



Magnetische Größen und ihre Einheiten

Elektrische Größen bereiten dem Praktiker kaum Schwierigkeiten, ebenso Vorstellungen über Strom- und Spannungsbeträge elektrischer Bauelemente und Anlagen. Schwieriger ist es mit magnetischen Größen. Ist die magnetische Flussdichte von 0,9 T ein hoher Wert? Magnetische Größen, ihre Beziehungen zueinander und praxisrelevante Beträge bilden den Inhalt des Beitrages.

feilspäne aus. Sie ordnen sich in Linien an, die als magnetische Feldlinien bezeichnet werden.

Magnetische Feldlinien sind die Wirkungslinien der magnetischen Kräfte.

Der elektrische Strom als Ursache des magnetischen Feldes ist richtungsbehaftet. Mithin muss den magnetischen Feldlinien eine Richtung zugeordnet werden, die aus Bild 1 zu entnehmen ist. Um magnetische Felder mit ihren Wirkungen als physikalische Erscheinungen vergleichen zu können, müssen sie durch physikalische Größen quantitativ erfasst werden. Die magnetischen Grundgrößen sind der magnetische Fluss, die elektrische Durchflutung und der magnetische Widerstand.

Magnetische Grundgrößen

Die menschlichen Sinnesorgane können das Fließen des elektrischen Stromes direkt nicht wahrnehmen. Er lässt sich nur durch seine Wirkungen feststellen. Von diesen entsteht die magnetische Wirkung stets ohne zusätzliche Bedingungen.

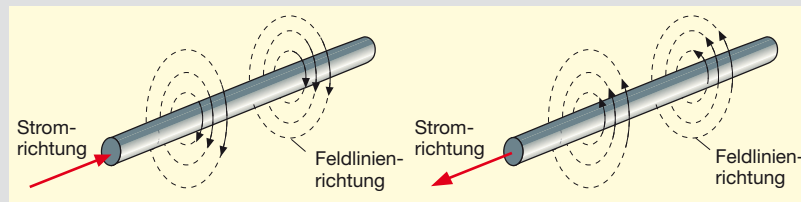
Jede gerichtete Bewegung von Ladungsträgern erzeugt in ihrer Umgebung ein magnetisches Feld.

Dieser besondere Raumzustand ist durch Kraftwirkungen auf andere Ladungsträger sowie auf ferromagnetische Stoffe nachweisbar. Die vom Magnetfeld ausgeübten Kräfte richten zum Beispiel kleine Eisen-

Der magnetische Fluss – Formelzeichen Φ (Phi) – kann bildhaft als Gesamtheit aller magnetischen Feldlinien gedeutet werden.

Die Bezeichnung *magnetischer Fluss* bzw. *Magnetfluss* ist in Anlehnung an den *Stromfluss* gewählt worden. Dabei muss beachtet werden, dass zwischen Stromkreis – magnetischer Kreis, elektrische Strömungslinien – magnetische Feldlinien und Stromfluss – Magnetfluss keine vollständige Analogie besteht.

Im Gegensatz zum Begriff elektrischer Stromfluss, der die gerichtete Bewegung der Ladungsträger, also die tatsächliche Änderung ihrer räumlichen Lage im Leiter beschreibt, bewegen sich die magnetischen Feldlinien als magnetischer Fluss nicht.



1 Strom- und Feldlinienrichtung

INHALT

Grundwissen
Lernfelder 1-5

Magnetismus

Magnetische Größen und ihre Einheiten 1

Fachbegriffe

Was versteht man unter 5

Fachwissen
Lernfelder 6-13

Software

Programm statt Kurvenlineal 7

Elektrotechnik

Technische Entwicklungen in der Elektrotechnik 9

WISO

Wirtschafts-, Sozial- und Gemeinschaftskunde 10

Arbeitssicherheit

Arbeitsstättenverordnung (3) 11

Fremdsprache

Technisches Englisch 13

Prüfung
Lernfelder 1-13

Fachtest

Lernfeld 4 14

Lernfeld 8 15

Lösungen 16

Eine kurze Anmerkung: Der Begriff *Stromfluss* als Pleonasmus [Strom = Fließen von Ladungsträgern + Fluss], ein Sachverhalt, der durch eine doppelte Fügung (Tautologie, wie weißer Schimmel, negatives Elektron) wiedergegeben wird, kann stilistisch nicht abgelehnt werden. Der Praktiker verstärkt bewusst diese physikalische Erscheinung: Der elektrische Strom fließt, aber die elektrische Spannung steht an!

