

Schweizerische Armee

65.90/I d

Technische Grundlagen
für
Übermittlungsgerätemechaniker

Band I

Gültig ab 1. Oktober 1974

C. Der Magnetismus

I. Permanentmagnete

1. Einführung

Magnetismus und Elektrizität sind eng verwandt. Viele elektrische Erscheinungen sind durch magnetische Vorgänge bedingt und umgekehrt. Zum Verständnis vieler elektrischer Vorgänge sind Kenntnisse der Grundgesetze des Magnetismus unerlässlich.

2. Was wissen Sie schon über Permanentmagnete?

(Lösung Seite 425)

- Kennen Sie ein Anwendungsbeispiel für die Ausnutzung des Erdmagnetismus?
- Wo treten magnetische Feldlinien auf?
- Wie können solche Feldlinien sichtbar gemacht werden?
- Nennen Sie ein Material, aus welchem sich Permanentmagnete herstellen lassen.

3. Der Permanentmagnet

a. Was ist ein Permanentmagnet?

Ein *Permanentmagnet*, oft auch *Dauermagnet* genannt, besteht aus einem Werkstoff, der magnetisiert wurde und nachher den Magnetismus beibehalten hat. Diese sogenannten ferromagnetisch harten Stoffe sind gehärteter Stahl oder Speziallegierungen, welche meist Stahl oder Nickel als Grundstoff enthalten. Der Magnetismus lässt sich am einfachsten dadurch nachweisen, dass man in die Nähe der Stabenden ein Stück Eisen bringt. Der Dauermagnet übt nun auf dieses Eisen eine bestimmte Kraft aus, er zieht es an. Fahren wir mit dem Eisenstück dem Magnetstab entlang, so stellen wir fest, dass die anziehende Kraft an den Stabenden am stärksten ist, in der Stabmitte finden wir eine neutrale Zone, in welcher das Eisen nicht mehr angezogen wird. Man sagt, der Permanentmagnet weise zwei *Pole* auf.

b. Eigenschaften und Wirkungsweise des Permanentmagneten

Das bekannteste Anwendungsbeispiel des Dauermagneten ist die Magnetnadel des Kompasses. Die Kompassnadel stellt sich unter dem Einfluss des Erdmagnetfeldes immer in Nord-Süd-Richtung ein. Das Verhalten der Kom-

passnadel hat zu der Benennung der Pole von Permanentmagneten geführt. Der Nordpol der Magnetnadel zeigt nach Norden, der Südpol nach Süden. Nord- und Südpole von zwei Dauermagneten üben aufeinander eine Kraft aus. Gleichnamige Pole stossen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an. Demnach ist paradoxerweise der geographische Nordpol der Erde ein magnetischer Südpol! Den Wirkungsbereich eines Magneten, in welchem seine Kräfte wirken, nennt man *magnetisches Feld*.

Ein unmagnetisches Stück Stahl lässt sich in einen Dauermagneten verwandeln, indem man es gleichmässig mit einem Pol eines Dauermagneten in der gleichen Richtung bestreicht. Es hat den Anschein, als ob dieser Vorgang im Inneren des Stahlstabes etwas ausgerichtet habe. Schneiden wir nun den so magnetisierten Stab in der Mitte entzwei, so entstehen zwei neue Magnetstäbe mit zwei neuen Polen. Dieser Teilungsvorgang lässt sich beliebig oft wiederholen, wir erhalten dabei immer wieder neue Dauermagnete. Setzen wir die Teilung beliebig fort, so erhalten wir schlussendlich winzig kleine Magnetstäbchen in der Grössenordnung von Molekülen. Wir nennen diese Magnetchen wegen ihrer Kleinheit *Molekularmagnete*.

Der Stabmagnet besteht aus einer unendlich grossen Anzahl solcher Molekularmagnete. In unmagnetischem Zustand liegen diese Molekularmagnete ungeordnet wirr durcheinander. Wird der Stab magnetisiert, so richten sich die Molekularmagnete alle in der gleichen Richtung aus. Wenn alle ausgerichtet sind, entsteht an den Enden des Stabes die bekannte Magnetwirkung. Im Eisen ist eine vollständige Ordnung der Molekularmagnete möglich, es findet deshalb als Grundstoff zur Herstellung von Magneten Verwendung. Bild 26 zeigt die Teilung eines Stabmagneten.

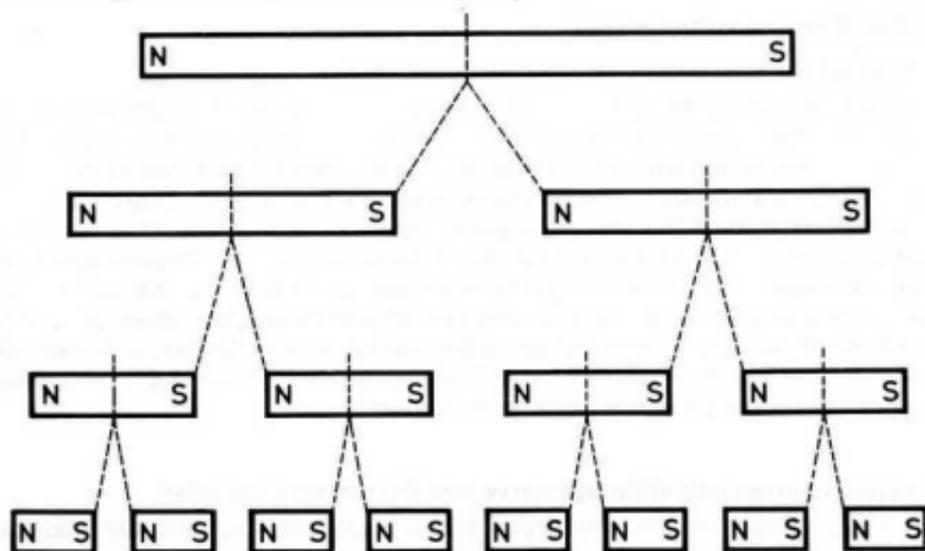
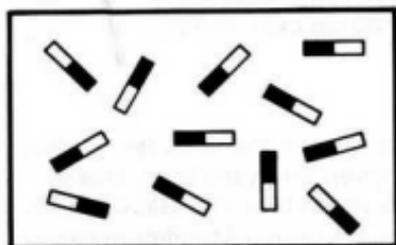
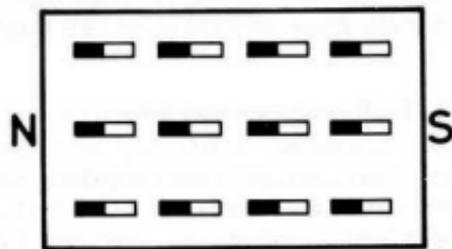


Bild 26

In Bild 27 erkennen wir den unmagnetischen Stahlstab mit den ungeordneten Molekularmagneten und den magnetischen Stahlstab, in welchem die Elementarmagnete alle in einer Richtung ausgerichtet sind.



ungeordnete Molekularmagnete



geordnete Molekularmagnete

Bild 27

Die Molekularmagnete müssen sich innerhalb des Stahlstabes drehen können. Die Beweglichkeit dieser Elementarmagnete ist nicht in allen Stahlsorten gleich. Im weichen Stahl sind die Molekularmagnete weniger starr ausgerichtet (beweglicher), er lässt sich leichter magnetisieren als harter Stahl. Harter Stahl behält dafür den Magnetismus besser als weicher Stahl, weshalb er zur Herstellung von Dauermagneten verwendet wird.

In Bild 28 sehen wir ein klassisches Experiment; magnetische Feldlinien werden mit Hilfe von Eisenpulver sichtbar gemacht. Zu diesem Zweck streuen wir Eisenpulver auf ein Blatt Papier, unter welchem ein Stabmagnet liegt. Wir sehen deutlich, dass die Feldlinien aus den Polen austreten und auch wieder in diese zurückkehren. Innerhalb des Magneten setzen sich dieselben Feldlinien fort, so dass der Kreis der Feldlinien geschlossen ist.

