

Versuch 6 - Magnetfelder

Oktober 2022 - Atilay Ayasli

Ziele des Versuchs

In dieser Versuchsreihe beschäftigen wir uns mit Magnetfeldern. Der Versuch ist aufgeteilt in drei verschiedene Teilaufgaben:

- **Aufgabe 1:** Bestimmen Sie mit dem iOLab die Stärke und den Inklinationswinkel des Erdmagnetfeldes in Innsbruck.
- **Aufgabe 2:** Mit zwei Magneten, einer AA Batterie, einer Schraube und ein bisschen Draht wird ein kleiner Elektromotor gebaut. Dieser soll benutzt werden, um den Nord- und Südpol der Magneten zu bestimmen.
- **Aufgabe 3:** Über das Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen Stück Drahtes soll die Stromstärke durch den Draht bestimmt werden.

Benötigte Materialien

Folgende Materialien werden für den Versuch bereitgestellt:

- Zwei AA Batterien
- Zwei Permanentmagnete
- Kabel: ca. 3 m
- Spax Schraube
- Isolierklebeband

Zusätzlich sollten Sie selber Papier, einen Stift und ein Geodreieck zur Versuchsdurchführung mitnehmen. Mit einem Messer oder einer Schere können Sie die Enden des Kabel abisolieren. Verdrillen Sie anschließend die offenen Adern des Kabels.

Wiederholung der Theorie

In diesem Abschnitt wollen wir die theoretischen Notwendigkeiten für diese Versuchsreihe kurz wiederholen. Eine ausführliche Beschreibung der benötigten Konzepte kann in Referenz [3] oder [5] nachgelesen werden.

Wir benötigen als erstes die allgemeine Lorentzkraft:

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1)$$

Wir beschäftigen uns nur mit Magnetfeldern in diesem Versuch und vernachlässigen elektrische Felder. Somit vereinfacht sich Gleichung 1 zu:

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2)$$

Gleichung 2 beschreibt die Kraft, die ein externes Magnetfeld \mathbf{B} auf ein Teilchen mit Ladung q und Geschwindigkeitsvektor \mathbf{v} ausübt. Die Kraft \mathbf{F}_L ist am größten, wenn \mathbf{v} und \mathbf{B} senkrecht aufeinander stehen. Alternativ dazu wirkt keine Kraft auf das Teilchen, wenn es sich parallel zum Magnetfeld bewegt.

In dieser Versuchsreihe betrachten wir Strom, der durch ein Kabel fließt. Hierbei gibt es zwei historisch bedingte Konventionen für die Richtung des Stromes.

- **Technische Stromrichtung:** Strom fließt von Plus nach Minus innerhalb des Kabels. Die Ladungsträger sind somit positiv geladen.
- **Physikalische Stromrichtung:** Strom fließt von Minus nach Plus innerhalb des Kabels. Die Ladungsträger sind negativ. Dies entspricht der tatsächlichen Elektronenbewegung des Stromes.

Gleichung 2 kann man sich mit der Rechten-Hand-Regel und der technischen Stromrichtung gut veranschaulichen. Hierbei zeigt der Daumen in die Bewegungsrichtung \mathbf{v} und der Zeigefinger entlang des Magnetfeldes \mathbf{B} , somit zeigt der Mittelfinger in Richtung der Kraft \mathbf{F}_L . Diese Überlegungen sind für Aufgabe 2 relevant.

In Aufgabe 3 betrachten wir das Magnetfeld, dass durch einen fließenden Strom erzeugt wird. Dafür wird ein Stück Draht gerade aufgespannt und mit einer Batterie kurzgeschlossen. Der resultierende Strom erzeugt ein Magnetfeld um den Draht. Das resultierende Magnetfeld in einem geraden Stück Draht kann mithilfe des Ampèreschen Gesetzes hergeleitet werden und wird beschrieben durch:

$$|\mathbf{B}(R)| = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{R}. \quad (3)$$

Hierbei ist μ_0 die magnetische Feldkonstante, I die Stromstärke durch den Draht und R der Abstand zum Draht. Somit hängt die Magnetfeldstärke $|\mathbf{B}|$ von der Stromstärke I und vom Abstand R ab.

