

Elektrotechnik Grundlagen

Kapitel 82

Gesetze des magnetischen Feldes

2003
Kurt Steudler

(/ET_82.doc)

Inhaltsverzeichnis

82	Gesetze des magnetischen Feldes	3
82.1	Einführung und Phänomene	3
	82.1.1 Zur MAWELL' schen Theorie	3
	82.1.2 Erscheinungsformen des Magnetismus	4
	82.1.3 Das Magnetfeld der Erde	6
82.2	Induktion, Permeabilität und Feldstärke	7
	82.2.1 Magnetische Induktion B	7
	82.2.2 Magnetische Feldstärke H	7
	82.2.3 Permeabilität	8
82.3	Die integralen Grössen des magnetischen Feldes	8
	82.3.1 Durchflutung Θ und Durchflutungsgesetz	8
	82.3.2 Fluss Φ	9
	82.3.3 Magnetische Spannung U_m	11
82.4	Spezielle Felder	14
	82.4.1 Feld des geraden Leiters	14
	82.4.2 Kreisringpule in Luft (Toroid)	15
	82.4.3 Die gerade Spule	17
82.5	Magnetisches Feld und Materie	18
	82.5.1 Dia-, para- und ferromagnetische Stoffe	19
	82.5.2 Grenzschichtproblem	20
82.6	Formelsatz	23
82.7	Der allgegenwärtige Magnetismus	24
82.8	Verzeichnisse	27

Literaturverzeichnis und Software

- L 82-1 Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, The Feynman Lectures on Physics, mainly electromagnetism and matter, Addison-Wesley Publishing Company, Reading (Massachusetts), Palo Alto, London.
- L 82-2 Frohne Heinrich, Löcherer Karl-Heinz und Müller Hans, Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart – Leipzig, 1996, ISBN 3-519-46400-4.
- L 82-3 Gren Joachim und Krause Joachim, Metzler Physik, Verlag Schroedel, Hannover, 1998, ISBN 3-507-10700-7.
- L 82-4 Lüscher Edgar, Experimentalphysik II, Hochschultaschenbücher BI 115/115a, Bibliographisches Institut, Mannheim.
- L 82-5 MATHCAD[®] 2000. Mathematiksoftware, die sich für numerische Rechnungen und Laborauswertungen eignet.
- L 82-6 Meinke H., Gundlach Friedrich Wilhelm, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Studienausgabe in 3 Bänden, Springer Verlag Berlin – Heidelberg – New York, 1986, 4. Auflage, ISBN 3-540-15394-2.
- L 82-7 Schilt Heinz, Elektrizitätslehre, Birkhäuser Verlag, Basel, 1959.
- L 82-8 Tabellenbuch Informations- und Telekommunikationstechnik, Verlag Dr. Max Gehlen, Bad Homburg vor der Höhe, 1998, ISBN 3-441-92102-x.

82 Gesetze des magnetischen Feldes

„If we take away the scaffolding¹ he used to build it, we find that Maxwell's beautiful edifice stands on its own. He brought together all of the laws of electricity and magnetism and made one complete and beautiful theory.“ R. P. Feynman. [L 82-1]

82.1 Einführung und Phänomene

82.1.1 Zur MAXWELL'schen Theorie

„1860 begründet JAMES CLERK MAXWELL die vollständige Theorie der elektromagnetischen Vorgänge. Betrachtet man das 19te Jahrhundert aus der Perspektive eines Menschen im Jahre 10'000, so ist diese Leistung Maxwells die bedeutendste des 19ten Jahrhunderts. Ereignisse wie zum Beispiel der amerikanische Sezessionskrieg (1861 – 1865) oder die Vormachtstellung Deutschlands unter Bismarck (1871 – 1890) verblassen neben der Bedeutung Maxwells. Maxwell sagte die Existenz der Radiowellen voraus und deutete das Licht als elektromagnetische Wellen.“ Aus [L 82-4].

MAXWELL konnte die Beschreibung der elektrischen und magnetischen Vorgänge ruhender Körper in vier partiellen Differenzialgleichungen zusammenfassen. Für Vorgänge im Vakuum werden in der Elektrizitätslehre folgende vier Grundgrößen verwendet:

Symbol	Bezeichnung	Dimension
ρ	Elektrische Ladungsdichte	Asm^{-3}
\vec{J}	Elektrische Stromdichte	Am^{-2}
E	Elektrische Feldstärke	Vm^{-1}
B	Magnetische Induktion	Vsm^{-2}

Die MAXWELL Gleichungen lauten:

$\text{div } \vec{E} = \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \rho$	(1)	$\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$
$\text{rot } \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	(2)	$\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$
$\text{div } \vec{B} = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	(3)	
$\text{rot } \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	(4)	

Die Dielektrizitätskonstante ϵ_0 hat den Wert $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$

Die Lichtgeschwindigkeit c hat den Wert $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Mit den vier Beziehungen von Maxwell ist die gesamte Elektrotechnik erklärt. Allerdings erfordert deren Anwendung ein gehöriges Mass an Kenntnissen in Mathematik. Untersucht werden daher in der Anwendung nur spezielle Fälle.

¹ scaffolding : Gerüst, edifice: Gebäude

82.1.2 Erscheinungsformen des Magnetismus

Legt man ein Blatt Papier auf einen Dauermagneten² und bestreut dieses mit Eisenfeilspänen, erhält man das folgende Bild:

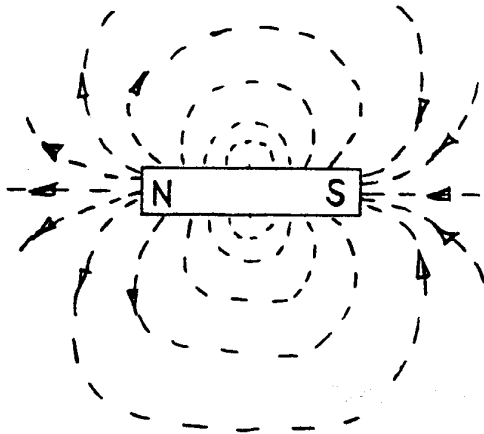


Fig. 82-1 Feld eines Dauermagneten

Es laufen Linien von einem Pol zum anderen, die sich nicht kreuzen oder verzweigen.

Die Linien treten beim Nordpol aus und beim Südpol wieder in den Magneten ein. Das Magnetfeld kann als Vektorfeld beschrieben werden.

Wird der Versuch mit zwei Permanentmagneten wiederholt, ergeben sich zwei Beobachtungen. Einerseits ändert sich das Bild der Eisenfeilspä-

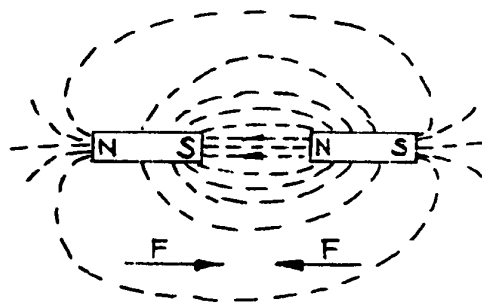


Fig. 82-2 Feld von zwei Dauermagneten

ne. Die Feldlinien sind abhängig von der relativen Lage der beiden Stabmagnete zueinander.

Andererseits kann zwischen den beiden Magneten eine Kraftwirkung festgestellt werden.

Dabei stoßen sich gleichnamige Pole ab und ungleichnamige Pole ziehen sich an.

Die Kraft ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes und direkt proportional zur „Stärke“ der Magnete.

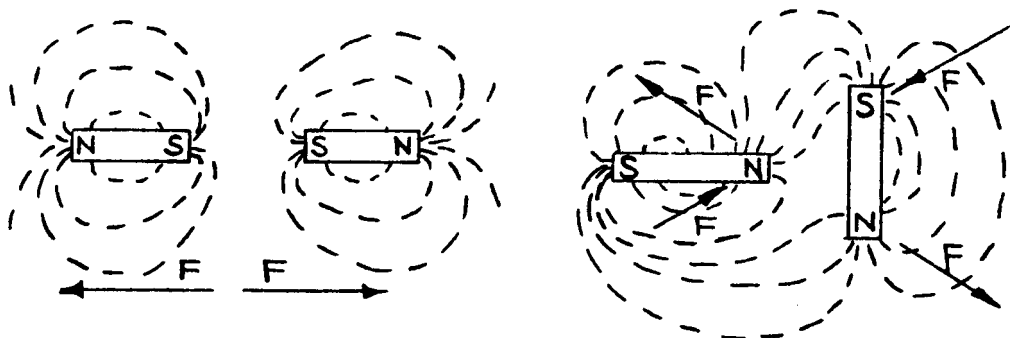


Fig. 82-3 Kräfte zwischen Dauermagneten

Das magnetische Feld hat an jeder Stelle seines Raumbereiches eine bestimmte Richtung und eine bestimmte Intensität. Die Größe für diese Intensität nennen wir „**magnetische Induktion**“; sie wird abgekürzt mit dem Buchstaben **B**. Die magnetische Induktion hat einen Betrag und eine Richtung; sie ist ein Vektor: \vec{B} .