Impressum

ep – LERNEN und KÖNNEN
Magazin für die Aus- und Weiterbildung
HUSS-MEDIEN GmbH

Am Friedrichshain 22; 10407 Berlin
Tel. 030 42151-378, Fax 030 42151-251

Redaktion:

Rüdiger Tuzinski (Redaktionsleiter),
Hein Elster, Heino Hackbarth (Redakteure),
Sabine Funke (Layout), Petra Richter (Zeichnungen)

Schülerservice

Abo-Verwaltung und Vertrieb:

Directa Buldt Fachverlag
Lübecker Str. 8; 23611 Bad Schwartau
Tel. 0451 49999-0, Fax 0451 49999-40

Erscheinungsweise:

Monatlich als Beilage der Zeitschrift Elektropraktiker

Voraussetzung für das Entstehen magnetischer Felder ist die elektrische Durchflutung.

Die elektrische Durchflutung – Formelzeichen Θ (Theta) – ist die Ursachengröße magnetischer Felder.

Die elektrische Durchflutung wird in ihrer Richtung durch die Stromrichtung (vgl. Bild 1) und in ihrem Betrag durch die Summe der vorzeichenbehafteten Stromstärken (Bild 2) festgelegt. Allgemein gilt elektrische Durchflutung

$$\Theta = \sum \pm I_i \quad (1)$$

Index $i = 1, 2, 3, 4, \dots$ im Speziellen für das Bild 2

$$\Theta = (+I_1) + (-I_2) + (+I_3).$$

Da insbesondere in Bauelementen und Maschinen starke magnetische Felder notwendig sind, müssen Ströme gleicher Richtung die elektrische Durchflutung bilden. Der gerade Leiter wird zur Spule (Bild 3) gewickelt, in deren Windungen der fließende Strom dieselbe Richtung hat.

Gleichung (1) geht damit in die auf Spulen mit der Windungszahl N anwendbare Formel für die elektrische Durchflutung über:

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

Formel (2) gilt dann für den geraden Leiter, wenn $N = 1$ gesetzt wird.

Die Größen des magnetischen Feldes lassen in ihren kausalen Beziehungen (Ursache – Wirkung) vielfältige Analogien zu den Größen des elektrischen Strömungsfeldes zu. Dadurch wird der Zugang zu den physikalischen Beziehungen der in der beruflichen Praxis wesentlich seltener gebrauchten magnetischen Größen erleichtert. Auf einen bedeutsamen Unterschied muss hingewiesen werden. Trotz des Vorhandenseins einer Spannung als Ursachengröße fließt der elektrische Strom als

Wirkungsgröße nur, wenn der Stromkreis geschlossen ist. Die Bedingung, der Widerstand $R < \infty$, muss erfüllt sein. Im magnetischen Kreis ist eine ähnliche Bedingung nicht erforderlich. Der magnetische Fluss Φ als Wirkungsgröße entsteht stets, wenn eine elektrische Durchflutung Θ (Ursachengröße) wirksam ist. Analog der Bedingungsgröße Widerstand des elektrischen Stromkreises, der als Quotient Bedingungsgröße = Ursachengröße : Wirkungsgröße

$$R = U : I$$

definiert ist, werden auch im magnetischen Feld Ursachen- und Wirkungsgröße durch den sogenannten magnetischen Widerstand R_m (Reluktanz) gekoppelt. Dabei ist es sinnvoll, ihn nicht als Bedingungsgröße sondern als Vermittlungsgröße zu bezeichnen.

Der magnetische Widerstand kennzeichnet die Durchlässigkeit eines Raumes gegenüber den magnetischen Feldlinien.