Sicherheitsanweisung

In den folgenden Aufgaben schließen wir mit Drähten AA Batterien kurz. Das ist grundsätzlich eine sehr schlechte Idee und muss generell mit Vorsicht gehandhabt werden. Jedoch ist nur der Kurzschlussstrom der Batterie stark genug, um mit dem iOLab die erzeugten Magnetfelder erfassen zu können. Unter kontrollierten experimentellen Bedingungen sollte dies aber kein Problem sein. Als Grundregel für den gesamten Versuch gilt: Die Batterien während Messungen nie länger als 2 Sekunden kurzschließen.

Die Batterie darf niemals warm werden. Zusätzlich entleert sich die Batterie durch den Kurzschluss sehr rapide, welches zu einer starken Abnahme der Stromstärke führt und die Messdaten verfälscht.

Aufgabe 0: Kalibrierung des iOLab

Stellen Sie sicher, dass sich in der Umgebung ihres Tisches (auch drunter) keine Objekte aus Metall befinden. Alle metallischen Objekte können Magnetfeldlinien verzerren und Messdaten stark beeinflussen. Ein halber Meter Abstand zu allen metallischen Objekten und dem iOLab ist während den Messungen und der Kalibrierung eine gute Faustregel.

Der Magnetometer des iOLab befindet sich unter dem roten M auf der Vorderseite Ihres Gerätes. Auf der Rückseite des Gerätes unter dem M befindet sich eine Metallschraube. Entfernen Sie diese Schraube mit dem beigelegten Schraubenzieher, um Ihre Messgenauigkeit zu erhöhen. Die anderen Befestigungsschrauben müssen Sie nicht entfernen. Vergessen Sie nicht, nach den Versuchen die Schraube wieder anzubringen.

Anschließend Kalibrieren Sie Ihr Gerät gemäß Anweisung der iOLab-Software. Die Kalibrierungsfunktion ist, wie in Abbildung 1 dargestellt, in den Einstellungen der Software zu finden.

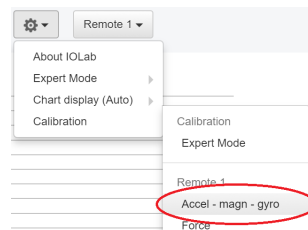


Abbildung 1: Kalibrieren Sie Ihr iOLab vor Versuchsbeginn.

Aufgabe 1: Stärke und Inklinationswinkel des Erdmagnetfeldes.

In dieser Teilaufgabe wollen wir die Stärke des Erdmagnetfeldes und dessen Inklinationswinkel bestimmen.

Legen Sie dazu den iOLab mit der weißen Vorderseite nach oben auf den Tisch. Die Ausrichtung des Koordinatensystems x,y,z können Sie der Skizze auf Ihrem Gerät entnehmen. Die z -Achse sollte zur Decke zeigen.

Schalten Sie die Magnetometerfunktion in der iOLab Software ein. Das Gerät misst jeweils das Magnetfeld entlang der drei Raumrichtungen x, y, z gemäß des eingezeichneten Koordinatensystems. Mit der Vorderseite nach oben gerichtet sollte die B_z -Komponente einen konstanten negativen Wert anzeigen.

Für die eigentliche Messung müssen Sie das iOLab so ausrichten, dass die y - oder x -Achse in Richtung Norden zeigt. *Drehen Sie Ihr iOLab in der x - y Ebene im Kreis und maximieren Sie entweder die B_y - oder B_x -Komponente.* Die andere Komponente des Magnetfeldes soll null anzeigen. Beispielsweise ist bei maximaler B_y -Komponente B_x null.

Die Stärke des Erdmagnetfeldes ergibt sich dann aus:

$$|\mathbf{B}_{\text{Erde}}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}. \quad (4)$$

Die Definition des Inklinationswinkels können Sie Abbildung 2 entnehmen. Er beschreibt den eingeschlossenen Winkel zwischen der horizontalen Ebene und dem Magnetfeld \mathbf{B} . Konventionsgemäß ist der Inklinationswinkel θ positiv, wenn \mathbf{B} in Richtung Boden zeigt.

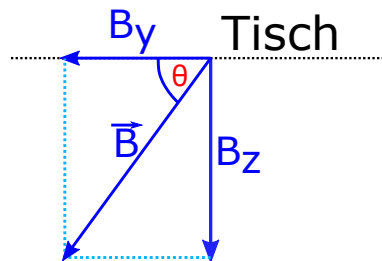


Abbildung 2: Skizze zur Bestimmung des Inklinationswinkels θ des Erdmagnetfeldes. Nach Definition ist der Winkel positiv, wenn das Magnetfeld in Richtung Boden zeigt.

