

► Messungen im Magnetfeld

Jürgen Enders

1. Die magnetische Flußdichte



Die magnetische Flußdichte B ist definiert als die Kraft F , die in einem homogenen Magnetfeld auf einen Leiter der Länge L wirkt, der von einem Strom I durchflossen wird:

$$B = \frac{F}{I \cdot L}$$

Es ist also $F \sim I$ und $F \sim L$. Will man diese Proportionalitäten im Experiment zeigen, so muss man sehr kleine Kräfte messen. Man kann dazu z.B. eine Stromwaage verwenden. Das ist ein zweiseitiger Hebel, an dessen einem Ende sich ein Drahtrahmen befindet, der senkrecht in das Magnetfeld eintaucht. Der untere, waagerechte Teil des Drahtrahmens im Magnetfeld stellt die Leiterlänge L dar. Die Waage wird so justiert, dass sie sich im Gleichgewichtszustand befindet; an der Seite mit dem Drahtrahmen wird sie durch eine sehr empfindliche Federwaage gehalten. Schaltet man den Strom ein, so wird durch die Lorentzkraft der Drahtrahmen in das Magnetfeld gezogen. Jetzt muss man an der Federwaage nachjustieren, bis sich die Waage wieder in ihrem ursprünglichen waagerechten Zustand befindet; erst dann kann man die Kraft ablesen.

Dieses etwas knifflige Messverfahren lässt sich mit dem Stromsensor für Ströme bis 10A und dem Zweibereichs-Kraftsensor vereinfachen. Statt der Federwaage wird der Kraftsensor starr mit einem Metallhaken an der Waage befestigt. Die starre Verbindung realisiert man z.B. durch eine leichte Belastung des Waagebalkens. Der Stromsensor kommt in die Zuleitung zum Drahtrahmen, zusammen mit einem Amperemeter zur Kontrolle der maximal zulässigen Stromstärke.

Aufbau:

Die Abbildung 1 zeigt den Aufbau von oben; Abbildung 2 stellt speziell die Verbindung des Kraftsensors mit der Stromwaage dar.

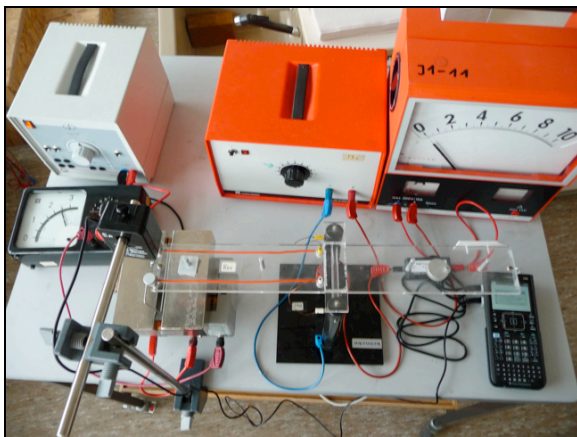


Abb. 1

- U-Kern mit 2 Spulen zu 250 Windungen und sehr breiten Polschuhen, betrieben mit Gleichstrom 5A und Amperemeter zur Kontrolle (in Abb.1 links).

- Stromwaage mit verschieden breiten Drahtrahmen (im Beispiel 5 – 7,5 – 10 cm)
- Gleichstromnetzgerät bis 10A regelbar, mit Amperemeter zur Kontrolle (in Abb.1 rechts)
- Stromsensor bis 10A
- Zweibereichs-Kraftsensor, Bereich 10 N
- TI-Nspire™CX mit Lab Cradle



Abb. 2

Durchführung:

- Einstellungen z.B. 20 Messungen pro Sekunde, Dauer: 3 s
- alle Netzgeräte ausschalten, alle Sensoren auf Null setzen
- Netzgeräte wieder einschalten
- Spulenstrom auf 5 A einstellen (diesen Wert für alle Messungen beibehalten)
- Messung starten und Strom durch den Drahtrahmen von 0 A auf 10 A in 3 s hochregeln
- dann wieder herunterregeln, um eine thermische Überlastung zu vermeiden
- neuen Durchlauf starten mit einer anderen Drahtrahmenbreite

