

# Elektromagnetisches Feld

## Materialgrößen

**DIN**  
**1324**  
Teil 2

Electromagnetic field; material quantities

Mit DIN 1324 T 1/05.88  
Ersatz für DIN 1324/01.72  
und DIN 1325/01.72

### 1 Anwendungsbereich und Zweck

Zweck dieser Norm ist es, die Materialgrößen darzustellen, die materialspezifische Beziehungen (z.B. Proportionalitäten) zwischen den Feldgrößen des elektromagnetischen Feldes (siehe DIN 1324 Teil 1) beschreiben. Die Norm basiert auf dem Kapitel 121 des Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuches (IEV), das Begriffe des Elektromagnetismus enthält (siehe DIN IEC 50 Teil 121).

Damit dielektrisch bzw. magnetisch nichtlineare Eigenschaften dennoch durch Permittivitäts- bzw. Permeabilitätszahlen beschrieben werden können, wird im Abschnitt 5 eine Reihe dafür geeigneter Größen eingeführt.

Die komplexen Größen nach Abschnitt 6 werden zweckmäßigerweise verwendet, wenn statt der im Abschnitt 4 vorausgesetzten idealen Eigenschaften zwar lineare Abhängigkeiten zwischen den Feldgrößen bestehen, die materialbedingten Verluste jedoch zeitliche Verzögerungen zwischen ihnen hervorrufen.

### 2 Allgemeines

Die in dieser Norm behandelten Größen und Begriffe sind in Tabelle 1 angegeben.

Die Benennung „Konstante“ wird für die Materialgrößen nicht verwendet, weil diese Größen z.B. von der Temperatur, der Frequenz usw. abhängen.

Während die in den Abschnitten 3 und 4 vorausgesetzte Proportionalität zwischen den elektrischen Feldgrößen in vielen technisch verwendeten Dielektrika im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit gegeben ist, verhalten sich in allen „magnetischen“ Materialien (Ferro- und Ferrimagnetika) die magnetischen Feldgrößen nichtlinear zueinander.

Da die Materialgrößen zur Beschreibung dielektrischer und magnetischer Eigenschaften meist analog zueinander gebildet sind, sind sie, soweit möglich, in dieser Norm unmittelbar nebeneinander gestellt. Textteile, die für beide Darstellungen gleichermaßen gelten, sind dabei nur einmal aufgeführt.

Tabelle 1. Übersicht

Materialgröße	Formelzeichen	SI-Einheit	Siehe Abschnitt
<b>Materialgrößen zur Beschreibung der Stromleitung</b>			
Elektrische Leitfähigkeit, Konduktivität	$\kappa$ <sup>1)</sup>	S/m = A/(V · m)	3
Spezifischer elektrischer Widerstand, Resistivität	$\rho$	$\Omega \cdot m = V \cdot m/A$	3
<b>Materialgrößen zur Beschreibung linearer dielektrischer bzw. magnetischer Eigenschaften</b>			
Permittivität	$\epsilon$	F/m = A · s/(V · m)	4
Permeabilität	$\mu$	H/m = V · s/(A · m)	4
Permittivitätszahl (relative Permittivität)	$\epsilon_r$	1	4
Permeabilitätszahl (relative Permeabilität)	$\mu_r$	1	4
Elektrische Suszeptibilität	$\chi_e$	1	4
Magnetische Suszeptibilität	$\chi_m$	1	4
<b>Materialgrößen für dielektrisch bzw. magnetisch nichtlineare Materialien</b>			
Aus der Hystereseschleife bei Vollaussteuerung abgeleitete Materialgrößen:			5
Magnetische Sättigungspolarisation	$J_s$	T = V · s/m <sup>2</sup>	5.1
Sättigungsmagnetisierung	$M_s$	A/m	5.1
Elektrische Remanenzflußdichte	$D_r$	C/m <sup>2</sup> = A · s/m <sup>2</sup>	5.1
Magnetische Remanenzflußdichte	$B_r$	T = V · s/m <sup>2</sup>	5.1
Elektrische Koerzitivfeldstärke	$E_c$	V/m	5.1
Magnetische Koerzitivfeldstärke	$H_c$	A/m	5.1
Flußdichte-Koerzitivfeldstärke	$H_{cB}$	A/m	5.1
Polarisations-Koerzitivfeldstärke	$H_{cJ}$	A/m	5.1
Differentielle Permittivitätszahl	$\epsilon_{dif}$	1	5.1
Differentielle Permeabilitätszahl	$\mu_{dif}$	1	5.1

<sup>1)</sup> Wegen Überschneidung wird in dieser Norm das 2. Ausweichzeichen  $\kappa$  anstelle des Vorzugszeichens  $\gamma$  und des 1. Ausweichzeichens  $\sigma$  nach DIN 1304 Teil 1 benutzt.

