

# Magnetfelder

Alexander Helbok\*, Clemens Bein†

9. Februar 2023

## Zusammenfassung

Ziel des Versuch ist es, Magnetfelder besser zu verstehen. Dazu werden in drei Versuchen verschiedene Aspekte von Magnetfelder untersucht. Es wird zu einem der Inklinationswinkel in Innsbruck bestimmt, zum anderen wird Magneten und einer Batterie ein kleiner Elektromotor gebaut, um mit Hilfe der Drehrichtung den Nord bzw. Südpols eines Magneten zu bestimmen. Zum Schluss soll der Strom, Welcher durch einen geraden Leiter fließt, über das Magnetfeld bestimmt werden.

---

\*alexander.helbok@student.uibk.ac.at

†clemens.bein@uibk.ac.at

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>1</b>
2.1	Trigonometrische Überlegungen . . . . .	1
2.2	Einführung in die Elektrodynamik . . . . .	1
2.3	Statistische Grundlagen . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Aufbau und Methoden</b>	<b>3</b>
3.1	Stärke und Inklinationswinkel des Erdmagnetfelds . . . . .	3
3.2	Elektromotor zur Bestimmung von Nord und Südpol eines Permanentmagneten . . . . .	3
3.3	Strom durch einen langen geraden Leiter . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>5</b>
4.1	Erdmagnetfeld . . . . .	5
4.2	Elektromotor . . . . .	6
4.3	Stromdurchflossener Leiter . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerung</b>	<b>6</b>

# 1 Einleitung

Der Elektromagnetismus ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungskräfte des Universums. Aus den Vieren ist es aber die einzige Kraft, welche sowohl in der klassischen Physik als auch in der Quantentheorie ihren Nutzen hat. So kommt es, dass elektrische und magnetische Wechselwirkungen in nahezu allen Bereichen der Physik vertreten sind und für die Beschreibung des

. Deshalb ist es wichtig, diese Kraft und ihre Folgen mittels Experimente im Grundpraktikum zu untersuchen.

Dafür werden in Kapitel 2 die dafür benötigten physikalischen und statistischen Grundlagen aufgezeigt. Daraufhin wird in Kapitel 3 der Aufbau und die Vorgehensweise der einzelnen Versuche beschrieben. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der drei Versuche dargestellt und zum Schluss werden die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert.

# 2 Theorie

Im nachfolgenden Kapitel wird auf die theoretischen Grundlagen des Versuches eingegangen.

## 2.1 Trigonometrische Überlegungen

Der Betrag eines Vektorfeldes in kartesischen Koordinaten lässt sich mit dem Satz vom Pythagoras als Wurzel der Quadratsummen anschreiben und schaut wie folgt aus

$$|\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (1)$$

, wobei  $B_i$  die kartesischen Komponenten des Vektorfeldes darstellen.

Betrachtet man den Winkel zwischen einer Ebene und einem Vektorfeld, lässt sich das über das Skalarprodukt zwischen dem Vektorfeld und dessen Projektion auf die Ebene bewerkstelligen. Dieser Ausdruck lässt sich vereinfachen, wenn man das Koordinatensystem so dreht, dass eine Komponente des Vektorfelds 0 wird. Setzt man zum Beispiel die y-Komponente auf 0, erhält man für den Winkel

$$\theta = \arctan\left(\frac{B_z}{B_x}\right) \quad (2)$$

## 2.2 Einführung in die Elektrodynamik

Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Konzepte lassen sich im Kapitel 3 vom Demtröder nachlesen [1]. Ein großer Teilbereich der Physik stellt die Elektrodynamik dar, welche sich mit der Studie von Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern beschäftigt. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (3)$$

, die eine bewegte Ladung  $q$  mit Geschwindigkeit  $\vec{v}$  in einem elektrischen Feld  $\vec{E}$ , sowie magnetischen Feld  $\vec{B}$  verspürt. To note! ist hier, dass der Betrag von E-Feld immer parallel zu den Feldlinien verläuft, während das B-Feld eine Kraft erzeugt, welche normal auf die Feldlinien (und die Geschwindigkeit der Ladung) steht. Die tatsächliche Richtung der Lorentzkraft kann man sich dann mit der Rechten-Hand-Regel herleiten, wobei der Daumen  $\vec{v}$ , der Zeigefinger  $\vec{B}$  und der Mittelfinger  $\vec{F}_L$  repräsentiert.

