vom Netzteil darf nicht vom Anzeigegerät getrennt werden! Behandeln Sie den Sensorkopf und seine Zuleitung vorsichtig. Insbesondere soll der Kopf in den Halterungen nur mit wenig Kraft fixiert werden, so dass er nicht versehentlich seine Position ändert.

Durch kurzes Drücken des Knopfes „Unit“ wird die Messeinheit zwischen der (alten) Einheit „Gauss“ und der zu benutzenden Einheit  $\mu\text{T}$  gewechselt. Durch längeres Drücken desselben Knopfes wird der momentane Messwert von den im Folgenden gemessenen abgezogen. Durch erneutes Drücken, wobei die Einheit wechselt, wird diese Kompensation wieder aufgehoben. Achten Sie darauf, dass sie nicht versehentlich die Einheit in der Messung wechseln und immer in  $\mu\text{T}$  messen. Das Vorzeichen der angezeigten Feldstärke gibt an, welcher Pol dem Messsensor gegenüber liegt. Positive Werte bedeuten, dass der gegenüberliegende Pol ein magnetischer Nordpol ist.

Das Erdmagnetfeld ist ein eher schwaches Feld von wenigen  $10 \mu\text{T}$ . Testen Sie die Umgebung ihres Messplatzes: das Gestell des Tisches, ein Schlüsselbund, ihre Gürtelschnalle, eine Kugelschreiberfeder, die



(a) Horizontalkomponente



(b) Vertikalkomponente

Abbildung 2: Aufbau zur Messung des Erdmagnetfelds.

Handy-Hülle, usw. können alle größere Magnetfelder als das Erdmagnetfeld erzeugen. Verstauen Sie diese Dinge in Ihrer Tasche oder legen Sie sie auf der Ablage am Fenster ab bzw. achten im Fall von Kugelschreiber und Gürtel darauf, dass diese die Messung nicht verfälschen. Wegen des Tischgestells empfiehlt es sich, einen Holzblock unter den Winkelhalter zu legen.

1. Justieren Sie den Winkelmesser so, dass die  $0^\circ$  Richtung möglichst parallel zur Tischkante verläuft. Messen Sie die Horizontalkomponente des Magnetfelds in  $15^\circ$  Schritten von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ . Notieren Sie die Messwerte mit Vorzeichen (!) in ihr Protokollheft. Stecken Sie den Sensor um, so dass die Vertikalkomponente gemessen wird. Nehmen Sie 2 Messwerte bei horizontal um  $90^\circ$  gedrehtem Sensor. Achten Sie auf die richtige Einheit des Magnetfelds und darauf, dass kein Offset unterdrückt ist („Zero“, s.o.).
2. Tragen Sie den Absolutbetrag der Messwerte in dem vorbereiteten Polarkoordinatensystem ein und verbinden Sie die Messwerte mit einer Kurve. Markieren Sie das Vorzeichen der Werte geeignet (unterschiedliche Farbe oder „+“ und „-“ neben dem Graphen). Legen Sie die Richtung der Maxima und die der Minima der Werte fest. Notieren Sie mögliche Gründe, weswegen ihre Messung von der oben gezeigten idealen Messung abweicht. Überlegen Sie anhand des Aussehens ihrer Auftragung, ob sie die Maxima oder die Minima für die Festlegung der Nord-Süd-Richtung verwenden wollen. Bestimmen Sie so den Betrag des Magnetfelds, seine Inklination und seine Deklination (unter der Annahme, dass die Tischkante genau senkrecht zur Gebäudeachse verläuft). Verwenden Sie für den Betrag der Horizontalkomponente einen geeignet bestimmten Mittelwert. Überprüfen Sie, ob die Magnetfeldrichtung mit ihrer Erwartung (Vorbereitung 1.2.1) übereinstimmt und notieren Sie das Ergebnis.

## 2.2 Magnetfeld einer Spule

Bauen Sie die Spule, Lineal und Reiter so auf, wie auf obigem Bild gezeigt. Die Spule muss bündig mit dem Holzblock auf der dem Lineal zugewandten Seite abschließen!

