

Magnetisches Feld

Begriffe

DIN
1325

Magnetic field; quantities

1. Magnetische Flußdichte (Induktion)

Wird ein kleiner Träger einer positiven elektrischen Ladung Q gegen einen materiellen Träger (Erreger) eines magnetischen Feldes mit der Relativgeschwindigkeit v ¹⁾ bewegt, so wirkt auf ihn die Kraft

$$\mathbf{F} = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1)$$

Auf ein „Leitungsstromelement“ $I d\mathbf{l}$, etwa repräsentiert durch einen Längenabschnitt $d\mathbf{l}$ eines von einem Strom I durchflossenen Drahtes, wird in einem magnetischen Feld die Kraft

$$d\mathbf{F} = I(d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

ausgeübt. Eine sehr kleine, ebene starre „Stromschleife“ von der Fläche A und der Stromstärke I , etwa repräsentiert durch einen stromdurchflossenen Drahttring, erfährt in einem magnetischen Feld das Drehmoment

$$\mathbf{T} = I(\mathbf{A} \times \mathbf{B}). \quad (3)$$

Hier ist überall die Größe $\mathbf{B}$ ausschließlich dem Ort im Feld eigentümlich (sie ist nicht durch Q , $\mathbf{v}$ im ersten Fall, durch I , $d\mathbf{l}$ im zweiten und durch I , $\mathbf{A}$ im dritten mitbestimmt), sie ist also eine Feldgröße. $\mathbf{B}$ heißt magnetische Flußdichte (Induktion).

2. Magnetischer Fluß

Das über eine Fläche A erstreckte Integral der magnetischen Flußdichte heißt magnetischer Induktionsfluß, kurz magnetischer Fluß durch diese Fläche:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A}. \quad (4)$$

3. Magnetische Feldstärke (magnetische Erregung)

Betrachtet werde eine Fläche A mit ihrer Randkurve, deren Linienelement $d\mathbf{s}$ ist; Flächennormale und Randkurve seien einander rechtsschraubig zugeordnet. Durch beliebige Elemente der Fläche trete elektrischer Leitungsstrom mit der Stromdichte $\mathbf{S}$ hindurch, und es werde das Flächenintegral der Stromstärke $\int_A \mathbf{S} d\mathbf{A} = \Theta$ elektrische Durchflutung genannt²⁾).

Dann gilt

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{s} = \int_A \mathbf{S} d\mathbf{A} = \Theta. \quad (5)$$

¹⁾ Darstellung von Vektoren durch Fettdruck nach DIN 1303.

²⁾ In dieser Norm wird für die Stromdichte an Stelle des Zeichens J das Ausweichzeichen S benutzt (siehe DIN 1304), um Verwechslungen mit der magnetischen Polarisierung J , siehe Abschnitt 7, auszuschließen.

³⁾ Zur Definition der elektrischen Durchflutung siehe Anmerkungen.

Der Feldvektor $\mathbf{H}$ wird magnetische Feldstärke oder magnetische Erregung, die Beziehung (5) wird Durchflutungsgesetz genannt. Es gilt unabhängig von den magnetischen Eigenschaften der Substanz, in der die Randkurve s liegt. Diese kann auch abschnittsweise durch verschiedene Stoffe verlaufen, z. B. durch Luft und durch Eisen (siehe hierzu die Anmerkungen).

Man kann sich einen kleinen geraden, fadenförmigen, stoffleeren Kanal und in ihm die in seiner Richtung t liegende Koordinate B_t der magnetischen Flußdichte gemessen denken; dann ist $H_t = B_t/\mu_0$ die Koordinate der magnetischen Feldstärke in dieser Richtung. Aus drei nicht in einer Ebene liegenden Koordinaten ergibt sich die magnetische Feldstärke an der betrachteten Stelle. Man kann die magnetische Feldstärke auch mit einer kleinen sehr dünnen Zylinderspule (Länge l , Stromstärke I , Windungszahl N , Strombelag $\alpha = IN/l$) messen; stellt man im untersuchten Feldpunkt die Stromstärke und die Achse der Spule so ein, daß das Innere der Spule feldfrei wird, so ist definitionsgemäß der Betrag der magnetischen Feldstärke gleich dem Strombelag der Spule: $H = \alpha$, deshalb unabhängig von magnetischen Eigenschaften der Substanz im Innern der Spule, und die Richtung ist durch die Richtung der Spulenachse bestimmt, wenn diese dem Strombelag rechtsschraubig zugeordnet ist.

