Formeln

1 Einführung

Das analytische Werkzeug

Einige Vektorformeln

$\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) = \vec{b} \cdot (\vec{c} \times \vec{a}) = \vec{c} \cdot (\vec{a} \times \vec{b})$
$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = \vec{b}(\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{c}(\vec{a} \cdot \vec{b})$ $(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c} = \vec{b}(\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{a}(\vec{b} \cdot \vec{c})$
$(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot (\vec{c} \times \vec{d}) = (\vec{a} \cdot \vec{c})(\vec{b} \cdot \vec{d}) - (\vec{b} \cdot \vec{c})(\vec{a} \cdot \vec{d}) =$ $= \vec{a} \cdot [\vec{b} \times (\vec{c} \times \vec{d})]$
$(\vec{a} \times \vec{b}) \times (\vec{c} \times \vec{d}) = \vec{c}[(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{d}] - \vec{d}[(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}] =$ $= \vec{b}[(\vec{c} \times \vec{d}) \cdot \vec{a}] - \vec{a}[(\vec{c} \times \vec{d}) \cdot \vec{b}]$
$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) + \vec{b} \times (\vec{c} \times \vec{a}) + \vec{c} \times (\vec{a} \times \vec{b}) = \vec{0}$

Das Tensorprodukt

Das Tensorprodukt ist nicht kommutativ!

$$\mathcal{T} = \vec{a} \otimes \vec{b} = \begin{array}{l} T_{11}\vec{e_1} \otimes \vec{e_1} + T_{12}\vec{e_1} \otimes \vec{e_2} + T_{13}\vec{e_1} \otimes \vec{e_3} + \\ T_{21}\vec{e_2} \otimes \vec{e_1} + T_{22}\vec{e_2} \otimes \vec{e_2} + T_{23}\vec{e_2} \otimes \vec{e_3} + \\ T_{31}\vec{e_3} \otimes \vec{e_1} + T_{32}\vec{e_3} \otimes \vec{e_2} + T_{33}\vec{e_3} \otimes \vec{e_3} \end{array} = \sum_{i,j} T_{ij}\vec{e_i} \otimes \vec{e_j} \tag{7}$$

Kreiszylinderkoordinaten

$$x = \rho\cos(\alpha), \qquad y = \rho\sin(\alpha), \qquad z = z \tag{18}$$

$$\left.\begin{array}{l} \vec{e_\rho} = \cos(\alpha)\vec{e_x} + \sin(\alpha)\vec{e_y}, \\ \vec{e_\alpha} = -\sin(\alpha)\vec{e_x} + \cos(\alpha)\vec{e_y}, \\ \vec{e_z} = \vec{e_z}, \end{array}\right\} \begin{array}{l} \vec{e_x} = \cos(\alpha)\vec{e_\rho} - \sin(\alpha)\vec{e_\alpha}, \\ \vec{e_y} = \sin(\alpha)\vec{e_\rho} + \cos(\alpha)\vec{e_\alpha}, \\ \vec{e_z} = \vec{e_z}, \end{array}\Bigg\} \tag{19}$$

Kugelkoordinaten

$$x = r\sin(\theta)\cos(\alpha), \qquad y = r\sin(\theta)\sin(\alpha), \qquad z = r\cos(\theta) \tag{22}$$

Rechenregeln für räumliche Ableitungen

$$\left.\begin{array}{l}\vec{e_r} = \sin(\theta)\cos(\alpha)\vec{e_x} + \sin(\theta)\sin(\alpha)\vec{e_y} + \cos(\theta)\vec{e_z},\\ \vec{e_\theta} = \cos(\theta)\cos(\alpha)\vec{e_x} + \cos(\theta)\sin(\alpha)\vec{e_y} - \sin(\theta)\vec{e_z},\\ \vec{e_\alpha} = -\sin(\alpha)\vec{e_x} + \cos(\alpha)\vec{e_y},\end{array}\right\}$$
$$\left.\begin{array}{l}\vec{e_x} = \sin(\theta)\cos(\alpha)\vec{e_r} + \cos(\theta)\cos(\alpha)\vec{e_\theta} - \sin(\alpha)\vec{e_\alpha},\\ \vec{e_y} = \sin(\theta)\sin(\alpha)\vec{e_r} + \cos(\theta)\sin(\alpha)\vec{e_\theta} + \cos(\alpha)\vec{e_\alpha},\\ \vec{e_z} = \cos(\theta)\vec{e_r} - \sin(\theta)\vec{e_\theta}\end{array}\right\} \quad (23)$$