Das Vorzeichen der Kraft wird (mitunter) durch die Ladung bestimmt, was in Stromkreisen zu Verwirrung führen kann. In diesem Bericht wird die technische Stromrichtung gewählt, sodass die Ladungsträger in einem Kabel positiv sind und der Strom somit vom Pluspol zum Minuspol fließt.

Betrachtet man einen elektrischen Strom in einem Leiter und setzt man  $q\vec{v} = I\vec{l}$  man erhält für den zweiten Teil der Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (4)$$

. Hierbei ist  $I$  die Durchflussrate der Ladungen und  $\vec{l}$  der Längenvektor des Leiters.

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I}{|\vec{r}|^3} d\vec{l} \times \vec{r} \quad (5)$$

. Hier ist das wird das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters im Abstand  $r$  durch das geschlossene Kurvenintegral (welches den Leiter umschließt) ausgedrückt. Wählt man für die Kurve  $C$  einen Kreis und schaut man sich nur den Absolutbetrag des Magnetfeldes an, vereinfacht sich das Integral zu

$$|\vec{B}(r)| = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (6)$$

## 2.3 Statistische Grundlagen

Hier werden kurz die Methoden erwähnt, welche für die statistische Aufbereitung der Daten essentiell sind.

Das Arithmetische Mittel, auch Mittelwert oder Durchschnitt genannt, ist das wohl meist verwendete Werkzeug der Statistik. Es lässt sich sowohl für „exakte“, als auch für fehlerbehaftete Daten definieren. Im ersten Fall spricht man von einem ungewichteten Mittelwert und man schreibt

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

mit  $\bar{x}$  als Mittelwert von  $N$  Daten [2].

Sind die Daten fehlerbehaftet (mit Fehler  $\alpha_i$ ) muss man diesen berücksichtigen und erhält

$$\bar{x} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{\alpha_i^2} \right)^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\alpha_i^2} \quad (8)$$

Haben alle Daten aber den selben Fehler, kürzt sich dieser weg und man landet wieder bei Gleichung (7). [2, S. 50] Aus diesem Grund wird in diesem Versuch größtenteils der ungewichtete Mittelwert angewandt, obwohl alle Daten fehlerbehaftet sind.

Die Standardabweichung ist ein direktes Maß für die Verteilung der Daten und gibt an, wie weit die Daten im Mittel vom Durchschnitt abweichen. Sie berechnet sich wie folgt

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Wir dividieren hier durch  $N - 1$ , da der Mittelwert, der in der Berechnung der Standardabweichung herangezogen wird, die  $N$  Freiheitsgrade der  $N$  Daten um einen reduziert [2].

Die Kombination der Unsicherheiten von fehlerbehafteten Messdaten erfolgt mittels der Gaußschen Fehlerpropagation. Diese stellt einen Zusammenhang zwischen dem Fehler der Größe  $Z(x_i)$ , welche von  $x_i$  Variablen abhängt, und den partiellen Ableitungen nach  $x_i$  her. In allgemeiner Form sieht die

Formel wie folgt aus

$$\alpha_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial Z}{\partial x_i} \alpha_{x_i} \right)^2} \quad (10)$$

mit  $\alpha_{x_i}$  als Fehler der einzelnen Größen, von denen  $Z$  abhängt [2]. Oft wird für  $\alpha_{x_i}$  die Standardabweichung aus Gleichung (9) verwendet, das muss aber nicht der Fall sein. Die Propagation von Fehlern erfolgt in diesem Versuch automatisch und wird im Hintergrund gehalten.

Eine kurze Anmerkung zur Notation:  $\sigma$  wird in diesem Bericht für die Standardabweichung eines Datensatzes verwendet, während  $\alpha$  der Fehler einer bestimmten Größe ist. Öfters fallen diese beiden zusammen (bzw.  $\alpha$  wird auf  $\sigma$  gesetzt), was für Verwirrung sorgen kann, weshalb dies im Text immer erwähnt wird. Als Faustregel kann man sich merken, dass  $\sigma$  die Eigenschaft eines Datensatzes ist und  $\alpha$  sich nur auf einzelne Werte bezieht.

