

Elektrisches Feld

Begriffe

DIN
1324

Electric field; quantities

1. Elektrische Feldstärke

Ein kleiner isolierter Prüfkörper, der die elektrische Ladung Q trägt, erfahre in einem elektrischen Feld die Kraft F^1). Man nennt elektrische Feldstärke am Ort des Prüfkörpers die Größe

$$E = \frac{F}{Q}. \quad (1)$$

Die Richtung des Vektors E ist die Richtung der Kraft F , wenn Q eine positive Ladung ist.

2. Elektrische Spannung

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

$$U_{12} = \int_1^2 E \, ds. \quad (2)$$

(ds ist das Linienelement der Wegkurve). Fällt der Endpunkt des Weges mit dem Anfangspunkt zusammen, so nennt man den Weg geschlossen oder Randlinie und die elektrische Spannung entlang diesem Weg elektrische Umlaufspannung oder elektrische Randspannung $\dot{U}$ (siehe auch DIN 1323).

3. Elektrische Flußdichte (elektrische Verschiebung, elektrische Verschiebungsdichte)

In einem endlichen Volumen V seien in beliebiger Verteilung elektrische Ladungen von der Gesamtgröße (algebraischen Summe) Q vorhanden. An jedem Flächenelement dA der Oberfläche (Hüllfläche) werde die Normale nach außen gerechnet. Dann gilt

$$\oint D \, dA = Q. \quad (3)$$

Der Feldvektor D wird elektrische Flußdichte oder elektrische Verschiebung oder elektrische Verschiebungsdichte genannt. Die Beziehung (3) wird auch „Satz vom elektrischen Hüllenfluß“ genannt. Er gilt unabhängig von den elektrischen Eigenschaften der (nichtleitenden) Substanz, in der die Hüllfläche A liegt.

In einer homogenen Substanz kann man sich einen engen, scheibenförmigen, stoffleeren Schlitz hergestellt und in ihm die Koordinate E_n der elektrischen Feldstärke gemessen denken, die in der Richtung der Normale n des Schlitzes liegt. Dann ist $D_n = \epsilon_0 E_n$ die Koordinate der elektrischen Flußdichte (Verschiebung, Verschiebungsdichte) in dieser Richtung. — Man kann die elektrische Flußdichte auch mit Hilfe zweier kleiner, dünner, gleicher Metallscheiben messen: bringt man sie aufeinanderliegend und ungeladen an den betrachteten Feldort, so ist die auf einer jeden influenzierte Flächendichte $\pm \sigma$ der elektrischen Ladung, die nach Trennung der Scheiben gemessen werden kann, ihrem Betrage nach gleich der Koordinate der elektrischen Flußdichte (Verschiebung, Ver-

schiebungsdichte) in Richtung der ursprünglichen Normale der Scheibe: $D_n = \sigma$. Durch Messung in drei aufeinander senkrechten Richtungen erhält man die elektrische Flußdichte an der betrachteten Stelle.

4. Elektrischer Fluß

Das über eine beliebige Fläche A erstreckte Integral der elektrischen Flußdichte D heißt elektrischer Fluß durch diese Fläche:

$$\Psi = \int_A D \, dA. \quad (4)$$

Das Vorzeichen des Elementes $D_n \, dA$ ist positiv, wenn die Richtung der elektrischen Flußdichte einen spitzen Winkel bildet mit der Richtung der Normale, die dem Flächenelement rechtswendig zugeordnet ist.

Ist die Fläche die geschlossene Hülle eines Raumteiles, so spricht man vom Hüllenfluß. Durch den Satz (3) wird also die Beziehung festgestellt zwischen dem elektrischen Hüllenfluß und der in der Hülle eingeschlossenen gesamten elektrischen Ladung.

5. Elektrische Feldkonstante

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

$$D = \epsilon_0 E. \quad (5)$$

Die universelle Konstante ϵ_0 heißt elektrische Feldkonstante.