² Dauermagnet = Permanentmagnet

Wir lassen einen vom Strom I durchflossenen und unendlich langen Leiter normal durch ein Blatt Papier (eine Ebene) treten und bestreuen dieses mit Eisenfeilspänen.

Es zeigt sich das folgende Feldlinienbild:³

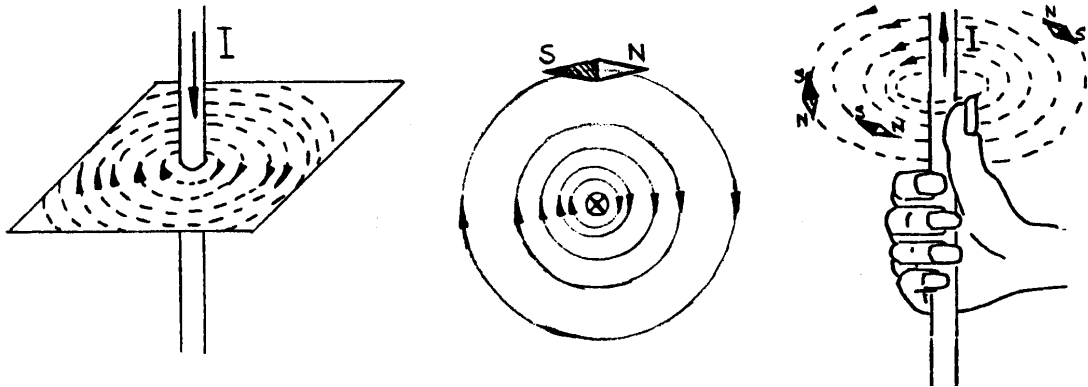


Fig. 82-4 Feld eines langen geraden Leiters

Bringt man kleine Nadeln in das Feld des langen, geraden und stromdurchflossenen Leiters, stellt sich deren Richtung tangential zu den Flusslinien ein. Ändert der Strom seine Richtung, drehen sich die Magnetnadeln um 180° .

Das betrachtete Feld weist die gleichen Eigenschaften auf, wie jenes eines Dauermagneten.

Ausserhalb des Leiters nimmt die magnetische Induktion B umgekehrt proportional zum Abstand vom Leiter ab.

Zur Bestimmung der Richtung von \vec{B} benutzt man die rechte Handregel (Faustregel): Umfasst man den Leiter mit der rechten Hand und zeigt der Daumen in der technischen Stromrichtung, dann zeigen die gekrümmten Finger in der Richtung des Vektors \vec{B} .

Wird der stromdurchflossene Leiter als Kreis ausgebildet, ergibt sich folgendes Magnetfeld:

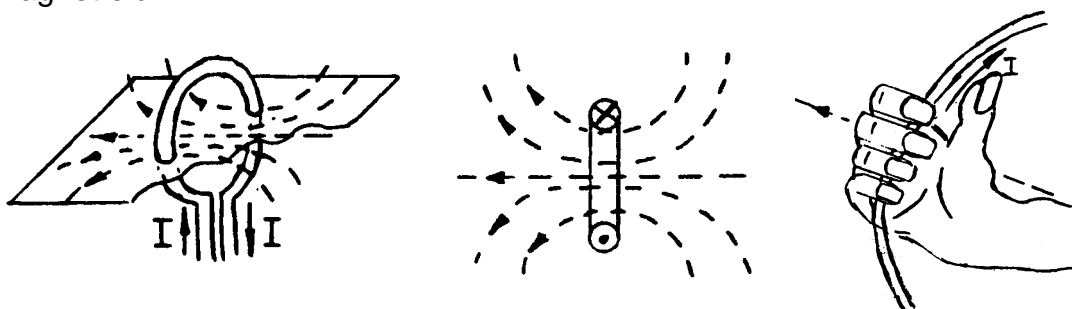


Fig. 82-5 Feld eines Rings

3

bedeutet: Der Strom fliesst normal in die Ebene hinein.

bedeutet: Der Strom fliesst normal aus der Ebene.

82.1.3 Das Magnetfeld der Erde

Die Erde ist von einem starken Magnetfeld umgeben, so als habe sie einen riesigen Stabmagneten in ihrem Innern.

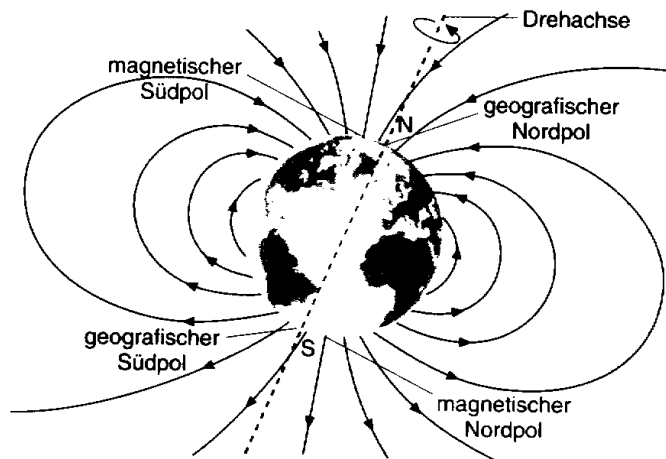


Fig. 82-6 Magnetisches Feld der Erde (Aus [L 82-3])

Das Phänomen des Erdmagnetismus resultiert aus der Tatsache, dass sich die Erde wie ein riesiger Magnet verhält.

Der englische Physiker und Naturphilosoph William Gilbert⁴ zeigte als erster um 1600 diese Ähnlichkeit, obwohl die Wirkung des Erdmagnetismus schon viel früher für einfache Kompass genutzte wurde.⁵

Das Magnetfeld der Erde kann beobachtet werden, wenn man einen kleinen Magneten drehbar aufhängt. Der Magnet richtet sich dann parallel zum Induktionsvektor aus.

Der magnetische Südpol der Erde liegt in der Nähe des geographischen Nordpols; die Feldlinien zeigen daher (ungefähr) nach Norden. Dies ist das Funktionsprinzip des Kompasses. Die Lage der magnetischen Pole der Erde stimmt demnach nicht mit den geographischen Polen überein.

Die Lage der magnetischen Pole ist nicht fest und weist von Jahr zu Jahr beachtliche Veränderungen auf. Veränderungen im Magnetfeld der Erde bewirken eine Änderung der Feldrichtung. Die Schwankungen des Erdmagnetfeldes werden als erdmagnetische Variationen bezeichnet. Dabei wird zwischen schnellen zeitlichen Variationen mit Perioden von einer Sekunde bis mehr als 24 Stunden und langsam verlaufenden Änderungen der Stromsysteme im Inneren der Erde unterschieden.

Messungen der Feldstärke werden mit Magnetometern durchgeführt, welche die gesamte Feldstärke und die Feldstärken in horizontaler und vertikaler Richtung messen. Die Stärke des Magnetfeldes der Erde ist an verschiedenen Stellen ihrer Oberfläche unterschiedlich gross.

Die magnetische Induktion B liegt im Bereich um ein tausendstel Tesla (mT).

⁴ GILBERT, William (1544-1603), englischer Physiker und Arzt, der durch seine Experimente zum Wesen der Elektrizität und des Magnetismus bekannt geworden ist. Er wurde in Colchester (Essex) geboren, studierte am Saint John's College der Universität Cambridge und richtete 1573 in London eine Arztpraxis ein. Im Jahre 1601 wurde Gilbert zum Leibarzt von Elisabeth I. ernannt.

⁵ Der Überlieferung zufolge benutzten die Chinesen bereits um 1100 den Kompass als Navigationsmittel.

82.2 Induktion, Permeabilität und Feldstärke

Wir betrachten zunächst nur magnetische Felder, die von einem Gleichstrom hervorgerufen werden.

Terme $\frac{d}{dt}$ werden daher stets zu Null und wir sprechen von Magnetostatik.

82.2.1 Magnetische Induktion B

Betrachtet seien magnetische Felder, bei denen im ganzen Feldraum eine gleich grosse und gleich gerichtete **magnetische Induktion B** auftritt.^{6, 7}

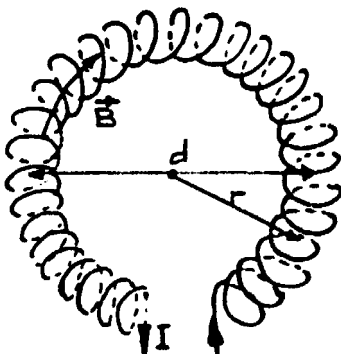


Fig. 82-7 Kreisringluftspule

Solche Felder finden sich in Kreisringspulen (Torus) mit konstantem Spulenquerschnitt, wenn der Durchmesser einer einzelnen Windung sehr viel kleiner ist als der Durchmesser d der Spule. Es sind:

- N die Windungszahl,
- $\ell = 2 \cdot r \cdot \pi = d \cdot \pi$ die Spulenlänge und
- I der felderregende Strom

In der Kreisringspule⁸ ist die magnetische Induktion B proportional zum erregenden Strom I und proportional zum Faktor $\frac{N}{\ell}$ der als „Windungsdichte“ gedeutet werden kann:

$$B \sim I \cdot \frac{N}{\ell} \quad (82-1)$$

82.2.2 Magnetische Feldstärke H

Für die Erregung des Magnetfeldes ist das Produkt aus Windungszahl und Strom massgebend. Das Produkt $N \cdot I$ wird Durchflutung Θ genannt.⁹

$$\Theta = N \cdot I \quad (82-2)$$

Ursache oder bestimmende Grösse für die magnetische Induktion B ist der Faktor $\frac{N \cdot I}{\ell} = \frac{\Theta}{\ell}$. Diese bestimmende Grösse wird **magnetische Feldstärke H** genannt.