Aufgabe 2: Elektromotor zur Bestimmung vom Nord- und Südpol eines Permanentmagneten.

In diesem Versuchsabschnitt wollen wir die Pole eines Permanentmagneten durch die Rotationsrichtung eines kleinen selbstgebautelektromotors bestimmen. Magnetfeldlinien im Inneren eines Permanentmagneten treten im Südpol in den Magneten hinein und am Nordpol wieder heraus. Für diesen Teilversuch können wir die Vereinfachung treffen, dass Magnetfeldlinien innerhalb des Magneten als gerade Linien zwischen den Polen verlaufen. In dieser Aufgabe benötigen Sie den iOLab nicht.

In Abbildung 3 sehen Sie die Versuchsanordnung. Heften Sie als ersten Schritt zwei Permanentmagnete auf den Kopf der beigelegten Spax-Schraube. Die Schraube sollte dann an einem Pol der Batterie haften bleiben. Schneiden Sie sich ein kleines Stück vom mitgelieferten Kabel ab und entfernen Sie die Isolierung an beiden Enden des Kabels. Eine Kabellänge von 10-15 cm sollte ausreichend sein. Indem man die Batterie über das Kabel, die Schraube und die Magnete kurzschließt, sollte die Schraube anfangen zu rotieren. Wichtig ist hierbei, dass Sie den Außenrand des Magneten kurzschließen. Sonst wird sich der Motor nicht drehen.

Es gibt vier mögliche Konfigurationen von Magnetfeldlinien und Stromrichtung, die zu einer Rotation führen. Sie können die Schraubenspitze entweder am Minus- oder Pluspol der Batterie haften lassen. Des Weiteren zeigt entweder der Nordpol oder der Südpol des Permanentmagneten Richtung Batterie. Vertauscht man die Pole der Batterie, so ändert sich

die Stromrichtung. Dreht man den Permanentmagneten um, so ändert sich die Richtung der Feldlinien. Alle möglichen Konfigurationen sind in 3 zu sehen.

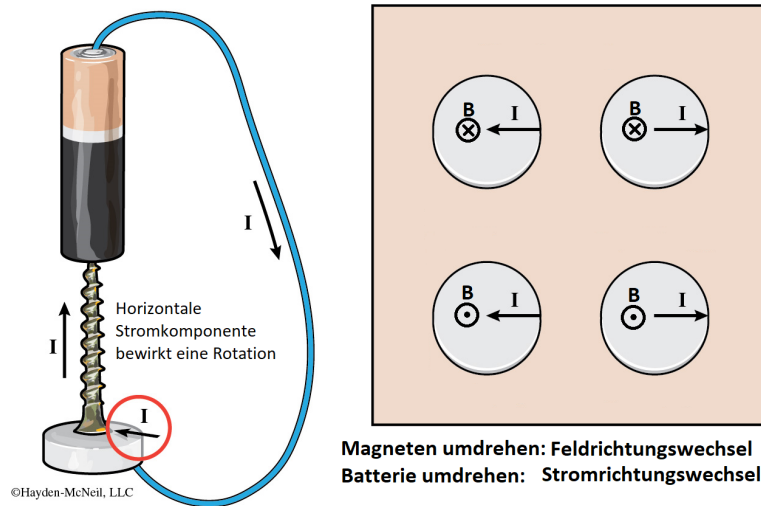


Abbildung 3: Eine Schraube mit zwei Permanentmagneten wird über ein kleines Stück Draht kurzgeschlossen. Bearbeitet aus Ref. [4].

Auslöser der Rotation ist die Lorentzkraft 2. Ladungsträger, welche horizontal im Permanentmagneten fließen, werden durch Magnetfeldlinien abgelenkt und die Schraube rotiert. Die relevante Stromkomponente ist in Abbildung 3 rot umrandet.

Überlegen Sie sich, bei welchen möglichen Konfigurationen die Schraube sich im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn rotiert.

Aufgabe 3: Strom durch einen langen geraden Leiter bestimmen.