Auswertung:

1. Wegen der besseren Übersichtlichkeit habe ich die Daten der Durchläufe (Abb.3) nach Lists&Spreadsheet kopiert und in Graphs dargestellt. Der Kraftsensor gerät bei dieser Messung an die Grenzen seiner Auflösung, denn man sieht sehr deutlich eine Stufung der Messwerte, verbunden mit einer starken Streuung (Abb. 4). Um die weitere Auswertung besser darstellen zu können, sind die Messwerte nur mit einem kleinen Kreuz gekennzeichnet.

Die Messwerte scheinen aber für jede Leiterlänge L (Breite des Drahtrahmens) einen linearen Verlauf abzubilden. Die Regressionsgeraden für 5 cm Leiterlänge ($f_2(x)$, blau), 7,5 cm ($f_1(x)$, schwarz) und 10 cm ($f_3(x)$, rot) sind ebenfalls eingezeichnet.

2. Die Regressionsgeraden sind von der Form $F = c \cdot I$ mit $c = B \cdot L$. Für 7,5 cm und 10 cm Leiterlänge erhält man jeweils 0,16 T, nur bei 5 cm weicht der Wert etwas ab (Abb. 5).

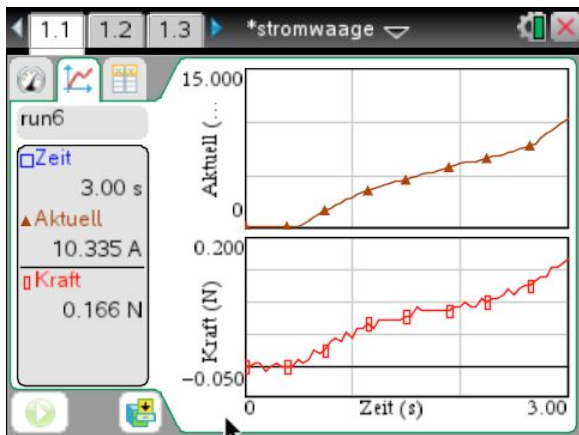


Abb.3

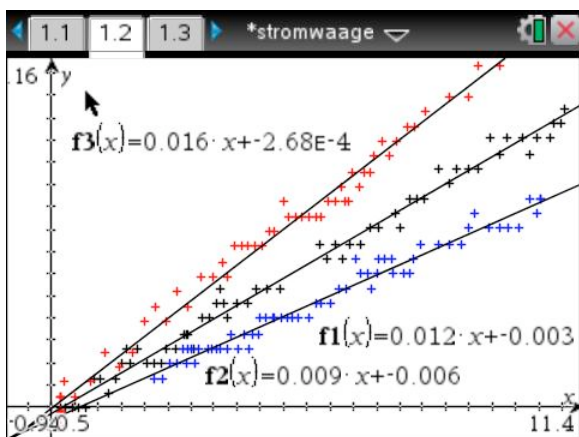


Abb.4



Abb.5

Man kann B auch direkt aus den Messwerten bestimmen. In der obersten Zeile in Abb. 5 ist dargestellt, wie man den Mittelwert aller Messungen (hier am Beispiel $L = 10$ cm) bestimmen kann. Auch hier erhält man wieder eine gute Übereinstimmung bei 7,5 cm und 10 cm. Allerdings sind alle Mittelwerte jetzt kleiner als bei der vorherigen Berechnung.