⁶ Solche Felder sind homogen.

⁷ Die magnetische Induktion wird auch „magnetische Flussdichte“ genannt. $[B] = \text{Vs m}^{-2} = \text{T}$ (Tesla). (Zur Verwirrung tragen jene Werke bei, die hier den Begriff „Feldstärke“ verwenden).

⁸ Torus = Kreisring

⁹ Die Durchflutung Θ wird in Ampère oder Amperewindungen gemessen. $[\Theta] = \text{A} = \text{AW} = \text{AWdg}$.

$$H = I \cdot \frac{N}{\ell} = \frac{\Theta}{\ell} \quad (82-3)$$

Die Dimension der magnetischen Feldstärke ergibt sich zu $[H] = \text{Am}^{-1}$.

82.2.3 Permeabilität

Mit 82.2.1 ist die magnetische Induktion B proportional zur magnetischen Feldstärke H . Die beiden Grössen B und H werden durch den Proportionalitätsfaktor μ miteinander verbunden.

$$\begin{aligned} B &= \mu \cdot H \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} \end{aligned} \quad (82-4)$$

Der Proportionalitätsfaktor μ wird Permeabilität genannt.¹⁰

Die Permeabilität μ besteht aus μ_0 und μ_r . Die Permeabilität des Vakuums μ_0 gibt den Zusammenhang zwischen B und H im Vakuum an.¹¹ In verschiedenen Materialien weicht μ von μ_0 um einen Faktor μ_r ab. Die relative Permeabilität μ_r ist eine Materialkonstante.¹²

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (82-5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (82-6)$$

Die Permeabilität des Vakuums ist

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad (82-7)$$

Damit ergibt sich die Dimension der magnetischen Induktion B zu $[B] = \text{Vs m}^{-2} = \text{T}$ (Tesla).¹³

82.3 Die integralen Grössen des magnetischen Feldes

82.3.1 Durchflutung Θ und Durchflutungsgesetz

Die Durchflutung aus 82.2.2 lässt sich auch schreiben als $\Theta = N \cdot I = \frac{N \cdot I}{\ell} \cdot \ell = H \cdot \ell$ und allgemein als Durchflutungsgesetz

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} \quad (82-8)$$

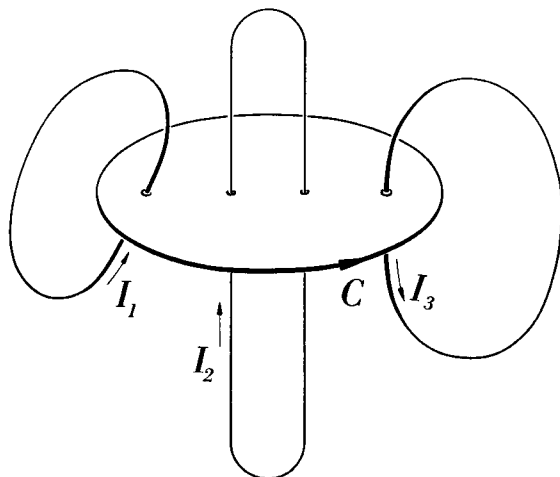
¹⁰ „Durchlässigkeit“; permano: hineinfließen, eindringen, sich verbreiten.

¹¹ μ_0 wird auch „magnetische Feldkonstante“ genannt.

¹² μ_r wird auch Permeabilitätszahl genannt. $\mu_r = 1$ im Vakuum. $\mu_r = 1,0000004$ in Luft.

¹³ TESLA, Nikola (1856-1943), in Kroatien geborener amerikanischer Elektrotechniker und Erfinder, der als Wegbereiter auf dem Gebiet der Elektrotechnik gilt.

Das Durchflutungsgesetz besagt: die Durchflutung ergibt sich aus dem Integral über den geschlossenen Weg ℓ , entlang dem die Feldstärke wirksam ist. Dabei umschliesst der Weg alle felderzeugenden Ströme.^{14, 15}



Die Ströme I_1 und I_3 sind mit dem Weg C „verkettet“. I_2 ist nicht mit C verkettet. Ebenso sind Ströme ausserhalb des Weges C nicht verkettet.

$$\Theta = I_1 - I_3 .$$

Fig. 82-8 Durchflutungsgesetz (Aus [L 82-7], S.101).

82.3.2 Fluss Φ

Der magnetische Fluss Φ ergibt sich aus dem Produkt der „magnetischen Induktion“ (der magnetischen Flussdichte) B mit jener Fläche A , durch die sie wirksam ist.

$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (82-9)$$

In homogenen oder nahezu homogenen Feldern sind B und H konstante Grössen. Es darf daher geschrieben werden

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (82-10)$$

In vielen Fällen verlaufen die Vektoren \vec{B} und \vec{A} parallel und es wird

$$\Phi = B \cdot A$$

Die Dimension des Flusses Φ ergibt sich zu $[\Phi] = V \cdot s = \text{Wb}$ (Weber)¹⁶

¹⁴ Das Durchflutungsgesetz wird auch als „Gesetz von Ampère“ bezeichnet. Dies zu Ehren von André Marie AMPÈRE, 22.1.1775 - 10.6.1836, französischer Physiker und Mathematiker. Untersucht die Einwirkung elektrischer Ströme aufeinander und erklärt den Magnetismus durch atomare elektrische Kreisströme.

¹⁵ Das Integral über einen geschlossenen Weg heisst „Kreisintegral“ oder „Ringintegral“.

¹⁶ WEBER, Wilhelm Eduard. Geboren am 24. Oktober 1804 in Wittenberg, gestorben am 23 Juni 1891 in Göttingen. Deutscher Physiker, der zusammen mit Carl Friedrich Gauss das Erdmagnetfeld untersucht und 1833 einen elektromagnetischen Telegraphen erfindet. Physikprofessor in Göttingen.

Mit dem Satz von GAUSS wird ¹⁷

$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B} \cdot dV \quad (82-11)$$

Die Divergenz von B ($\vec{\nabla} \cdot \vec{B}$) gibt die Feldflussveränderung in einem Volumenelement an.

Damit $\vec{\nabla} \cdot \vec{B}$ einen Wert annimmt, muss eine Feldflussveränderung festgestellt werden können, das heisst es müssen Quellen oder magnetische Punktladungen und daraus eine magnetische Raumladungsdichte vorhanden sein. ¹⁸

Da Magnete immer mit Nord- und Südpol versehen sind, das heisst die Pole nicht getrennt werden können, gibt es keine Raumladungsdichte und es gilt ¹⁹

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (82-12)$$

Aus diesem Grund muss der magnetische Fluss ein Volumenelement in das er eintritt auch vollständig – ohne Gewinn und ohne Verlust - wieder verlassen. Darum sind die magnetischen Feldlinien immer geschlossen, das heisst sie haben keinen Anfang und kein Ende.

Der magnetische Fluss Φ kann sich daher in Knotenpunkten verzweigen. Dabei müssen die Summe der zufließenden Teilflüsse und die Summe der wegfließenden Teilflüsse einander gleich sein.

$$\sum \Phi_{\text{zufließend}} = \sum \Phi_{\text{wegfließend}} \quad (82-13)$$

Beispiel

Gegeben sei eine Kreisringluftspule mit dem mittleren Durchmesser $d = 15 \text{ cm}$. Im Toroid herrsche eine magnetische Induktion von $B = 250 \mu\text{T}$ (Vs m^{-2} , Wbm^{-2}). Die einzelne Drahtwindung weise einen Durchmesser von $\Delta = 15 \text{ mm}$ auf. Insgesamt sind $N = 1000$ Windungen eng gewickelt aufgebracht. ($\rho_{\text{Cu}} = 17,5 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$)

- Wie gross wird der magnetische Fluss Φ ?
- Wie gross ist die magnetische Durchflutung Θ ?
- Wie lang wird der Draht ? $\lambda = ?$
- Welches ist der Durchmesser δ des Drahtes für eine Stromdichte von $J = 5 \text{ MA m}^{-2}$?
- Der Kreisring werde aus einer idealen Quelle gespeist. Wie gross wird die Quellenspannung U ?

Beispiel

Gegeben sei ein unendlich langer, gerader Leiter, der normal auf π_1 steht und vom Strom I in positiver e_3 (z) – Richtung durchflossen wird.

Im Abstand $r_0 = 20 \text{ mm}$ herrsche eine magnetische Induktion von $B_0 = 200 \mu\text{T}$.

