

## Versuch: Hystereseschleife (25.6.2002)

### Inhalt:

- |    |  |          |
|----|--|----------|
| 1. | Einführung zum Versuch                 | Seite 1  |
| 2. | Messungen und Bearbeitung der Aufgaben | Seite 1  |
| 3. | Beantwortung der Fragen                | Seite 10 |

### 1. Einführung zum Versuch

Im vorliegenden Versuch geht es in der Hauptsache darum, zu untersuchen, **wie ferromagnetische Materialien** (das sind im Wesentlichen Eisen, Kobalt, Nickel und einige Metalllegierungen sowie einige Lanthanoide und Verbindungen) **sich verhalten, wenn man ein Magnetfeld anlegt**. Grundsätzlich ist hierbei bekannt, dass solche Materialien Magnetfelder **signifikant verstärken**, im Gegensatz zu den paramagnetischen bzw. diamagnetischen Materialien, welche anliegende Magnetfelder nur schwach verstärken bzw. sogar abschwächen.

Der Versuch zielt darauf, **eine Abhängigkeit zwischen  $H$  (also dem anliegenden Magnetfeld) und  $B$  (also dem Gesamtfeld aus anliegendem und vom untersuchten Material ausgehenden Magnetfeld) aufzuzeichnen (Neukurve/Hystereseschleife, siehe auch Frage 4)**. Man verwendet dazu eine Anordnung von zwei Spulen, einer langen und einer kurzen, die in die Öffnung der längeren mittig eingebaut ist. Es werden alsdann, nachdem ein Spulenkern aus dem zu untersuchenden Material in die gemeinsame Spulenöffnung geschoben und entmagnetisiert (siehe unten) wurde, **folgende Messgrößen** mit Hilfe eines **X-Y-Schreibers** aufgezeichnet (wobei der Spuleneingangsstrom – wie unter 2.2 erklärt – in besonderer Weise variiert wird):

- **Der Eingangsstrom in die äußere Spule (X-Eingang)**. Für den inneren/mittleren Bereich der langen Spule, also dem Bereich, wo die kurze Spule liegt, ist durch Gleichung (5) der Anleitung eine näherungsweise Proportionalitätsbeziehung zwischen dem Spulenstrom durch die lange Spule und dem (an der Probe anliegenden) Magnetfeld  $H$  dieser Spule gegeben.
- **Das zeitliche Integral über die Ausgangsspannung (Spannungsstoß) der inneren Spule (Y-Eingang)**. Dieses Integral vom Startzeitpunkt des Messvorgangs bis zum aktuellen Zeitpunkt wird elektrisch durch einen Integrator als mit einer Proportionalitätskonstante behafteter Spannungswert ausgegeben; dieser kann direkt durch den X-Y Schreiber erfasst werden. **Der Integrator wird am Startzeitpunkt mittels eines Tasters Null gesetzt**. Da eine Proportionalitätsbeziehung zwischen dem Spannungsstoß und der Magnetfeldänderung  $\Delta B$  in der inneren Spule (vom Integrationsbeginn bis zum Integrationsende bzw. hier bei fortlaufender Integration bis zum momentanen Zeitpunkt) besteht (Gleichung (8)), ist das Integral, vorausgesetzt beim Integrationsstart  $t_0$  gilt  $B_0=0$ , direkt proportional zum Gesamtmagnetfeld  $B$  (mit  $B=H_{\text{äußere Spule}} \cdot \mu_0 + M \cdot \mu_0$ ) in der inneren Spule, wo  $M$  die Magnetisierung der Probe, also ein Maß für die Magnetfeldverstärkung durch das Ferromagnetikum darstellt.

Neben dem Aufnehmen zweier Hystereseschleifen maßen wir am Schluss noch das **Remanenzfeld eines Stabmagneten**; dies gelingt, kurz gesagt, durch Einschieben eines Magneten in die stromlose Doppelspule (Spannungsinduktion), und Aufnehmen des Integrals über die Induktionsspannung (siehe 2.4).

## 2. Messungen und Auswertung

### 2.1 Kalibrierung des Integrators

Vor Beginn der eigentlichen Messungen ist es erforderlich, die „Integratorkonstante“  $K$  zu bestimmen, die den gemessenen Spannungsstoß mit der Ausgangsspannung gemäß der Gleichung

$$U_a = K \cdot \int_0^t U_i dt'$$

in Beziehung setzt. Zu diesem Zweck legt man eine bekannte (konstante) Spannung für eine bestimmte Zeit an den Integrator an (d.h. der Spannungsstoß ist bekannt) und misst die zugehörige Ausgangsspannung.