Die Position des Sensors im Gehäuse liegt etwa 5mm hinter dem vorderen (dem Kabel abgewandten) Gehäuseende, die Mitte der Spule (unter Berücksichtigung des Randes des Spulenkörper) etwa 73 mm vom Rand der Spule entfernt, Das Ende des Sensors muss demnach 78 mm über der Kante des Reiters hinaus ragen. Beachten Sie, dass zum einen diese Abmessungen keinesfalls genauer als auf  $\pm 1$  mm bekannt sind und Sie die Fixierung des Sensors auch nicht viel genauer hinbekommen werden. Nutzen Sie ein Geodreieck und das Holzlineal um den Sensor möglichst genau zu positionieren. Fixieren Sie den Sensor vorsichtig mit den Plastikschaublen des Reiters, so dass er sich nicht versehentlich bewegt.

An der Kante des Reiters, die der Spule zugewandt ist, können Sie den Abstand des Sensors von der Spulenmitte direkt ablesen, dabei muss die Spule mit dem Ende, an dem sich **nicht** die Zuleitungen befinden, bündig am Ende des Holzträgers auf der Seite des Lineals anliegen (siehe Abb. 3).

Versichern Sie sich, dass das Netzteil ausgeschaltet ist und der Einstellknopf auf Null steht. Verbinden Sie die Spule mit dem Ausgang des Netzteils (nicht den Ausgang für „Motor“ benutzen!) und schalten sie den Hochstrom-Eingang des Multimeters so in den Aufbau, dass Sie den Spulenstrom messen können. Vor Inbetriebnahme muss die Betreuerin bzw. den Betreuer den Aufbau überprüfen. Das Netzteil bleibt weiterhin ausgeschaltet!



Abbildung 3: Messaufbau für die Vermessung des Spulenfelds entlang der Spulenachse.

1. Setzen Sie den Reiter mit der Vorderkante auf „16 cm“ und notieren den Wert des dort herrschenden Magnetfelds in  $\mu\text{T}$ . Bringen Sie nun durch längeres Drücken des „Zero“ Knopfes die Anzeige auf Null. Achtung, dabei die Einheit ( $\mu\text{T}$ ) nicht verstellen! Fahren Sie nun den Sensor ganz in die Spule und notieren den nun angezeigten Wert. Fahren Sie den Reiter zwischen 0 und 16 cm entlang und notieren jeweils die Position des positivsten und negativsten Werts des angezeigten Magnetfelds. Diese Zahlen geben Ihnen einen Eindruck, wie genau Sie das Spulenfeld vermessen können. Behalten Sie im Folgenden die Nullstellung bei, sollte diese aus irgendwelchen Gründen verloren gehen, wiederholen Sie die Nullstellung auf der Position „16 cm“.  
**Verschieben Sie bei den Versuchen die Spule bzw. das Lineal nicht!**
2. Setzen Sie den Sensor auf die Position „12 cm“ und messen dort die Abhängigkeit des Magnetfelds vom Spulenstrom im Bereich 0.. 1.5 A in Schritten von 0.2 A. Notieren Sie die Messwerte in ihr Protokollheft (auch der Wert bei  $I=0$  ist ein Messwert!) und tragen Sie diese dann geeignet in einem Koordinatensystem auf (z.B. x-Achse 1 cm  $\hat{=}$  0.2 A und y-Achse 1 cm  $\hat{=}$  50  $\mu\text{T}$ ). Ziehen Sie mit dem Geodreieck eine Ausgleichsgerade durch die Datenpunkte, fassen das Ergebnis der Messung in einem Satz zusammen und diskutieren ggf. Abweichungen vom erwarteten linearen Zusammenhang  $B \propto I$ .
3. Stellen Sie nun den Spulenstrom möglichst genau auf 150 mA ein und schieben den Sensor ganz in die Spule (Sensor in der Mitte der Spule). Sollte ein negativer Wert angezeigt werden, dann polen Sie die Spule um. Weicht der angezeigte Wert des Magnetfelds (inkl. der Korrektur bei stromloser Spule) erheblich ( $\geq 20\mu\text{T}$ ) von dem vorher theoretisch ermittelten Wert ab, dann justieren Sie den Strom etwas nach. Notieren Sie die Größe dieser Änderung des Magnetfelds in ihrem Protokollheft. Vervollständigen Sie nun die von ihnen vorbereitete Tabelle und die grafische Auftragung mit den Messwerten.
4. Diskutieren Sie den Vergleich der Messwerte mit den berechneten Werten (Vorbereitung 1.2.3). Berücksichtigen Sie dabei die Ungenauigkeit, die durch vorhandene Streufelder, die Sie bei stromloser Spule gemessen haben, erzeugt werden. Auch die Ungenauigkeit der Strommessung sollten Sie berücksichtigen. Tragen Sie den kombinierten Effekt als Fehlerbalken für den Wert des Magnetfelds an den Punkten ein, die sie unter 1. bestimmt haben. Falls die Abweichung zwischen gerechneter und gemessener Abhängigkeit unter Berücksichtigung der Fehler der Magnetfeldmessung auf eine Verschiebung der Messwerte entlang der x-Achse zurückzuführen ist, notieren und diskutieren Sie die Größe dieser Verschiebung. Beachten Sie dabei, dass die genaue Position des Sensors im Sensorkopf (Ihnen) nicht exakt bekannt ist.