Fortsetzung Seite 2 bis 7

Normenausschuß Einheiten und Formelgrößen (AEF) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.  
Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

Tabelle 1. (Fortsetzung)

Materialgröße	Formelzeichen	SI-Einheit	Siehe Abschnitt
Aus Unterschleifen abgeleitete Materialgrößen: Symmetrische Aussteuerung, ausgehend vom neutralen Zustand:			5.2
Amplitudenpermittivitätszahl	$\epsilon_a$	1	5.2.1
Amplitudenpermeabilitätszahl	$\mu_a$	1	5.2.1
Wechselpermittivitätszahl	$\epsilon_{\sim}$	1	5.2.1
Wechselpermeabilitätszahl	$\mu_{\sim}$	1	5.2.1
Anfangspermittivitätszahl	$\epsilon_i$	1	5.2.1
Anfangspermeabilitätszahl	$\mu_i$	1	5.2.1
Maximalpermittivitätszahl	$\epsilon_{\max}$	1	5.2.1
Maximalpermeabilitätszahl	$\mu_{\max}$	1	5.2.1
Unsymmetrische Aussteuerung:			5.2.2
Überlagerungspermittivitätszahl	$\epsilon_{\Delta}$	1	5.2.2
Überlagerungspermeabilitätszahl	$\mu_{\Delta}$	1	5.2.2
Impulspermittivitätszahl	$\epsilon_p$	1	5.2.2
Impulspermeabilitätszahl	$\mu_p$	1	5.2.2
Reversible Permittivitätszahl	$\epsilon_{\text{rev}}$	1	5.2.2
Reversible Permeabilitätszahl	$\mu_{\text{rev}}$	1	5.2.2
<b>Materialgrößen bei sinusförmiger Zeitabhängigkeit</b>			6
Komplexe Permittivitätszahl	$\epsilon_r$	1	6
Komplexe Permeabilitätszahl	$\mu_r$	1	6
Permittivitäts-Verlustfaktor	$\tan \delta_{\epsilon}$	1	6
Permeabilitäts-Verlustfaktor	$\tan \delta_{\mu}$	1	6
Komplexe elektrische Suszeptibilität	$\chi_e$	1	6
Komplexe magnetische Suszeptibilität	$\chi_m$	1	6

### 3 Materialgrößen zur Beschreibung der Stromleitung

Die elektrische Stromdichte und die elektrische Feldstärke sind in isotropen Materialien außerhalb stofflicher Inhomogenitäten einander gleichgerichtet. Es gilt:

$$\vec{J} = \kappa \vec{E} \quad (1)$$

und  $\vec{E} = \varrho \vec{J}$  (2)

Die Materialgröße  $\kappa$  wird elektrische Leitfähigkeit oder Konduktivität genannt, ihr Kehrwert  $\varrho = 1/\kappa$  spezifischer elektrischer Widerstand oder Resistivität.

Wenn  $\kappa$  und damit  $\varrho$  unabhängig von der elektrischen Feldstärke ist, spricht man von ohmschem Verhalten.

Anmerkung: Das Formelzeichen  $\kappa$  ist hier zwecks Vermeidung von Überschneidungen gewählt; sonst werden die Zeichen  $\gamma$  oder  $\sigma$  bevorzugt. Das Formelzeichen  $\varrho$  wird in der Elektrotechnik sowohl für die Raumladungsdichte als auch für den spezifischen elektrischen Widerstand benutzt.

### 4 Materialgrößen zur Beschreibung linearer

**dielektrischer  
Eigenschaften**

**magnetischer  
Eigenschaften**

Materialien, bei denen im Rahmen der Grenzabweichungen die zeitabhängigen Feldgrößen

$$\vec{E}, \vec{D} \text{ und } \vec{P} \quad | \quad \vec{H}, \vec{B} \text{ und } \vec{M}$$

durch Systeme von linearen Differentialgleichungen mit feldstärkeunabhängigen Koeffizienten verknüpft sind, heißen

dielektrisch lineare Materialien  
(kurz lineare Dielektrika).

magnetisch lineare Materialien.