Wie oben wird er als Quotient definiert: Vermittlungsgröße = Ursachengröße : Wirkungsgröße

$$R_m = \frac{\Theta}{\Phi} \quad (3)$$

Der Betrag des magnetischen Widerstandes wird durch die Ausdehnung des Raumes und den Stoff bestimmt, der von den magnetischen Feldlinien durchsetzt wird. Nach Bild 4 sind es die geometrischen Größen Länge l und Querschnitt A sowie die magnetische Durchlässigkeit des Raumes, die Permeabilität μ (my) als Stoffgröße.

Analog der Widerstandsgleichung eines linienhaften elektrischen Leiters lautet die Bemessungsgleichung des magnetischen Widerstandes

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (4)$$

Auf zwei wesentliche Besonderheiten muss hingewiesen werden.

1. Trotz großer Unterschiede gibt es keinen Stoff, auch nicht das Vakuum, der nicht von den magnetischen Feldlinien durchsetzt werden kann. Es gibt also keinen magnetischen „Isolierstoff“. Deshalb ruft eine elektrische Durchflutung ausnahmslos ohne zusätzliche Bedingungen einen magnetischen Fluss hervor.

2. Im Gegensatz zur elektrischen Leitfähigkeit κ wird die Permeabilität μ der Stoffe auf die magnetische Durchlässigkeit des leeren Raumes (Vakuum), auf die magnetische Feldkonstante μ_0 bezogen. Die Vergleichszahl μ/μ_0 , die sogenannte relative Permeabilität μ_r , beschreibt als Zahlenwert der Stoffkonstanten wievielfach besser oder schlechter die magnetischen Feldlinien einen Stoff durchsetzen als das Vakuum. Gewöhnlich wird deshalb die Permeabilität

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

als Produkt mit den Faktoren magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \text{ Vs/Am}$ und relative Permeabilität μ_r angegeben.

Wenn physikalische Größen messbare Merkmale von Sachen, Vorgängen oder Zuständen sind, gehören zu den Größen stets entsprechende Einheiten. Vor der Einführung des Internationalen Einheitensystems SI trugen die spezifischen, heute meist unbekannten magnetischen Einheiten die Namen bedeutender Naturwissenschaftler, wie zum Beispiel *Maxwell*, *Gauß*, *Oerstedt* oder *Gilbert*. Diese sind seit 1958 nicht mehr zulässig.

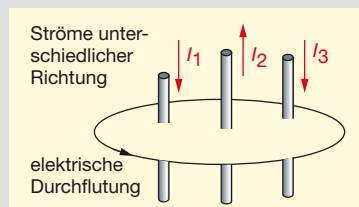
Die SI-Einheiten der magnetischen Grundgrößen sind:

Ursachengröße elektrische Durchflutung: Nach der Gleichung (2) ist die Einheit $[\Theta] = 1 \text{ A}$ (Ampere). Die elektrische Durchflutung von 1 A entsteht, wenn eine Windung oder ein gerader Leiter von 1 A durchflossen wird.

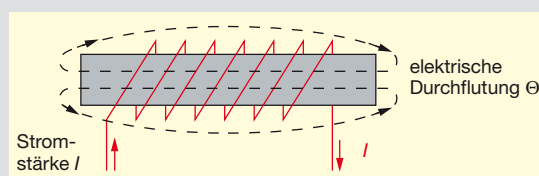
Wirkungsgröße magnetischer Fluss: Grundlage der Einheit ist der Induktionsvorgang. Bei ihm wird durch Änderung des magnetischen Flusses eine elektrische Spannung induziert $[\Phi] = 1 \text{ Vs} = 1 \text{ Wb}$ (1 Voltsekunde = 1 Weber)

Der magnetische Fluss beträgt dann 1 Wb, wenn er durch die gleichmäßige Abnahme auf null in einer Windung die Spannung 1 V induziert.