In unserem Fall wurde dies einmal mit einer positiven und einmal mit einer (betragsmäßig gleichen) negativen Spannung durchgeführt. Diese Spannung wurde dem x-Eingang des Schreibers zugeführt, mit einem Spannungsteiler um den Faktor tausend heruntergeteilt und dann an den Integrator angelegt. Dessen Ausgangsspannung wurde über den y-Kanal des Schreibers aufgezeichnet. Die beiden entstandenen Diagramme können dem Protokollheft entnommen werden. Man erkennt daraus, dass sich im Rahmen der Messgenauigkeit kein Unterschied zwischen der Integration der positiven und der negativen Spannung ergibt, d.h. die Konstante  $K$  ist in beiden Fällen gleich groß. Unter Beachtung der Tatsache, dass in beiden Diagrammen und auf jeweils beiden Achsen der Maßstab  $0,5\text{V/cm}$  vorliegt, erhält man:

$$K = \frac{U_a}{\int_0^t U_i dt'} \stackrel{U_i = \text{const.}}{=} \frac{U_a}{U_i \cdot \Delta t} = \frac{13,1\text{cm} \cdot 0,5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}}{16\text{cm} \cdot 0,5 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \cdot \frac{1}{1000} \cdot 60\text{s}} \approx 13,6\text{s}^{-1}$$

Mit dieser Konstante kann nun im Folgenden aus der Ausgangsspannung des Integrators ein unbekannter Spannungsstoß berechnet werden.

### 2.2 Hysteresekurve (und Neukurve) von Weicheisen

Um die Hysteresekurve von Weicheisen aufzeichnen zu können, wird die entsprechende Probe in die Spulen eingelegt und mit einem U-Kern aus demselben Material versehen, um eine homogene Flussdichte in der Probe bzw. einen vollständigen magnetischen Schluss zu erreichen.

Vor der Messung muss das Material möglichst vollständig entmagnetisiert werden, damit auch eine Neukurve aufgenommen werden kann. Zu diesem Zweck durchfährt man die Hystereseschleife mehrmals, wobei man die maximale Stärke des Primärspulenstroms immer weiter verringert, so dass ein immer geringerer Teil der Weißschen Bezirke den Umkehrungen der Feldrichtung folgen kann und man im Idealfall schließlich eine nach außen hin unmagnetisierte Probe erhält.

Vor Beginn der eigentlichen Messung haben wir noch einen Probelauf durchgeführt, um den Schreiber so einzustellen, dass die Kurve möglichst groß dargestellt wird, aber auf dem Papier noch Platz findet. Dabei stellten sich die im entsprechenden Diagramm eingetragenen Werte für

die Spannungsempfindlichkeiten als bestmögliche Lösung heraus. Für ein exaktes Ergebnis ist nun nochmals eine Entmagnetisierung erforderlich.

Nun kann man mit der Aufzeichnung beginnen. Man steigert den Strom durch die Primärspule zunächst bis zu dem Punkt, wo am Regler ein merklicher Widerstand das weitere Hochdrehen erschwert. (Es empfiehlt sich, den Strom nicht über diesen Punkt hinaus zu erhöhen - wenngleich dies möglich ist -, da ansonsten sprunghafte Stromänderungen eine geschlossene Kurve verhindern.) Zunächst wird die sog. Neukurve durchlaufen, dann reduziert man den Strom wieder bis auf Null, polt am Netzteil um, steigert den Strom wieder bis zum Anschlag, reduziert ihn zu Null, polt erneut um und erreicht schließlich nach wiederum maximaler Stromsteigerung eine geschlossene Kurve. Das Ergebnis für Weicheisen kann dem Protokollheft entnommen werden.

Zunächst eine Bemerkung zu den Achsenmaßstäben. Auf der y-Achse wird eine Spannung (die Ausgangsspannung des Integrators) gemessen. Die Achsenskalierung wurde daher direkt aus dem Messbereich (in diesem Fall 0,2V/cm) gewonnen. Bei der x-Achse hingegen wird eigentlich der Strom durch die Primärspule gemessen, der aber über einen Widerstand in eine dem Schreiber zuführbare Spannung umgesetzt wird. Zunächst entschlossen wir uns daher dafür, den Achsenmaßstab mit dem Schreiber einzutragen, indem wir entsprechende Ströme am Netzteil einstellten und an dessen Anzeigeinstrument ablesen. Daraus ergab sich die schwarze Skala im Diagramm. Man erkennt nun allerdings, dass diese nicht genau linear ist. Dieser Effekt, den wir auf einen Offset des Messinstruments zurückführen, tritt noch wesentlich deutlicher bei der zweiten Messung (siehe unten) auf. Daher haben wir uns entschlossen, mithilfe der Einstellung des Schreibers (hier 0,2V/cm) und dem bekannten Messwiderstand von 1,12Ω die eine „richtigere“ Stromskala aus den gemessenen Spannungen zu errechnen (rote Skala). Diese wird im folgenden für die Berechnungen verwendet.