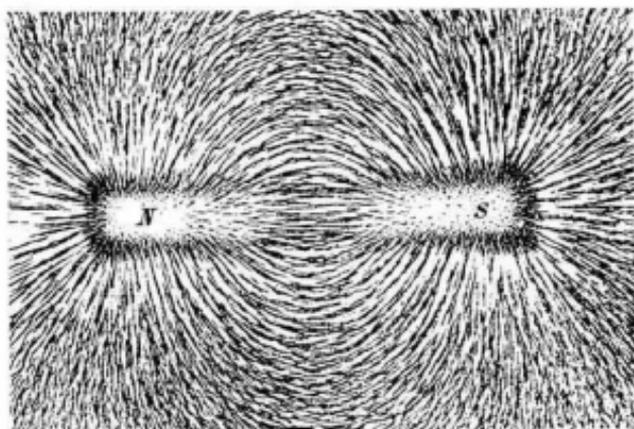


Bild 28

Ähnlich der Stromrichtung, die konventionell festgelegt wurde, hat man auch die Richtung der Feldlinien festgelegt.

Die Regel lautet:

Die Feldlinien verlassen das Eisen am Nordpol und treten am Südpol wieder ein. Diese Richtung wird als positive Feldrichtung bezeichnet.

c. Die Kenndaten des Permanentmagneten

Die Stärke der magnetischen Kraftwirkung des Permanentmagneten muss definiert und gemessen werden. Die Masseinheiten des veralteten absoluten Masssystems werden für Magnetkreise noch oft verwendet. Die Masseinheiten des Giorgi-Systems erlauben eine Definition der Werte von Magnetkreisen mit den vier Grundeinheiten; sie basieren jedoch auf dem Elektromagneten. Wir wollen die beiden Masseinheiten einander gegenüberstellen, wobei uns die Einheiten des Giorgi-Systems vorerst noch recht sonderbar erscheinen mögen. Wir nehmen sie zur Kenntnis, der nächste Abschnitt «Elektro-Magnete» wird uns über die Zusammenhänge aufklären.

Der *magnetische Fluss* ist die Summe aller Feldlinien, die an einem Pol eintreten oder austreten.

Die *magnetische Feldstärke* ist die Anzahl Feldlinien, die auf einen Quadrat-zentimeter entfallen.

Die *magnetische Spannung* entspricht der Feldstärke multipliziert mit der Länge der Feldlinie.

Die *magnetische Induktion* entspricht dem magnetischen Fluss pro Flächeneinheit.

d. Masseinheiten

Grösse	Masseinheit	
	Absolutes Masssystem	Giorgi-System
Magnetischer Fluss Φ	Maxwell (Mx)	Vs = Weber (Wb)
Magnetische Feldstärke H	Oersted (Oe)	A/m
Magnetische Spannung U_m	Gilbert (Gb)	A
Magnetische Induktion B	Gauss (Gs)	Vs/m ² = Tesla (T)

Tabelle 6

Um Werte von einem Masssystem in das andere Masssystem umrechnen zu können, benötigt man Umrechnungsfaktoren:

$$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m} = 79,6 \text{ A/m}$$

$$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Vs}$$

$$1 \text{ Gb} = \frac{10}{4\pi} \text{ A} = 0,796 \text{ A}$$

Wir werden später erkennen, dass die Masseinheiten des Giorgi-Systems für Berechnungsaufgaben bedeutend praktischer sind als die Einheiten im absoluten System. Die magnetische Feldstärke H , sowie die magnetische Induktion B haben an jeder Stelle eine bestimmte Stärke nach Betrag und Richtung. Nachfolgend werden alle Kenngrössen des Magnetismus nur betragsmässig behandelt.

4. Das Wesentliche

Jeder Permanentmagnet weist einen Südpol und einen Nordpol auf; die Pole treten immer paarweise auf.

Den Wirkungsbereich eines Magneten, in welchem seine Kräfte wirksam sind, nennt man magnetisches Feld.

Die Feldlinien treten am Nordpol aus dem Magneten aus und kehren am Südpol in diesen zurück.

Die Wirkung des Permanentmagneten beruht auf der Beweglichkeit der Molekularmagnete, in magnetisiertem Zustand sind diese Molekularmagnete gleichsinnig ausgerichtet, in unmagnetisiertem Zustand sind sie ungeordnet. Die Beweglichkeit der Molekularmagnete ist ein Mass für die magnetischen Eigenschaften eines Stoffes. Bei grosser Beweglichkeit lässt sich ein Stoff gut magnetisieren, er verliert jedoch den Magnetismus leicht wieder.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 426)

- a) Was ist ein magnetisches Feld?
- b) Welche Rolle spielen die Molekularmagnete im Dauermagneten?
- c) Beschreiben Sie den Weg, den magnetische Feldlinien innerhalb und ausserhalb eines Permanentmagneten nehmen.
- d) Wie können magnetische Feldlinien sichtbar gemacht werden?
- e) Warum lässt sich Weicheisen besser magnetisieren als harter Stahl?
- f) Was verstehen Sie unter dem Begriff «Magnetischer Fluss»?
- g) Wie ist die magnetische Feldstärke definiert?
- h) Was geschieht, wenn wir einen Stabmagneten in der Mitte in zwei Teile entzweibrechchen?

II. Elektromagnetismus

1. Einführung

Elektromagnete spielen in der Praxis eine viel grössere Rolle als Permanentmagnete. Die Vorgänge in elektromagnetischen Kreisen lassen sich in Gesetze kleiden, ähnlich den Erscheinungen im Gleichstromkreis. Der Elektromagnetismus ist eine der Säulen, auf denen die Elektrotechnik ruht. Ohne die genaue Kenntnis der elektromagnetischen Phänomene lassen sich weder Transformatoren noch Drosselspulen oder Schwingkreise wirklich verstehen. Beim Studium des Elektromagnetismus kommt es primär auf das Verständnis der physikalischen Vorgänge in elektromagnetischen Kreisen an, die Berechnungsbeispiele sollen dabei lediglich die Theorie bestätigen und untermauern. Diese Forderung steht im Widerspruch zu früher Gesagtem. Es ist jedoch so, dass der Praktiker sehr oft eine Schaltung überschlagsmässig überprüfen muss. Dazu muss er in der Lage sein, die Werte der Schaltelemente und deren spezifisches Verhalten abzuschätzen. Diese Prüfung setzt voraus, dass man fähig ist, die zu erwartenden Messwerte grob zu berechnen. Um das zu können, muss man die Berechnungsvorgänge beherrschen. Es kommt jedoch praktisch kaum vor, dass Sie einen Magnetkreis nachrechnen müssen. Die einfachen physikalischen Vorgänge in Transformatoren oder Spulen setzen aber voraus, dass Sie die Grundgesetze des Elektromagnetismus kennen. In diesem Sinn wollen wir uns mit diesem Gebiet befassen.

2. Was wissen Sie schon über Elektromagnetismus?

(Lösung Seite 427)

- Nennen Sie ein Anwendungsbeispiel für den Elektromagnetismus.
- Hat ein mit Gleichstrom gespeister Elektromagnet die gleichen Eigenschaften wie ein Permanentmagnet?
- Treten beim Elektromagneten ebenfalls Feldlinien auf?
- Beschreiben Sie den prinzipiellen Aufbau eines Elektromagneten.
- Von welchen Faktoren hängt die Feldstärke eines Elektromagneten ab?

3. Der Elektromagnetismus

a. Was ist ein Elektromagnet?

Eine stromdurchflossene Spule bildet einen Elektromagneten. Durch einen Eisenkern im Innern der Spule werden die magnetischen Eigenschaften erhöht.

b. Magnetfeld und stromdurchflossener Leiter

Bild 29 zeigt einen stromdurchflossenen Leiter, welcher ein Papier durchdringt. Dieses Papier steht senkrecht zum Leiter; streut man nun Eisenpulver darauf, so lassen sich die Feldlinien wie beim Permanentmagneten nachweisen.

