

7. Messungen mit Spulen für Schülerübungen

Nach dem Gesetz von Bio-Savart errechnet sich die Flussdichte im Zentrum einer kurzen Zylinderspule der Länge l mit dem Durchmesser d gemäß der Gleichung

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{\sqrt{l^2 + d^2}}$$

Ist $l \gg d$, so erhält man daraus die bekannte Gleichung

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{l} \quad .$$

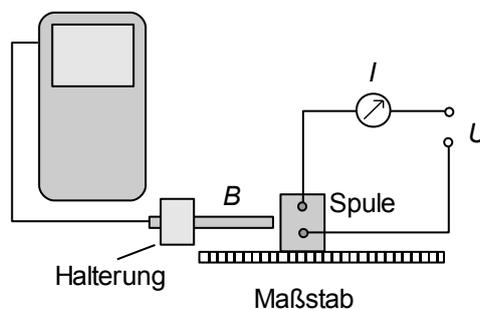
An einer langen Zylinderspule kann man also die drei Proportionalitäten $B \sim I$, $B \sim n$ und $B \sim l^{-1}$ zeigen. Für eine Abweichung von weniger als 10 % sollte l deutlich größer als $2d$ sein. Diese Bedingung ist bei den für die Demonstration vorgesehenen großen Zylinderspulen sicher gegeben, nicht aber bei den kürzeren Spulen, die zudem auch nicht zylinderförmig sind. Aber kann man auch mit diesen Spulen, etwa aus einem Aufbautransformator für Schülerübungen, arbeiten? Hier hätte man – im Gegensatz zu den großen Zylinderspulen – mehr Möglichkeiten, auch die Windungszahl n und die Spulenlänge l zu verändern, und man könnte μ_0 durch eine Schülerübung bestimmen lassen.

Die Experimente gliedern sich in 4 Abschnitte:

- Im Abschnitt a. wird der axiale Verlauf der Flussdichte untersucht, um eine begründete Position des Magnetfeldsensors zu finden und den grundsätzlichen Fehler zu untersuchen.
- Im Abschnitt b. geht es um $B \sim I$.
- Im Abschnitt c. geht es um $B \sim n$.
- Im Abschnitt d. geht es um $B \sim l^{-1}$.
- Im Anschluss folgt die Bestimmung von μ_0 .

Aufbau:

Für alle Versuche gibt es einen *einheitlichen* Aufbau. Dabei wird der Magnetfeldsensor stets ortsfest gelassen. Nur die Luftspulen werden bewegt, um örtliche Schwankungen des Magnetfeldes zu unterbinden.



Schematische Ansicht von oben

Kleinspannungs-Netzteil, geglättet (ideal: Konstantstromquelle)

Maßstab

Magnetfeldsensor 6,4 mT (Eingang 1)

Luftspulen aus Schülerübungsmaterial

Amperemeter

Aufbauhinweise:

Der Maßstab wird mit dem doppelseitigen Klebeband auf dem Tisch befestigt.

Der Sensor bekommt eine Halterung aus Stativmaterial und wird ebenfalls durch doppelseitiges Klebeband auf dem Tisch befestigt.

Die Luftspule wird am Maßstab angelegt; der Sensor muss dabei so justiert werden, dass er genau mittig durch die Spule gesteckt werden kann.

a. Axialer Verlauf des Magnetfeldes bei einer kurzen Spule

Aufbau:

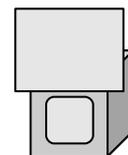
grundsätzlicher Aufbau

Spule mit $n = 600$ Windungen

Ergänzung bei Verwendung des Ultraschallsensors:

Reflektor (z. B. kleine Karteikarte) mit doppelseitigem Klebeband an Spule befestigen (Bild rechts).

Ultraschallsensor (digitaler Eingang 1) zur Entfernungsmessung leicht erhöht (ca. 5 cm) auf den Tisch stellen, sodass er den Mindestabstand zum Reflektor nicht unterschreitet.