Als nächstes fällt auf, dass die gemessene Kurve nicht symmetrisch zum Nullpunkt unseres Koordinatensystems ist, was wir auf eine nicht vollständige Entmagnetisierung der Probe vor Beginn der Messung sowie auf mögliche Einflüsse des Integrators (vgl. dazu Frage 7) zurückführen. Somit sind die Werte für Remanenz, Sättigungs- und Koerzitivfeld im oberen und unteren (bzw. rechten und linken) Teil der Kurve nicht identisch. Wir verwenden daher im folgenden stets die jeweiligen Mittel aus den beiden zur Verfügung stehenden Werten, was einer Verschiebung der Kurve in die Position gleichkommt, in der sie symmetrisch zum Ursprung ist.

Nun zu den eigentlichen Messungen:

- **Sättigungsfeldstärke  $H_S$ :**

Aus dem Diagramm erhält man für den zur Sättigungsfeldstärke gehörenden Spulenstrom einen Wert von etwa 1,9A. Daraus kann man gemäß Gleichung (5) der Anleitung die Feldstärke in der Primärspule berechnen:

$$H = \frac{100 \cdot 1,9\text{A}}{0,034\text{m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{(1 + \sqrt{2}) \cdot 34\text{mm}}{2 \cdot 34\text{mm}} \right)^2}} \approx 3,6 \cdot 10^3 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- **Sättigungsflussdichte  $B_S$  in der Probe:**

Als maximale Ausgangsspannung des Integrators misst man im Diagramm etwa  $U_a=1,7\text{V}$ . Der Spannungsstoß ergibt sich daraus mit der oben bestimmten Konstante  $K$  zu

$$\int_0^t U_i dt' = \frac{U_a}{K}$$

Die gesuchte Flussdichte bestimmt man nun nach Gleichung (8) der Anleitung wie folgt:

$$B_s = \frac{1}{N_2 \cdot A_m} \cdot \int_0^t U_i dt' = \frac{1}{2000 \cdot 0,0185\text{m} \cdot 0,019\text{m}} \cdot \frac{1,7\text{V}}{13,6\text{s}^{-1}} \approx 0,18\text{T}$$

- **Remanenz  $B_R$ :**

Als Mittelwert für die zur Remanenzflussdichte gehörige Integratorausgangsspannung misst man im Diagramm  $U_a=0,4\text{V}$ . Daraus ergibt sich mit der obigen Gleichung die Remanenz von Weicheisen zu:

$$B_s = \frac{1}{2000 \cdot 0,0185\text{m} \cdot 0,019\text{m}} \cdot \frac{0,4\text{V}}{13,6\text{s}^{-1}} \approx 42\text{mT}$$

- **Koerzitivfeldstärke  $H_C$ :**

Für den Mittelwert der Primärspulenströme bei  $B=0$  liest man aus dem Diagramm ab:  $I_C=0,14\text{A}$ . Mit der oben bereits verwendeten Formel errechnet sich daraus die Feldstärke  $H_C$  in der Primärspule zu

$$H = \frac{100 \cdot 0,14\text{A}}{0,034\text{m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{(1 + \sqrt{2}) \cdot 34\text{mm}}{2 \cdot 34\text{mm}} \right)^2}} \approx 2,6 \cdot 10^2 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

### 2.3 Messung der Neukurve und Hystereseschleife eines Ferritkerns

Auch hier entmagnetisiert man die Probe zunächst, durchfährt zum Einstellen der Achsenskalierung eine „Probeschleife“, und entmagnetisiert erneut.

Als Achsenmaßstäbe ergeben sich hier aus den eingestellten Skalierungsfaktoren am Schreiber:

- Y-Achse: 0,5 V/cm
- X-Achse: 0,05 V/cm, das entspricht bei einer Messung des Spannungsabfalls über einem Widerstand von  $1,12\Omega$  einer rechnerischen Stromstärkeskalierung von:

$$0,5 \text{ V/cm} \cdot 1/1,12 \text{ A/V} \approx 44,6 \text{ mA/cm}$$

Diese Skalierung ist im Diagramm rot eingezeichnet. Wir gaben ihr, wie oben schon erwähnt, den Vorzug, da die am Netzgerät abgelesene Stromstärke (schwarze Skala) offensichtlich mit einem eklatanten Offset behaftet war (die 0,1-Striche müssten beide je über 2 cm vom Nullpunkt entfernt sein!).

