

DIN 1324-1

ICS 17.220.01

Einsprüche bis 2008-10-31
Vorgesehen als Ersatz für
DIN 1324-1:1988-05

Entwurf**Elektromagnetisches Feld –
Teil 1: Zustandsgrößen**

Electromagnetic field –
Part 1: State quantities

Champs électromagnétique –
Partie 1: Grandeurs d'état

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2008-06-23 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an natg@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) im DIN, 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 27 Seiten

Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) im DIN
DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Vorwort

Für den Anwendungsbereich dieses Norm-Entwurfes bestehen keine entsprechenden regionalen oder internationalen Normen

Diese Norm wurde vom Gemeinschaftsarbeitskreis GAK 111.0.1 des NATG-A und der DKE erarbeitet.

DIN 1324 „*Elektromagnetisches Feld*“ besteht aus:

- *Teil 1: Zustandsgrößen*
- *Teil 2: Materialgrößen*
- *Teil 3: Elektromagnetische Wellen*

Änderungen

Gegenüber DIN 1324-1:1988-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) in Abschnitt 5.5 „Stromdichte“ (vorher 4.5) Unterscheidung zwischen Leitungstromdichte und Konvektionsstromdichte;
- b) in Abschnitt 5.7 „Stromstärke“ (vorher 4.7) Unterscheidung zwischen Leitungstromstärke und Konvektionsstromstärke;
- c) in Abschnitt 5.8 „Verschiebungsstromdichte“ (vorher 4.8) Einführung des Formelzeichens $\vec{J}_D$;
- d) Erweiterung auf relativistische Elektrodynamik;
- e) redaktionelle Überarbeitung.

1 Anwendungsbereich

Zweck dieser Norm ist es, die Zustandsgrößen des elektromagnetischen Feldes, die in Teil 121 des Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuches (IEV) einzeln definiert sind, in geschlossener Form darzustellen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1303:1987-03, *Vektoren, Matrizen, Tensoren; Zeichen und Begriffe*

DIN 1304-1:1994-03, *Formelzeichen; Allgemeine Formelzeichen*

DIN 1324-2:1988-05, *Elektromagnetisches Feld; Materialgrößen*

DIN 1324-3:1988-05, *Elektromagnetisches Feld; Elektromagnetische Wellen*

DIN 4895-2:1977-11, *Orthogonale Koordinatensysteme; Differentialoperatoren der Vektoranalysis*

DIN EN 60375: *Vereinbarungen für Stromkreise und magnetische Kreise*

Deutsche Ausgabe des IEC Teil 121 (IEC 60050-121), *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch; Teil 121: Elektromagnetismus*

3 Allgemeines

Als elektromagnetisches Feld wird ein Zustand des Raumes bezeichnet, dem Impuls und Energie zugeschrieben werden können. Es ist durch einen Satz von vier miteinander verknüpften vektoriellen Größen bestimmt. Ursachen für elektrische und magnetische Felder sind ruhende und bewegte elektrische Ladungen. Letztere werden als Ströme bezeichnet. Die elektrische Ladung Q , früher auch Elektrizitätsmenge genannt, wird als Grunderscheinung der Elektrizität betrachtet; sie ist eine skalare Größe. Das elektromagnetische Feld charakterisiert zusammen mit den Quellen die elektrischen und magnetischen Zustände eines materiellen Mediums oder des Vakuums.

Als Quellengrößen des elektromagnetischen Feldes werden Einzelladungen Q , die Raumladungsdichte ρ und die Stromdichte $\vec{J}$ betrachtet.

Das durch die Quellen hervorgerufene Feld wird durch Feldgrößen beschrieben. Zusammen mit den Quellengrößen und abgeleiteten Größen bilden sie das System der Zustandsgrößen, welche Gegenstand dieser Norm sind. Es wird die Kontinuumstheorie zugrunde gelegt.

Das Adjektiv „quasi-infinitesimal“ kennzeichnet in einem System elementarer Entitäten (hier Ladungsträger) die Länge, den Flächeninhalt oder das Volumen eines Elements im Raum, wobei die Abmessungen des Elements im Vergleich zu den Abmessungen des betrachteten Gesamtsystems alle klein sind, aber so groß, dass das Element eine sehr große Anzahl elementarer Entitäten enthält. Der Ausdruck "quasi-infinitesimal" wird benutzt, um diesen Begriff von "infinitesimal" im mathematischen Sinn zu unterscheiden. Zur Berechnung wird jedoch auf infinitesimale Größen übergegangen.