Vermittlungsgröße magnetischer Widerstand: Nach der Definitionsgleichung (3) ist $[R_m] = 1 \text{ A/Vs} = 1 \text{ A/Wb}$. Der magnetische Widerstand eines Raumes beträgt dann 1 A/Wb, wenn die elektrische Durchflutung von 1 A einen magnetischen Fluss von 1 Wb hervorruft. In der Literatur wird mit der Einheit der Induktivität $[L] = 1 \text{ Vs/A} = 1 \text{ H}$ (Henry) die Einheit des magnetischen Widerstandes auch mit 1/H angegeben.

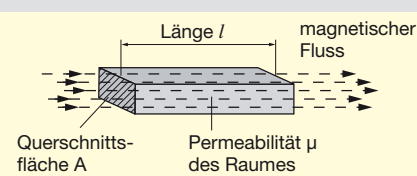


2 Zum Betrag der elektrischen Durchflutung



3 Elektrische Durchflutung der stromdurchflossenen Spule

4 Bestimmungsgrößen des magnetischen Widerstandes



Magnetische Stoffkonstante Permeabilität: Aus der Bemessungsgleichung des magnetischen Widerstandes (4) ergibt sich die Einheit der magnetischen Feldkonstanten und damit auch die der Permeabilität $[\mu] = 1 \text{ Vs/Am} = 1 \text{ H/m}$. Ein Luftspalt ($\mu_r = 1$) von 1 cm^2 Fläche und 1 mm Breite hat nach (4) einen magnetischen Widerstand

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

$$R_m = \frac{1 \text{ mm} \cdot \text{Am}}{1,256 \cdot 10^{-8} \text{ Vs} \cdot 1 \cdot 1 \text{ cm}^2} = 796,2 \cdot 10^6 \text{ A/Vs.}$$

Würden sich im gegebenen Raum die magnetischen Feldlinien in einem Eisenkern ausbreiten, reduziert sich der magnetische Widerstand in Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte auf etwa $6,7 \cdot 10^3 \text{ A/Vs}$. Beide Zahlenwerte zeigen, dass die Einheit des magnetischen Widerstandes 1 A/Vs nur in Eisenkernen mit großem Querschnitt zu erreichen ist.

■ Bezogene magnetische Größen

Der magnetische Fluss als Gesamtheit aller magnetischen Feldlinien sagt wenig über seine Stärke, das heißt über die Kraftwirkung des magnetischen Feldes aus, da die Feldlinien über einen großen Raum verstreut sein können. So kann das Erdmagnetfeld nur eine relativ kleine Magnetnadel des Kompasses auslenken. Aussagefähiger sind bezogene Größen. Bei den elektrischen und magnetischen Feldern werden die Ursachengröße auf die Länge und die Wirkungsgröße auf die Fläche bezogen.

Die magnetische Feldstärke – Formelzeichen H – ist die auf die Feldlinienlänge l bezogene elektrische Durchflutung Θ als Ursachengröße.

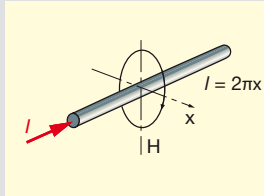
Definitionsgleichung der magnetischen Feldstärke

$$H = \frac{\Theta}{l} \quad (6)$$

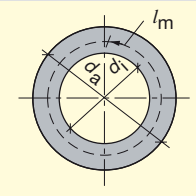
und daraus abgeleitet ihre Einheit $[H] = 1 \text{ A/m}$.

Der Feldlinienweg ist durch die Streuung der Feldlinien oft nicht exakt berechenbar. Bei einfachen Leiteranordnungen ergeben die Formeln Beträge der magnetischen Feldstärke mit für die Praxis hinreichender Genauigkeit.

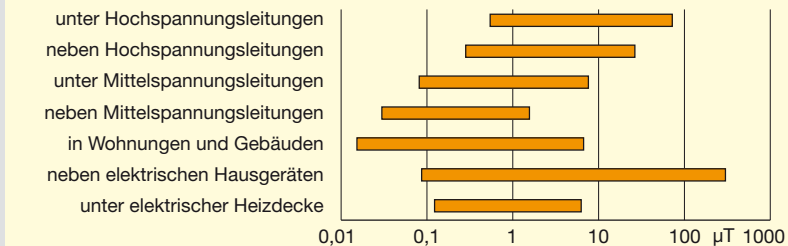
Bei einem geraden stromdurchflossenen Leiter (Bild 5) entspricht die Feldlinienlänge in Abhängigkeit vom Leiterabstand x dem Umfang eines Kreises mit dem Radius x .