Hier zwingt uns eine Asymmetrie der Kurve ebenfalls zur Mittelwertbildung über die je zwei Beiträge (positiver und negativer Wert!) für Remanenz und Koerzitivkraft. Die Berechnungen und Ablesungen verlaufen analog oben:

- **Sättigungsfeldstärke  $H_S$ :**

Aus dem Diagramm erhält man hier für den zur Sättigungsfeldstärke gehörenden Spulenstrom einen Wert von etwa 0,5A. Eine Berechnung nach Gleichung (5) der Anleitung ergibt wiederum die Feldstärke in der Primärspule:

$$H = \frac{100 \cdot 0,5A}{0,034m} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{(1 + \sqrt{2}) \cdot 34mm}{2 \cdot 34mm} \right)^2}} \approx 9,4 \cdot 10^2 \frac{A}{m}$$

- **Sättigungsflussdichte  $B_S$  in der Probe:**

Als Ausgangsspannung des Integrators bei Sättigung ( $I \approx 0,5A$ ) liest man hier im Diagramm etwa  $U_a=2,3V$  ab (Mittelwert aus linkem und rechtem Wert).

Der Spannungsstoß ergibt sich mit der Integratorkonstante  $K$  wieder zu

$$\int_0^t U_i dt' = \frac{U_a}{K}$$

Die gesuchte Flussdichte bestimmt man nun nach Gleichung (8) der Anleitung wie folgt:

$$B_s = \frac{1}{N_2 \cdot A_m} \cdot \int_0^t U_i dt' = \frac{1}{2000 \cdot 0,0140m \cdot 0,014m} \cdot \frac{2,3V}{13,6s^{-1}} \approx 0,43T$$

- **Remanenz  $B_R$ :**

Als Mittelwert für die zur Remanenzflussdichte gehörige Integratorausgangsspannung erhält man bei diesem Versuch aus dem Diagramm  $U_a=0,35V$ . Daraus ergibt sich mit der obigen Gleichung die Remanenz von Ferrit zu:

$$B_s = \frac{1}{2000 \cdot 0,0140m \cdot 0,014m} \cdot \frac{0,35V}{13,6s^{-1}} \approx 66mT$$

Das ist offensichtlich ein höherer Wert als bei Weicheisen, da die geringe Breite der Schleife für Ferrit nicht zwangsläufig eine geringere Höhe am Nullpunkt zur Folge hat (die Schleife für Ferrit ist in diesem Bereich nämlich „steiler“, das erkennt man nur aufgrund der verschiedenen Skalierung der Diagrammachsen für Ferrit und Weicheisen nicht direkt).

- **Koerzitivfeldstärke  $H_C$ :**

Für den Mittelwert der Primärspulenströme bei  $B=0$  berechnet man aus dem Mittelwert der beiden Diagrammwerte und dem oben gegebenen Achsen-Skalierungsfaktor:  $I_C=0,029A$ . Mit der oben bereits verwendeten Formel errechnet sich daraus die Feldstärke  $H_C$  in der Primärspule zu

$$H = \frac{100 \cdot 0,029A}{0,034m} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{(1 + \sqrt{2}) \cdot 34mm}{2 \cdot 34mm} \right)^2}} \approx 54 \frac{A}{m}$$

## 2.4 Messung des Remanenzfeldes eines AlNiCo-Stabmagneten

Das Remanenzfeld des gegebenen Permanentmagneten (bei magnetischem Schluss vom Nord- zum Südpol mittels Weicheisenkern) erhält man ebenfalls nach Gleichung (8) der Anleitung, indem man über die Induktionsspannung integriert, und zwar vom Versuchsstart (leere Spulenöffnung) bis zum Zeitpunkt, wo der magnetische Schluss erfolgt ist. Dann gilt:

$$B_m - B_0 = B_m = \frac{1}{N_2 \cdot A_m} \cdot \frac{U_{a,max}}{K} = \frac{1}{2000 \cdot 0,0180\text{m} \cdot 0,010\text{m}} \cdot \frac{1,22\text{V}}{13,6\text{s}^{-1}} \approx 0,25\text{T},$$

wo  $U_a$  wie in der Anleitung wieder die Integratorausgangsspannung ist, deren Maximalwert im entsprechenden Diagramm abzulesen ist.