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

Mit dem Symbol j wird die imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$ bezeichnet.

Die Materialgrößen, welche die stoffspezifischen Beziehungen zwischen den Feldgrößen beschreiben, werden in DIN 1324-2 behandelt.

Begriffe und Größen, die im Zusammenhang mit der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen stehen, werden in DIN 1324-3 behandelt.

Tabelle 1 — Übersicht

Größe oder Begriff	Formelzeichen	SI-Einheit	Abschnitt
Grundbegriffe			
Feldgrößen, Quellengrößen			4.1
Feldgleichungen			4.2
Feldkonstanten			4.4
magnetische Feldkonstante	μ_0	$\text{H/m} = \text{V} \cdot \text{s}/(\text{A} \cdot \text{m})$	4.4
elektrische Feldkonstante	ε_0	$\text{F/m} = \text{A} \cdot \text{s}/(\text{V} \cdot \text{m})$	4.4
Feldlinien			4.5
Ladung und Strom			
elektrische Ladung	Q	$\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}$	5.1
volumenbezogene elektrische Ladung	ρ	$\text{C/m}^3 = \text{A} \cdot \text{s/m}^3$	5.2
flächenbezogene elektrische Ladung	σ	$\text{C/m}^2 = \text{A} \cdot \text{s/m}^2$	5.3
längenbezogene elektrische Ladung	q_L	$\text{C/m} = \text{A} \cdot \text{s/m}$	5.4
Stromdichte	$\vec{J}$	A/m^2	5.5
Strombelag	$\vec{\alpha}$	A/m	5.6
Stromstärke	I	A	5.7
Verschiebungsstromdichte	$\vec{J}_D$	A/m^2	5.8
Gesamtstromdichte	$\vec{J}_{\text{tot}}$	A/m^2	5.9
Feldstärken und Flussdichten			
elektrische Feldstärke	$\vec{E}$	V/m	6.1
elektrische Flussdichte	$\vec{D}$	$\text{C/m}^2 = \text{A} \cdot \text{s/m}^2$	6.2
elektrischer Fluss	Ψ	$\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}$	6.3
magnetische Feldstärke	$\vec{H}$	A/m	6.4
magnetische Flussdichte	$\vec{B}$	$\text{T} = \text{V} \cdot \text{s/m}^2$	6.5
magnetischer Fluss	Φ	$\text{Wb} = \text{V} \cdot \text{s}$	6.6
Coulomb-Lorentz-Kraft	$\vec{F}$	N	6.7
Elektrische und magnetische Polarisation			
elektrische Polarisation	$\vec{P}$	$\text{C/m}^2 = \text{A} \cdot \text{s/m}^2$	7.1
Elektrisierung	$\vec{E}_i$	V/m	7.2

Tabelle 1 — (fortgesetzt)

Größe oder Begriff	Formelzeichen	SI-Einheit	Abschnitt
elektrisches Dipolmoment	$\vec{p}$	$C \cdot m = A \cdot s \cdot m$	7.3
magnetische Polarisation	$\vec{B}_i$	$T = V \cdot s / m^2$	7.4
Magnetisierung	$\vec{M}$	A / m	7.5
magnetisches Flächenmoment	$\vec{m}$	$A \cdot m^2$	7.6
magnetisches Dipolmoment	$\vec{j}$	$Wb \cdot m = V \cdot s \cdot m$	7.7
Spannungen und Potentiale			
Spannung	U	V	8.1
elektrisches Potential	φ_e	V	8.2
verketteter Fluss	Ψ	$Wb = V \cdot s$	8.3
induzierte Spannung	U_i	V	8.4
magnetisches Vektorpotential	$\vec{A}_m$	$Wb / m = V \cdot s / m$	8.5
magnetische Spannung	V_m	A	8.6
elektrische Durchflutung	Θ	A	8.7
Relativistische Elektrodynamik			
Viererpotential	$\vec{A}_v$	$V \cdot s / m$	9.1
Feldstärketensor	$\mathbf{F}$	$T = V \cdot s / m^2$	9.2
Viererstromdichte	$\vec{J}_v$	A / m^2	9.3
elektromagnetische Leistungsdichte	$\dot{w}$	$V \cdot A / m^3$	9.7
Energie-Impuls-Tensor	$\mathbf{T}$		9.8
Energie- und Impulsgrößen			
elektromagnetische Energiedichte	w	$J / m^3 = V \cdot A \cdot s / m^3$	10.1
Poynting-Vektor	$\vec{S}$	$W / m^2 = V \cdot A / m^2$	10.2
elektromagnetische Impulsdichte	$\vec{p}_v$	$N \cdot s / m^3 = V \cdot A \cdot s^2 / m^4$	10.3
Kraftdichte	$\vec{f}$	$N / m^3 = V \cdot A \cdot s / m^4$	10.4

4 Grundbegriffe

4.1 Feldgrößen und Quellengrößen

Feldgrößen sind

- die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ (siehe 6.1);
- die elektrische Flussdichte $\vec{D}$ (siehe 6.2);
- die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ (siehe 6.4);
- die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ (siehe 6.5).