Wie gross wird der Fluss Φ in einer quadratischen Fläche mit der Kantenlänge $a = 10 \text{ mm}$, die normal zu B steht und deren Mittelpunkt sich im Abstand r befindet ?

¹⁷ GAUSS, Karl Friedrich, Mathematiker und Astronom, 30.4.1777 - 23.2.1855, Prof. und Leiter der Sternwarte Göttingen. 1801: "Disquisitiones arithmeticae". Erster Telegraph mit WEBER. Gauss'sches Masssystem (absolutes System, cgs).

¹⁸ $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \text{div } \vec{B}$, Divergenz von B. Sie gibt die Feldflussveränderung in einem Volumenelement an.

¹⁹ Aus neuerer Forschung ist bekannt, dass es magnetische Punktladungen geben könnte. Die Feststellung ist experimentell gezeigt aber noch nicht gesichert.

82.3.3 Magnetische Spannung U_m

Die magnetische Spannung U_m wird definiert als ²⁰

$$U_m = \int_1^2 \vec{H} \cdot d\vec{\ell} \quad (82-14)$$

Die magnetische Spannung kann in inhomogenen Feldern von Bedeutung sein. Im homogenen Feld gelten $\Theta = N \cdot I$ und $\Theta = \vec{N} \cdot \vec{\ell}$. Für das homogene Feld wird damit

$$\Theta = \vec{N} \cdot \vec{\ell} = N \cdot I \quad (82-15)$$

Im inhomogenen Feld darf diese Vereinfachung nicht angewendet werden:

Zunächst sind \vec{H} und \vec{B} im inhomogenen Feld nicht konstant; beide Grössen beschreiben ein Vektorfeld. Dann darf auch I allgemein nicht als konstant angenommen werden; die Stromdichte j kann eine Funktion des Ortes sein.

Allgemein gilt daher ²¹

$$\Theta = \iint_A \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (82-16)$$

Aufgrund der bisherigen Erkenntnis und mit STOKES gilt ²²

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \iint_A (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot d\vec{A} = \iint_A \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (82-17)$$

Diese Gleichheit gilt für jeden Raum und jedes Material.

Es lässt sich erkennen, dass sich die Durchflutung Θ bei gegebenem Feldverlauf, das heisst wenn das Vektorfeld der magnetischen Feldstärke \vec{H} gegeben ist, immer bestimmen lässt.

Umgekehrt ist das nicht der Fall, das heisst aus der gegebenen Durchflutung Θ lässt sich das \vec{H} - Feld nicht bestimmen.

Ursache für das Entstehen eines magnetischen Feldes ist die Durchflutung Θ ; die-

²⁰ Ist der Integrationsweg geschlossen, ergibt sich die Umlaufspannung $U_{m0} = \Theta$. $[U_m] = A$.

²¹ Statt j wird für die Stromdichte in der Literatur manchmal auch S verwendet. $[j] = Am^{-2}$

²² STOKES, Sir George Gabriel (1819-1903), britischer Mathematiker und Physiker. Stokes wurde am 13. August 1819 in Skreen (County Sligo, Irland) geboren. Er studierte Mathematik an der Universität Cambridge. Er behandelte einige der grundlegendsten Probleme der mathematischen Physik. Stokes starb am 1. Februar 1903 in Cambridge.

se Ursache wird beschrieben durch die magnetische Feldstärke \vec{H} . Massgebend für die Wirkung des magnetischen Feldes ist der magnetische Fluss Φ ; die Wirkung wird beschrieben durch die magnetische Induktion \vec{B} .

In der Praxis muss oft für homogene oder nahezu homogene Felder, das heisst Felder in denen die magnetische Feldstärke \vec{H} beziehungsweise die magnetische Induktion \vec{B} konstant sind, aus einem bestimmten, gewünschten magnetischen Fluss Φ die erforderliche Durchflutung Θ berechnet werden.

Im **homogenen Feld** gilt²³

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{\ell} \cdot A = \frac{\mu \cdot A}{\ell} \cdot \Theta = \Lambda \cdot \Theta \quad (82-18)$$

Der Fluss Φ und die Durchflutung Θ sind über eine Konstante Λ miteinander verknüpft. Die Konstante Λ ist durch die geometrische Anordnung und die Permeabilität gegeben. Sie wird **magnetischer Leitwert** genannt.

Mit $R_M = \Lambda^{-1}$ ist der magnetische Widerstand gegeben.^{24, 25}

Im homogenen Feld werden daher

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{\mu \cdot A}{\ell} & R_M &= \frac{\ell}{\mu \cdot A} \\ \Phi &= \Lambda \cdot \Theta & \Theta &= R_M \cdot \Phi \end{aligned} \quad (82-19)$$

²³ Felder sind homogen, wenn die Feldlinien mit konstanter Dichte parallel verlaufen.

²⁴ Λ : Lambda, griechisch, gross. $[\Lambda] = \text{WbA}^{-1} = \text{VsA}^{-1} = \text{H} = \text{Henry}$ zu Ehren von Joseph HENRY. Der Begriff „magnetischer Leitwert“ ist als Analogon aus der Gleichstromtechnik übernommen.

²⁵ HENRY, Joseph (1797-1878), amerikanischer Physiker, dessen wichtigste Arbeit sich mit dem Elektromagnetismus beschäftigt. Als führender amerikanischer Physiker entdeckte er die Prinzipien der elektromagnetischen Induktion, ehe der britische Physiker Michael Faraday seine Entdeckung des elektromagnetisch erzeugten Stromes verkündete.

Übung A

Gegeben sei eine Kreisringluftspule mit dem mittleren Durchmesser $d = 15 \text{ cm}$. In der Toroidspule herrsche eine magnetische Induktion von $|\vec{B}| = B = 250 \mu\text{T}$ (Vsm^{-2} , Wbm^{-2}).

Die einzelne Drahtwindung weise einen Durchmesser von $\Delta = 15 \text{ mm}$ auf und bestehe aus $N = 1000$ Windungen. ($\rho_{\text{Cu}} = 17,5 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$)

- a) Wie gross wird der magnetische Fluss Φ ?
- b) Wie gross muss die magnetische Durchflutung Θ sein ?
- c) Wie lang wird der Draht ? $\lambda = ?$
- d) Welches ist der Durchmesser δ des Drahtes für eine Stromdichte von $j = 5 \text{ Amm}^{-2} = 5 \text{ MAmm}^{-2}$?
- e) Der Kreisring werde gespeist aus einer idealen Spannungsquelle. Wie gross wird die Quellenspannung U ?

Übung B

Gegeben sei ein unendlich langer, gerader Leiter, der normal auf π_3 steht und vom Strom I in positiver \vec{e}_3 - Richtung durchflossen wird.

Im Abstand $r_0 = 20 \text{ mm}$ herrsche eine magnetische Induktion von $B = 200 \mu\text{T}$.

Wie gross wird der Fluss Φ in einer quadratischen Fläche mit der Kantenlänge $a = 10 \text{ mm}$, die normal zu B steht und deren Mittelpunkt sich im Abstand r beziehungsweise r_0 befindet ?

82.4 Spezielle Felder

82.4.1 Feld des geraden Leiters

Ein unendlich langer, gerader, runder Leiter, der im Ursprung normal auf der Grundrissebene Π_1 steht, werde in der positiven z - Richtung vom Strom I durchflossen.

Wie gross wird die magnetische Feldstärke \vec{H} .

Wir unterscheiden zwei Fälle:

- \vec{H} ausserhalb des Leiters
- \vec{H} innerhalb des Leiters

Zur Betrachtung der beiden Fälle benötigen wir die Formeln

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I \quad \text{und} \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}$$

Entlang eines Kreises um den Leiter bleibt H jeweils konstant; dies aus Gründen der Symmetrie. Um den unendlich (genügend) langen Leiter enthält \vec{H} keine Komponente in der z - Richtung.

a) Das \vec{H} - Feld ausserhalb des Leiters

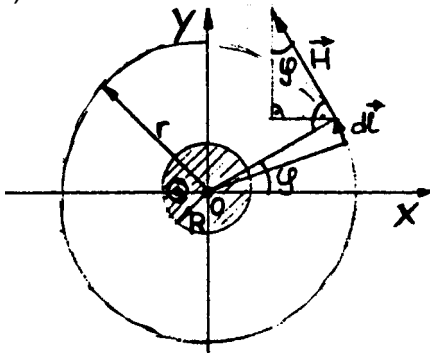


Fig. 82-9 Feld ausserhalb eines Leiters

r : Abstand vom Leitermittelpunkt. $r > R$
 R : Radius des Leiters

Da \vec{H} ausserhalb des Leiters die gleiche Richtung hat wie $d\vec{\ell}$ wird

$$\Theta = I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \oint H \cdot dl = H \cdot 2\pi r$$

und daraus

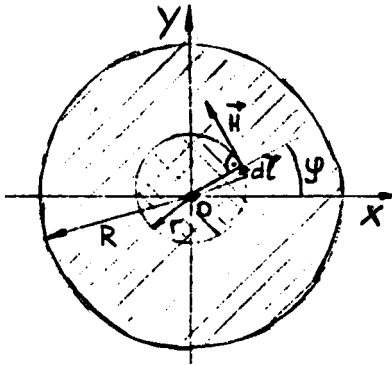
$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (82-20)$$