## 3. Beantwortung der Fragen

### 3.1 Wann tritt Ferromagnetismus auf?

Ferromagnetismus tritt in Materialien auf, in denen die Wechselwirkung der atomaren magnetischen Momente so stark ist, dass es bereits ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes in Teilbereichen (den sog. Weißschen Bezirken) zu einer Ausrichtung dieser „Elementarmagneten“ in eine gemeinsame Richtung kommt (entgegen der thermischen Bewegung der Atome). Eine solche Wechselwirkung entsteht dabei meist zwischen metallischen Leitungselektronen und den magnetischen Spin-Momenten von Elektronen in nicht aufgefüllten Schalen. Daher findet man Ferromagnetismus hauptsächlich bei Übergangselementen wie Eisen, Kobalt oder Nickel, die innere, nicht vollständig besetzte Elektronenschalen aufweisen.

### 3.2 Was ist mit den Weißschen Bezirken passiert, wenn ein Ferromagnetikum entmagnetisiert wurde?

Bei einem entmagnetisierten Ferromagnetikum (unterhalb der Curie-Temperatur) sind sehr wohl Weißsche Bezirke vorhanden, in diesen sind auch die magnetischen Momente der Atome alleamt gleich ausgerichtet; lediglich sind die Ausrichtungen von Bezirk zu Bezirk so verschieden, dass man nach außen keine resultierende Magnetisierung erkennen kann.

Anders sieht die Antwort jedoch aus, wenn wir von einer thermischen Entmagnetisierung ausgehen: Wenn das Ferromagnetikum über die sogenannte Curie-Temperatur erhitzt wird, so wird die thermische Bewegung darin so stark, dass die Weiß-Bezirke einer chaotischen Ausrichtung (bzw. nicht-Ausrichtung) der atomaren magnetischen Momente weichen müssen. Dann ist das Material erstens entmagnetisiert und zweitens hat es auch keine Weiß-Bezirke mehr. Kühlt es dann wieder unter die Curie-Temperatur ab, so bildet sich das oben beschriebene Bild der Weiß-Bezirke, die alle in unterschiedliche Richtungen magnetisiert sind.

### 3.3 Die Sättigungsmagnetisierung.

Steigert man die Stärke des von außen angelegten Magnetfeldes, so richten sich die Weißschen Bezirke so aus, dass die magnetischen Momente der Atome möglichst parallel zum äußeren Feld liegen. Ab einer bestimmten Feldstärke sind alle diese Momente vollständig ausgerichtet. Somit kann auch bei weiterer Erhöhung der äußeren Feldstärke die Magnetisierung des Materials nicht mehr zunehmen, sie hat ihren Sättigungswert erreicht. Eine weitere Steigerung der Flussdichte ist

dann nur durch ein stärkeres äußeres Feld herbeizuführen, aber dies beruht nicht mehr auf dem Einfluss des Ferromagnetikums.

### 3.4 Wie kommt es zu einer Hysteresekurve?

Eine Hysteresekurve entsteht, wenn man die magnetische Flussdichte  $B$  in einem ferromagnetischen Material in Abhängigkeit von der äußeren Feldstärke  $H$  aufzeichnet. Beginnen wir mit einer unmagnetisierten Probe und ohne äußere Feldstärke. In dieser Situation sind die atomaren magnetischen Momente (wir wollen sie im folgenden Elementarmagnete nennen) wie schon oben beschrieben in kleinen Teilbereichen, den Weißschen Bezirken, einheitlich ausgerichtet. Im Mittel über das gesamte Material ist aber keine Richtung bevorzugt, so dass die Probe keine resultierende Magnetisierung aufweist.

Legt man nun ein äußeres Feld an, so vergrößern sich diejenigen Weißschen Bezirke, innerhalb derer die Elementarmagnete möglichst parallel zu diesem Feld ausgerichtet sind zu Lasten jener, in denen die Ausrichtung eher senkrecht zum Feld steht, und zwar umso mehr, je größer die  $H$  ist (man spricht in diesem Zusammenhang von sog. Blochwandverschiebungen). Die Magnetisierung und damit die Flussdichte  $B$  im Material nimmt also mit dem äußeren Feld zu. Bei einer bestimmten Feldstärke richten sich in den Weißschen Bezirken schließlich alle Elementarmagnete sprunghaft genau parallel zur Feldrichtung aus (es finden die sog. Barkhausensprünge statt), so dass  $B$  seinen Sättigungswert erreicht und die Hysteresekurve abflacht (die Tatsache, dass sie nicht ganz horizontal verläuft, ist nur noch auf den Einfluss des äußeren Feldes aber nicht auf das Ferromagnetikum zurückzuführen, vgl. auch Frage 3). Den bisher durchlaufenen Kurventeil bezeichnet man als Neukurve.