Summen von Feldern
$\nabla(f+g) = \nabla f + \nabla g$
$\nabla \cdot (\vec{f}+\vec{g}) = \nabla \cdot \vec{f} + \nabla \cdot \vec{g}$
$\nabla \times (\vec{f}+\vec{g}) = \nabla \times \vec{f} + \nabla \times \vec{g}$
Produkt von Skalarfeldern
$\nabla(fg) = f\nabla g + g\nabla f$
Produkte von Skalarfeldern mit Vektorfeldern
$\nabla \cdot (f\vec{g}) = f\nabla \cdot \vec{g} + \vec{g} \cdot \nabla f$
$\nabla \times (f\vec{g}) = f\nabla \times \vec{g} + (\nabla f) \times \vec{g}$
Skalares Produkt von Vektorfeldern
$\nabla(\vec{f} \cdot \vec{g}) = \vec{f} \cdot \nabla\vec{g} + \vec{g} \cdot \nabla\vec{f} + \vec{f} \times (\nabla \times \vec{g}) + \vec{g} \times (\nabla \times \vec{f})$
Vektorielle Produkte von Vektorfeldern
$\nabla \cdot (\vec{f} \times \vec{g}) = \vec{g} \cdot (\nabla \times \vec{f}) - \vec{f} \cdot (\nabla \times \vec{g})$
$\nabla \times (\vec{f} \times \vec{g}) = \vec{f}\nabla \cdot \vec{g} - \vec{g}\nabla \cdot \vec{f} + \vec{g} \cdot \nabla\vec{f} - \vec{f} \cdot \nabla\vec{g}$
Identitäten
$\nabla \cdot (\nabla f) = \nabla^2 f = \Delta f$
$\nabla \times (\nabla f) = \vec{0}$
$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{f}) = 0$
$\nabla \times (\nabla \times \vec{f}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{f}) - \nabla^2\vec{f}$

(24)

Räumliche Ableitungen

Kartesische Koordinaten x, y, z
$\nabla f = \vec{e_x}\partial_x f + \vec{e_y}\partial_y f + \vec{e_z}\partial_z f$
$\nabla \cdot \vec{f} = \partial_x f_x + \partial_y f_y + \partial_z f_z$
$\nabla \times \vec{f} = \vec{e_x}(\partial_y f_z - \partial_z f_y) + \vec{e_y}(\partial_z f_x - \partial_x f_z) + \vec{e_z}(\partial_x f_y - \partial_y f_x)$
$\nabla^2 f = {\partial_x}^2 f + {\partial_y}^2 f + {\partial_z}^2 f$
Kreiszylinderkoordinaten ρ, α, z
$\nabla f = \vec{e_\rho}\partial_\rho f + \vec{e_\alpha}\frac{1}{\rho}\partial_\alpha f + \vec{e_z}\partial_z f$
$\nabla \cdot \vec{f} = \frac{1}{\rho}\partial_\rho(\rho f_\rho) + \frac{1}{\rho}\partial_\alpha f_\alpha + \partial_z f_z$
$\nabla \times \vec{f} = \vec{e_\rho}(\frac{1}{\rho}\partial_\alpha f_z - \partial_z f_\alpha) + \vec{e_\alpha}(\partial_z f_\rho - \partial_\rho f_z) + \vec{e_z}\frac{1}{\rho}[\partial_\rho(\rho f_\alpha) - \partial_\alpha f_\rho]$
$\nabla^2 f = \frac{1}{\rho}\partial_\rho(\rho\partial_\rho f) + \frac{1}{\rho^2}{\partial_\alpha}^2 f + {\partial_z}^2 f$
Kugelkoordinaten r, θ, α
$\nabla f = \vec{e_r}\partial_r f + \vec{e_\theta}\frac{\partial_\theta f}{r} + \vec{e_\alpha}\frac{\partial_\alpha f}{r\sin(\theta)}$
$\nabla \cdot \vec{f} = \frac{\partial_r(r^2 f_r)}{r^2} + \frac{\partial_\theta[\sin(\theta) f_\theta]}{r\sin(\theta)} + \frac{\partial_\alpha f_\alpha}{r\sin(\theta)}$
$\nabla \times \vec{f} = \vec{e_r}\frac{\partial_\theta[\sin(\theta) f_\alpha] - \partial_\alpha f_\theta}{r\sin(\theta)} + \vec{e_\theta}[\frac{\partial_\alpha f_r}{r\sin(\theta)} - \frac{\partial_r(r f_\alpha)}{r}] + \vec{e_\alpha}\frac{\partial_r(r f_\theta) - \partial_\theta f_r}{r}$
$\nabla^2 f = \frac{\partial_r(r^2\partial_r f)}{r^2} + \frac{\partial_\theta[\sin(\theta)\partial_\theta f]}{r^2\sin(\theta)} + \frac{{\partial_\alpha}^2 f}{r^2\sin^2(\theta)}$