Ziel dieser Aufgabe ist es, durch Messung von Magnetfeldern den Kurzschlussstrom einer Batterie zu bestimmen. Wir messen hierfür das Magnetfeld eines langen geraden Leiters. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Feldlinien um einen solchen Leiter.

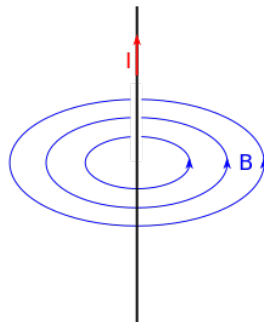


Abbildung 4: Magnetfeldlinien eines geraden, stromdurchflossenen Leiters. Die Feldlinien verlaufen radialsymmetrisch um den Leiter. Entnommen aus Ref. [1].

Die Richtung der Feldlinien kann man sich recht einfach mit der Rechten-Hand-Regel veranschaulichen. Umfasst man den Leiter mit der Hand, so dass der Daumen entlang der Stromrichtung verläuft, zeigen die Finger entlang der Magnetfeldlinien. Wichtig ist, dass keine Magnetfeldkomponente entlang der Achse des Leiters existiert. Die Feldlinien verlaufen radial um den Leiter.

Der Versuchsaufbau für diese Teilaufgabe ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Kurzschluss einer Batterie lässt einen starken Strom durch den Leiter fließen. Dieser Strom erzeugt ein Magnetfeld gemäß Abbildung 4.

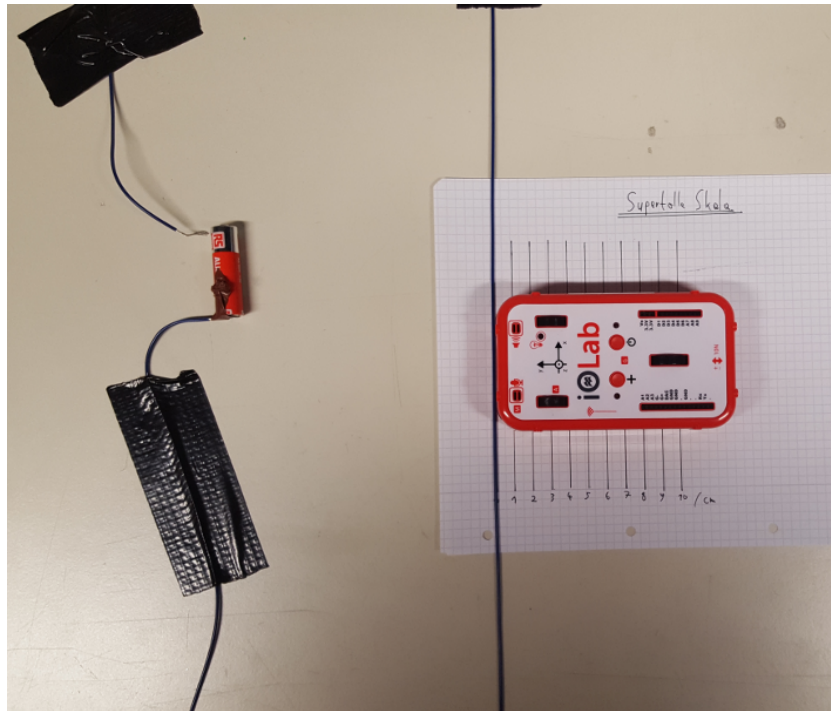


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Stromstärke. Eine Batterie wird zwei Sekunden kurz geschlossen, um B_y und B_z in Abhängigkeit des Abstandes vom Draht zu messen.

Folgende Schritte sind notwendig um das Experiment gemäß Abbildung 5 aufzubauen:

- Es soll für diesen Versuch eine frische, unbenutzte AA Batterie verwendet werden.
- Entfernen Sie die Isolierung an beiden Enden eines langen Stück Kabels. Ungefähr 2 m als Kabellänge sollten ausreichen.
- Ein längeres Stück des Kabels soll unter leichter Zugspannung am Tisch mit Klebeband befestigt werden. Dies stellt den geraden Leiter dar, dessen Magnetfeld wir messen wollen. Das Kabel soll dabei sehr gerade gespannt werden.
- Zeichnen Sie auf ein Blatt Papier eine Messskala mit 11 Strichen, jeweils in einem Abstand von 1 cm zueinander. Achten Sie auf die Genauigkeit Ihrer Skala. Die Abstandsmessung zwischen dem Leiter und dem Magnetometer ist die größte Fehlerquelle in diesem Versuch.
- Schieben Sie den ersten Strich Ihrer Messskala genau unter den Leiter. Dies stellt ihren Nullpunkt dar.