Verringert man nun die Stärke des äußeren Feldes wieder, so nimmt die Flussdichte in der Probe zwar ab, aber langsamer, als es die Neukurve erwarten lassen würde. Das Material behält einen Teil seiner Magnetisierung bei, d.h. es bleibt eine Ausrichtungsrichtung der Weißschen Bezirke bevorzugt (die Richtung des äußeren Feldes) und die Flussdichte sinkt ohne äußeres Feld nicht zu Null sondern die Kurve schneidet die  $y$ -Achse beim sog. Remanenzwert  $B_R$ . Kehrt man nun die Richtung des äußeren Feldes um, und steigert die Feldstärke wieder, so kann man mit einer bestimmten Gegenfeldstärke (dem sog. Koerzitivfeld) erreichen, dass die Flussdichte im Material Null wird. Eine noch höhere Feldstärke bewirkt dann wieder eine Magnetisierung des Materials (in der entgegengesetzten Richtung) bis zu Sättigungswert. Bei Verringerung der Feldstärke und anschließend erneutem Umpolen wiederholen sich die beschriebenen Effekte (Remanenz, Koerzitivfeld) und der untere Ast der Schleife wird durchlaufen, bis die Kurve geschlossen ist. Man beachte, dass die Neukurve nur ein einziges Mal zu Beginn mit einer unmagnetisierten Probe durchlaufen wird, danach aber nur noch die eigentliche Hysteresekurve.

### 3.5 Kurvenformen magnetisch weicher und harter Materialien.

Ein magnetisch hartes Material zeichnet sich dadurch aus, dass es mit vergleichsweise viel Energieaufwand verbunden ist, seine Magnetisierung zu ändern. Die Fläche innerhalb der Hysteresekurve (ein Maß für die zur Ummagnetisierung aufzuwendende Arbeit), ist daher bei magnetisch harten Materialien relativ groß. Zur Änderung der Magnetisierungsrichtung der Probe sind hier relativ große äußere Feldstärken erforderlich, weswegen entsprechend hohe Werte für die Koerzitivfeldstärke auftreten. Bei magnetisch weichen Materialien findet man dagegen schmale Kurven mit niedrigen Werten für das Koerzitivfeld sowie entsprechend einer kleinen umschlossenen Fläche.

### 3.6 Unterschiede in den Hysteresekurven für Weicheisen und Ferrit – Auswirkungen der Kurven auf die technische Anwendung.

Man sieht beim Vergleich der beiden Kurven sofort, dass die Schleife des Ferrits deutlich „dünnere“ ist, d.h. die „Koerzitivkraft“  $H_C$  von Ferrit ist kleiner. **Ferrit ist ein magnetisch weiches Ferromagnetikum, im Gegensatz zum magn. harten Ferromagnetikum Weicheisen.**

Es gibt nun **drei hauptsächliche technische Anwendungen von Ferromagnetika**, wobei zu beachten ist, dass magnetisch weiche Materialien für schnelle Ummagnetisierung besser geeignet sind (nötige Energie  $\cong$  (bei solchen Materialien relativ geringe) Fläche unter der Hystereseschleife):

- **Verstärken des Magnetfeldes einer Spule (Elektromagnete...).** Die durch das Ummagnetisieren dissipierte Arbeit ist bei magnetisch harten Materialien recht hoch. Dies ist ein Nachteil; besonders bei andauernder schneller Veränderung des anliegenden Magnetfeldes wird dadurch eine große Leistungsaufnahme verursacht. Es ist also besser oder sogar zwingend erforderlich, einen magnetisch weicheren Kern (mit möglichst hoher Sättigungsmagnetisierung) zu verwenden.
- **„Überleitung des magnetischen Flusses“.** Beispielsweise in Transformatoren werden Magnete verwendet, um nahezu den gesamten magnetischen Fluss aus einer Spulenöffnung in die andere überzuleiten. Da sich das Magnetfeld der Primärspule hier ständig ändert (denn ansonsten würde in der Sekundärspule keine Spannung induziert) geht andauernd Energie durch das Ummagnetisieren des Kernes verloren. Die hierdurch verursachte Verlustleistung ist bei den gewöhnlich auch bei höherer Frequenz eingesetzten „Übertragern“ (gleiches Funktionsprinzip wie Transformatoren) besonders hoch, aber kann natürlich auch schon bei Netzfrequenz sehr groß werden. Demzufolge wählt man für solche Anwendungen, bei denen sich das Feld schnell ändert, am besten magnetisch weiche Materialien.
- **Permanentmagnet.** Hier soll die Magnetisierungsrichtung möglichst unabänderbar sein. Ein klarer Fall für magnetisch harte Materialien, die sich nur unter hohem Energieaufwand ummagnetisieren lassen.