Spule mit angeklebtem Reflektor

Durchführung:

Einstellungen:

Messmodus: Ereignisse mit Eingabe (Bild 2.1), wenn die Entfernung (Position in mm) von Hand eingegeben werden soll, sonst Einstellungen wie auf Bild 7.1 bei Verwendung des Ultraschallsensors.

Durchführung:

Spule möglichst weit über den Sensor schieben.

Alle Sensoren auf Null setzen.

Stromquelle einschalten (im Beispiel $I = 0,15\text{ A}$).

Alle 5 mm eine Messung vornehmen **oder**

bei Verwendung des Ultraschallsensors die Spule langsam am Maßstab entlangziehen.

In diesem Fall erhält man eine Grafik wie bei Bild 7.2 (untere Kurve).

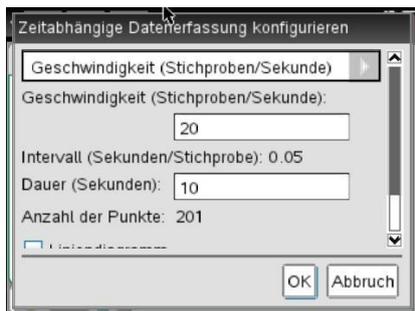


Bild 7.1

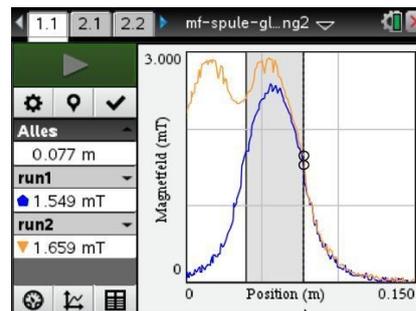


Bild 7.2

Auswertung:

1. Der *grau hinterlegte Bereich* in Bild 7.2 entspricht der Länge der Spule. Es kann also nicht von einem homogenen Feld ausgegangen werden. In einem ca. 5 mm breiten Bereich werden maximal Werte um 2,55 mT erreicht; das sind 88 % des nach der üblichen Formel zu erwartenden Wertes von 2,9 mT.
2. Für die praktische Durchführung bedeutet dieses Ergebnis, dass man μ_0 mit einer Genauigkeit von 10-15 % bestimmen kann, wenn sich der Sensor in der Mitte der Spule befindet. Die obere, hellere Kurve zeigt den Verlauf der Flussdichte bei zwei hintereinander geschalteten Spulen und einer anderen Stromstärke. Auch hier wird das Maximum an derselben Stelle in der Spule erreicht, sodass man für spätere Versuche die einmal gefundene Position der Spule beibehalten kann. Deutlich zu erkennen ist der Einbruch der Flussdichte an der Stelle, wo die Spulen aneinanderstoßen.
3. Um die Mitte der Spule zu bestimmen, verschiebt man sie langsam und beobachtet die Flussdichte. Ist der Sensor in der Mitte des Bereiches maximaler Flussdichte angekommen, so muss man sich am Maßstab die Position der Spule merken. Das ist notwendig, da man im Laufe der Versuche die Spulen wechseln muss und die genaue Position des Hallgenerators im Sensor nicht markiert ist. Stattdessen kann man nach jedem Wechsel die Spule an dieser Marke ausrichten und ist sich sicher, im Bereich der maximalen Feldstärke zu messen.

b. Abhängigkeit der Flussdichte vom Strom I

Aufbau:

grundsätzlicher Aufbau

Spule mit $n = 600$ Windungen

optional:

Stromsensor (Eingang 2) anstelle des Amperemeters

Durchführung:

Einstellungen:

- Messmodus: Ereignisse mit Eingabe (Bild 7.3), wenn die Stromstärke (Strom in A) von Hand eingegeben werden soll.
 Sonst Einstellungen wie auf Bild 7.1 bei Verwendung des Stromsensors.

Durchführung:

Magnetfeldsensor auf Null setzen.

Spule an der Markierung ausrichten.