2 Eigenschaften elektromagnetischer Felder

2.1 Globale und lokale Eigenschaften

Induktionsgesetz

$$U(\partial\mathcal{A}) = -\dot{\Phi}(\mathcal{A}) \tag{3}$$

$$\begin{aligned} U(\partial\mathcal{A}) + \dot{\Phi}(\mathcal{A}) &= \int_{\partial\mathcal{A}} \vec{s}\cdot\vec{E}\mathrm{d}s + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\mathcal{A}} \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}A = \\ &= \int \vec{n}\cdot(\nabla\times\vec{E})\mathrm{d}A + \int \vec{s}\cdot[\![\vec{E}]\!]\mathrm{d}s + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}A = \\ &= \int \vec{n}\cdot(\nabla\times\vec{E} + \partial_t\vec{B})\mathrm{d}A + \int \vec{s}\cdot[\![\vec{E}]\!]\mathrm{d}s = 0 \end{aligned}$$

$$\nabla\times\vec{E} = -\partial_t\vec{B}, \qquad \vec{n}\times[\![\vec{E}]\!] = \vec{0} \tag{8}$$

Satz vom magnetischen Hüllenfluß

$$\Phi(\partial\mathcal{V}) = 0 \tag{4}$$

$$\int_{\partial\mathcal{V}} \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}A = \int_{\mathcal{V}'} \nabla\cdot\vec{B}\mathrm{d}V + \int_{\mathcal{S}'} \vec{n}\cdot[\![\vec{B}]\!]\mathrm{d}A$$

$$\nabla\cdot\vec{B} = 0, \qquad \vec{n}\cdot[\![\vec{B}]\!] = 0 \tag{9}$$

Erhaltung der elektrischen Ladung

Kontinuitätsgleichung der elektrischen Ladung

$$I(\partial\mathcal{V}) = -\dot{Q}(\mathcal{V}) \tag{11}$$

$$I(\partial\mathcal{V}) + \dot{Q}(\mathcal{V}) = \int_{\partial\mathcal{V}} \vec{n}\cdot\vec{J}\mathrm{d}A + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\mathcal{V}'}\rho\mathrm{d}V + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\mathcal{S}'}\sigma\mathrm{d}A =$$

$$= \int_{\mathcal{V}'}(\nabla\cdot\vec{J} + \partial_t\rho)\mathrm{d}V + \int_{\mathcal{S}'}(\vec{n}\cdot[\![\vec{J}]\!] + \partial_t\sigma)\mathrm{d}A = 0$$

$$\nabla\cdot\vec{J} = -\partial_t\rho, \qquad \vec{n}\cdot[\![\vec{J}]\!] = -\partial_t\sigma \tag{15}$$

Ampere-Maxwell-Satz

$$V(\partial\mathcal{A}) = I(\mathcal{A}) + \dot{\Psi}(\mathcal{A}) \tag{17}$$

$$V(\partial\mathcal{A}) - I(\mathcal{A}) - \dot{\Psi} =$$

$$\int_{\partial\mathcal{A}}\vec{s}\cdot\vec{H}\mathrm{d}s - \int_{\mathcal{A}'}\vec{n}\cdot\vec{J}\mathrm{d}A - \int_{\mathcal{S}'}(\vec{s}\times\vec{n_2})\cdot\vec{K}\mathrm{d}s - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\mathcal{A}}\vec{n}\cdot\vec{D}\mathrm{d}A =$$

$$= \int_{\mathcal{A}'}\vec{n}\cdot(\nabla\times\vec{H} - \vec{J} - \partial_t\vec{D})\mathrm{d}A + \int_{\mathcal{S}'}\vec{s}\cdot([\![\vec{H}]\!] - \vec{K}\times\vec{n})\mathrm{d}s = 0$$

$$\nabla\times\vec{H} = \vec{J} + \partial_t\vec{D}, \qquad \vec{n}\times[\![\vec{H}]\!] = \vec{K} \tag{22}$$