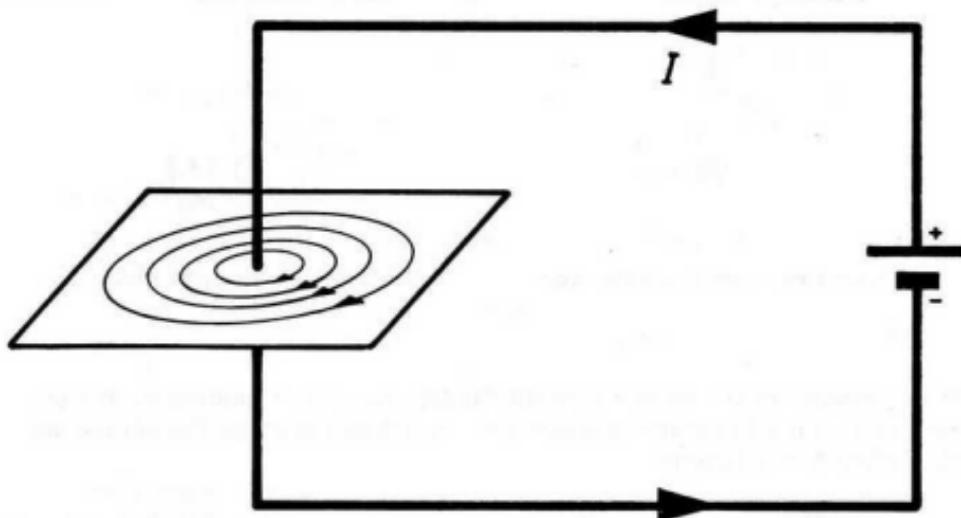


Bild 29

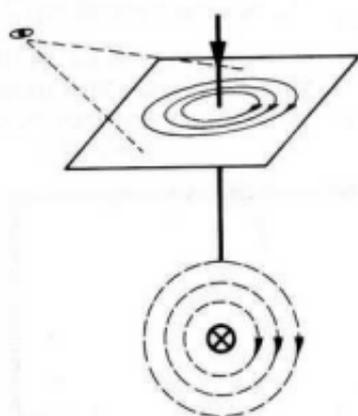
Das Experiment beweist, dass sich um einen stromdurchflossenen Leiter kreisförmige magnetische Feldlinien bilden. Diese konzentrischen Feldlinien sind in sich geschlossen. Beim Permanentmagneten haben wir festgelegt, dass die Kraftlinien beim Nordpol austreten und beim Südpol wieder in den Magneten eintreten. Mit Hilfe der Kompassnadel stellen wir die Richtung des Magnetfeldes um den Leiter fest. Die Nadel muss sich tangential zu den konzentrischen Feldlinien stellen. Wird die Stromrichtung umgepolt, so dreht sich die Magnetnadel um 180°. Die Richtung des Magnetfeldes ist demzufolge von der Stromrichtung abhängig. Die *Korkenzieherregel* diene uns als Gedächtnisstütze, sie erlaubt es uns, die Feldrichtung zu bestimmen:

Drehen wir einen Korkenzieher in Stromrichtung durch die Papierebene, so zeigt die Drehrichtung die Richtung des Flusses. Bild 30 erläutert die Verhältnisse.

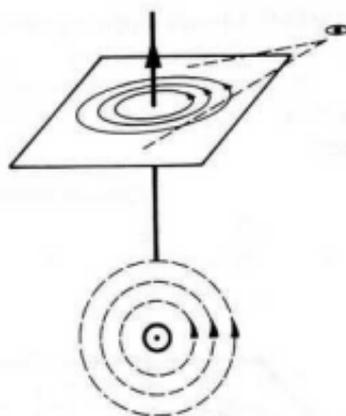
Die Feldstärke wird umso kleiner, je grösser der Abstand zwischen dem stromdurchflossenen Leiter und der Feldlinie ist; je grösser der Radius der Kraftlinie, desto kleiner wird die Feldstärke. Mit zunehmendem Strom nimmt die Feldstärke zu. Eine einfache Formel hält diese Feststellungen fest.

$$H = 0,4\pi \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} = 0,2 \frac{I}{r} \text{ [Oe]} \quad (\text{für betrachteten Feldpunkt})$$

H = Feldstärke
 I = Stromstärke in Ampère
 r = Radius in m



Strom fließt vom Zuschauer weg



Strom fließt auf den Zuschauer zu

Bild 30

In der moderneren Literatur wird die Feldstärke in A/m gemessen. Wir erinnern uns an die Umrechnungsfaktoren und schreiben obige Formel so, dass als Einheit A/m erscheinen.

$$H = \frac{I}{2 \pi \cdot r} \quad [\text{A/m}]$$

H = Feldstärke
 I = Stromstärke in A
 r = Radius in m

Anlässlich der Besprechung des Permanentmagneten haben wir den Ausdruck «magnetische Spannung» kennen gelernt. Wir erinnern uns der Definition: Magnetische Spannung ist gleich Feldstärke mal Länge der Feldlinie. Da wir es bei den Feldlinien mit Kreisen zu tun haben, wird die Rechnung einfach. Die Länge einer Feldlinie berechnet sich nach der Kreisformel:

$$\text{Länge} = \text{Kreisumfang} = 2 \cdot \pi \cdot r = l$$

Setzen wir diese Formel in unsere Beziehung für die Berechnung der Feldstärke in Oersted ein, so erhalten wir die folgende Gleichung:

$$U_m = H \cdot l = 0,2 \cdot \frac{I}{r} \cdot 2 \pi \cdot r \quad \text{Die Gleichung lässt sich kürzen:}$$

$$U_m = 0,4 \cdot \pi \cdot I \quad [\text{A}]$$

Wir erkennen, dass die Masseinheit für die magnetische Spannung das Ampère ist; gleichzeitig stellen wir fest, dass die magnetische Spannung unabhängig vom Radius der Feldlinienkreise geworden ist, eine Tatsache, die gut verständlich ist, da die Feldstärke in dem Masse abnimmt, wie die Feldlinienlänge zunimmt, und da die magnetische Spannung sich aus dem Produkt von Feldlinienlänge und Feldstärke errechnet, wird das Resultat unabhängig vom Radius.

Wir wollen jetzt versuchen, die gleiche Formel aufzustellen, jedoch mit der Einheit A/m für die Feldstärke:

$$U_m = \frac{I}{2\pi \cdot r} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \quad \text{oder gekürzt:}$$

$$U_m = I \quad [\text{A}]$$

Beide Resultate unterscheiden sich durch den Faktor $0,4 \pi$. Diese Zahl ist eine Konstante des absoluten Masssystems, wir werden ihr noch oft begegnen.

c. Die magnetische Induktion

Die magnetische Induktion B ist der magnetischen Feldstärke H proportional. Der Ausdruck Induktion ist mit dem Verb induzieren verwandt. Die magnetische Induktion verdankt ihren Namen der Tatsache, dass ein Magnetfeld unter bestimmten Bedingungen in einem Leiter eine Spannung induzieren kann. Das Verb «induzieren» lässt sich am besten mit «verursachen» übersetzen. Zum besseren Verständnis des Vorganges wollen wir ein Experiment betrachten. Bild 31a zeigt den Aufbau des Versuches.