### 2.3 Magnetfeld im Inneren eines (Ionen-)Leiters

Im letzten Teil des Versuchs wird das Magnetfeld im Inneren und außerhalb eines Leiters gemessen, um die Voraussage nach ihrer Vorbereitung unter 1.1.2 zu überprüfen. Da man keinen Magnetfeldsensor



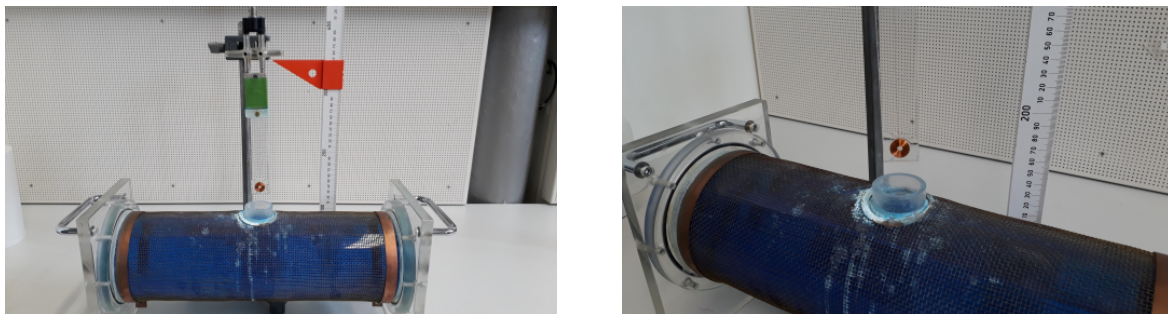
in einen metallischen einbringen kann, wird eine Kupfersulfatlösung mit beweglichen Ionen als Leiter verwendet. Der Gesamtstrom ergibt sich also als Summe von gegenläufig sich bewegenden negativ und positiv geladenen Ionen. Geht man davon aus, dass die Stromdichte in der Elektrolytlösung annähernd homogen über den Querschnitt des Leiters ist, also ortsunabhängig den Wert

$$j = I / (\pi R^2)$$

mit dem Radius  $R$  des Leiters hat, so muss man im Ampèreschen Gesetz als relevanten Strom bei einem Abstand  $r$  von der Mittelachse des Leiters einen Strom

$$I_{<r} = I \frac{\pi r^2}{\pi R^2} = I \frac{r^2}{R^2}$$

für die Erzeugung des Magnetfelds  $B(r)$  verwenden. Anders als bei einem einfachen geraden Leiter wird allerdings im Versuch der Strom am Rand durch ein Kupfernetz wieder zurückgeführt, so dass idealerweise nach dem Ampèreschen Gesetz das Feld im Außenraum Null sein sollte.



(a) Glaszylinder mit Kupfersulfatlösung, Induktionsspule und Messlineal (b) Detailansicht von Ionenleiter und Induktionsspule

Abbildung 4: Aufbau zur Messung des Magnetfelds in einem Ionenleiter

In die Flüssigkeit wird eine Induktionsspule mit  $N = 1200$  Windungen und einer Fläche von  $A = 74.3 \text{ mm}^2$  getaucht. Mit dieser kann gemäß der Formel von 1.1.6. eine Induktionsspannung proportional zum Magnetfeld gemessen werden, wenn dieses sich periodisch ändert. Daher und auch um die Entwicklung von Knallgas ( $\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) zu verhindern, wird die Spule mit einem Wechselstrom betrieben. Sowohl Strom  $I(t)$  als auch Spannung  $U_{\text{ind}}(t)$  werden auf einem Oszilloskop dargestellt. Damit kann man sehr einfach die Amplitude des Signals (halber Abstand Spitze-Spitze) und die Periodendauer  $T$  ablesen. Aus letzterer erhält man mit

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

die (Kreis-)Frequenz des Wechselsignals.



Abbildung 5: Bei der Messung verwendete elektronische Geräte: Frequenzgenerator zur Erzeugung des Stroms, Verstärker für die induzierte Spannung und Oszilloskop für die Anzeige von Strom und induzierter Spannung.