Wie schon angedeutet sind also magnetisch harte Materialien wie Eisen in der Hochfrequenztechnik und bei Transformatoren sowie Elektromagneten eher unerwünscht, da hier bei Ummagnetisierung Energie dissipiert wird. Man verwendet also lieber magnetisch weiche Materialien wie Ferrit. Geeignet sind sie jedoch für Permanentmagneten, z.B. im Motor oder Lautsprecher oder als Beschichtung von Magnetspeichern.

### 3.7 Fehlerquellen bei mangelhaftem Integrator

Es gibt drei Fehlerquellen am Integrator:

- **Thermische Instabilität der Integrationskonstanten:** Diese wurde durch die „Aufwärmphase“ vor dem Versuch mit hoher Wahrscheinlichkeit größtenteils eliminiert.
- **Idealisierung der Integratorfunktion:** Das Kernstück eines Integrators funktioniert, vereinfacht gesagt, so, dass ein Kondensator über einen Widerstand durch die am Eingang anliegende Spannungsquelle aufgeladen wird ( $\rightarrow$  Versuch OSZ). Am Kondensator selbst steigt hierbei, wenn eine Konstantspannung  $U_0$  angelegt wird, die Spannung mit einer funktionalen Abhängigkeit  $U_C = U_0 \cdot (1 - \exp(-t/(RC)))$  an. Diese Abhängigkeit ist bei gegenüber  $RC$  sehr klei-

nen Zeitwerten näherungsweise linear; in diesem Bereich wirkt der Tiefpass integrierend. Integriert man jedoch zu lange, so steigt die Ausgangsspannung des Tiefpasses zu langsam an und man misst also zu kleine Werte für das Integral. Da eine ähnliche Nichtlinearität auch beim Entladen des Kondensators durch eine konstante Spannung vorhanden ist (der Entladungsstrom sinkt auch hier mit der Zeit durch den kleiner werdenden Spannungsabfall am Widerstand), kann es z.B. auch dazu kommen, dass das Integral über eine Spannung  $U$  die eine Zeit  $\Delta t$  anliegt plus das Integral über die entsprechende negative Spannung  $-U$  über dieselbe Zeitspanne addiert nicht gleich 0 ist, sondern z.B. negative Werte erreicht, wenn man es mittels Umpolung der Spannungsquelle nach der Zeit  $\Delta t$  misst, da der hohe Spannungsgradient am Widerstand nach der Umpolung eine schnellere Entladung des Kondensators bewirkt als es bei der Aufladung der Fall war. Es kann also insgesamt zu einer Nullpunktverschiebung und unrealistischen unteren/oberen Werten kommen, wenn das Integrationsglied (Tiefpass) für die gewünschte Messzeitspanne nicht geeignet ist. Freilich ist im vorliegenden Integrator hierfür wahrscheinlich eine Korrekturschaltung eingebaut. Allerdings lässt sich ein solches Grundproblem im Messprinzip niemals völlig ideal eliminieren, wodurch eben Ungenauigkeiten entstehen können.

- **Energieverlust im Kondensator des Integrators:** Da die Materialien im Integrator sowie die Umgebungsluft geringe Leitfähigkeit besitzen und aufgrund des Schaltungsaufbaus im Integrator (intern muss die Kondensatorspannung in der ein oder anderen Form abgegriffen werden, und eine Spannungsmessung ganz ohne Stromfluss gibt es nicht) kann der Kondensator Spannung verlieren. Auch hier gilt, dass vielleicht Korrekturschaltungen vorhanden sind, die aber evtl. nicht optimal wirksam sind. Dadurch kann es ebenfalls zu einer Nullpunktverschiebung kommen.

Insgesamt kann man also sagen, dass sowohl die oberen gemessenen  $B$ -Werte ( $B_S$ ) als auch die Remanenzfeldwerte und auch die Koerzitivkraftwerte durch den Integrator verfälscht worden sein können. Die Nullpunktverschiebung könnte bewirken, dass die gemessene Kurve nicht geschlossen wäre (dies war aber bei uns zum Glück nicht der Fall).