Das \vec{H} - Feld ausserhalb des Leiters wird²⁶

$$\vec{H} = H \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{I}{2\pi} \cdot \begin{pmatrix} -\frac{y}{x^2 + y^2} \\ \frac{x}{x^2 + y^2} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (82-21)$$

²⁶ Zeigen Sie, dass ausserhalb des Leiters $j = 0$ wird. Formulieren Sie das Feld für Leiter, die normal auf der Aufrissebene, beziehungsweise der Seitenrissebene stehen.

b) Das \vec{H} – Feld innerhalb des Leiters



r : Abstand vom Leitermittelpunkt. $r < R$
 R : Radius des Leiters

Da \vec{H} innerhalb des Leiters die gleiche Richtung hat wie $\vec{d\ell}$ wird

$$\Theta = I \cdot \frac{r^2}{R^2} = \oint \vec{H} \cdot \vec{d\ell} = \oint H \cdot d\ell = H \cdot 2\pi r$$

und daraus

Fig. 82-10 Feld innerhalb eines Leiters

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot R^2} \cdot r \quad (82-22)$$

Das \vec{H} - Feld innerhalb des Leiters wird

$$\vec{H} = H \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{I}{2\pi \cdot R^2} \cdot \begin{pmatrix} -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (82-23)$$

c) Die Überlagerung von \vec{H} für mehrere Leiter

Mehrere Vektorfelder dürfen vektoriell addiert werden. Der Absolutwert der magnetischen Feldstärke \vec{H} an einem beliebigen Ort ergibt sich aus dem Absolutwert von \vec{H} nach der entsprechenden Vektoraddition.

82.4.2 Kreisringspule in Luft (Toroid)

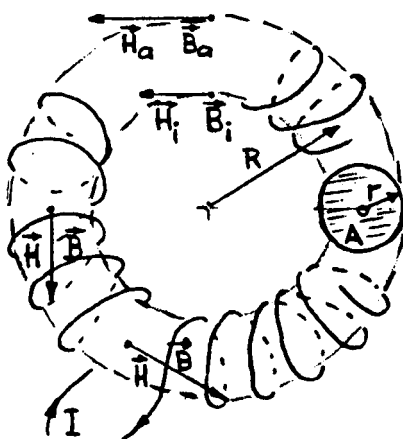


Fig. 82-11 Kreisringspule

In der Toroidspule²⁷ dürfen das Feld der magnetischen Induktion \vec{B} und jenes der magnetischen Feldstärke \vec{H} zunächst als konstant angenommen werden (homogenes Feld). $R \gg r$

Es werden

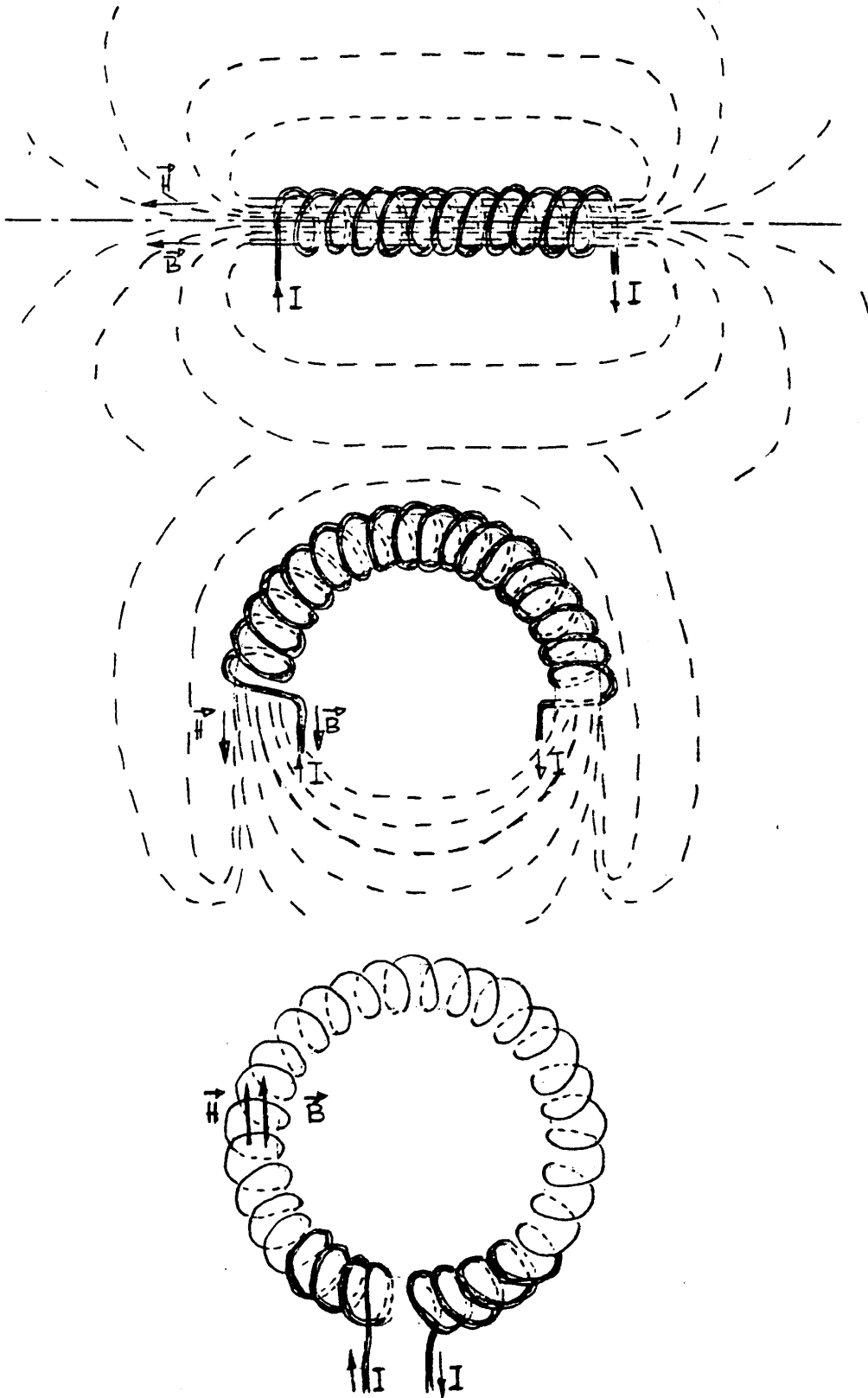
$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot \vec{dA} = B \cdot A = B \cdot r^2 \pi \quad \text{und}$$

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot \vec{d\ell} = H \cdot \ell = H \cdot 2R\pi$$

²⁷ Toroid: lat.:tortuosus: voller Windungen; gr.: τορνευτοζ : gedreht; fr.: tortu: gewunden

Zwischen Φ und Θ besteht die Beziehung

$$\Phi = \frac{B \cdot r^2 \pi}{H \cdot 2R\pi} \cdot \Theta = \frac{\mu \cdot r^2}{2 \cdot R} \cdot \Theta = \Lambda \cdot \Theta$$



82.4.3 Die gerade Spule

82.4.3.1 Gesetz von BIOT - SAVART

Im allgemeinen ist das Durchflutungsgesetz von Ampère für die Berechnung magnetischer Felder von beliebigen dünnen, stromdurchflossenen Leitern nicht geeignet.

Das geeignete Gesetz von BIOT und SAVART lautet:²⁸

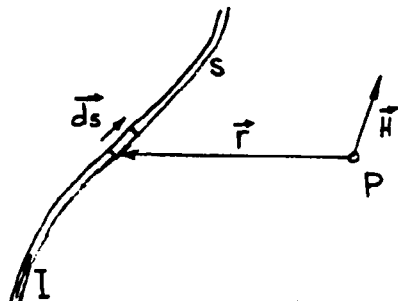


Fig. 82-12 Gesetz von Biot - Savart

$$\vec{H}_{inP} = \frac{I}{4\pi} \int_s \frac{\vec{r} \times ds}{r^3} \quad (82-24)$$

$$d\vec{H}_{inP} = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\vec{r} \times ds}{r^3}$$

82.4.3.2 Beitrag einer Einzelwindung

In der nachstehenden Anordnung wird nach dem H – Feld - Beitrag einer einzelnen Windung entlang der y – Achse gesucht.

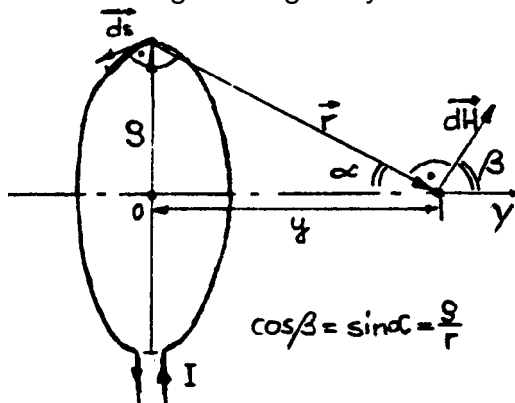


Fig. 82-13 H – Feld einer Einzelwindung

\vec{r} und $d\vec{s}$ stehen normal zueinander; ebenso stehen $d\vec{H}$ und \vec{r} normal zueinander.