Anmerkung: Zum Beispiel besteht für Dielektrika mit einem einheitlichen Resonanz- oder Relaxationsverhalten der Zusammenhang

$$a_0 \vec{D} + a_1 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + a_2 \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (3)$$

mit dem Rückstellkoeffizienten  $a_0$ , dem Dämpfungskoeffizienten  $a_1$  und dem Trägheitskoeffizienten  $a_2$ .

Für die elektromagnetischen Felder gilt in diesen Materialien das Superpositionsgesetz: Unterschiedliche Vorgänge überlagern sich, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Man nennt Materialien  
dielektrisch

magnetisch

ideal, wenn die Feldgrößen zueinander proportional sind, wenn also bei den betrachteten Zeitabhängigkeiten die Summanden mit zeitlichen Ableitungen in den Differentialgleichungen vernachlässigbar klein sind.

Sind die Materialien außerdem isotrop, so ist der Quotient der Beträge von Flußdichte und Feldstärke in demselben Feldpunkt die

Permittivität

$$\epsilon = \frac{D}{E} \quad (4)$$

Permeabilität

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (5)$$

Für den materiefreien Raum stimmt sie nach DIN 1324 Teil 1/05.88, Abschnitt 3.3, überein mit der elektrischen Feldkonstante  $\epsilon_0$ .

magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$ .

Man nennt das Größenverhältnis

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r \quad (6)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r \quad (7)$$

Permittivitätszahl oder relative Permittivität.

Permeabilitätszahl oder relative Permeabilität.

Man nennt das Größenverhältnis

$$\chi_e = \frac{P}{\epsilon_0 E} = \epsilon_r - 1 \quad (8)$$

$$\chi_m = \frac{M}{H} = \mu_r - 1 \quad (9)$$

elektrische Suszeptibilität.

magnetische Suszeptibilität.

Es gilt also für isotrope ideale

Dielektrika:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (10)$$

Magnetika:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (11)$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (12)$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (13)$$

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r = \chi_e + 1 \quad (14)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r = \chi_m + 1 \quad (15)$$

Für dielektrisch bzw. magnetisch ideale, jedoch anisotrope Materialien treten an Stelle der skalaren Materialgrößen Tensoren zweiter Stufe.

## 5 Materialgrößen für dielektrisch nichtlineare Materialien

## magnetisch nichtlineare Materialien

In ferroelektrischen

In ferro- und in ferrimagnetischen

Materialien unterscheidet man zwischen der spontanen Polarisation als der Vektorsumme der Dipolmomente über viele Elementarzellen innerhalb einer Domäne, dividiert durch das entsprechende Volumen, und der pauschalen Polarisation als der Vektorsumme der Dipolmomente über viele Domänen (z. B. über die ganze Probe) dividiert durch ihr Volumen.

Die spontane elektrische Polarisation in ferroelektrischen Materialien muß man bei  $E = 0$  ermitteln, denn bei  $E \neq 0$  kommt ein feldinduzierter Polarisationsbeitrag hinzu.

Der Betrag der spontanen magnetischen Polarisation in ferro- und in ferrimagnetischen Materialien hängt praktisch nicht von der magnetischen Feldstärke ab.

Durch die Domänenstruktur werden auch die übrigen Feldgrößen inhomogen. Unter der pauschalen Flußdichte versteht man ebenfalls den Mittelwert über viele Domänen.

Die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen den Feldgrößen werden meist so dargestellt, daß man die pauschale Flußdichte oder die pauschale Polarisation in Abhängigkeit von der Feldstärke als Zustandskurven darstellt. Man unterscheidet zwischen statischen und dynamischen Zustandskurven.

Der Zustand des Materials, in dem die pauschale Polarisation, die pauschale Flußdichte und die Feldstärke gleich null sind, heißt neutraler Zustand. Er kann durch dynamisches, statisches oder thermisches

Depolarisieren erreicht werden.

Abmagnetisieren

Die vom neutralen Zustand ausgehende Zustandskurve bei monotoner Feldstärkesteigerung heißt Neukurve.

Die bei zyklischer Feldstärkeänderung auftretende, aus einem aufsteigend durchlaufenen und einem davon verschiedenen absteigend durchlaufenen Kurvenast bestehende statische geschlossene Zustandskurve heißt Hystereseschleife, siehe Bilder 1, 2 und 3. Die eingeschlossene Hysteresefläche gibt die bei einem Zyklus auf der Umpolarisation beruhende Verlustenergie-dichte an.

Für isotrope Materialien werden aus den Hystereseschleifen die folgenden Größen abgeleitet.