Stromquelle einschalten und die Stromstärke um $I = 0,05$ A steigern; dabei darauf achten, dass der Messbereich des Magnetfeldsensors (6,4 mT) nicht überschritten wird.²

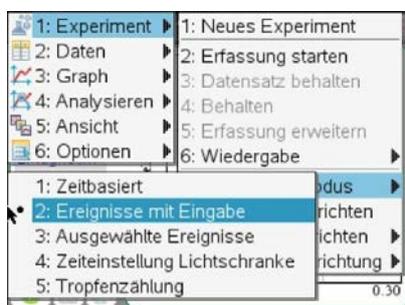


Bild 7.3



Bild 7.4



Bild 7.5

²TI-Nspire™CX mit LabCradle: Die Messreihe wird gestartet durch den grünen Startbutton ► und auch dort beendet (roter Stoppbutton ■); ein einzelner Messwert wird durch den rechten Photo-Button ☐ aufgenommen. Ein Countdown läuft (Bild 7.4) und am Ende wird man aufgefordert, den externen Wert einzugeben (Bild 7.5). Nach der Bestätigung mit „ok“ kann eine neue Messung gemacht werden. Während der ganzen Messung wird der Messwert als vertikal bewegter Punkt mit angezeigt. Soll die Messreihe gespeichert werden, so beendet man sie durch Drücken des Stopp-Buttons und drückt anschließend den rechten Knopf mit dem Hakensymbol in der Reihe darunter. Automatisch wird dann ein neuer „run“ angelegt.

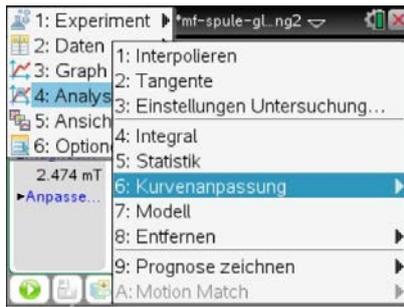


Bild 7.6

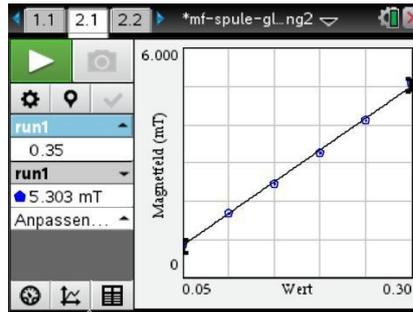


Bild 7.7



Bild 7.8

Auswertung:

1. Es wird ein proportionaler Zusammenhang erwartet. Das Bild 7.6 zeigt das Menü für die anschließende grafische Auswertung, wobei hier proportional gewählt werden muss.
2. Bild 7.7 zeigt die Messwerte und die ermittelte Proportionalität, Bild 7.8 den Proportionalitätsfaktor. Es ist $a = B/I = 16,74 \text{ mT/A}$.

c. Abhängigkeit der Flussdichte von der Windungszahl n

Aufbau:

grundsätzlicher Aufbau; zusätzlich:

Spulen mit verschiedenen Windungszahlen, aber gleicher Länge (im Beispiel ließen sich mit 2 Spulen mit Mittenanzapfung 5 Windungszahlen realisieren ($n = 200 - 400 - 600 - 800 - 1200$ Windungen))

Durchführung:

Einstellungen:

Messmodus: Ereignisse mit Eingabe (Bild 4.1)
Windungszahl n von Hand eingeben

Durchführung:

Die Spulen werden nach und nach ausgetauscht, an der Markierung ausgerichtet und es wird eine Messung der Flussdichte ausgeführt.

Stromstärke einheitlich $I = 0,15 \text{ A}$ (Obergrenze von 6,4 mT beim Magnetfeldsensor beachten).

Ablauf der Messung wie unter a. beschrieben.