### 3 Aufbau und Methoden

In diesem Kapitel wird der Aufbau der drei Einzelversuchen erläutert

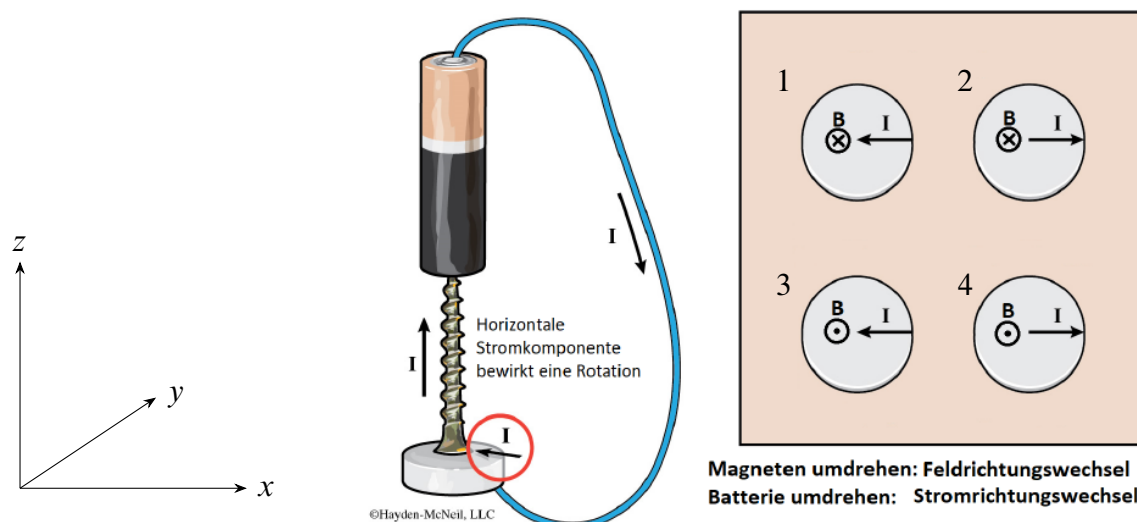
#### 3.1 Stärke und Inklinationswinkel des Erdmagnetfelds

Um systematische Fehler in den Messdaten zu vermeiden, muss als erstes sichergestellt werden, dass sich im Umkreis von circa 1 m des Tisches keine metallischen Objekte befinden, da diese das Magnetfeld der Erde verzerrern können. Danach lässt sich der Hall-Effekt Sensor im IOLab über die Software kalibrieren. Um die Berechnung des Inklinationswinkels zu vereinfachen, muss das IOLab am Tisch so ausgerichtet werden, dass eine Komponente des gemessenen Magnetfeldes im Rahmen der Unsicherheit mit 0 vereinbar ist. Ist der Hall-Effekt Sensor so ausgerichtet, dass eine kartesische Komponente 0 ist (und somit die beiden anderen im Betrag maximal sind) kann man die eigentliche Ausmessung vom Inklinationswinkel und Betrag des Erdmagnetfeldes durchführen.

#### 3.2 Elektromotor zur Bestimmung von Nord und Südpol eines Permanentmagneten

Für diesen Versuch werden eine AA Batterie, eine Spax-Schraube, ein Permanentmagnet und ein Kabel benötigt. Auf den Permanentmagneten wird die (am besten ferromagnetische und auf jeden Fall Stromleitende) Schraube gestellt, dessen Spitze als Drehachse fungiert. Auf die Schraubenspitze balancieren wir eine Batterie, mit dem Minuspol nach unten. Das andere Ende der Batterie verbinden wir mit einem Kabel mit dem Magneten. Hierbei ist wichtig, das Kabel am äußeren Rand des Magneten anzuschließen, da es sonst zu keiner Rotation der Batterie kommt.