- Es ist für die Messung hilfreich, mit ein bisschen Klebeband eines der abisoliertes Enden des Kabels an die Batterie zu befestigen. Anschließend soll die Batterie auf den Tisch geklebt werden. Für die eigentliche Messung brauchen Sie dann nur das freiliegende abisolierte Ende des Kabels kurz gegen die Batterie halten.

Schalten Sie den Magnetometer ein und platzieren Sie den iOLab direkt neben den geraden Leiter (= Nullpunkt) wie in Abbildung 5. Schließen Sie als nächstes die Batterie für 1-2 Sekunden kurz. Je nach Ausrichtung des iOLab werden zwei Magnetfeldkomponenten ausschlagen. Zeigt beispielsweise die x-Achse des iOLab entlang des geraden Leiters, werden B_y und B_z das Magnetfeld des Leiters erfassen.

Messen Sie das Magnetfeld in Abhängigkeit vom Abstand zum geraden Leiter in 1 cm Schritten. Ein Beispieldatensatz für diese Messung ist in Abbildung 6 zu sehen. Die stufenförmigen Peaks sind Zeitpunkte während des Versuchs, an denen die Batterie kurzgeschlossen wurde. Es ist klar ersichtlich, dass keine B_x -Komponente des Magnetfeldes zu sehen ist, da die x-Achse des iOLab während dieser Messung entlang des geraden Leiters verlief.

Bitte bedenken Sie, dass je nach Ausrichtung der Batterie, Sie statt positive Ausschläge negative Ausschläge sehen, da der Strom in die andere Richtung fließt. Dies hat keinerlei Auswirkungen auf die Auswertung oder Ihre Daten und ist eine völlig äquivalente Messung. Die Stromrichtung können Sie sich mit der Rechten-Hand-Regel und Abbildung 4 veranschaulichen.

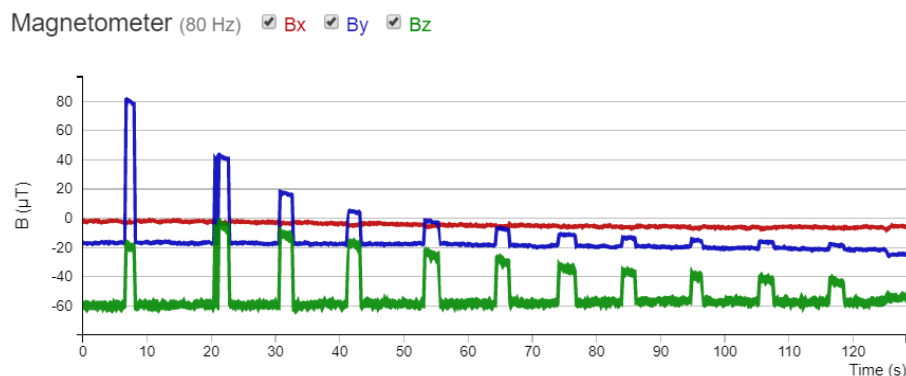


Abbildung 6: Beispieldatensatz für das Magnetfeld eines geraden Leiters. Die Batterie wurde immer wieder für etwa eine Sekunde kurzgeschlossen und der Abstand dazwischen vergrößert. Die stufenförmigen Ausschläge sind Zeitpunkte, an der die Batterie kurzgeschlossen wurde. Je nachdem wie Sie die Batterie kurzschließen, ändert sich die Stromrichtung. Somit kann es sein, dass Sie statt positive Ausschläge, negative Ausschläge sehen.

Für die Auswertung müssen Sie zwei Korrekturen durchführen. Die erste Korrektur ist die Platzierung des Sensors im iOLab. Zusätzlich zu der Skala muss der Ort des Sensors berücksichtigt werden. Die Position Ihres Sensors können Sie Abbildung 7 entnehmen. Ermitteln Sie mit Ihrer Skala und der Position des Sensors im iOLab den Abstand R zwischen dem Sensor und dem Leiter für jeden Messpunkt.

