



Werkstoffkenngrößen elektro- technischer Bauelemente

Teil 2: Magnetwerkstoffe und Einfluss auf elektromagnetische Felder

Die stromleitenden, dielektrischen und magnetischen Eigenschaften von Werkstoffen können quantitativ nur durch entsprechende Kenngrößen [1] bewertet werden. Sie können dann einen optimalen Werkstoffeinsatz in den Bauelementen der Elektrotechnik gewährleisten.

■ Kenngrößen der Magnetwerkstoffe

Hinsichtlich des magnetischen Verhaltens werden die Werkstoffe in die drei Stoffgruppen eingeteilt:

- diamagnetisch** $\mu_r < 1$ (konstant)
 - Cu $\mu_r = 0,99999$
 - Bi $\mu_r = 0,99983$
- paramagnetisch** $\mu_r > 1$ (konstant)
 - Al $\mu_r = 1,00002$
 - Pt $\mu_r = 1,00036$
- ferromagnetisch** $\mu_r \gg 1$ (nicht konstant)
 - reines Eisen $\mu_{rmax} = 250\ 000$
 - Stahl, 1 % C $\mu_{rmax} = 7\ 000$
 - Gusseisen $\mu_{rmax} = 600$

Die ferromagnetischen Stoffe erfüllen zwei Bedingungen:

1. Die Metallgitter bestehen aus Atomen mit nicht abgeschlossenen Elektronenbahnen.
2. Der Gitterabstand der Atome ist so groß, dass unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes die Drehachsen der Elektronen innerhalb kleiner Kristallbereiche (weiße Bezirke) ausgerichtet werden können.

Elementarmagnete. Den weißen Bezirken wird die kleinste magnetische Größe, der sogenannte Elementarmagnet zugeordnet. Die Elementarmagnete sind unterschiedlich ausgerichtet, so dass der Werkstoff nach außen unmagnetisch wirkt. Durch ein äußeres Magnetfeld richten sich die Elementarmagnete aus. Das einwirkende Magnetfeld wird verstärkt. Sind alle Elementarmagnete ausgerichtet, ist der so genannte Sättigungsbereich erreicht. Eine weitere Aufmagnetisierung entspricht der von Luft mit einem nicht vertretbaren Aufwand-Nutzen-Verhältnis. Wird ein ferromagnetischer Stoff über die Curie-temperatur erwärmt, nimmt er paramagnetische Eigenschaften an. Die Curie-temperaturen betragen zum Beispiel für Eisen 768 °C, Kobalt 1120 °C und für Nickel 360 °C.

Tafel 3 Remanenz und Koerzitivfeldstärke magnetischer Werkstoffe

	Remanenzflussdichte B_r in T	Koerzitivfeldstärke H_c in kA/m
hartmagnetische Werkstoffe Dauermagnete in Haftmagnetsystemen, in Messgeräten, in Lautsprechern	1,8 ... 2	24 ... 300
weichmagnetische Werkstoffe Dynamo- und Transformatorbleche, Spulkerne, Abschirmungen	0,8 ... 1,2	0,4 ... 160

INHALT

Grundwissen
Lernfelder 1-5

Werkstoffkunde
Werkstoffkenngrößen
elektrotechnischer
Bauelemente (2)1

WISO
Wirtschafts-, Sozial- und
Gemeinschaftskunde3

Fachbegriffe
Was versteht man unter4

Fachwissen
Lernfelder 6-13

Regelungstechnik
Temperaturmesstechnik (4)6

Antennentechnik
Satellitenempfang (8)8

Computertechnik
Flexibel und mobil
mit portablen Programmen9

Arbeitssicherheit
Beleuchtung
am Arbeitsplatz (6)11

Prüfung
Lernfelder 1-13

Englisch
Technical English – Technische
Texte in englischer Sprache13

Fachtest
Fachtest Antriebstechnik14
Fachtest Computertechnik15
Lösungen16

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, Petra Hahn (Layout),
Petra Richter (Zeichnungen)

Schülerservice
Ab-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 Elektrotechniker

Remanenzflussdichte und Koerzitivfeldstärke

Verschwindet das äußere Magnetfeld, nimmt der ferromagnetische Stoff nicht wieder seinen Ausgangszustand an. Einige Elementarmagnete bleiben weiterhin ausgerichtet. Es bleibt ein Restmagnetismus, gekennzeichnet durch die Remanenzflussdichte B_r , zurück. Sie kann durch ein Magnetfeld beseitigt werden, dessen Richtung dem ursprünglichen Feld entgegengesetzt ist. Bei der Koerzitivfeldstärke H_c wird die Remanenz Null. Steigert man die „Gegenfeldstärke“ weiter, verstärkt sich das Magnetfeld bis zur Sättigung, jetzt in entgegengesetzter Richtung (Tafel 3).