4. Magnetische Spannung

Das Linienintegral der magnetischen Feldstärke, das von einem Anfangspunkt 1 zu einem Endpunkt 2 einer Wegkurve s erstreckt wird, heißt magnetische Spannung:

$$V_{12} = \int_1^2 \mathbf{H} d\mathbf{s}; \quad (6)$$

fällt der Endpunkt des Weges mit dem Ausgangspunkt zusammen, so nennt man den Weg geschlossen oder Randlinie und die magnetische Spannung entlang diesem Weg magnetische Umlaufspannung oder magnetische Randspannung $\dot{V}$. Durch das Durchflutungsgesetz (5) wird also auch die Beziehung festgestellt zwischen der magnetischen Umlaufspannung und der durch die berandete Fläche tretenden elektrischen Durchflutung: $\dot{V} = \Theta$.

5. Magnetische Feldkonstante

Besteht die in Abschnitt 3 angegebene Anordnung im leeren Raum, so gilt die Beziehung (5) mit

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \quad (7)$$

Die universelle Konstante μ_0 heißt magnetische Feldkonstante.

Fortsetzung Seite 2 und 3
Anmerkungen Seite 3 bis 5

6. Permeabilität

In einem magnetisch isotropen Stoff haben in demselben Feldpunkt $\mathbf{B}$ und $\mathbf{H}$ die gleiche Richtung. Dann ist der Quotient: Betrag der Flußdichte geteilt durch Betrag der Feldstärke in demselben Feldpunkt ein den Stoff kennzeichnender, positiver Skalar. Er heißt Permeabilität μ . Im leeren Raum ist diese Größe nach Abschnitt 5 gleich der magnetischen Feldkonstanten μ_0 . Das Verhältnis $\mu/\mu_0 = \mu_r$ heißt Permeabilitätszahl (relative Permeabilität). Es ist also in isotropen Stoffen

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \mu_r} \quad (8)$$

In magnetisch anisotropen Stoffen ist die Permeabilität ein Tensor zweiter Stufe. Bei den ferromagnetischen (eisenartigen) Stoffen muß die Permeabilität je nach den Stoffen und den betrachteten Vorgängen besonders definiert werden, siehe Abschnitt 10.

7. Magnetische Polarisation und Magnetisierung

Die Größe

$$\mathbf{J} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H} \quad (9)$$

heißt magnetische Polarisation, die Größe

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{J}}{\mu_0} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H} \quad (10)$$

wird Magnetisierung genannt.

8. Magnetische Suszeptibilität

Das Verhältnis: Betrag der Magnetisierung $\mathbf{M}$ geteilt durch den Betrag der magnetischen Feldstärke $\mathbf{H}$ wird magnetische Suszeptibilität χ_m genannt:

$$\frac{M}{H} = \frac{J/\mu_0}{H} = \chi_m = \mu_r - 1. \quad (11)$$

In Tafelwerken, vor allem in älteren, werden oft die Werte $\chi'_m = \chi_m/4\pi$ angegeben. Zur Unterscheidung wird χ_m rationale, χ'_m nichtrationale Suszeptibilität genannt.

9. Magnetisches Moment

Ein stab- oder scheibenförmiger permanenter Magnet oder eine stab- oder scheibenförmige starre stromdurchflossene Spule sei in einem homogenen Feld im leeren Raum so angeordnet, daß die magnetische Achse senkrecht zu dem ursprünglichen magnetischen Feld gerichtet ist. Dann erfährt der Körper ein Drehmoment. Das magnetische Moment hat man vor allem in der Magnetostatik, in formaler Analogie zur Elektrostatik, so definiert, daß bei der beschriebenen Anordnung sein Betrag gleich ist dem Quotienten: Betrag des Drehmomentes geteilt durch den Betrag der magnetischen Feldstärke des ursprünglichen Feldes. Bei dieser Festlegung ist die in (9) definierte magnetische Polarisation eines Volumenteiles des permanenten Magneten gleich dem Quotienten: magnetisches Moment dieses Teiles geteilt durch sein Volumen. Man kann das magnetische Moment aber auch so definieren, daß bei der beschriebenen Anordnung sein Betrag gegeben ist durch den Quotienten: Betrag des Drehmomentes geteilt durch den Betrag der magnetischen Flußdichte des ursprünglichen Feldes. Zur Unterscheidung kann man bei der ersten Definition von dem magnetischen Dipolmoment oder dem Coulombschen magnetischen Moment, bei der zweiten von dem elektromagnetischen Moment oder dem Ampèreschen magnetischen Moment sprechen.