Die zweite wichtige Korrektur ist eine Hintergrundmessung für das Erdmagnetfeld und eventuelle Verzerrungen aufgrund von metallischen Objekten. Beispielsweise addiert sich das Magnetfeld der Erde auf das gemessene Magnetfeld des geraden Leiters. Zusätzlich verzerren Gegenstände aus Metall das Erdmagnetfeld und verfälschen die Messung. Um diesen Faktoren entgegenzuwirken, muss nach der Messung der Hintergrund von den Messdaten abgezogen werden.

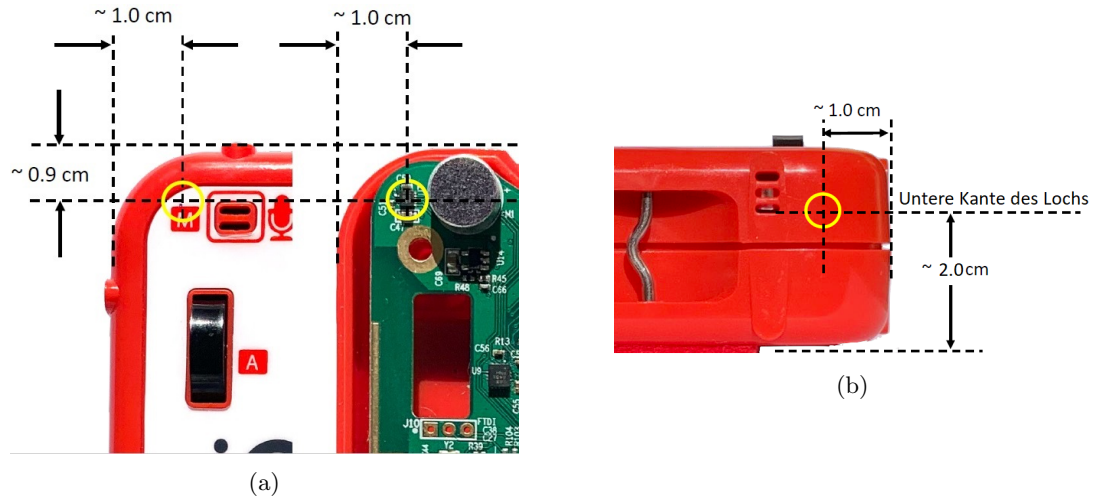


Abbildung 7: Position des Magnetometers innerhalb des iOLab. Der Sensor ist im Bild gelb umrandet. Alle angegebenen Werte haben eine Unsicherheit von $\pm 0,1$ cm. Bild abgeändert von Ref. [2].

Da der Magnetometer während der ganzen Messung durchgehend eingeschaltet ist, messen Sie den Hintergrund automatisch mit. Nach Änderung der Position des iOLab ist es ratsam, ein paar Sekunden zu warten, um den Hintergrund der Position aufzunehmen. Durch Verschieben des Sensors auf eine neue Position kann sich der Hintergrund aufgrund von Metall in der Umgebung ändern. Ziehen Sie für jede einzelne Magnetfeldkomponente den Hintergrund dieser Komponente ab. Wählen Sie dazu links vom jeweiligen betrachteten Peak einen geeigneten Bereich als Hintergrund. Ein Beispiel zur Hintergrundmessung kann in Abbildung 8 gesehen werden.

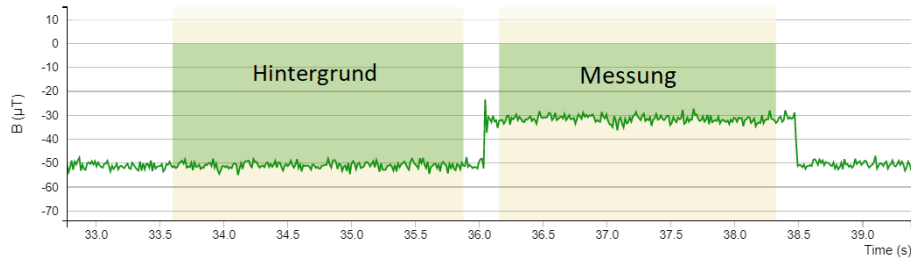


Abbildung 8: Der positive Ausschlag rechts ist eine beliebige Magnetfeldkomponente des geraden Leiters durch Kurzschluss einer Batterie. Von jedem Messpunkt muss der Hintergrund abgezogen werden.