Beim Aufbau des Versuchs ist einiges zu beachten, weswegen Sie die Verkabelung gemeinsam unter Anleitung der Betreuerin bzw. des Betreuers vornehmen werden. Folgende Punkte sollen aber erwähnt sein:

- Mit dem Oszilloskop können Signale in ihrem Zeitverlauf quantitativ gemessen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die variablen Einstellungen der Zeitablenkung (X) und der Messsignalablenkungen (Y I und Y II) der verwendeten Kanäle durch Einrastung der entsprechenden Drehknöpfe am rechten Anschlag fixiert werden und die Tastenschalter für eine mögliche gestreckte Darstellung beider Ablenkungen ( $\times 10$ ) nicht aktiviert sind!

- Weder die Anschlüsse des Tonfrequenzgenerators noch die des Oszilloskops sind erdfrei, d.h. jeweils ein Anschlusspol beider Geräte (der Außenleiter der BNC-Buchsen) liegt auf Erdpotential. Man muss auf die korrekte Polung der Spannungsquelle achten, um einen Kurzschluss über das Oszilloskop zu vermeiden.
- Für die Messung des Stromstärke  $I$  wird ein Messwiderstand von  $100\text{ m}\Omega$  in Serie zum Elektrolyten geschaltet und der Spannungsabfall über diesen Messwiderstand mit dem ersten der beiden Kanäle des Oszilloskops gemessen.
- An die Elektroden des Elektrolytzylinders wird mit dem Tonfrequenzgenerator eine Wechselspannung mit einer Frequenz von  $5\text{ kHz}$  angelegt ( $0.4\text{ V}$ -Ausgang mit  $4\ \Omega$  Innenwiderstand verwenden). Achten Sie bei der Kontaktierung darauf, dass der Strom über das Kupfernetz zurück fließt!
- Die Frequenzeinstellung an der Spannungsquelle ist nicht genauer als etwa  $10\%$ . Benutzen Sie deswegen für die korrekte Messung der Frequenz ebenfalls das Oszilloskop!
- Der zweite Eingang des Oszilloskops wird benutzt, um die periodische Induktionsspannung an der Testspule darzustellen. Sie wird dazu zunächst durch den Verstärker vergrößert. Bei der Auswertung der magnetischen Induktion ist der entsprechende Verstärkungsfaktor zu berücksichtigen!

Folgende Messungen sind nun durchzuführen:

1. Legen Sie die maximal mögliche Ausgangsspannung mit einer Frequenz von  $5.0\text{ kHz}$  an die Schaltung an und bestimmen Sie anhand der Spannung am Messwiderstand die Amplitude der Stromstärke. Notieren Sie diese in Ihrem Protokollheft.
2. Tauchen Sie die mit Verstärker und Oszilloskop verbundene Spule freihändig in den Elektrolyten ein und überzeugen Sie sich davon, dass das Magnetfeld im Inneren variiert und überall tangential um die Zylinderachse gerichtet ist, also keine Komponente in Achsenrichtung aufweist! Notieren Sie die Beobachtung mit einem Satz in Ihr Protokollheft.
3. Montieren Sie die Induktionsspule an das Stativ und tauchen Sie sie so in den Elektrolyten ein, dass Sie eine maximale Induktionsspannung messen. Sie beobachten eine Phasenverschiebung zwischen Strom (sprich Magnetfeld) und Induktionsspannung. Woher kommt sie?
4. Messen Sie die Amplitude  $U_0$  der induzierten Spannung  $U_{ind}$  als Funktion der Eintauchtiefe  $y$  der Induktionsspule relativ zur Zylinderachse ( $y = 0$ ). Nehmen Sie mindestens zehn Messpunkte im Inneren und weitere fünf außerhalb des Zylinders auf und notieren diese in Tabellenform in Ihrem Protokollheft.
5. Berechnen Sie aus den gemessenen Spannungswerten gemäß ihrer Vorbereitung 1.1.6. die Amplitude des B-Felds  $B_0(y)$  und ergänzen die angelegte Tabelle entsprechend.
6. Tragen Sie Ihre Messdaten  $B_0(y)$  in einem Diagramm auf und zeichnen Sie zum Vergleich die Kurve ein, welche Sie für den im Experiment fließenden Strom erwarten (Vorbereitung 1.1.2). Der Innenradius des Ionenleiters beträgt  $R = 60\text{ mm}$ . Interpretieren Sie Ihr Ergebnis.