5 Magnetische Feldstärke des geraden Leiters im Abstand x



6 Mittlere Feldlinienlänge einer Ringspule ▶



7 Magnetische Flussdichten im Bereich elektrischer Anlagen

Magnetische Feldstärke eines geraden Leiters im Abstand x

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot x} \quad (7)$$

Um im Abstand von 1 cm eine magnetische Feldstärke von 1 A/m zu erhalten, muss im geraden Leiter ein Strom

$$\begin{aligned} I &= H \cdot 2\pi \cdot x \\ I &= 1 \text{ A/m} \cdot 2\pi \cdot 1 \text{ cm} \\ I &= 0,628 \text{ A fließen.} \end{aligned}$$

In einer Ringspule (Bild 6) ist die mittlere Feldlinienlänge l_m zwischen dem inneren und äußeren Spulendurchmesser für die magnetische Feldstärke bestimmend. Magnetische Feldstärke im Inneren einer Ringspule

$$H = \frac{I \cdot N}{l_m} \quad (8)$$

Formel (8) kann auf lange Zylinderspulen übertragen werden. Hinreichende Genauigkeit wird erreicht, wenn die Spulenlänge $l > 10 \cdot d$ (Spulendurchmesser) ist.

Die magnetische Flussdichte – Formelzeichen B – ist der auf die Fläche A bezogene Magnetfluss Φ als Wirkungsgröße.

Definitionsgleichung der magnetischen Flussdichte

$$B = \Phi/A \quad (9)$$

Und daraus abgeleitet ihre Einheit

$$[B] = \text{Vs/m}^2 = 1 \text{ T (Tesla)}$$

Starke Dauermagnete, zum Beispiel Haftmagnete mit einer Abreißkraft von 1000 N , weisen eine magnetische Flussdichte im Bereich von $0,5 \text{ T}$ bis 1 T auf. Das Magnetfeld der Erde beträgt in Mitteleuropa etwa $0,05 \text{ mT}$. Die Eisenkerne von Netztransformatoren werden allgemein für magnetische Flussdichten bis $1,3 \text{ T}$ ausgelegt.

Während die meisten magnetischen Felder unserer Umgebung im Bereich von Mikrottesla liegen (Bild 7), werden für spezielle Anwendungen wie in der MRT-

Computer-Tomographie und in der Kernfusionsforschung überaus starke Magnetfelder bis zu einigen Tesla benötigt. So kann im ringförmigen Brennraum des Tokamak TEXTOR in Jülich ein Gleichfeld von etwa 2 T erzeugt werden. Es sorgt dafür, dass ein mehrere Millionen Grad heißes Plasma ohne Berührung der Wände im Schwebezustand bleibt.

■ Funktionale Abhängigkeiten

Funktionale Abhängigkeiten beschreiben Auswirkungen auf Wirkungsgrößen, wenn die Ursachengrößen verändert werden. Aus den Funktionsgleichungen sind diese kausalen Zusammenhänge zwischen der abhängigen Veränderlichen und der unabhängig Veränderlichen erkennbar.

Abhängigkeit des magnetischen Flusses

Wird die Definitionsgleichung (2) des magnetischen Widerstandes umgestellt, entsteht für den magnetischen Fluss

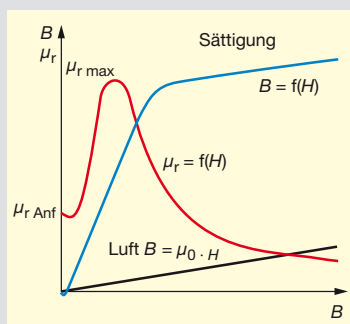
$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} \quad (10)$$