Auf der y – Achse wird

$$dH_y = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{r \cdot ds}{r^3} \cdot \cos\beta = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\rho}{r^3} \cdot ds$$

und daraus

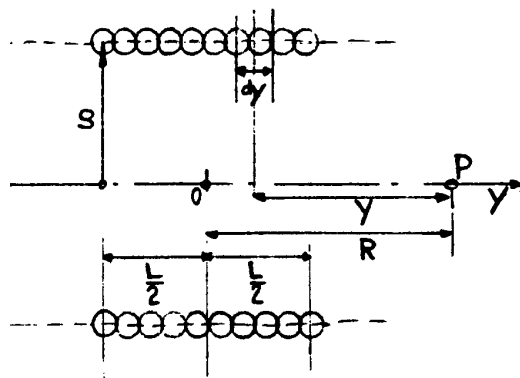
$$H_y = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{\rho}{r^3} \cdot \oint ds = \frac{I}{2} \cdot \frac{\rho^2}{r^3}$$

oder umgeformt:

$$H_y = \frac{I}{2} \cdot \frac{1}{\rho \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{y^2}{\rho^2}} \right)^3} \quad (82-25)$$

²⁸ BIOT, Jean-Baptiste (1774-1862), französischer Physiker, Mathematiker und Astronom, der mehrere naturwissenschaftliche Werke verfasst hat. SAVART, Félix (1791-1841), frz. Physiker.

82.4.3.3 Lange gerade Spule: Feld entlang der Achse



Die gerade Spule wird unterteilt in Längenelemente dy . Jedes Längenelement enthält $(N/L)dy$ Windungen. Der Beitrag eines Längenelementes dy zum H – Feld in der y – Richtung im beliebigen Punkt P wird

$$dH_y = \frac{I}{2} \cdot \frac{1}{\rho \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{y^2}{\rho^2}} \right)^3} \cdot \frac{N}{L} \cdot dy$$

Fig. 82-14 H – Feld einer geraden Spule

Die ganze Spule bewirkt im Punkt P eine H – Feld von

$$H_y = \frac{I}{2} \cdot \frac{N}{L} \cdot \int_{R - \frac{L}{2}}^{R + \frac{L}{2}} \frac{1}{\rho \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{y^2}{\rho^2}} \right)^3} dy$$

$$H_y = \frac{I \cdot N}{2 \cdot L} \cdot \left[\frac{R + \frac{L}{2}}{\sqrt{\rho^2 + \left(R + \frac{L}{2} \right)^2}} - \frac{R - \frac{L}{2}}{\sqrt{\rho^2 + \left(R - \frac{L}{2} \right)^2}} \right] \quad (82-26)$$

Das H – Feld entlang der Achse einer geraden Spule ist nicht homogen. In einer gegebenen Anordnung wird $H = H(R)$.

a) Innerhalb einer langen, engen, geraden Spule wird für

$$\frac{L}{2} \gg R \text{ und } L \gg \rho : \quad H_y = \frac{I \cdot N}{L}$$

b) Am Ende einer langen, engen, geraden Spule wird für

$$\frac{L}{2} = R \text{ und } L \gg \rho : \quad H_y = \frac{I \cdot N}{2 \cdot L}$$

82.5 Magnetisches Feld und Materie

Für die relative Permeabilität μ_r (eine dimensionslose Zahl) ergeben sich für verschiedene Materialien unterschiedliche Werte. Dazu einige Beispiele:

	Material	relative Permeabilität μ_r
I	Wismut (Bi)	0,999840
	Kupfer (Cu)	0,999990
	Silber (Ag)	0,999975
	Wasser (H ₂ O)	0,999991
II	Luft	1,0000004
	Aluminium (Al)	1,000022
	Platin (Pt)	1,000300
III	Eisen (Fe)	25'000 – 250'000
	Eisen techn.	
	Kobalt (Co)	50 – 10'000 je nach C – Gehalt } 10 – 300'000
	Nickel (Ni)	
	Fe, Co und Ni –Legierungen	

Warum nimmt die Materialkonstante μ_r für unterschiedliche Materialien unterschiedliche Werte an ?

Ursache für ein Magnetfeld ist bewegte Ladung, das heisst ein Strom $I = dQ/dt$. Betrachten wir die Materie mikroskopisch, stellen wir fest, dass sich Elementarladungen (Elektronen) bewegen und je Atom ein Magnetfeld erzeugen.

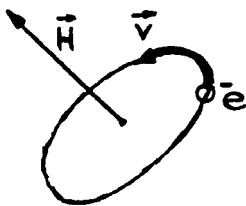


Fig. 82-15 Elementarmagnet

Die mikroskopischen Kreisströme erzeugen am betrachteten Ort in der Materie ein Magnetfeld H . Makroskopisch betrachtet treten diese mikroskopischen Magnetfelder nicht in Erscheinung; die Richtungen der mikroskopischen Magnetfelder sind statistisch verteilt und heben sich gegenseitig auf.

In einem äusseren Magnetfeld zeigt die Materie unterschiedliche Wirkungen. Wird zum Beispiel Eisen in eine stromdurchflossene Spule gebracht, richten sich „Elementarmagnete“ in eine Richtung aus, was die hohen μ_r – Werte erklärt. Diese Wirkung ist bei den Materialien I und II nicht erkennbar.

82.5.1 Dia-, para- und ferromagnetische Stoffe

Wir unterscheiden

I diamagnetische Stoffe $\mu_r < 1$	II paramagnetische Stoffe $\mu_r > 1$	III ferromagnetische Stoffe
magnetisch neutrale Stoffe $\mu_r \approx 1$		$\mu_r \gg 1$

I Diamagnetische Stoffe.

Die regellose Orientierung der mikroskopischen Magnetfelder bleibt auch im äusseren Magnetfeld beinahe erhalten. Im Inneren dieser Stoffe bildet sich ein Magnetfeld, das dem äusseren Magnetfeld schwach entgegenwirkt. Die magnetische

Induktion B ist in den diamagnetischen Stoffen kleiner als im Vakuum. $\mu_r < 1$ und konstant.

II Paramagnetische Stoffe.

Die regellose Orientierung der mikroskopischen Magnetfelder bleibt auch hier beinahe erhalten. Es bildet sich im Inneren dieser Stoffe ein Magnetfeld, welches das äussere Feld schwach verstärkt. In den paramagnetischen Stoffen ist die magnetische Induktion B grösser als im Vakuum. $\mu_r > 1$ und konstant.

III Ferromagnetische Stoffe.

Die mikroskopischen Magnetfelder richten sich stark nach dem Aussenfeld aus und unterstützen dieses. Die magnetische Induktion B wird in den ferromagnetischen Stoffen bei gleichem Aussenfeld sehr viel grösser als im Vakuum.

Die relative Permeabilität μ_r wird abhängig vom Aussenfeld.

Zudem fallen die mikroskopischen Magnetfelder nicht mehr vollständig in die ursprüngliche, regellose Ausgangslage zurück, wenn das äussere Magnetfeld verschwindet; (es bleibt ein dem Stoff, der Materie, eigenes Magnetfeld zurück (Remanenz)).

82.5.2 Grenzschichtproblem

Werden Stoffe mit unterschiedlicher relativer Permeabilität μ_r aneinandergesetzt, verläuft die magnetische Induktion B in den beiden Materialien in unterschiedlicher Richtung.

Es stellt sich die Frage, wie sich das B -Feld beim Übergang von einem Material in ein anderes verhält.

Dabei genügt es, wenn wir die Grenzschicht zwischen den beiden Materialien betrachten; (innerhalb der einzelnen Stoffe verhält sich die magnetische Induktion diesen Stoffen gemäss).

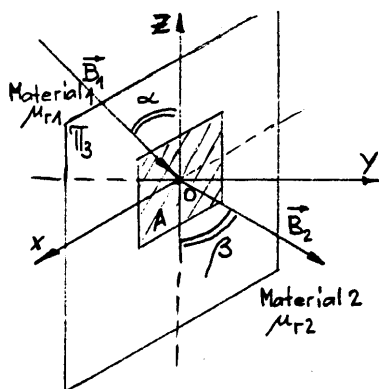


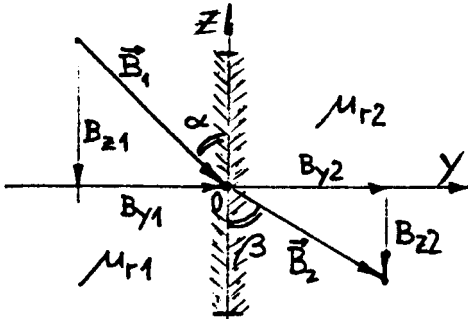
Fig. 82-16 Grenzschichtproblem

Die Seitenrissebene Π_3 stelle die Grenzschicht dar.