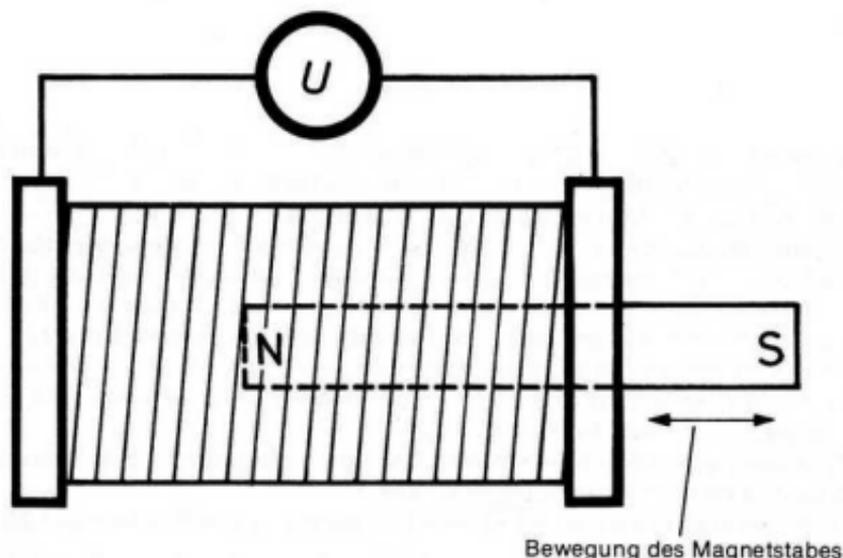


Bild 31a



Bild 31b

Eine Luftspule wird mit einem Voltmeter verbunden. Ein Stabmagnet wird langsam in die Spule geschoben, das Instrument schlägt in einer Richtung aus, es wurde eine Spannung *induziert*. Wenn wir den Magneten wieder aus der Spule herausziehen, so schlägt das Instrument in der entgegengesetzten Richtung aus. Wir wechseln die Spule aus, die neue Spule habe die doppelte Windungszahl, und wir wiederholen das Experiment. Der Zeiger des Instrumentes zeigt jetzt den doppelten Ausschlag. Wird der Magnet rascher in die Spule gestossen, so steigt der Instrumentenausschlag an. Den gleichen Effekt erreichen wir, wenn wir einen stärkeren Magneten verwenden. Das Experiment bringt uns folgende Erkenntnisse:

- Wenn ein Leiter (Spule) von einem bewegten Magnetfeld geschnitten wird, so wird in ihm eine Spannung induziert.
- Die Polarität der induzierten Spannung hängt von der Polarität des Magnetfeldes ab.
- Die induzierte Spannung wird umso grösser, je stärker das Magnetfeld, je rascher die Bewegung des Feldes und je länger der Leiter (Windungszahl der Spule) ist.

Der beschriebene Vorgang heisst *Induktion*. Wir stellten fest, dass die induzierte Spannung proportional der Feldstärke ist. Die Feldliniendichte bezeichnet man deshalb als magnetische Induktion. Bei Luftspulen, das sind Spulen ohne Eisenkern, ist die magnetische Induktion gleich der Feldstärke. Im absoluten Masssystem wird die magnetische Induktion in **Gauss** gemessen. Im modernen Giorgi-System verwendet man für die magnetische Induktion die Einheit Tesla oder **Vs/cm²** (Voltsekunde pro Quadratzentimeter).

In Anlehnung an die Praxis verwenden wir anstelle der Grundeinheit m die kleinere Einheit cm.

Zwischen den beiden Masseinheiten besteht folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ Tesla} = 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Eine Luftspule, die eine Feldstärke von beispielsweise 40 Oe aufweist, hat eine magnetische Induktion von ebenfalls 40 Gauss. Man darf schreiben:

$$B = H \text{ (magnetische Induktion ist gleich magnetische Feldstärke, da } \mu \text{ für Luft} \approx 1\text{)}$$

Eine Luftspule mit einer Feldstärke von 40 A/cm dagegen besitzt eine magnetische Induktion von:

$$B = 0,4 \pi \cdot 10^{-8} \cdot 40 \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

$$B = 50,2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Wir erkennen in dieser Gleichung die Zahl $0,4 \pi$, die Potenz 10^{-8} und die Masseinheit Voltsekunde pro Quadratzentimeter. Damit diese Masseinheit entsteht, muss der Verhältniszahl $0,4 \pi \cdot 10^{-8}$ eine Einheit gegeben werden. Die Feldstärke wird in A/cm angenommen. Um die Einheit Vs/cm² zu erhalten muss demzufolge die Feldstärke mit der Einheit Vs/Acm multipliziert werden. In der folgenden Gleichung sind diese Einheiten berücksichtigt:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot H & H &= \text{Feldstärke in A/cm} \\ & & \mu_0 &= \text{Induktionskonstante in Vs/Acm} \\ & & &= 0,4 \pi \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \\ & & &= 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \end{aligned}$$

Die Einheitenprobe beweist die Richtigkeit der Masseinheiten:

$$[B] = \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{cm}} = \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Die Induktionskonstante wird oft auch magnetische Feldkonstante oder Permeabilität des freien Raumes genannt. Diese Ausdrücke mögen recht verwirrend klingen, in der Praxis handelt es sich bei der Induktionskonstante lediglich um einen *Umrechnungsfaktor*, um aus dem absoluten Masssystem in das Giorgi-System umzurechnen.

Sie werden sich sicher die Frage gestellt haben, warum das Giorgi-System eine dermassen komplizierte Einheit für die magnetische Induktion angibt. Es gibt zwei Gründe: das Giorgi-System will mit den vier Einheiten Meter, Sekunde, Kilogramm und Ampère auskommen, um alle Grössen zu definieren. Das System will auch Berechnungsvorgänge vereinfachen. Das folgende Beispiel zeigt uns, wie einfach sich Berechnungen mit dem Giorgi-System durchführen lassen. Wir wollen die induzierte Spannung in einem Leiter vorausberechnen, der sich in einem bestimmten Magnetfeld mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt. Bild 32 zeigt das Prinzip des Versuches. Der Leiter wird mit gleichbleibender Geschwindigkeit durch das homogene (gleichmässige) Magnetfeld bewegt. Die Spannung, die für die Dauer der Bewegung des Leiters im Magnetfeld erzeugt wird, soll errechnet werden.

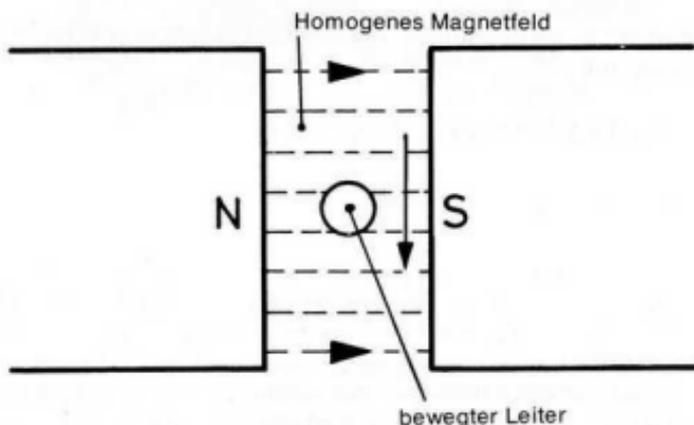


Bild 32

Folgende Angaben sind bekannt:

Magnetische Induktion	$B = 1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$
Geschwindigkeit des Leiters	$v = 400 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$
Länge des Leiters	$l = 8 \text{ cm}$

Wir haben früher festgestellt, dass die induzierte Spannung zu der Geschwindigkeit, der magnetischen Induktion und der Leiterlänge proportional ist. Algebraisch ausgedrückt:

$$U_i = B \cdot v \cdot l; [U_i] = \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot \text{cm} = \text{V}$$

$$U_i = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 400 \cdot 8$$

$$U_i = 0,32 \text{ V}$$

So einfach lässt sich die Berechnung durchführen, wenn man die Einheiten des Giorgi-Systems verwendet. Wir wollen uns dieses Beispiel merken, wir werden später bei der Behandlung der Induktivität darauf zurückkommen.