Quellengrößen sind

- die volumenbezogene elektrische Ladung ρ (siehe Abschnitt 5.2) und
- die Stromdichte (siehe Abschnitt 5.5).

4.2 Feldgleichungen

Die Feldgrößen bilden ein System von Größen unterschiedlicher Tensor-Stufe (siehe DIN 1303:1987-03, Abschnitte 6 und 7). In dieser Norm werden Bi- und Trivektoren durch ihre jeweilige duale Ergänzung, das sind Monovektoren und Skalare, ersetzt.

Die Feldgrößen sind miteinander durch die Maxwell'schen Gleichungen, kurz die Feldgleichungen, verknüpft. Sie lauten:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}, \quad (2)$$

mit

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (4)$$

dabei ist t die Zeit.

Die Maxwellgleichungen (1) bis (4) sind invariant gegenüber Lorentz-Transformationen, d. h. sie gelten auch für bewegte Inertialsysteme, obwohl ihre Bestandteile, z. B. $\vec{E}$ und $\vec{H}$, nicht invariant sind.

Über die Bedeutung der Differentialoperatoren grad, div und rot siehe DIN 4895-2.

Statt in differentieller Form können die Maxwell'schen Gleichungen auch in Integralform angegeben und mit besonderen Benennungen gekennzeichnet werden:

Induktionsgesetz:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{e}_n dA + \oint_s (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r} \quad (5)$$

Durchflutungsgesetz:

$$\oint_s \vec{H} \cdot d\vec{r} = \int_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot \vec{e}_n dA \quad (6)$$

mit

$$\oint_A \vec{D} \cdot \vec{e}_n dA = Q = \int_V \rho \cdot dV \quad (7)$$

und

$$\oint_A \vec{B} \cdot \vec{e}_n dA = 0. \quad (8)$$

Dabei ist $\vec{r}$ der Ortsvektor, s die Weglänge, $\vec{e}_n$ der zur Hüllfläche orthogonale Einsvektor, A der Flächeninhalt der Hüllfläche und V das Volumen, über die die Integrale erstreckt werden. $d\vec{r}$ und $\vec{e}_n dA$ sind die Vektoren, die den Differentialen der Skalare r und A zugeordnet sind.

In den Gleichungen (5) und (6) wird mit dem Linienelement $d\vec{r}$ über die Randkurve und mit dem Flächenelement $\vec{e}_n dA$ über die durch die Randkurve begrenzte einfach zusammenhängende Fläche integriert; in den Gleichungen (7) und (8) wird mit $\vec{e}_n dA$ über eine geschlossene Fläche integriert, die ein Raumgebiet mit dem Volumen V einschließt. Dabei zeigt $\vec{e}_n dA$ nach außen und ist mit $d\vec{r}$ rechtsschraubig verknüpft.

In Materie kann der Zusammenhang zwischen den Feldgrößen durch die Materialgrößen elektrische Leitfähigkeit (Konduktivität) γ , Permittivität ε und Permeabilität μ beschrieben werden (siehe DIN 1324-2).

Sind die Materialgrößen von den Feldgrößen unabhängig, so wird die Materie als ideal bezeichnet. Wenn die Materie im gewählten Bezugssystem ruht, gelten in diesem Fall die Materialgleichungen:

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} \quad (9)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (10)$$

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

4.3 Felder in bewegten Systemen

In einem Koordinatensystem, das sich mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ gegenüber einem System mit den zugehörigen Feldern $\vec{E}$ und $\vec{B}$ translatorisch bewegt, ergeben sich das elektrische Feld $\vec{E}'$ und die magnetische Flussdichte $\vec{B}'$ zu:

$$\vec{E}' = \vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (12)$$

$$\vec{B}' = \vec{B} - \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c_0^2}. \quad (13)$$

Diese Beziehungen gelten nur im klassischen Fall, d. h. wenn die Geschwindigkeit v zwischen den Systemen klein gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 ist. Anderenfalls sind die Transformationsgleichungen der speziellen Relativitätstheorie anzuwenden:

$$\vec{E}' = \gamma \left(\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}) - \frac{\vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{E})}{1 + 1/\gamma} \right) \quad (14)$$

$$\vec{B}' = \gamma \left(\vec{B} - \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c_0^2} - \frac{\vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{B})}{1 + 1/\gamma} \right); \quad (15)$$

dabei ist $\vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c_0}$ und $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$. Die Gleichungen (12) und (13) ergeben sich hieraus mit $\vec{\beta} = 0$ und $\gamma = 1$.