Das Induktionsfeld habe keine Komponente in der x -Richtung²⁹ und trete gegenüber der Seitenrissebene unter dem Winkel α in die Grenzschicht ein und unter dem Winkel β wieder aus dieser aus.

²⁹ Diese Bedingung lässt sich durch geeignete Wahl des Koordinatensystems immer erreichen.

Der in die Grenzschicht eintretende Feldvektor \vec{B}_1 wird in seine Komponenten zerlegt; dies so, dass die eine Komponenten \vec{B}_{y1} normal zur Grenzschicht steht und die andere Komponente \vec{B}_{z1} parallel zu dieser verläuft (Tangentialkomponente).



Vor und nach der Grenzschicht ist der Fluss Φ durch die Fläche A gleich gross.

Aus diesem Grund bleibt die Normalkomponente nach der Grenzschicht erhalten, das heisst die Normalkomponente ist vor und nach der Grenzschicht gleich gross.

$$B_{y1} = B_{y2} \quad (82-27)$$

Die Tangentialkomponente ist vor und nach der Grenzschicht materialabhängig und verschieden gross.

Die Tangentialkomponente parallel zur Grenzschicht überträgt sich im Verhältnis der relativen Permeabilität:

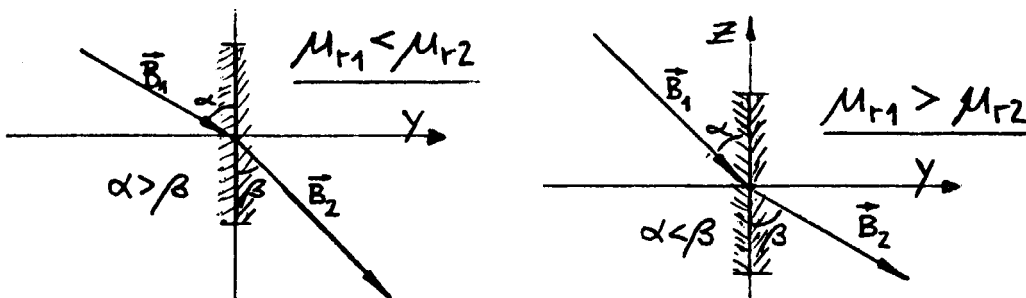
$$\frac{B_{z1}}{B_{z2}} = \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} \quad (82-28)$$

Für den Betrag der Induktion gilt

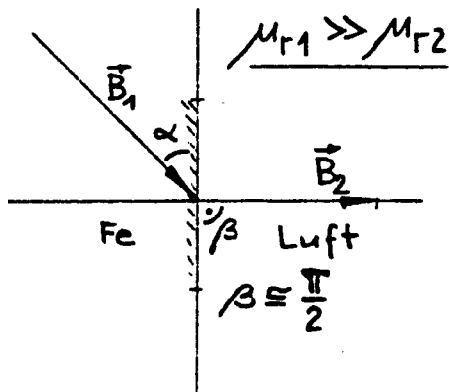
$$\frac{B_2}{B_1} = \sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right)^2 \right] \cdot \cos^2 \alpha} \quad (82-29)$$

Aufgabe: Beweisen Sie diese Formel.

Abhängig von den beiden aneinandergfügten Materialien ergeben sich die beiden Fälle:



Dringt der Induktionsvektor \vec{B} in ein Material mit grösserer relativer Permeabilität μ_r , wird er zur Grenzschicht abgelenkt und umgekehrt.



Sonderfall: $\mu_{r1} \gg \mu_{r2}$

Besteht zwischen zwei Materialien ein sehr grosser Unterschied in der relativen Permeabilität, dann tritt der Induktionsvektor nahezu normal in das Material mit der sehr viel kleineren relativen Permeabilität ein.

Umgekehrt wird der Induktionsvektor nahezu parallel zur Grenzschicht geführt, wenn er in ein Material mit sehr grosser relativer Permeabilität dringt.

Bezüglich der magnetischen Feldstärke \vec{H} gelten folgende Zusammenhänge

$$H_{z1} = H_{z2} \quad (82-30)$$

$$\frac{H_{y1}}{H_{y2}} = \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \quad (82-31)$$

82.6 Formelsatz

Bezeichnung	inhomogenes Feld allgemeiner Fall	homogenes Feld Spezialfall	Dimension
magnetische Induktion	\vec{B}	B	$Vs\,m^{-2} = T$
magnetischer Fluss	$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$	$\Phi = B \cdot A$	$Tm^2 = Vs = Wb$
magnetische Feldstärke	\vec{H}	H	Am^{-1}
magnetische Durchflutung	$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell}$ $= \iint_A \vec{j} \cdot d\vec{A}$	$\Theta = N \cdot I = H \cdot \ell$	$A, AWdg$
keine magnetische Punktladung	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ $\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B}$		
	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}$ $\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} =$ $\iint_A (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot d\vec{A}$		
Permeabilität	μ_0 : Induktionskonstante, Permeabilität des Vakuums μ_r : relative Permeabilität. Materialgrösse	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	$\frac{Vs}{Am} = \frac{H}{m}$ 1
Zusammenhang von B und H	$B = \mu \cdot H$	$B = \mu \cdot H$	
magnetischer Leitwert		$\Lambda = \frac{\mu \cdot A}{\ell}$	H
magnetischer Widerstand		$R_M = \Lambda^{-1}$	H^{-1}
		$\Phi = \Lambda \cdot \Theta$	
		$\sum \Phi_{zu} = \sum \Phi_{weg}$	

Tabelle 82-1 Formelsatz

82.7 Der allgegenwärtige Magnetismus

Eine altbekannte physikalische Erscheinung voller Überraschungen

Durch den Kompass und die im Haushalt verwendeten Permanentmagnete ist der Magnetismus eine vertraute Erscheinung. Der Magnetismus ist auch die Grundlage der Informationsspeicherung und der elektrischen Maschinen. Und selbst ausserhalb der Erdatmosphäre spielt der Magnetismus eine wichtige Rolle. Ohne Magnetfeld wäre die Erde schutzlos dem Sonnenwind ausgesetzt.

Unter Magnetismus versteht man die Eigenschaften des Magnetfeldes und seiner Wechselwirkung mit Ladungen und Stoffen. Das Magnetfeld ist dabei ein Zustand des Raumes, der durch Magnete oder durch bewegte elektrische Ladungen herbeigeführt wird. Im Gegensatz zum optischen und zum akustischen Feld können wir das Magnetfeld nicht mit den Sinnen wahrnehmen; wir können von ihm nur dadurch Kenntnis erlangen, dass wir seine Auswirkungen beobachten. Eine dieser Auswirkungen ist die Kraft, die manche Stoffe im Magnetfeld erfahren. So richtet sich eine Kompassnadel unter dem Einfluss des erdmagnetischen Feldes in Nord-Süd-Richtung aus.

Gibt es magnetische Monopole?

Ein Magnet ist ein Dipol. Zu einem magnetischen Nordpol gehört also immer ein Südpol. Darin unterscheidet sich das magnetische Feld vom elektrischen Feld, das auch von einer isolierten Ladung ausgehen kann. Es gibt zwar immer wieder Versuche, magnetische Monopole in der kosmischen Strahlung zu finden oder im Laboratorium herzustellen, bisher freilich ohne Erfolg; die Hoffnungen, sie doch noch zu entdecken, sind geschrumpft.

Der Name Magnet kommt von der altgriechischen Stadt Magnesia an der Westküste Kleinasiens unweit Ephesos, wo neben andern Mineralien auch magnetische Stoffe gefunden wurden. Es gibt eine Klasse von Stoffen mit besonders ausgeprägten magnetischen Eigenschaften; sie heissen ferromagnetisch. Zu diesen Stoffen gehört in erster Linie das Eisen; aber auch Nickel, Kobalt und andere Elemente sind ferromagnetisch. Sie eignen sich für die Herstellung von Permanentmagneten, also von Magneten, die – einmal magnetisiert – ihre Magnetisierung behalten.

Ein Magnetfeld wird aber nicht nur durch die

Anwesenheit magnetischer Stoffe erzeugt, sondern auch durch elektrische Ströme; diese Art der Erzeugung ist es, die am Anfang des Elektrizitätszeitalters vor 120 Jahren gestanden hat. Im Zentrum steht dabei die Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und Leiter: Ein stromdurchflossener Leiter erfährt im Magnetfeld eine Kraft. Darauf beruhen die Elektromotoren. Sie sind die Kraftquelle aller industriellen Antriebe, und auch ins Alltagsleben sind sie mittlerweile tief eingedrungen. So gibt es in einem durchschnittlichen Haushalt 20 bis 40 Elektromotoren. Sie finden sich im Heizkessel, in den Haushaltsmaschinen, im Videorecorder, im CD-Spieler, im Computer.

Das Gegenstück der Elektromotoren sind die Generatoren: Sie beruhen darauf, dass in einem Leiter, der sich im Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert wird. Dieser Zusammenhang ist die Grundlage der Generatoren, in denen die Elektrizität, die die Kraftwerke den Verbrauchern zuführen, erzeugt wird.