6. Permittivität, Dielektrizitätskonstante

In einem isotropen Dielektrikum haben in demselben Feldpunkt E und D die gleiche Richtung. Dann ist der Quotient: Betrag der Flußdichte geteilt durch den Betrag der Feldstärke in demselben Feldpunkt ein den Stoff kennzeichnender, positiver Skalar. Er heißt Permittivität ϵ . Im leeren Raum ist diese Größe nach Abschnitt 5 gleich der elektrischen Feldkonstanten ϵ_0 . Das Verhältnis $\epsilon/\epsilon_0 = \epsilon_r$ heißt Permittivitätszahl (relative Permittivität). Es ist also in isotropen Stoffen

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E. \quad (6)$$

Stoffe, deren Permittivität vom Betrag der Feldstärke abhängt, bei denen also der Zusammenhang zwischen D und E nichtlinear ist (durch eine Kurve wiedergegeben wird), heißen nichtlinear wirkende oder kurz nichtlineare Dielektrika, siehe Abschnitt 11. Stoffe, bei denen im Grade der geforderten oder erreichten Genauigkeit und im betrachteten Bereich die Permittivität unabhängig vom Betrag der Feldstärke ist, bei denen also D und E einander proportional sind, heißen linear wirkende oder kurz lineare Dielektrika. Ihre Permittivität wird Dielektrizitätskonstante, ihre Permittivitätszahl wird Dielektrizitätszahl genannt.

In anisotropen Stoffen ist die Permittivität (Dielektrizitätskonstante) ein Tensor zweiter Stufe.

¹⁾ Darstellung von Vektoren durch Fettdruck nach DIN 1303.

7. Elektrische Polarisierung und Elektrisierung

Die Größe

$$P = D - \varepsilon_0 E \quad (7)$$

heißt elektrische Polarisierung; hierzu siehe auch Abschnitt 9.

Die Größe

$$\frac{P}{\varepsilon_0} = \frac{D}{\varepsilon_0} - E \quad (8)$$

wird Elektrisierung genannt.

8. Elektrische Suszeptibilität

Das Verhältnis: Betrag der Elektrisierung P/ε_0 geteilt durch den Betrag der elektrischen Feldstärke E wird elektrische Suszeptibilität χ_e genannt:

$$\frac{P/\varepsilon_0}{E} = \chi_e = \varepsilon_r - 1. \quad (9)$$

In Tafelwerken, vor allem in älteren, werden oft die Werte $\chi'_e = \chi_e/4\pi$ angegeben. Zur Unterscheidung kann χ_e rationale, χ'_e nichtrationale Suszeptibilität genannt werden.

9. Elektrisches Moment

9.1. Ein elektrischer Dipol wird gebildet durch zwei voneinander isolierte Träger entgegengesetzt gleichgroßer Punktladungen in bestimmtem Abstand voneinander. Das Dipolmoment ist dem Betrage nach das Produkt aus dem Betrag der Ladung und dem Abstand; als Vektor hat es die Richtung vom negativen Ladungsträger zum positiven. Das elektrische Moment eines elektrisch polarisierten Körpers ist die vektorielle Summe seiner elementaren Dipolmomente.

9.2. Ein elektrischer Dipol sei so in einem homogenen elektrischen Feld im leeren Raum angeordnet, daß das Dipolmoment senkrecht zu dem äußeren elektrischen Feld gerichtet ist. Dann erfährt der Dipol, als starrer Körper gedacht, ein Drehmoment, dessen Betrag gleich ist dem Produkt aus dem Betrag des Dipolmomentes und dem Betrag der äußeren elektrischen Feldstärke. Bei dieser Festlegung ist die in (7) definierte elektrische Polarisierung eines Volumenteiles eines Körpers gleich dem Quotienten: elektrisches Moment dieses Teiles geteilt durch sein Volumen.

10. Elektrische Leitungsströmung; elektrischer Leiter

10.1. Elektrische Leitungsströmung

Tritt durch den Querschnitt eines homogenen fadenförmigen (geometrisch linearen) Leiters in der Zeitspanne dt die positive Elektrizitätsmenge dQ , so nennt man $dQ/dt = I$ die elektrische Leitungsstromstärke. Ist I gleichmäßig über den Querschnitt A des Leiters verteilt, so ist die elektrische Stromdichte ihrem Betrage nach durch $J = I/A$ gegeben. Die elektrische Stromdichte und die elektrische Feldstärke sind erfahrungsgemäß im homogenen metallischen Leiter einander gleich gerichtet und einander proportional:

$$J = \gamma E, \quad E = \rho J. \quad (10)$$

Die Stoffkonstante γ wird elektrische Leitfähigkeit genannt, ihr Kehrwert $\rho = 1/\gamma$ spezifischer elektrischer Widerstand.