10. Eigenschaftsgrößen nichtlinearer magnetischer Werkstoffe, z. B. ferromagnetischer Werkstoffe⁴⁾

10.1. Die im allgemeinen nichtlinearen Zusammenhänge zwischen den magnetischen Zustandsgrößen ferromagnetischer Substanzen werden meist so dargestellt, daß man die magnetische Flußdichte B oder die magnetische Polarisation J in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke H tabellarisch oder graphisch angibt (magnetische Zustandskurven). Neukurve heißt die vom unmagnetischen Zustand ($H = 0$, $B = J = 0$) ausgehende Zustandskurve. Ändert sich mit zunehmender Feldstärke H die Polarisation J nicht mehr merklich, so spricht man von magnetischer Sättigung und nennt die (angenähert) konstante Polarisation in diesem Gebiet die Sättigungspolarisation J_s . Wird eine Folge von Feldstärkewerten zwischen zwei entgegengesetzt gleich großen Endbeträgen zyklisch durchlaufen, so setzt sich die magnetische Zustandskurve zusammen aus einem absteigend und einem davon verschiedenen aufsteigend durchlaufenen Kurvenast.

Man nennt diese Zustandskurve Hystereseschleife oder -kurve und die von beiden Kurvenästen eingeschlossene Fläche Hysteresefläche. Man nennt ferner Rayleigh-Schleifen die bei sehr kleinen Feldstärkewerten auftretenden Hystereseschleifen, jedoch äußerste Hystereseschleifen (Grenzschleifen) diejenigen, bei denen das Gebiet der magnetischen Sättigung erreicht wird. Besondere magnetische Zustandspunkte der äußersten Hystereseschleife sind: der für $H = 0$ vorhandene Wert der magnetischen Flußdichte und Polarisation $B_r = J_r$, der magnetische Remanenzflußdichte genannt wird, ferner der für $J = 0$ vorhandene Wert der Feldstärke H_c und der für $B = 0$ vorhandene Wert H_{c_2} ; diese heißen Koerzitivfeldstärken der magnetischen Polarisation und der magnetischen Flußdichte. Remanenzflußdichte und Koerzitivfeldstärke der äußersten Hystereseschleife sind Stoffkonstanten.

10.2. Wird B in Abhängigkeit von H betrachtet, so wird Anfangspermeabilität μ_a die Neigung im Anfangspunkt der Neukurve genannt, ferner heißt im gegebenen Zustandspunkt (B, H) auf gegebener Zustandskurve totale Permeabilität die Neigung der Ursprungsgeraden $B/H = \mu$.

Entsprechende Definitionen gelten für die Suszeptibilität, wenn J in Abhängigkeit von H betrachtet wird.

10.3. In der Umgebung eines gegebenen magnetischen Zustandspunktes (Arbeitspunktes auf der magnetischen Zustandskurve) können Zustandsänderungen in hinreichend kleinen Bereichen reversibel verlaufen. Die reversibel durchlaufenen Zustandskurven haben angenähert die Form schräg liegender Lanzetten (Rayleigh-Schleifen), die man für viele Zwecke durch das die Spitzen der Lanzette verbindende Geradenstück mit der Steigung $\Delta B/\Delta H = \mu_{rev}$ ersetzen kann; μ_{rev} heißt reversible Permeabilität.

Bei magnetisch weichem Eisen wird die reversible Permeabilität häufig auch Überlagerungspermeabilität genannt und μ_Δ geschrieben, wenn es sich um die Überlagerung einer reversiblen Zustandsänderung über einen gegebenen magnetischen Zustand handelt. Sie ist

⁴⁾ Zu den nichtlinearen magnetischen Werkstoffen können auch ferrimagnetische, antiferromagnetische und ähnliche Stoffe gerechnet werden.