Das Magnetfeld der Erde

Dass die Erde über ein magnetisches Feld verfügt, ist bekannt, seitdem Kompassnadeln verwendet wurden; und diese datieren bis weit in die vorchristliche Zeit zurück. Aber über die Ursache dieses Feldes herrschte lange Zeit Unklarheit. Anfänglich bestand die Meinung, im Innern der Erde befände sich ein riesiger Magnet. Heute ist bekannt, dass es elektrische Ströme sind, die im äusseren Kern der Erde fliessen. Der äussere Kern reicht von einer Tiefe von 3000 Kilometer bis 5000 Kilometer. Im Gegensatz zum inneren Kern ist er flüssig und besteht grösstenteils aus geschmolzenem Eisen. Durch die Rotation der Erde wird diese Flüssigkeit in Bewegung versetzt, und es fliessen elektrische Ströme in komplizierten Strömungsmustern, über deren Verlauf erst Spekulationen bestehen. Es sind

diese Ströme, die das magnetische Feld erzeugen.

Die Wirkungen des erdmagnetischen Feldes sind nicht nur auf der Erdoberfläche zu spüren. Es ist dieses Feld, das den von der Sonne kommenden Sonnenwind aus Elektronen und Protonen ablenkt. Die Partikeln werden in Zonen ausserhalb der Erde – den sogenannten Van-Allen- Gürteln – festgehalten. Würde diese Strahlung auf die Erde gelangen, hätte das sehr schädliche Auswirkungen auf das Leben.

Auf Grund von Messungen an Gesteinen weiss man, dass sich das erdmagnetische Feld in unregelmässigen Abständen umpolt. Besonders gut dokumentiert ist eine Umpolung, die vor 15 Millionen Jahren stattfand. Der Vorgang dauerte etwa 15 000 Jahre. Während dieser Zeit wanderte der magnetische Südpol der Erde auf einem ganz unregelmässigen Pfad von Süden nach Norden und wurde damit zum Nordpol. Das Verhalten der äusseren Atmosphäre, der Ionosphäre, und die Bahnen des Sonnenwindes waren während dieser Zeit vollkommen verschieden vom heutigen Zustand.

Auch die Sonne hat ein kräftiges magnetisches Feld, das alle elf Jahre umgepolt wird. Aber nicht nur die Sonne als Ganzes ist ein magnetischer Dipol; Sonnenflecken treten in Paaren auf, die ebenfalls magnetische Dipole sind, wobei freilich die zwei zueinander gehörenden Pole weit auseinander liegen können. Die Auswirkungen der Partikelströme, die von diesen Sonnenflecken ausgehen, sind selbst auf der Erde spürbar. Die Teilchenströme beeinflussen die Ionosphäre, die ihrerseits einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbreitung von langreichweitigen Radiowellen hat. Gegenwärtig strebt die Sonne in ihrem elfjährigen Zyklus einem Maximum entgegen. Es ist deshalb mit einer Störung von Kommunikationssystemen zu rechnen.

Magnetische Informationsspeicherung

Eine gewaltige Ausweitung erfuhren die Anwendungen des Magnetismus durch sein Eindringen in die Informationsspeicherung. Die Tonaufzeichnung auf Magnetbändern begann in den dreissiger Jahren des ablaufenden Jahrhunderts. Die anfänglich verwendeten Stahlbänder wurden bald durch Kunststoffbänder ersetzt, die mit einer Magnetschicht auf der Basis von Eisenoxid überzo-

gen waren. Ein weiterer, bedeutsamer Schritt war die Erweiterung dieses Prinzips für die Aufzeichnung von Fernsehprogrammen.

Von 1950 an fand die magnetische Aufzeichnung Eingang in die Computertechnik. Die Signale werden in Form von kleinen Permanentmagneten aufgezeichnet, wobei die Symbole 0 und 1 durch die zwei möglichen Richtungen der Magnetisierung unterschieden werden. Mit Magnetbändern lassen sich grosse Datenmengen speichern. Dabei ist freilich ein schneller Zugriff nicht möglich, weil das Band bis zur gesuchten Stelle umgespult werden muss. Für den raschen Zugriff wurden die schnell rotierenden Magnettrommeln eingeführt. Diese wurden jedoch bald durch rotierende Platten ersetzt.

Das Streben war von Anfang an darauf gerichtet, die Dichte der Aufzeichnung schrittweise zu erhöhen, und die darin erzielten Fortschritte haben die Erwartungen und Prognosen, die man in den fünfziger Jahren wagte, bei weitem übertroffen. Die Kapazität der Festplatte der Heimcomputer hat 20 Gigabyte überschritten, die Schranke von 100 Gigabyte dürfte in einigen Jahren erreicht sein. Das sind Datenmengen, die man vor noch nicht allzu langer Zeit nur in Grosscomputern finden konnte. In einer solchen Festplatte beträgt die Fläche, die ein Impuls beansprucht, wenig mehr als $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$.

Um eine Abnutzung zu vermeiden, darf der Magnetkopf, der diese Impulse schreibt und abliest, die rotierende Oberfläche nicht berühren. Er wird mittels eines ausgeklügelten Mechanismus durch aerodynamische Kräfte auf einem Luftkissen in einem Abstand festgehalten, der wenigen Durchmessern der Luftmoleküle entspricht.

In der Zukunft bleibt die Informationsspeicherung vielleicht nicht auf die Verwendung von magnetischen Materialien mit ihren beiden Magnetisierungszuständen beschränkt. Unter dem Namen «Spintronics» ist eine neue Klasse von Computer-Speicherelementen in Untersuchung, die von der Tatsache Gebrauch machen, dass ein Elektron nicht nur eine elektrische Ladung, sondern auch ein magnetischer Dipol ist. Man kann sich vorstellen, dass das Elektron eine rotierende Ladung ist. Daher heisst diese Eigenschaft Spin. Wenn nun ein Elektronenstrom in einer dünnen Schicht fliesst, in welcher ein magnetisches Feld erzeugt wird, so werden die Spins der Elektronen parallel und in gleicher Orien-

tierung ausgerichtet, und beim Verlassen des Magnetfeldes behalten sie diese Orientierung bei.

Diese Tatsache macht es möglich, Schaltelemente zu bauen, die sich ähnlich verhalten wie gewöhnliche Transistoren. Wenn nämlich diese Elektronen in ein zweites magnetisches Feld geleitet werden, so werden sie durch dieses zweite Feld je nach ihrer Orientierung entweder ungehindert weitergeleitet oder aber gebremst. Wir haben also einen Schalter vor uns, und damit kann im Prinzip ein digitales System aufgebaut werden. Es besteht die Aussicht, dass auf dieser Grundlage die Miniaturisierung, verglichen mit der in der auf Halbleitern beruhenden Mikroelektronik, nochmals ein gutes Stück weitergetrieben werden kann. Solche Schaltelemente sind freilich erst im Versuchsstadium.

Ein Blick in die Zukunft

Wie sieht die Zukunft des Magnetismus aus? In der Energietechnik ist der Weg klar vorgezeichnet: Die elektrischen Maschinen, die heute das Rückgrat der Stromerzeugung und der elektrischen Antriebstechnik bilden, werden ihr Aussehen nicht wesentlich ändern, etwas grundsätzlich Neues ist nicht in Sicht. In der Informations- und Kommunikationstechnik hingegen ist manches im Fluss, und es könnten uns auf der Grundlage des Magnetismus in den kommenden Jahrzehnten erhebliche Überraschungen bevorstehen.

Ambros P. Speiser

Der Autor ist emeritierter Titularprofessor an der ETH Zürich. Adresse: Sonnhalde 9, CH-5400 Baden.

Neue Zürcher Zeitung FORSCHUNG UND TECHNIK Mittwoch,
06.09.2000 Nr.207

82.8 Verzeichnisse

Figurenverzeichnis

Fig. 82-1	Feld eines Dauermagneten.....	4
Fig. 82-2	Feld von zwei Dauermagneten	4
Fig. 82-3	Kräfte zwischen Dauermagneten.....	4
Fig. 82-4	Feld eines langen geraden Leiters	5
Fig. 82-5	Feld eines Rings	5
Fig. 82-6	Magnetisches Feld der Erde (Aus [L 82-3])	6
Fig. 82-7	Kreisringluftspule	7
Fig. 82-8	Durchflutungsgesetz (Aus [L 82-7], S.101).....	9
Fig. 82-9	Feld ausserhalb eines Leiters	14
Fig. 82-10	Feld innerhalb eines Leiters	15
Fig. 82-11	Kreisringspule.....	15
Fig. 82-12	Gesetz von Biot - Savart.....	17
Fig. 82-13	H – Feld einer Einzelwindung.....	17
Fig. 82-14	H – Feld einer geraden Spule	18
Fig. 82-15	Elementarmagnet	19
Fig. 82-16	Grenzschichtproblem.....	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 82-1	Formelsatz.....	23
--------------	-----------------	----