4.4 Feldkonstanten

Die beiden Feldkonstanten μ_0 und ε_0 verknüpfen elektromagnetische Größen mit mechanischen Größen.

Die magnetische Feldkonstante μ_0 ergibt sich aus der Beziehung

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{|I_1 I_2|}{d}, \quad (16)$$

dabei ist F/l der Betrag der längenbezogenen Kraft zwischen zwei geradlinigen parallelen Leitern unendlicher Länge und vernachlässigbaren Querschnitts, die einen Abstand d voneinander haben, sich im Vakuum befinden und von elektrischen Strömen der Stromstärken I_1 und I_2 durchflossen werden. Der Größenwert der magnetischen Feldkonstante beträgt

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \approx 1,256\,637\,061 \text{ }\mu\text{H/m} \quad (17)$$

Die elektrische Feldkonstante ε_0 ergibt sich aus der Beziehung

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}, \quad (18)$$

die auf dem Coulombschen Gesetz für das Vakuum beruht; dabei ist F der Betrag der Kraft zwischen Punktladungen mit den elektrischen Ladungen Q_1 beziehungsweise Q_2 , die einen Abstand r voneinander haben. Der Größenwert der elektrischen Feldkonstante beträgt

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} = 8,854\,187\,817 \dots \text{ pF/m}. \quad (19)$$

Die in Gleichung (19) enthaltene Konstante

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (20)$$

ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Im Internationalen Einheitensystem (SI) sind die Größenwerte für μ_0 und c_0 mit den Definitionen der Basiseinheiten Meter und Ampere implizit festgelegt. Aus der Gleichung (19) ergibt sich damit auch der Größenwert für ε_0 .

Im Vakuum sind Flussdichten und Feldstärken durch die Feldkonstanten verknüpft. Es gelten die Beziehungen:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (21)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}. \quad (22)$$

4.5 Feldlinien

Die Konfiguration eines elektromagnetischen Feldes kann durch Feldlinien dargestellt werden. Eine Feldlinie ist die Raumkurve, welche durchlaufen wird, wenn stets in Richtung der zugehörigen vektoriellen Feldgröße fortgeschritten wird. Eine Feldlinie, die zur vektoriellen Ortsfunktion $\vec{E}$ gehört und deren Inkrement des Fortschreitens mit $d\vec{r}$ bezeichnet wird, wird mathematisch durch die Beziehung

$$\vec{E} \times d\vec{r} = 0 \quad (23)$$

beschrieben.

5 Ladung und Stromstärke

5.1 Elektrische Ladung Q

SI-Einheit: $C = A \cdot s$

Es gibt zwei unterschiedliche Ladungsarten, die positiv und negativ genannt werden. Die positive Ladung entspricht derjenigen, die nach Übereinkunft dem Proton zugeordnet wird, und die negative derjenigen, die nach Übereinkunft dem Elektron zugeordnet wird.

Die elektrische Ladung in einem Raumbereich ist die algebraische Summe der darin enthaltenen positiven und negativen Ladungen. Ladung kann in einem abgeschlossenen System weder erzeugt noch zerstört werden. Dieser Sachverhalt wird als Ladungserhaltungssatz bezeichnet.

Ladungen sind an materielle Träger, die Ladungsträger, gebunden. Freie Ladungsträger können sich, zum Beispiel unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes, frei bewegen.

Ladung, die auf einen hinreichend kleinen Raumbereich beschränkt ist, kann als in einem Punkt konzentriert angenommen werden. In Analogie zur Punktmasse wird sie dann als Punktladung bezeichnet.

Elektrische Ladungen üben mechanische Kräfte aufeinander aus. Für zwei Teilchen mit den Ladungen Q_1 und Q_2 gibt das Coulombsche Gesetz die Kraft F_{12} an, die das Teilchen mit der Ladung Q_1 auf das Teilchen mit der Ladung Q_2 ausübt:

$$\vec{F}_{12} = k \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}_{21}}{r} = k \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{e}_{21}; \quad (24)$$