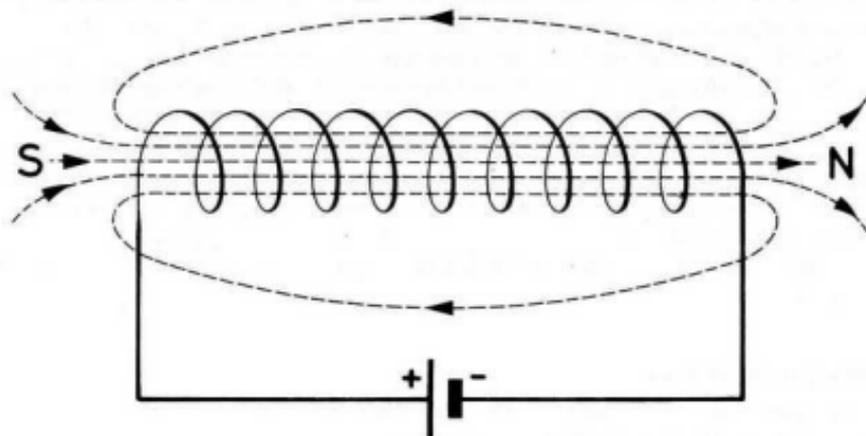


Bild 33

d. Die eisenlose stromdurchflossene Spule

Wird der Leiter auf einen zylindrischen Körper aufgewickelt, so entsteht eine Spule. Schickt man einen Strom durch die Windungen der Spule, so entsteht in der Spule ein gleichmässiges Magnetfeld. Die Magnetfelder der einzelnen Windungen haben sich in der Spule zu einem Gesamtmagnetfeld vereinigt, dessen Form dem Feld eines Stabmagneten ähnlich sieht.

Bild 33 zeigt die stromdurchflossene Zylinderspule.

Zur Bestimmung des Nord- und Südpoles der Spule dienen verschiedene Regeln; bekannt sind die Korkenzieher-Regel, die Rechte-Hand-Regel und die Südpolregel. Alle diese Regeln haben den Nachteil, dass sie auswendig gelernt werden müssen. Auswendiggelerntes kann man jedoch vergessen, oder man erinnert sich nur mangelhaft an den Inhalt. Es ist deshalb weitaus besser, man versucht die Polarität mit Hilfe logischer Überlegung selber zu finden oder man bediene sich einer narrensicheren Gedächtnishilfe. Bild 34 zeigt uns beide Möglichkeiten. Ausgangsbasis für alle Überlegungen ist die einfache Korkenzieherregel. Wir untersuchen zuerst die Polarität einer einzelnen

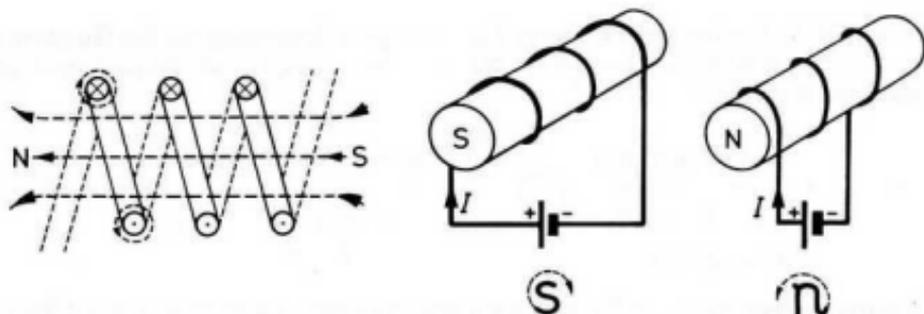


Bild 34

Wicklung, indem wir uns den Feldverlauf um den gestreckten Leiter vergegenwärtigen und diesen Leiter nun zu einer Wicklung biegen. Dann zeichnen wir den Schnitt durch eine Zylinderspule und tragen in die Schnittflächen der einzelnen Windungen die Stromrichtungen ein. Beide Vorgehen führen zur Bestimmung der Pole. Wer gerne mit Gedächtnishilfen arbeitet, der stelle sich die kleinen Buchstaben n und s vor, die Buchstabenenden werden mit Pfeilen verlängert. Die Pfeilrichtung zeigt die Stromrichtung für die entsprechende Polarität, die eine Spule aufweisen muss, wenn man den Blick auf das Spulenende richtet.

Die magnetische Feldstärke in der Spule ist der Windungszahl und dem Strom proportional.

e. Die Durchflutung Θ

Die Durchflutung Θ in der stromdurchflossenen Spule ist das Produkt von Stromstärke mal Windungszahl.

$$\Theta = I \cdot N \quad [\text{A}]$$

Die Masseinheit ist das Ampère, da die Windungszahl dimensionslos ist. Wir erkennen in der Durchflutung unsere magnetische Spannung wieder. In der Spule trägt jede einzelne Windung zur Vergrößerung des Magnetfeldes bei, da sich die Felder der einzelnen Windungen addieren. Aus diesem Grund wird zur Berechnung der magnetischen Spannung in Spulen der Strom mit der Windungszahl multipliziert. In der Praxis spricht man von *Ampèrewindungen* (AW) an Stelle der Durchflutung.

$$U_{\text{mtot}} = \Theta = IN \quad [\text{A}]$$

f. Der magnetische Fluss des Elektromagneten

Der magnetische Fluss des Elektromagneten unterscheidet sich nicht vom Fluss des Dauermagneten. Daraus ersehen wir, dass der Fluss gleich dem Produkt von magnetischer Induktion und Fläche ist.

$$\Phi = B \cdot A \quad (A = \text{Fläche})$$

Die Masseinheit für den Fluss ist die Voltsekunde (Vs). Setzen wir zu den Grössen der Berechnungsformel für den Fluss die Einheiten, so ersehen wir aus dieser Probe die Zusammenhänge, die zur Masseinheit Voltsekunde führen.

$$[\Phi] = \frac{Vs}{cm^2} \cdot cm^2 = Vs \quad (Wb)$$

Verwenden wir für die Induktion Gauss, so erhalten wir:

$$[\Phi] = Gs \cdot cm^2 = Mx$$

g. Die Permeabilität

Wir bringen in eine Zylinderspule einen Eisenkern. Wir machen nun die Feststellung, dass die magnetische Induktion bei gleichbleibender Windungszahl und Stromstärke gegenüber der Luftspule ganz gewaltig zugenommen hat. Das Eisen hat die Eigenschaft, die Kraftlinien zu konzentrieren. Die Wirkung ist beträchtlich, die Feldstärke kann einige tausendmal grösser sein. Der Flusszuwachs hängt vom Eisen und vom Magnetisierungszustand ab. Der Faktor der Feldzunahme wird als *Permeabilität* μ bezeichnet. Zur Unterscheidung von der Induktionskonstante wird er mit dem Index «r» versehen, man spricht von der *relativen Permeabilität* μ_r .

Die relative Permeabilität eines Stoffes sagt aus, um wie viel mal grösser der Magnetfluss eines Elektromagneten wird, wenn der betreffende Stoff als Kernmaterial verwendet wird. Die relative Permeabilität ist eine dimensionslose Grösse.

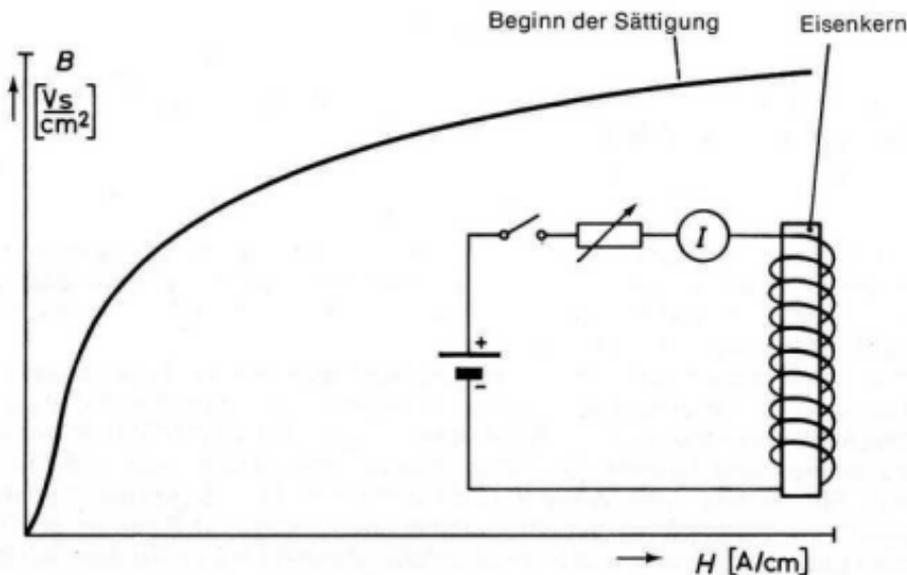


Bild 35a



Bild 35b

Das Produkt aus Induktionskonstante und relativer Permeabilität bezeichnet man als *absolute Permeabilität* μ

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_{ri} \quad [\mu] = \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$$

Die Permeabilität des Eisens ist kein konstanter Faktor, sie hängt von der Eisensorte und von der Feldstärke ab. Wir magnetisieren nach Bild 35a einen Eisenkern und zeichnen die Abhängigkeit der magnetischen Induktion von der Feldstärke in ein Diagramm.