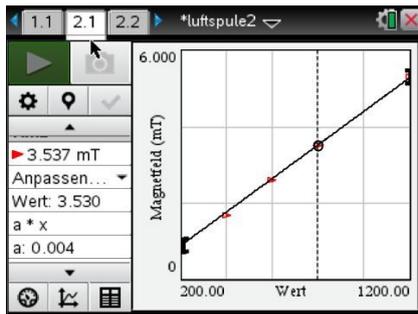


Bild 7.9

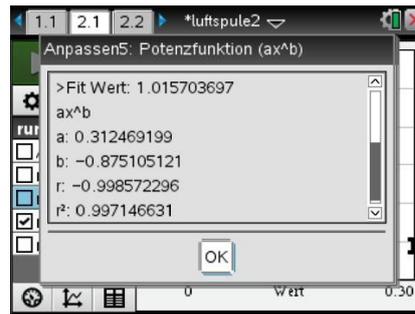


Bild 7.10

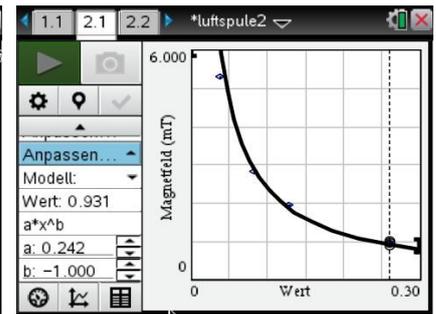


Bild 7.11

Auswertung:

Es wird ein proportionaler Zusammenhang erwartet.

Bild 7.9 zeigt die Messwerte und die ermittelte Proportionalität. Der genauere Wert für den Proportionalitätsfaktor ist $a = B/n \approx 0,0044$ mT.

d. Abhängigkeit der Flussdichte von der Spulenlänge l

Aufbau:

grundsätzlicher Aufbau; zusätzlich:

Aneinanderreihung verschiedener Spulen; im Beispiel ergeben die Spulenkombinationen 1x1200, 2x600, 3x400 und 6x200 die vier Längen $l = 0,038 - 0,078 - 0,128 - 0,258$ m bei *einheitlicher(!)* Windungszahl $n = 1200$

Durchführung:

Einstellungen:

Messmodus: Ereignisse mit Eingabe (Bild 4.1)
Spulenlänge l von Hand eingeben

Durchführung:

Die Spulenkombinationen werden nach und nach aufgebaut und die erste Spule wird jeweils an der Markierung ausgerichtet.

Stromstärke einheitlich $I = 0,15$ A (Obergrenze von 6,4 mT beim Magnetfeldsensor beachten).

Ablauf der Messung wie unter a. beschrieben.

Auswertung:

1. Es wird eine Antiproportionalität erwartet, aber die Regression (Bild 7.10) liefert einen schlechten Wert für den Exponenten.
2. Eine Regression mit dem Modell $a \cdot x^b$ und festem $b = -1$ ist durchaus überzeugend (Bild 7.11); es ist $a = B \cdot l = 0,242 \text{ mT} \cdot \text{m}$.

e. Zusammenfassende Berechnungen und Werte für μ_0

In der Tabelle sind die Daten für die einzelnen Versuche noch einmal zusammengestellt (a ist der jeweilige Proportionalitätsfaktor). Die magnetische Feldkonstante wurde für jeden Versuch berechnet mit der Gleichung

$$\mu_0 = \frac{B \cdot l}{n \cdot I}$$

	a	n	I	l	μ_0 in Vs/Am	Abweichung
$B \sim I$	16,74 mT/A	600	---	0,038 m	$1,06 \cdot 10^{-6}$	16 %
$B \sim n$	0,0044 mT	---	0,15 A	0,038 m	$1,12 \cdot 10^{-6}$	11 %
$B \sim l^{-1}$	0,242 mT·m	1200	0,15 A	---	$1,34 \cdot 10^{-6}$	6 %
Mittelwert:					$1,17 \cdot 10^{-6}$	7 %

Die ermittelten Werte für μ_0 weichen unterschiedlich stark vom Literaturwert ab. Bildet man den Mittelwert, so ist die Abweichung mit 7 % aber nur gering – eine Scheingenauigkeit, denn im Mittelwert weichen die 3 Messungen ca. 11 % vom Literaturwert ab, ein Wert, der zu erwarten war. Nimmt man diese prinzipielle Ungenauigkeit in Kauf, so eignet sich die vorgestellte Schülerübung durchaus, um die Gleichung für das Magnetfeld einer langen Zylinderspule zu bestätigen.