2. Die Hysteresiskurve

Ferromagnetisches Material verstärkt das Magnetfeld H einer Spule, allerdings nur bis zu einem gewissen Grade. Verstärkt man das Magnetfeld immer weiter, so wächst die

Flussdichte in immer geringerem Maße, bis sie sich asymptotisch an eine Gerade anschmiegt. Schaltet man den Spulenstrom ab, so verbleibt ein gewisser Restmagnetismus im Material, die Remanenz. Polt man nun den Strom um, so muss erst diese Remanenz neutralisiert werden, bevor sich die Magnetisierung in der umgekehrten Richtung aufbaut. Beim Abschalten erhält man wieder eine Remanenz, nur mit vertauschten Polen. Trägt man den Spulenstrom stellvertretend für die Magnetfeldstärke gegen die Flussdichte auf, so erhält man die typische Hysteresiskurve.

Die magnetische Flussdichte $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ in einem ferromagnetischen Stoff wird bestimmt durch die Feldstärke H des umgebenden Magnetfeldes. Bei der Durchführung des Versuches sollte man darauf achten, dass man eine Spule verwendet, die eine große Stromstärke bei gleichzeitig hoher Windungszahl zulässt, da sich die Feldstärke einer (langen) Spule berechnet als

$$H = \frac{n \cdot I}{L}$$

Stromstärken jenseits 10 A lassen sich mit den normalen Sensoren nicht mehr messen. Ich habe deshalb als Zuleitung zur Spule 4 m Experimentierkabel verwendet und den Spannungsabfall an dieser Zuleitung mit einem ganz normalen Spannungssensor gemessen und als Ersatzgröße für H verwendet.

Ferromagnetische Stoffe können recht hohe Flussdichten erzeugen, die vom Magnetfeldsensor nicht mehr gemessen werden können, ohne ihn zu zerstören. Der Sensor muss deshalb in einem gewissen Abstand vor dem Spulenkern befestigt werden. Vor der eigentlichen Messung muss ferner der Nullpunkt des Magnetfeldsensors eingestellt werden.

Aufbau:

- Stromquelle (geregelter Gleichstrom-Netzgerät, mindestens 10 A), sofern vorhanden über einen Umpol-Schalter mit der Spule verbinden
- Spule z.B. aus Aufbau-Material, ferromagnetischen Stoff so in die Spule einlegen, dass er nicht verrutschen kann
- Spannungssensor anschließen, Magnetfeldsensor positionieren und beides an TI-Nspire™ CX mit Lab Cradle anschließen

Durchführung:

- Einstellungen: 15 Messungen pro Sekunde, Dauer: 30 s
- die Messdauer ist großzügig gewählt, damit man genug Zeit für den Versuch hat
- Netzgerät einschalten
- Strom langsam bis zum Maximalwert hochregeln, wieder herunterregeln
- mit dem Schalter umpolen bzw. die Anschlusskabel vertauschen
- Strom wieder bis zum Maximalwert hochregeln und herunterregeln und Messung stoppen

Die Abbildung 6 zeigt den Aufbau mit einer normalen Spule aus Aufbau-Material und dem Stromsensor 10 A und ohne Umpol-Schalter. Abbildung 7 zeigt den Aufbau mit dem Umpol-Schalter und einer speziell für diesen Versuch von einer Lehmittelfirma entworfenen Spule.

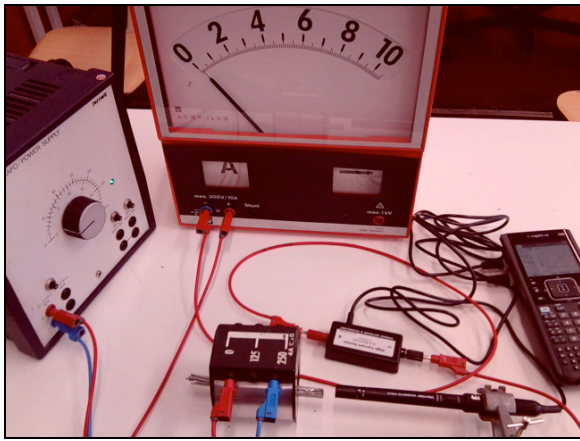


Abb.6

Bei den Abbildungen 8, 9 und 10 wurde ein Bündel kurzer Fahrradspeichen als Spulenfüllung verwendet. Bei den Bildern 8 und 9 erfolgte die Messung in der speziellen Anordnung wie auf Bild 7 dargestellt, mit der eine größere Feldstärke erzeugt werden konnte wie bei den übrigen Bildern. Die an der Hochachse abgetragenen Werte für B können untereinander nicht verglichen werden, da der Abstand des Magnetfeldsensors zum Spulenkern nicht gleich war.