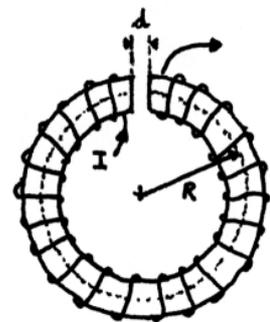
### 3.8 Auswirkungen eines Luftspaltes im magnetischen Kreis auf die gemessene Hysteresekurve und ihre Kennwerte $B_S$ , $B_R$ , $H_C$ .

Sehen wir uns hierzu folgende Teile der Aufgabe 2, Blatt 9 der derzeitigen Experimentalphysikübung an:

#### Aufgabe 2: Ringmagnet mit Eisenkern

Ein zylindrischer Weicheisenstab wird ringförmig zu einem Torus mit mittlerem Radius  $R = 0.1\text{m}$  gebogen. Die relative magnetische Permeabilität  $\mu_r = 2000$  sei konstant. Der Torus wird mit  $N = 200$  Windungen eines Drahts gleichmäßig umwickelt. Durch den Draht fließt ein Strom  $I = 5\text{A}$ .

- Bestimmen Sie die magnetische Feldstärke  $H$ , die magnetische Flussdichte  $B$  und die Magnetisierung  $M$  im Torus (ohne Luftspalt).
- Zwischen den Enden des gebogenen Weicheisenstabs soll nun ein Luftspalt der Dicke  $d = 5\text{mm}$  entstehen. Wie groß sind  $B$  und  $H$  im Eisen und im Luftspalt? (Streufelder am Rand des Spaltes sollen vernachlässigt werden)



**Lösung:**

a)

Nach dem Ampereschen Gesetz gilt:  $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = I$ , wo  $C$  eine geschlossene Kurve,  $H$  das Magnetfeld an einem Kurvenpunkt und  $I$  der die Kurve „durchflutende“ Strom ist. Damit gilt für eine Kurve, wie sie in der Zeichnung gestrichelt eingezeichnet ist:

$$H \cdot 2R\pi = N \cdot I,$$

wo  $H$  das (konstante) Magnetfeld entlang der Kurve und  $N$  die Windungszahl sowie  $I$  der **Spulenstrom** ist (nicht zu verwechseln mit dem die Kurve durchflutenden Strom  $N \cdot I$ ). Unter Ausnutzung dieser Relation erhalten wir  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = 4T$ .

b)

Auch hier nutzen wir wieder das Amperesche Gesetz, wobei wir jetzt die oben genannte Kurve in zwei Teile  $C_{Fe}$  und  $C_{Luft}$ , also den Teil der Kurve im Eisen und den im Spalt, zerteilen. Innerhalb derer ist das Magnetfeld jeweils wiederum näherungsweise konstant und der Flussdichte ist in beiden Teilen dieselbe, da der Spalt so klein ist, dass Streufelder nicht auftreten sollen. Dies führt uns über die dann sehr einfache Integration über die Kurve zu einer näherungsweise Relation:

$$H_s d + H_e (2\pi R - d) = N \cdot I$$

$$\Leftrightarrow \frac{B}{\mu_0} \cdot d + \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \cdot (2R\pi - d) = N \cdot I$$

$$\Leftrightarrow B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{d + \frac{1}{\mu_r} (2R\pi - d)} = 0,273T$$

Man sieht also, dass sich bei der recht hohen relativen magnetischen Permeabilität des Spulenkerns von 2000 das zusätzliche Glied im Nenner ( $d - d/\mu_r \approx d$ , das mehr als zehn mal so groß ist, wie das Glied  $2R\pi/\mu_r$ , (das in a) alleine im Nenner auftritt) in Form einer starken Verkleinerung des Magnetfeldes bemerkbar macht.

Ein ähnliches Ergebnis wäre auch für eine solche Berechnung in der Versuchsanordnung zu erwarten. Das hätte folgenden Einfluss auf die Kenngrößen der Hystereseschleife:

- Die Magnetisierung und damit auch das Remanenzfeld sowie die Koerzitivkraft würden kleiner werden, der Kern lässt sich leichter ummagnetisieren.
- Da sich der Kern nicht mehr so gut magnetisieren lässt, ist der Fall der Sättigungsmagnetisierung, bei dem alle Weißschen Bezirke ausgerichtet sind, erst bei höherem anliegenden Feld  $H$  erreicht. Da  $M$  (Magnetisierung) dann dieselbe Größe haben muss wie im normalen Sättigungsfall bei geschlossenem Kern, ist  $B_S = M_S + H_S$  im Fall mit Luftspalt größer.