In der Gleichung (10) ist die elektrische Durchflutung Θ die unabhängige Veränderliche und der magnetische Fluss Φ die abhängige Veränderliche: $\Phi = f(\Theta)$. Wird nach (2) die elektrische Durchflutung durch die Stromstärke erhöht, steigt proportional auch der magnetische Fluss. Dabei wird der magnetische Widerstand konstant bleiben, da der Raum, der von den magnetischen Feldlinien durchsetzt wird, in seiner Ausdehnung und in seinen stofflichen Eigenschaften sich nicht ändert. Diese Aussage muss später für ferromagnetische Stoffe eingeschränkt werden. Bei konstanter elektrischer Durchflutung ändert sich selbstverständlich der magnetische Fluss auch, wenn der magnetische Widerstand größer oder kleiner wird. Zieht

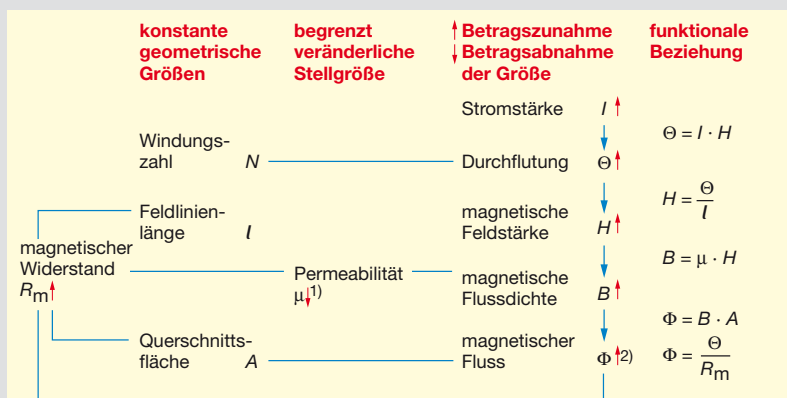
zum Beispiel ein Gleichstromschütz an, wird durch das Aufheben des Luftspaltes zwischen Eisenkern und Klappanker der magnetische Widerstand verringert. Der Gleichstrom in der Schützspule kann reduziert werden, da für das Halten des Klappankers kein größerer Magnetfluss erforderlich ist. Beachten Sie. Bei einem Wechselstromschütz entstehen andere physikalische Abhängigkeiten. Hier, wie in allen Wechselstromkreisen wirken Änderungen im magnetischen Kreis stets auf den elektrischen Kreis zurück.

Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte

Werden in der Definitionsgleichung der magnetischen Flussdichte (9) der magnetische Fluss Φ nach (10), der magnetische



3 Magnetisierungskurve



1) Die Permeabilität sinkt, wenn der Bereich der Sättigung erreicht ist.

2) Im Sättigungsbereich überwiegt in der Beziehung $\Phi = \frac{\Theta}{R_m}$ die Zunahme der elektrischen Durchflutung (Zähler des Bruches) im Vergleich zur Zunahme des magnetischen Widerstandes (Nenner).

9 Zusammenhang zwischen magnetischen Grundgrößen und bezogenen magnetischen Größen als Ursache-Wirkungsbeziehung

Tafel 1 Permeabilitätswerte ausgewählter Stoffe

diamagnetische Stoffe $\mu_r < 1$	paramagnetische Stoffe $\mu_r > 1$
Wismut $\mu_r = 1 - 160 \cdot 10^{-6}$	Luft $\mu_r = 1 + 0,4 \cdot 10^{-6}$
Kupfer $\mu_r = 1 - 10 \cdot 10^{-6}$	Aluminium $\mu_r = 1 + 22 \cdot 10^{-6}$
Silber $\mu_r = 1 - 25 \cdot 10^{-6}$	Platin $\mu_r = 1 + 300 \cdot 10^{-6}$
Wasser $\mu_r = 1 - 9 \cdot 10^{-6}$	
ferromagnetische Stoffe $\mu_r \gg 1$	kohlenstoffarmes Eisen $\mu_r = 10000$
	Gusseisen $\mu_r = 600$ (Maximalwerte)

Widerstand R_m nach (4) und Θ/l nach (6) durch H ersetzt, entsteht folgende Beziehung für die magnetischen Flussdichte:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (11)$$

Die Gleichung (11) beschreibt mathematisch die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte B als Wirkungsgröße von der magnetischen Feldstärke H (Ursachengröße): $B = f(H)$. Beeinflusst wird diese Abhängigkeit von der magnetischen Durchlässigkeit – relative Permeabilität μ_r – des Raumes, der von den magnetischen Feldlinien durchsetzt wird.