10.2. Dünne (geometrisch lineare) Leiter

Wird aus (10) das Linienintegral entlang einem homogenen dünnen (linearen) Leiter (fadenförmigen Leiter) von überall gleichem Querschnitt A zwischen einem Anfangspunkt 1 und einem um die Strecke l entfernten Endpunkt 2 gebildet, so entsteht

$$U_{12} = \frac{Jl}{\gamma} = \frac{I_{12} l}{\gamma A} = I_{12} R, \quad (11)$$

wobei die Stromstärke I_{12} das gleiche Vorzeichen hat, wie die Spannung U_{12} ; die Größe $R = l/(\gamma A)$ heißt der elektrische Widerstand, ihr Kehrwert $1/R = \gamma A/l$ der elektrische Leitwert des linearen Leiters von der Länge l und vom Querschnitt A (Draht, Stab, Band). R ist definitionsgemäß stets positiv. Die Beziehung (10) heißt das Ohmsche Gesetz für homogene Leiter, (11) für homogene lineare (fadenförmige) Leiter.

10.3. Inhomogene Leiter

An Berührungsflächen von Körpern verschiedener Beschaffenheiten können Potentialsprünge auftreten. An einem zusammenhängenden elektrisch leitenden Körper, der beliebig inhomogen, z. B. geschichtet, ist (Beispiel: galvanische Zelle, Konzentrationskette, Thermoelement), nimmt man deshalb zwischen seinen Endschichten im umgebenden Nichtleiter ein andauerndes elektrisches Feld (eine elektrische Feldstärke) wahr. Man kann seinem Innern in summarischer (pauschaler) Betrachtungsweise eine eingeprägte elektrische Feldstärke E_e zuschreiben, die sich der Feldstärke E überlagert. E_e ist eine an dem inhomogenen leitenden Körper haftende Eigenschaftsgröße. Das von einem Anfangspunkt 1 zu einem Endpunkt 2 genommene Linienintegral der eingepprägten elektrischen Feldstärke wird (eingepprägte) elektromotorische Kraft genannt:

$E_{12} = \int_1^2 E_e \cdot ds$. Sie kann bei Stromlosigkeit als $-U_{12}$ im Außenraum festgestellt werden, wenn 1 und 2 die Endschichten des Körpers sind. Im Fall $I_{12} \neq 0$ ist

$$U_{12} + E_{12} = I_{12} R, \quad (12)$$

vergleiche die Anmerkungen und DIN 1323. An Stelle von (10) gilt beim inhomogenen Körper

$$J = \gamma(E + E_e), \quad E + E_e = \rho J. \quad (13)$$

11. Nichtlineare Dielektrika (Ferroelektrika)

11.1. Die Zusammenhänge der Zustandsgrößen entsprechen in wesentlichen Zügen denen der Ferromagnetika, siehe DIN 1325. Die Darstellung der Flußdichte D oder der Polarisierung P in Abhängigkeit von der Feldstärke E heißt Elektrisierungskurve. Neukurve heißt die im Punkte $E = 0$, $D = P = 0$ beginnende Elektrisierungskurve. Wird eine Folge von Feldstärkewerten zwischen zwei entgegengesetzt gleichgroßen Beträgen zyklisch durchlaufen, so besteht die Elektrisierungskurve aus einem absteigend und einem aufsteigend durchlaufenen Kurvenast. Man nennt diese Kurve Hystereseschleife und die von beiden Kurvenästen eingeschlossene Fläche Hysteresefläche. Man nennt den für $E = 0$ vorhandenen Wert der Flußdichte und der Polarisierung $D_r = P_r$ Remanenzflußdichte; der für $P = 0$ vorhandene Wert der Feldstärke E_c heißt Koerzitivfeldstärke der Polarisierung, der für $D = 0$ vorhandene Wert der Feldstärke E_c heißt Koerzitivfeldstärke der Flußdichte.