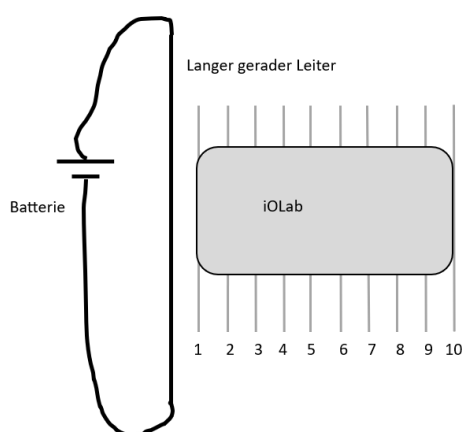
Je nach Ausrichtung des Magneten geht das Magnetfeld in die positive oder negative z-Richtung und je nach Ausrichtung der Batterie fließt der Strom von der Batterie über das Kabel in den Magneten oder umgekehrt (das Koordinatensystem wurde so gelegt, dass der Strom in der xz-Ebene fließt). Wir haben also vier verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten mit zwei unterschiedlichen Beobachtungen, eine Drehung in und gegen den Uhrzeigersinn. In Abbildung 1 ist der Versuchsaufbau (links), sowie die möglichen Konfigurationsarten (rechts) dargestellt.



**Abbildung 1:** Links: Versuchsaufbau des Batteriemotors. Auf einen Permanentmagneten wird über eine Schraube eine Batterie gestellt, welche über ein Kabel wieder mit dem Magneten in der Basis verbunden ist. Rechts: möglichen Konfigurationsarten des Versuchs mit eingezeichnetem Strom und Magnetfeld. Graphik entnommen aus <sup>2</sup>

### 3.3 Strom durch einen langen geraden Leiter

In diesem Versuch wird das Magnetfeld eines langen geraden Leiters gemessen, um auf den Kurzschlussstrom zurückzuschließen. Dazu wird eine frische AA Batterie, ein Kabel und ein Stück Papier benötigt. Zuerst wird unter Spannung ein ungefähr 15 cm langes Stück des Kabels mit Klebeband am Tisch befestigt. Daraufhin wird auf einem Papier eine Skala mit elf Markierungen mit jeweils 1 cm Abstand gezeichnet und unter den Leiter geschoben. Der erste Strich sollte unter dem Kabel sein.



**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau des dritten Versuchs.

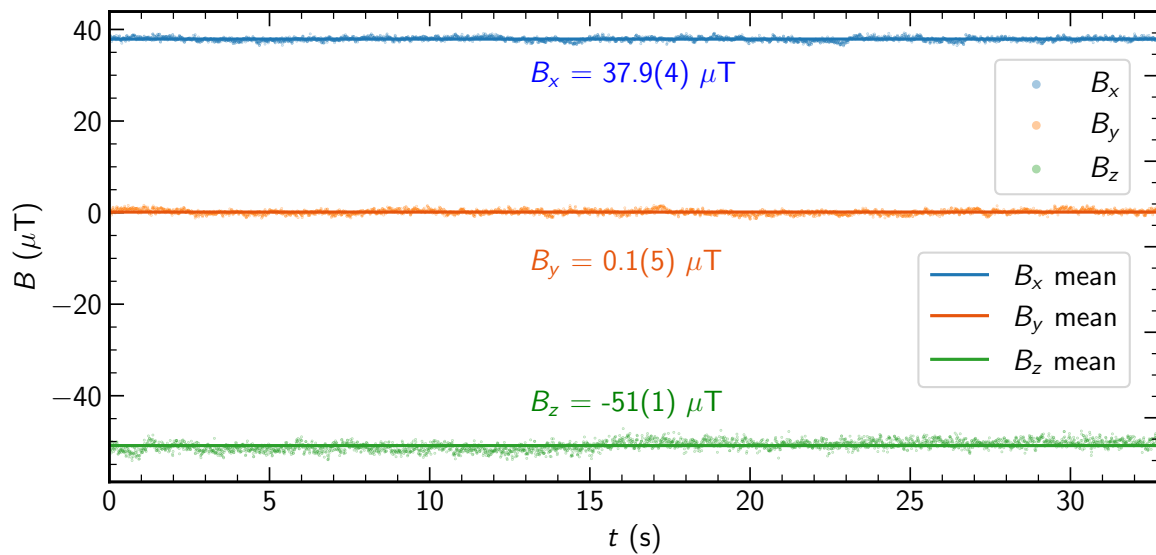
Für die erste Messung mit Magnetometer des IOLabs wird das Gerät direkt an das Kabel gelegt. Nun wird die Batterie für zwei Sekunden kurzgeschlossen. Dies wird nun für alle Abstände wiederholt.