In Abbildung 8 ist der Übergang in die Sättigung gut zu erkennen, und die Ausschnittsvergrößerung Bild 9 zeigt deutlich die Remanenzpunkte und ihre symmetrische Lage zum Nullpunkt. Ihre Markierungen entstanden während der Messung durch das Umpolen an der Stromquelle.

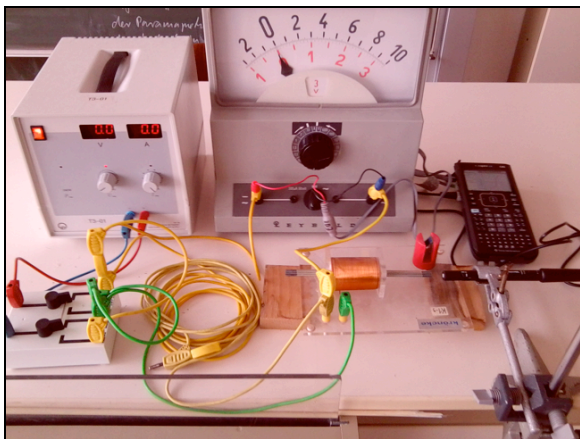


Abb.7

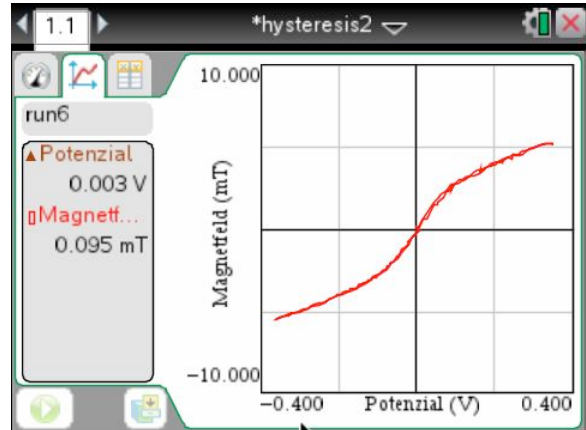


Abb.10

Abhängig vom ferromagnetischen Stoff erhält man verschiedene Kurven:

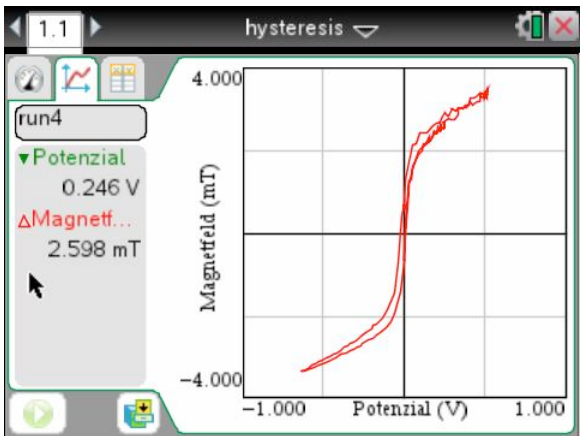


Abb.8

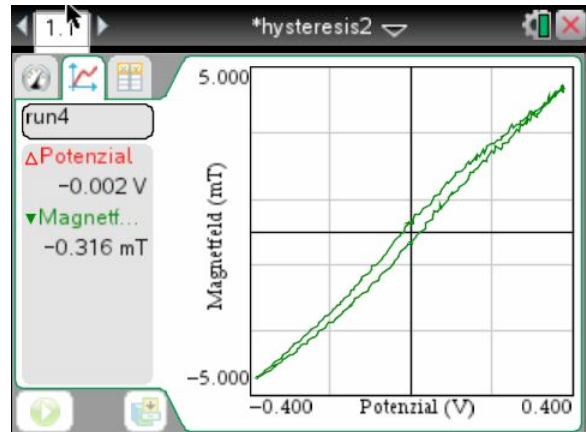


Abb.11

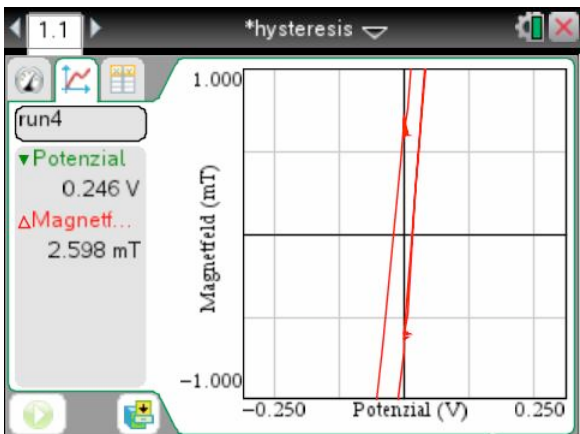


Abb.9

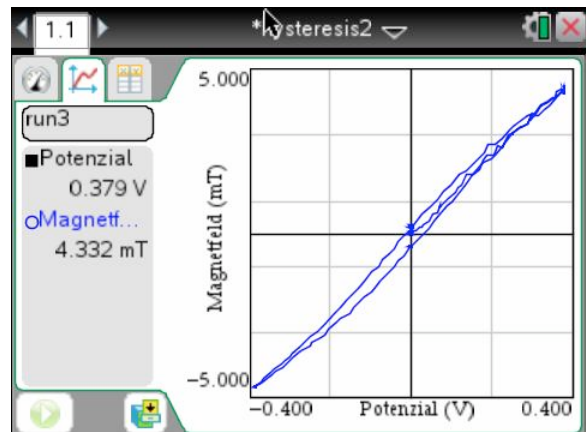


Abb.12

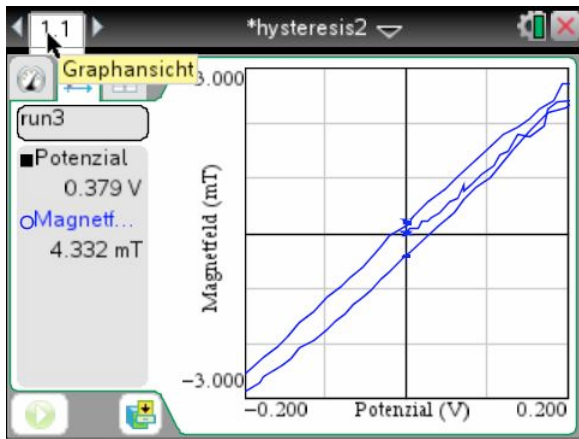


Abb.13

Zu Abbildung 10 wurde jetzt eine Spule mit 500 Windungen verwendet; auch hier ist der Übergang in die Sättigung noch gut zu erkennen. Bei den Abbildungen 11 bis 13 wurde als

ferromagnetisches Material ein mit Eisenfeilspänen gefülltes Reagenzglas verwendet. Die Sättigung wird hier nur ansatzweise erreicht. Dafür erlaubt die breite Form der Hysteresis die Darstellung der sogenannten „jungfräulichen“ Kurve. Dazu muss die Magnetisierung zunächst gelöscht werden, z.B. indem man vorsichtig durch ein Gegenfeld die vorhandene Magnetisierung neutralisiert. Beginnt man nun mit der Messung wie oben beschrieben, so startet die Kurve am Nullpunkt, bevor sich wieder die übliche Darstellung ergibt.

Autor:

Jürgen Enders

Humboldt-Gymnasium, Bad Pyrmont

aj.enders@t-online.de