Die magnetische Induktion wird gemessen, indem man die Zugkraft des Elektromagneten mit einer Waage feststellt und die erhaltenen Werte umrechnet. Dieses Verfahren ist einfach, da zwischen Zugkraft und Feldstärke ein direkter Zusammenhang besteht. Die Magnetisierungsfeldstärke lässt sich einfach aus Stromstärke und Windungszahl ermitteln. Bei steigender Feldstärke nimmt die magnetische Induktion immer weniger zu, das Eisen ist gesättigt, die Molekularmagnete sind fast vollständig ausgerichtet. Im Bereich der Sättigung ist die relative Permeabilität nur noch klein. Im folgenden Versuch wollen wir das Verhalten des Eisenkernes näher untersuchen. Wir stellen eine Schal-

tung zusammen, die es ermöglicht, das Material in beiden Richtungen zu magnetisieren.

Bild 36 zeigt die verwendete Schaltung und die graphische Darstellung der erhaltenen Werte.

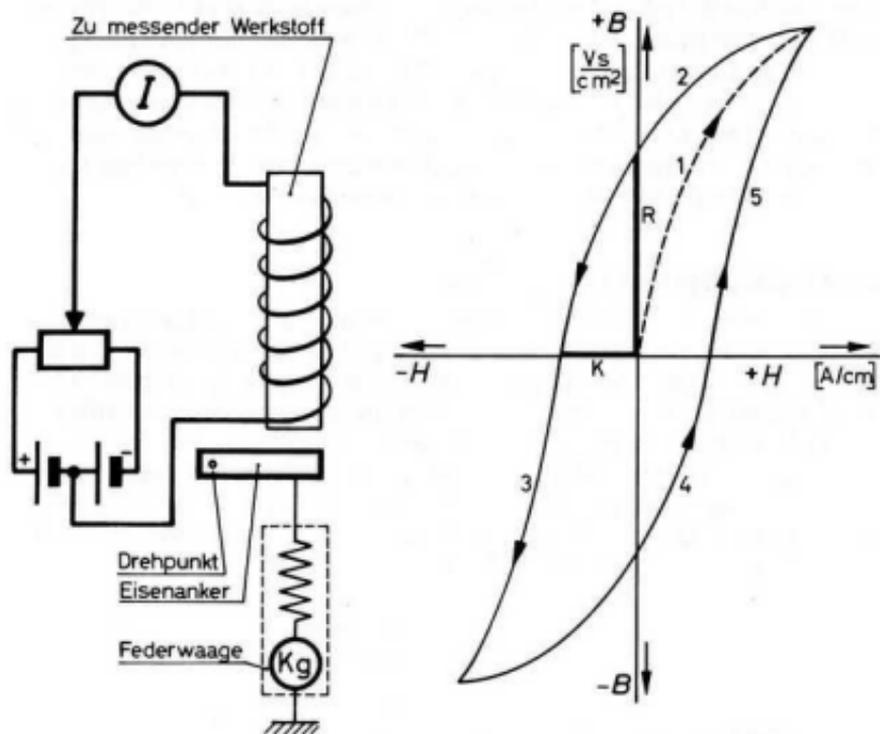


Bild 36

Der Strom wird in positiver Richtung durch die Spule geschickt und kontinuierlich erhöht, die Induktion verläuft nach der gestrichelt gezeichneten Kurve 1. Jetzt wird der Strom langsam auf Null zurück reguliert, die Induktion verläuft nach dem Kurvenstück 2. Lässt man nun den Strom in negativer Richtung langsam bis zu seinem Maximalwert ansteigen, so erhalten wir für die Induktion das Kurvenstück 3.

Das Kurvenstück 4 zeigt den Induktionsverlauf wie wir ihn erhalten, wenn der Strom wieder gegen Null geregelt wird. Das letzte Kurvenstück 5 entsteht, wenn wir den Strom wieder bis zu seinem positiven Maximalwert steigern. Der in sich geschlossene Kurvenzug gibt Auskunft über die magnetischen

Eigenschaften des verwendeten Eisens. Die Kurve wird als *Hysteresisschleife* bezeichnet. Die gestrichelt gezeichnete Kurve wird «Ursprungskurve» genannt, sie entsteht nur beim erstmaligen Magnetisieren. Die Hysteresisschleife enthält zwei Kennwerte des Werkstoffes: *Remanenz* und *Koerzitivkraft*. Unter Remanenz verstehen wir den Restmagnetismus des Werkstoffes, er wird in der Kurve durch die Strecke R dargestellt, diese gibt an, welche magnetische Induktion erhalten bleibt, wenn die magnetisierende Wirkung der Spule Null geworden ist. Die Koerzitivkraft gibt die Feldstärke an, die notwendig ist, um den Restmagnetismus zu beseitigen. Im Diagramm wird sie durch die Strecke K dargestellt. Remanenz und Koerzitivkraft kennzeichnen den magnetischen Werkstoff. Magnetisch hartes Material wie Stahl weist eine grosse Remanenz und eine grosse Koerzitivkraft auf, magnetisch weiches Eisen besitzt nur eine geringe Remanenz und eine kleine Koerzitivkraft.

h. Das ohmsche Gesetz für Magnetismus

Analog dem ohmschen Gesetz für elektrische Stromkreise lässt sich das ohmsche Gesetz für magnetische Kreise aufstellen. Wir kennen bereits die magnetische Spannung und den magnetischen Fluss. Letzterer ist dem Strom im Stromkreis gleichzusetzen. Es fehlt uns noch der *magnetische Widerstand*. Dieser magnetische Widerstand setzt sich aus analogen Komponenten zusammen wie der Widerstand eines elektrischen Leiters. Als Leiter verwendet man für den magnetischen Fluss entweder Luft oder einen magnetischen Werkstoff, in den meisten Fällen eine Eisensorte. Die Bestimmungsgleichung für den magnetischen Widerstand lautet:

$$R_m = \frac{l}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$$

l = Länge des Leiters
 A = Querschnitt des Leiters

Die Masseinheit für R_m im Giorgi-System ist $\frac{A}{Vs}$

Im absoluten Masssystem wird die Bestimmungsgleichung einfacher, da dort die Induktionskonstante wegfällt:

$$R_m = \frac{l}{\mu_r \cdot A}$$

Die Masseinheit im absoluten System wird dadurch $\frac{1}{cm}$

Der Aufbau der Gleichungen ist streng logisch: Je länger der Leiter, desto grösser sein Widerstand, je grösser der Querschnitt, desto kleiner der Widerstand.

Die Permeabilität spielt in beiden Gleichungen die Rolle des spezifischen Leitwertes; Permeabilität kann auch als «Durchlässigkeit» aufgefasst werden, je durchlässiger das Leitmaterial, desto geringer der Widerstand.