Alle Werkstoffe beeinflussen den Verlauf der magnetischen Feldlinien mehr oder weniger stark. Werden zum Beispiele Eisen, Nickel oder Kobalt in ein homogenes magnetisches Feld gebracht, bündeln sich in diesen ferromagnetischen Stoffen die magnetischen Feldlinien. Die magnetische Flussdichte ist damit in diesen Stoffen wesentlich größer als in Luft oder im Vakuum. Andere Stoffe verstärken das Magnetfeld nur geringfügig (paramagnetische Stoffe). Die diamagnetischen Stoffe streuen sogar durch ihren größeren magnetischen Widerstand im Vergleich zu Luft die Feldlinien. Dieses unterschiedliche Verhalten beschreiben die Permeabilitätszahlen. Für ausgewählte Stoffe sind sie aus der Tafel 1 zu entnehmen.

Die Permeabilität nicht-ferromagnetischer Stoffe wird in der Praxis meist gleich der magnetischen Feldkonstanten μ_0 gesetzt, da μ_r nur geringfügig von 1 abweicht. Diese Stoffe können magnetisch als neutral bezeichnet werden.

Messungen an ferromagnetischen Stoffen zeigen, dass zwischen der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte kein linearer Zusammenhang besteht. Dieser kann zwischen den beiden Größen rechnerisch nicht bestimmt werden. Deshalb geben grafische Darstellungen, sogenannte Magnetisierungskurven (Bild 3) als Bilder der Funktion $B = f(H)$ die Abhängigkeit wieder.

Bild 3 zeigt den typischen Verlauf der Magnetisierungskurve von ferromagnetischen Stoffen. Die magnetische Flussdichte steigt von null beginnend mit zunehmender magnetischer Feldstärke stark an. Ein Teil der Elementarmagnete in den Stoffkristallen hat sich ausgerichtet. Bei einer weiteren Steigerung der magnetischen Feldstärke schwächt sich die Zunahme der magnetischen Flussdichte ab. Sie entspricht jetzt nur noch der Zunahme der Magnetflussdichte von Luft. Der Sättigungsbereich ist erreicht. Alle Elementarmagnete sind ausgerichtet. Der Vorteil einer weiteren Feldverstärkung durch den ferromagnetischen Stoff ist nicht mehr gegeben.

Genau genommen sind die Magnetisierungskurven der ferromagnetischen Stoffe keine „glatten“ Kurven, sondern setzen sich aus einer außerordentlich großen Zahl von kleinen Sprüngen zusammen. Sie entstehen dadurch, dass die Elementarmagnete mit Zunahme der magnetischen Feldstärke plötzlich gruppenweise aber unregelmäßig in die durch die magnetische Feldstärke gegebene Richtung umklappen. Die als Barkhausen-Effekt bezeichneten Magnetisierungssprünge sind akustisch durch entsprechende Verstärkung als prasselndes Rauschen oder im Oszillografen nachweisbar.

Aus den Koordinaten der Kennlinienpunkte können nach (11) die unterschiedlichen Beträge der relativen Permeabilität berechnet werden. Das Bild der Funktion $\mu_r = f(H)$ zeigt, dass im Sättigungsbereich die magnetische Durchlässigkeit stark abnimmt. Ein relativ großer magnetischer Widerstand ist wirksam.

Fazit

Zusammenfassend soll der Zusammenhang zwischen den magnetischen Grundgrößen und den bezogenen magnetischen Größen in Form einer Kausalkette (Ursache-Wirkungsbeziehungen) betrachtet werden (Bild 9). H. Spanneberg