In Abhängigkeit von den Beträgen der Remanenz B_r und der Koerzitivfeldstärke H_c werden die ferromagnetischen Werkstoffe in hartmagnetische und weichmagnetische Werkstoffe eingeteilt.

Verlustziffer

In Wechselstromgeneratoren und -motoren sowie in Transformatoren werden die weichmagnetischen Werkstoffe im Rhythmus der Frequenz des fließenden Wechselstromes periodisch ummagnetisiert. Die sich drehenden Elementarmagnete erwärmen die Bleche. Es entstehen Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste). Ihre Größe wird durch die Verlustziffer $v_{1,0}$ oder $v_{1,5}$ in W/kg bei den magnetischen Flussdichten 1,0 T oder 1,5 T angegeben (Tafel 4).

Einfluss auf elektromagnetische Felder

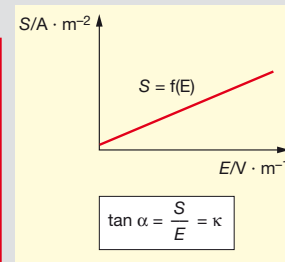
Eine gerichtete Bewegung der freien Elektronen in Leiterwerkstoffen entsteht durch ein elektrisches Strömungsfeld, eine Elektronenorientierung innerhalb eines Isolierstoffmoleküls als dielektrische Polarisierung durch das elektrostatische Feld und das Ausrichten der Elementarmagnete in ferromagnetischen Stoffen durch ein magnetisches Feld. Für alle drei Felder werden die Ursache-Wirkungsbeziehungen quantitativ durch Feldgrößen beschrieben. Ursachengrößen sind die elektrische Feldstärke E und die magnetische Feldstärke H . Sie sind auf die Strecke bzw. Feldlinienlänge l bezogene Größen, über die die elektrische Spannung U bzw. die elektrische Durchflutung Θ wirksam ist:

elektrische Feldstärke

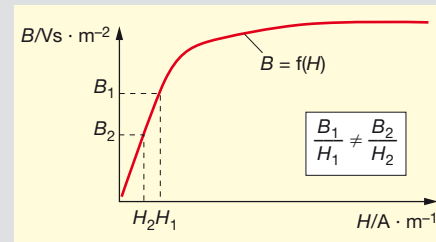
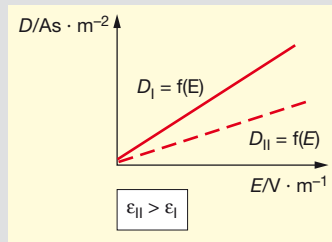
$$E = \frac{U}{l} \tag{9}$$
 $[E] = V/m$

Tafel 4 Verlustziffer von Elektroblechen

Elektroblech Kurzname	Nennstärke in mm	Verlustziffer $v_{1,0}$ in W/kg	Verlustziffer $v_{1,5}$ in W/kg
V250-35 A	0,35	1,00	2,50
V400-50 A	0,50	1,70	4,00
VM89-27N kornorientiert	0,27	-	0,89
VM 111-35N kornorientiert	0,35	-	1,11



3 Abhängigkeit der Feldgrößen des elektrischen Strömungsfeldes



4 Abhängigkeit der Feldgrößen des elektrostatischen Feldes

5 Abhängigkeit der Feldgrößen ferromagnetischer Stoffe

magnetische Feldstärke

$$H = \frac{\Theta}{l} \tag{10}$$
 $[H] = A/m$

Ohne zusätzliche Bedingungen entstehen durch die Ursachengrößen als Wirkungen der elektrische Strom im Leiterwerkstoff, der Verschiebungsfluss im Isolierstoff und der magnetische Fluss in allen Stoffen. Ein Vergleich gleichartiger Wirkungen ist nur möglich, wenn die Wirkungsgrößen als bezogene Größen bestimmt werden. Es werden die Stromstärke I , der Verschiebungsfluss Ψ (Psi) und der magnetische Fluss Φ (Phi) auf die Querschnittsflächen A bezogen, in denen die genannten Größen wirksam sind. Damit ergeben sich als Wirkungsgrößen die elektrische Stromdichte

$$S = \frac{I}{A} \tag{11}$$
 $[S] = A/m^2$

Verschiebungsflussdichte

$$D = \frac{\Psi}{A} \tag{12}$$
 $[D] = As/m^2$

magnetische Flussdichte

$$B = \frac{\Phi}{A} \tag{13}$$
 $[B] = Vs/m^2 = T \text{ (Tesla)}$

Zwischen den Feldgrößen bestehen direkte Proportionalitäten. Werden die oben genannten Werkstoffgrößen als Proportio-

nalitätsfaktor eingesetzt, entsteht die allgemeine Gleichung:

Dichtegröße =
Werkstoffgröße · Feldstärkegröße

Diese ist in ihrem Wesen nach eine Funktionsgleichung mit der unabhängigen Veränderlichen (Ursachengröße = Feldstärke) und der abhängigen Veränderlichen (Wirkungsgröße = Dichte). Im Konkreten gilt für die Größen des

elektrischen Strömungsfeldes

$$S = \kappa \cdot E \tag{14}$$

elektrostatischen Feldes

$$D = \epsilon \cdot E \tag{15}$$

des magnetischen Feldes

$$B = \mu \cdot H \tag{16}$$

GEDANKENBLITZ

Interessanter Zusammenhang

Mathematischer Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldkonstanten ϵ_0 , der magnetischen Feldkonstanten μ_0 und der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2,99792458$ m/s im leeren Raum:

Das Produkt der elektrischen und der magnetischen Feldkonstanten ist gleich dem Kehrwert des Quadrates der Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum.

$$\epsilon_0 \cdot \mu_0 = \frac{1}{c_0^2}$$

Neben der Darstellung der funktionalen Abhängigkeiten der Feldgrößen in den Gleichungen (14) bis (16) zeigen ihre Kennlinien im rechtwinkligen Koordinatensystem anschaulich, wie die Änderungen der Feldstärkegrößen sich auf die Dichte­größen auswirken. Sowohl im elektrischen Strömungsfeld als auch im elektrostatischen Feld besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen den Ursachen- und Wirkungsgrößen. Die Bilder der Funktionsgleichungen (14) und (15) sind steigende Gerade (Bild 3 und 4), deren Anstiegswinkel durch den Betrag der Konduktivität κ des entsprechenden Leiterwerkstoffes bzw. durch den Betrag der Permittivität ϵ des Isolierstoffs festgelegt ist.

Analoge Aussagen treffen auch für die magnetischen Feldgrößen der dia- und paramagnetischen Stoffe zu. Die für den Elektrotechniker weit wichtigeren ferromagnetischen Stoffe haben Permeabilitäts­werte, die von der einwirkenden magnetischen Feldstärke abhängig sind. Die Ursache für die unterschiedlichen Werte ist das Feld verstärkende Ausrichten der Elementarmagnete. Die magnetische Flussdichte steigt von Null beginnend mit zunehmender magnetischer Feldstärke stark linear an. Ein Teil der Elementarmagnete wird dabei ausgerichtet. Bei einer weiteren Steigerung der magnetischen Feldstärke schwächt sich die Zunahme der magnetischen Flussdichte ab. Sie entspricht jetzt nur noch der Zunahme der magnetischen Flussdichte von Luft. Der Sättigungsbereich ist erreicht. Alle Elementarmagnete sind ausgerichtet. Der Vorteil einer weiteren Feldverstärkung durch den ferromagnetischen Stoff ist nicht mehr gegeben. Das Bild der Funktionsgleichung (16) wird als Magnetisierungskurve bezeichnet. Aus den Koordinaten der Kennlinienpunkte (Bild 5) können die unterschiedlichen Beträge der Permeabilität berechnet werden.

Fazit

Der optimale Einsatz der Werkstoffe in elektrischen Geräten und Anlagen setzt voraus, dass die elektrischen und magnetischen Eigenschaften durch Größen festgelegt sind. Wesentlich ist weiterhin, dass durch diese Werkstoffgrößen die Größen der die Werkstoffe durchsetzenden elektrischen und magnetischen Felder quantitativ beeinflusst werden.

Literatur

[1] Spanneberg, H.: Werkstoffkenngrößen elektrotechnischer Bauelemente; Teil 1: Kenngrößen der Leiterwerkstoffe und Isolierstoffe. Elektropraktiker Berlin, 64(2010)1, Lernen und Können S. 1–3.

H. Spanneberg