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Ausmessung des Erdmagnetfeldes, sowie die Bestimmung der Polarität eines Permanentmagneten und die Berechnung eines Stromes in einem Leiter. Alle Fehlerangaben beziehen sich auf statistische Fehler; Systematische werden gegebenenfalls separat diskutiert.

### 4.1 Erdmagnetfeld

Die Messung des Erdmagnetfeldes wurde über den Magnetsensor des IOLabs gemacht und lief für etwas mehr als 30 s. Wie in Unterabschnitt 3.1 beschrieben, wurde das IOLab so ausgerichtet, dass eine Komponente . In Abbildung 3 sind die aufgezeichneten Magnetfelddaten auf die Zeit aufgetragen. Hier sieht man, dass das IOLab so ausgerichtet wurde, dass die  $B_y$  Komponente normal auf das Magnetfeld steht (und daher keinen Beitrag misst).



**Abbildung 3:** Das gemessene Magnetfeld in die drei kartesischen Raumrichtungen farblich unterscheidbar auf die Zeit aufgetragen. Der Mittelwert der Daten wird als durchgezogene Linie dargestellt.

Es wurde für jede Komponente der Mittelwert gebildet und der Fehler auf die Standardabweichung gesetzt, da dann (per Definition) zwei Drittel der Daten innerhalb des  $1\sigma$  Intervalls liegen.

Man erhält für die drei kartesischen Komponenten des Erdmagnetfeldes

$$B_x = 37.9(4) \mu\text{T} \quad B_y = 0.1(5) \mu\text{T} \quad B_z = -50.9(1.0) \mu\text{T} \quad (11)$$

. Daraus lässt sich jetzt mit Gleichung (1) und Gleichung (2) die Stärke und Inklination des Erdmagnetfeldes berechnen und man erhält folgende Werte

$$|\vec{B}| = 63.4(9) \mu\text{T} \quad \theta = 53.3(6)^\circ \quad (12)$$

. Vergleicht man diese Werte mit Literaturwerten [3]





$$|\vec{B}| = 48.40(15) \mu\text{T} \quad \theta = 63.5(2)^\circ \quad (13)$$

erkennt man, dass unsere gemessenen Werte signifikant abweichen. Das liegt wahrscheinlich daran, dass

am Versuchsort eine Vielzahl an metallische Objekte vorhanden waren, die Magnetfelder beeinflussen oder sogar selber erzeugen. Der Versuch wurde nämlich in einem Gebäude aus Stahlbeton durchgeführt, in einem Raum voller Elektronik und oberhalb Labore, in welchen Experimente mit elektrischen und Magnetische Felder durchgeführt werden. Es kommt daher zu systematischen Abweichungen, die verringert werden können, indem man die Messung fern von metallischen Objekten wiederholt.

## 4.2 Elektromotor

**Tabelle 1:** Stromrichtung, Drehrichtung und daraus erschlossene Magnetfeldrichtung für die vier Konfigurationen.

Konfiguration	Stromrichtung	Drehrichtung	Magnetfeldrichtung
1	$-\hat{x}$		$-\hat{z}$
2	$\hat{x}$		$-\hat{z}$
3	$-\hat{x}$		$\hat{z}$
4	$\hat{x}$		$\hat{z}$

## 4.3 Stromdurchflossener Leiter

# 5 Diskussion und Schlussfolgerung

## Literatur

- [1] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2*. Bd. 2. Springer, 2004.
- [2] I. Hughes und T. Hase. *Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis*. OUP Oxford, 2010.
- [3] *Magnetic Field Calculators*. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml%5C#igrfwmm>.

## Erklärung

Hiermit versichern wir, dass der vorliegende Bericht selbständig verfasst wurde und alle notwendigen Quellen und Referenzen angegeben sind.





9. Februar 2023

Student 1

Date

9. Februar 2023

Student 2

Date