Im folgenden Beispiel wollen wir einen magnetischen Kreis nach beiden Masssystemen durchrechnen. Bild 37 zeigt den Kreis. Er besteht aus einer Erregerspule und einem Kern, welcher durch einen Luftspalt unterbrochen ist. Aus den Magnetisierungskennlinien lesen wir die relative Permeabilität für das Kernmaterial ab. Gesucht ist die notwendige Stromstärke für eine bestimmte Feldstärke im Luftspalt. Für die Berechnung unterteilen wir den Kreis in zwei Teile. Wir berechnen die notwendige magnetische Spannung für den Fluss im Kern und diejenige für den Fluss im Luftspalt. Die Summe der beiden Spannungen ergibt die Gesamtspannung, aus welcher sich der notwendige Strom errechnen lässt.

Vorgehen:

1. Schritt: Aufstellen des ohmschen Gesetzes für magnetische Kreise

$$U_m = \Phi \cdot R_m$$

2. Schritt: Berechnung der magnetischen Spannung für den Fluss im Luftspalt.

– Grundformel anschreiben
$$U_{mL} = \Phi \frac{l}{\mu_o \cdot A}$$

– Grundformel für Φ anschreiben
$$\Phi = B \cdot A$$

– Grundformel für Φ einsetzen
$$U_{mL} = \frac{B \cdot l}{\mu_o}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$U_{mL} = \frac{9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,18}{1,256 \cdot 10^{-8}} \frac{\text{Vs cm A cm}}{\text{cm}^2 \text{Vs}}$$

$$U_{mL} = 1290 \text{ A}$$

– Gleiche Rechnung mit den Masseinheiten des absoluten Masssystems

$$U_{mL} = B \cdot l$$

$$U_{mL} = 9 \cdot 10^3 \cdot 0,18 \text{ Gs} \cdot \text{cm} (= \text{Gilbert})$$

$$U_{mL} = 1620 \text{ Gb}$$

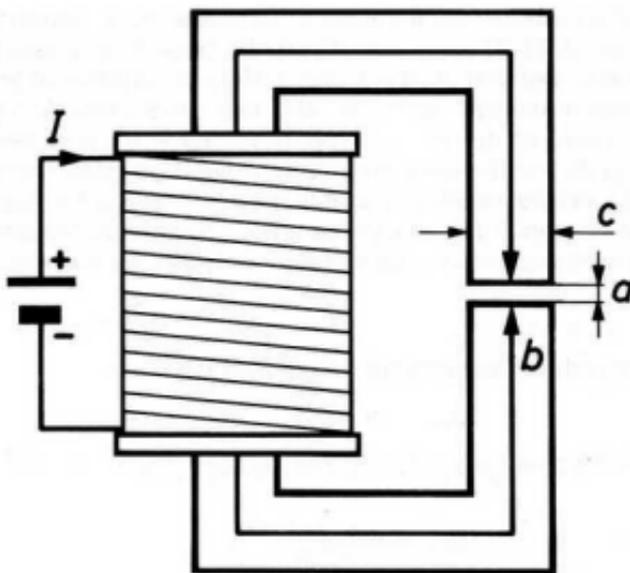
3. Schritt: Berechnung der magnetischen Spannung für den Fluss im Eisen.

– Die Endformeln können übernommen werden, der magnetische Widerstand ist lediglich mit dem Reziprokwert der relativen Permeabilität zu multiplizieren, da das Eisen um den Faktor der relativen Permeabilität «durchlässiger» ist als die Luft.

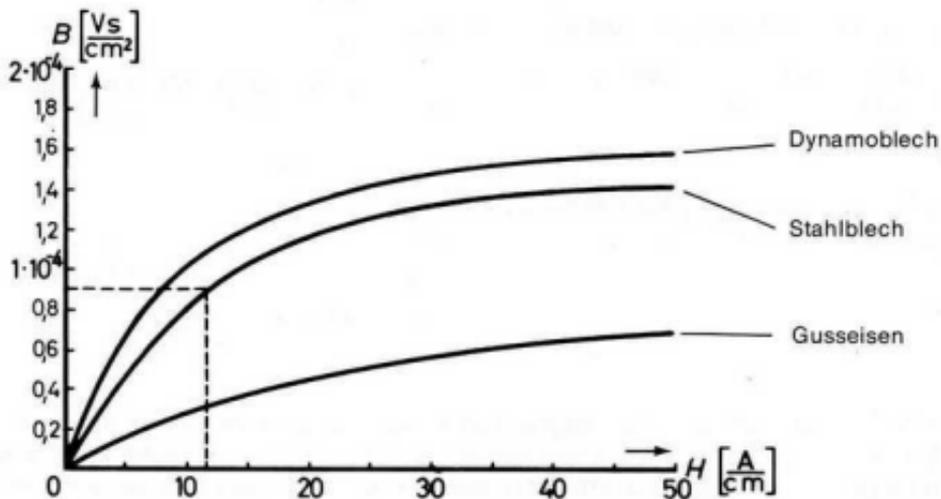
– Ergänzte Endformel anschreiben:
$$U_{mE} = \frac{B \cdot l}{\mu_o \mu_r}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$U_{mE} = \frac{9 \cdot 10^{-5} \cdot 16}{1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 650} \frac{\text{Vs cm A cm}}{\text{cm}^2 \text{Vs}}$$

$$U_{mE} = 177 \text{ A}$$



$a = 1,8 \text{ mm}$
 $b = 16 \text{ cm}$
 $c^2 = 8 \text{ cm}^2$
 $N = 10\,000$
 $B = 9 \cdot 10^{-5}$
 $= 9000 \text{ Gs}$
 $I = ?$



$$\mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_0} = \frac{0,9 \cdot 10^{-4}}{11 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8}} = \frac{\text{Vs} \cdot \text{Acm} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Vs} \cdot \text{A}} \quad \mu_r = 650$$

Bild 37

- Gleiche Rechnung mit den Mass-einheiten des absoluten Masssystems

$$U_{mE} = \frac{B \cdot l}{\mu_r}$$

$$U_{mE} = \frac{9 \cdot 10^3 \cdot 16}{650} \text{Gs} \cdot \text{cm} (= \text{Gb})$$

$$U_{mE} = \mathbf{221 \text{ Gb}}$$

4. Schritt: Berechnung der totalen magnetischen Spannung

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\Theta = U_{mL} + U_{mE}$$

$$\Theta = 1290 + 177$$

$$\Theta = 1467 \text{ A}$$

- Gleiche Rechnung mit den Einheiten des absoluten Masssystems

$$\Theta = 1620 + 221$$

$$\Theta = 1841 \text{ Gb}$$

5. Schritt: Berechnung des notwendigen Stromes

- Grundformel anschreiben
- Grundformel nach I umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\Theta = I \cdot N$$

$$I = \frac{\Theta}{N}$$

$$I = \frac{1467}{10\,000}$$

$$I = \mathbf{0,147 \text{ A}}$$

- Gleiche Rechnung mit den Einheiten des absoluten Masssystems

$$\Theta = I \cdot N \cdot \frac{4 \pi}{10}$$

$$I = \frac{\Theta \cdot 10}{N \cdot 4 \cdot \pi}$$

$$I = \frac{1841 \cdot 10}{10\,000 \cdot 4 \cdot 3,14}$$

$$I = \mathbf{0,147 \text{ A}}$$

Beide Rechnungen müssen im Endresultat gleich sein. Das Giorgi-System hat den grossen Vorteil, dass es mit den vier Grundeinheiten auskommt. Der Nachteil des absoluten Masssystems liegt auf der Hand, wir müssen mit Einheiten arbeiten, die uns zusätzlich belasten, da für jede Einheit die entsprechende Definition bekannt sein muss. Der Ungeübte mag den Eindruck haben, der magnetische Kreis sei schwierig zu verstehen und noch schwerer zu rechnen. Diese Unsicherheit hat ihre Ursache in der Vielzahl der Einheiten. Die konsequente Anwendung der Einheiten des Giorgi-Systems hilft uns die Übersicht zu gewinnen. Arbeiten Sie nur mit diesen Einheiten, werfen Sie früher Gelerntes über die Masseinheiten des absoluten Systems über Bord, und Sie werden sehen, wie rasch Sie sich in den magnetischen Kreisen zu Hause fühlen.