Für die Auswertung benötigen Sie Gleichung 3. Tragen Sie in einem Graphen $|B_{\text{korrigiert}}|$ gegen $1/R$, also dem inversen Abstand, mitsamt Fehlerbalken auf. Durch Anpassung einer Geraden können Sie dann den Kurzschlussstrom der Batterie bestimmen.

Sie können Ihr Ergebnis grob abschätzen, wenn Sie annehmen, dass die Batterie einen Innenwiderstand von $0,15 \Omega$ und das Kabel einen Leiterwiderstand von $40,1 \Omega/\text{km}$ hat. Die Unsicherheiten für den Leiterwiderstand und den Innenwiderstand können Sie für diese Teilaufgabe ignorieren, nur der Länge des Kabels hat eine Unsicherheit.

Punktevergabe

Für diese Versuchsreihe müssen nur die Daten von Aufgabe 3 ins Repository hochgeladen werden.

In Summe kann man für diesen Versuch 10 Punkte erreichen. Aufgaben 1 und 2 bringen jeweils 3 Punkte, Aufgabe 3 bringt 4 Punkte.

Korrekte Angaben der Messwerte und deren Unsicherheiten ist für die Benotung von großer Wichtigkeit. Jede einzelne falsche Angabe von Unsicherheiten (Beispiel: 10,34(231) μT) bringt einen automatischen Punkteabzug von 0,5 Punkten von der erreichten Gesamtpunktezahl.

Falls es während der Auswertung Fragen gibt oder etwas unklar ist, bitte Mail an atily.ayasli@uibk.ac.at.

Aufgabe 1 (3 Punkte)

Diese Aufgabe erfordert:

- Angabe von Stärke und Inklinationswinkel des Erdmagnetfeldes mitsamt Unsicherheiten.
- Recherche, ob Ihre Messwerte mit Literaturwerten übereinstimmen. Was sind Faktoren die Ihre Messwerte beeinflussen können. (2-3 Sätze)

Aufgabe 2 (3 Punkte)

Diese Aufgabe erfordert:

- Wählen Sie eine mögliche Konfiguration des Elektromotors. Erläutern Sie kurz: Wie fließt der Strom? Wie verlaufen die Magnetfeldlinien und in welche Richtung dreht sich der Motor?
- Erstellen Sie eine Tabelle für alle möglichen Konfigurationen des Elektromotors, mit der eine externe Person bestimmen kann, ob der Nordpol oder der Südpol zur Batterie zeigt.
- Ist es mit diesem Aufbau möglich zu bestimmen, ob positive oder negative Ladungsträger durch das Kabel fließen? (2-3 Sätze)

Aufgabe 3 (4 Punkte)

Diese Aufgabe erfordert:

- Grafische Darstellung Ihrer korrigierten Daten mit Fehlerbalken und Bestimmung des Stromes mitsamt Unsicherheiten.
- Sie können Ihr Ergebnis grob abschätzen, wenn Sie annehmen, dass die Batterie einen Innenwiderstand von $0,15\ \Omega$ und das Kabel einen Leiterwiderstand von $40,1\ \Omega/\text{km}$ hat. Die Unsicherheiten für den Leiterwiderstand und den Innenwiderstand können Sie für diese Teilaufgabe ignorieren, nur der Länge des Kabels hat eine Unsicherheit.
- Was sind die größten Fehlerquellen? Was kann man machen, um die Genauigkeit zu erhöhen (3-4 Sätze)?

Literatur

- Demtröder, Wolfgang. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer-Verlag, 2018.

Literatur

- [1] *B-Feld eines stromdurchflossenen geraden Leiters*. https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Gerader_leiter.svg, 2006. Gemeinfrei, Abgerufen am 5.12.20.
- [2] *iOLab-Maße*. drive.google.com/drive/folders/1ezIXiIjzQCAZgmKt1SvQH0uU1sWK70uK, 2020. Abgerufen am 5.12.20.
- [3] W. DEMTRÖDER, *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*, Springer-Verlag, 2018.
- [4] T. HEMMICK, *iOLab for Scientists and Engineers*, Hayden-McNeil, 2019.
- [5] P. A. TIPLER UND G. MOSCA, *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 6. Auflage*, Springer Verlag, 2009.