Tabelle 7 enthält die Grössen der magnetischen Kreise in beiden Masssystemen.

Grösse	Formelzeichen	Masseinheiten			Zusammenhang mit anderen Grössen
		Im absoluten Masssystem	Im Giorgi-Masssystem	Umrechnungsfaktor	
Feldstärke	H	Oersted (Oe)	A/m, A/cm	1 Oe = $\frac{10}{4\pi}$ A/cm	
Spannung, Durchflutung	U_m Θ	Gilbert (Gb) Ampèrewindung (AW)	A A	1 Gb = $\frac{10}{4\pi}$ A	$U_m = H \cdot l$ (l = Länge der Kraftlinien) $\Theta = I \cdot N$ (N = Windungszahl)
Fluss	Φ	Maxwell (Mx)	Vs, Weber	1 Mx = 10^{-8} Vs = 10^{-8} Wb	
Induktion	B	Gauss (Gs)	Vs/m ² , Vs/cm ² , Wb/m ²	1 Gs = 10^{-4} Vs/m ² 1 Gs = 10^{-8} $\frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$ 1 Gs = 10^{-4} Wb/m ² = 10^{-8} Vs/cm ²	$B = \frac{\Phi}{A}$
Induktionskonstante	μ_0		$\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$; $\frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$		$\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-8}$ Vs/Acm $= 1,256 \cdot 10^{-8}$ Vs/Acm $= \text{H/cm}$
Relative Permeabilität	μ_r	dimensionslos	dimensionslos		
Absolute Permeabilität	μ		$\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$; $\frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$		$\mu = \frac{B}{H}$, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
Magnetischer Widerstand	R_m	$\frac{1}{\text{cm}}$	A/Vs H ⁻¹		$R_m = \frac{U_m}{\Phi}$ $R_m = \frac{l}{\mu_r \cdot A}$ absolutes System $R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$ Giorgi-System l = Länge der Kraftlinie A = Querschnittsfläche

Tabelle 7

4. Das Wesentliche

Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein Magnetfeld in Form von konzentrischen Kreisen. Die magnetische Feldstärke an irgendeinem Punkt um diesen Leiter ist ausschliesslich durch den Strom im Leiter und den Abstand von diesem bestimmt.

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt oder bewegt sich das Magnetfeld zum Leiter, so wird in diesem Leiter eine elektrische Spannung induziert. Die induzierte Spannung ist proportional zur magnetischen Feldstärke, zur Leiterlänge und zur Geschwindigkeit, mit der sich Leiter oder Feld bewegen.

Die Dichte des magnetischen Feldes bezeichnet man mit Induktion. Für die Luftspule sind Induktion und Feldstärke gleichbedeutend.

In der stromdurchflossenen zylinderförmigen Luftspule entsteht ein Magnetfeld, das dem Magnetfeld des Stabmagneten ähnlich sieht. Die Feldstärke im Innern der Luftspule ist homogen, sie ist proportional zur Windungszahl und zum Strom in der Spule.

Das Produkt von Windungszahl und Stromstärke bezeichnet man als Durchflutung oder magnetische Spannung.

Wie beim Permanentmagneten bezeichnen wir die Summe aller Kraftlinien als magnetischen Fluss. In homogenen Magnetfeldern entspricht der Fluss dem Produkt aus Feldstärke und Fläche.

Bringt man in eine Spule einen Eisenkern, so erhöht sich die Feldliniendichte. Das Eisen hat die Eigenschaft die Kraftlinien zu konzentrieren. Diese Eigenschaft heisst Permeabilität. Der Faktor der Feldzunahme wird mit relativer Permeabilität bezeichnet.

Das Giorgi-System kennzeichnet alle magnetischen Grössen mit den vier Einheiten m, s, kg und A. Im Giorgi-System fällt der Induktionskonstante die Rolle eines Umrechnungsfaktors zu. Die Einheit dieser Induktionskonstante ist so gewählt, dass sich bei allen Berechnungen in den Resultaten wieder die Grundeinheiten einstellen.

Um die magnetischen Eigenschaften eines Werkstoffes zu studieren, wird von diesem Stoff die Hysteresisschleife aufgenommen. Diese Kurve gibt Auskunft über Remanenz und Koerzitivkraft, beides Werte, die das Verhalten des Werkstoffes im magnetischen Wechselfeld kennzeichnen.

Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes für Magnetismus lässt sich jeder elektromagnetische Kreis bestimmen. Die magnetische Spannung oder Durchflutung hat dabei die gleiche Bedeutung wie die elektrische Spannung im elektrischen Stromkreis. Der magnetische Fluss entspricht dem elektrischen Strom, während der magnetische Widerstand mit dem ohmschen Widerstand vergleichbar ist.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 428)

- a) Beschreiben Sie die Form des magnetischen Feldes, welches um einen gestreckten stromdurchflossenen Leiter entsteht.

- b) Welche Grössen bestimmen dieses Magnetfeld?
- c) Wie kann die Richtung dieses Feldes bestimmt werden?
- d) Welches ist die Einheit für die Feldstärke im Giorgi-System?
- e) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Magnetische Induktion»?
- f) Welches ist die Masseinheit im Giorgi-System für die magnetische Induktion?
- g) Mit welcher Grösse im elektrischen Stromkreis lässt sich die Durchflutung vergleichen?
- h) Welches ist die Masseinheit für die Durchflutung im Giorgi-System?
- i) Ist die relative Permeabilität eines magnetischen Werkstoffes eine konstante Grösse?
- k) Welches ist die Aufgabe der Induktionskonstante?
- l) In welchem Masssystem verwendet man die absolute Permeabilität und welches ist ihre Bedeutung?
- m) Nennen Sie die beiden charakteristischen Grössen, welche aus der Hysteresis-schleife herausgelesen werden können.
- n) Was hat es zu bedeuten, wenn diese beiden Grössen gross sind?
- o) Bei welcher Eisensorte sind die beiden Grössen klein? erklären Sie warum.
- p) Lösen Sie die folgende Aufgabe unter Zuhilfenahme der Tabelle 7

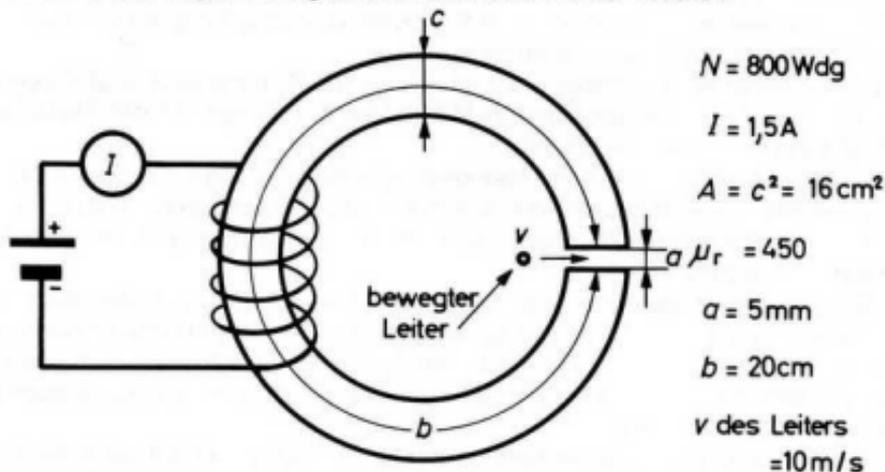


Bild 38

Durch den Luftspalt des gezeichneten Elektromagneten wird ein Leiter mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegt. Geben Sie an, wie gross die im Leiter induzierte Spannung ist, während sich dieser durch das Feld des Elektromagneten bewegt. Die angegebene relative Permeabilität wurde mit Hilfe eines Diagrammes für die Induktion bei dem aufgeführten Strom ermittelt.