Satz vom elektrischen Hüllenfluß

$$\Psi(\partial\mathcal{V}) = Q(\mathcal{V}) \tag{18}$$

$$\Psi(\partial\mathcal{V}) - Q(\mathcal{V}) = \int_{\partial\mathcal{V}}\vec{n}\cdot\vec{D}\mathrm{d}A - \int_{\mathcal{V}'}\rho\mathrm{d}V - \int_{\mathcal{S}'}\sigma\mathrm{d}A =$$

$$\int(\nabla\cdot\vec{D} - \rho)\mathrm{d}V + \int(\vec{n}\cdot[\![\vec{D}]\!] - \sigma)\mathrm{d}A = 0$$

$$\nabla\cdot D = \rho, \qquad \vec{n}\cdot[\![\vec{D}]\!] = \sigma \tag{23}$$

Die Maxwell–Gleichungen

Maxwell–Beziehung

$$\mu_0\varepsilon_0 c_0^2 = 1 \tag{25}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 &= 8{,}8542\cdot 10^{-12}\,\tfrac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}}\\ \mu_0 &= 4\pi\cdot 10^{-7}\,\tfrac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}\end{aligned}$$

Maxwellgleichungen für den leeren Raum

$$\begin{array}{rcl@{\qquad}rcl}
\nabla\times\vec{E} + \partial_t\vec{B} &=& \vec{0}, & \vec{n}\times[\![\vec{E}]\!] &=& \vec{0}\\
\nabla\cdot\vec{B} &=& 0, & \vec{n}\cdot[\![\vec{B}]\!] &=& 0\\
\frac{1}{\mu_0}\nabla\times\vec{B} - \varepsilon_0\partial_t\vec{E} &=& \vec{J}, & \frac{1}{\mu_0}\vec{n}\times[\![\vec{B}]\!] &=& \vec{K}\\
\varepsilon_0\nabla\cdot E &=& \rho, & \varepsilon_0\vec{n}\cdot[\![\vec{E}]\!] &=& \sigma
\end{array} \tag{26}$$

Maxwellgleichungen im Inneren von Körpern

Für die makroskopische Betrachtungsweise wird das mikroskopische Modell unter Verwendung von statistischen Verteilungsfunktionen auf ein Kontinuumsmodell abgebildet, die makroskopischen Felder werden in makroskopischen Bereichen glatt, also gewissermaßen verschmiert.

Übergang von den wahren elektrischen Ladungen und Stromdichten auf die effektiven, d.h. die wirkung von Ladungs- u. Strommomenten erster und höherer Ordung werden als Dichten von "fiktiven", gebundenen Ladungen und Strömen zusammengefaßt.

$$\begin{aligned} \rho &\to \rho - \nabla \cdot \vec{P} \\ \vec{J} &\to \vec{J} + \partial_t \vec{P} + \nabla \times \vec{M} \end{aligned} \tag{27}$$

$\vec{P}$	elektrischePolarisation	als Dichte der statistisch gemittelten elektrischen Dipolmomente interpretierbar.
$\vec{M}$	Magnetisierung	als Dichte der statistisch gemittelten magnetischen Dipolmomente interpretierbar

Verknüpfungsbeziehungen

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \qquad \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \tag{28}$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} + \partial_t \vec{B} &= \vec{0}, & \vec{n} \times [\![\vec{E}]\!] &= \vec{0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0, & \vec{n} \cdot [\![\vec{B}]\!] &= 0 \\ \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} - \varepsilon_0 \partial_t \vec{E} &= \vec{J} + \partial_t \vec{P} + \nabla \times \vec{M}, & \frac{1}{\mu_0} \vec{n} \times [\![\vec{B}]\!] &= \vec{K} + \vec{n} \times [\![\vec{M}]\!] \\ \varepsilon_0 \nabla \cdot E &= \rho - \nabla \cdot \vec{P}, & \varepsilon_0 \vec{n} \cdot [\![\vec{E}]\!] &= \sigma - \vec{n} \cdot [\![\vec{P}]\!] \end{aligned} \tag{30}$$

Zusammenhänge zwischen effektiven, wahren und fiktiven Größen

$$\begin{aligned} \vec{J^e} &= \vec{J} + \vec{J^f}, & \vec{K^e} &= \vec{K} + \vec{K^f}, \\ \rho^e &= \rho + \rho^f, & \sigma^e &= \sigma + \sigma^f. \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} \vec{J^f} &= \partial_t \vec{P} + \nabla \times \vec{M}, & \vec{K^f} &= \vec{n} \times [\![\vec{M}]\!], \\ \vec{J} &= \nabla \times \vec{H} - \partial_t \vec{D}, & \vec{K} &= \vec{n} \times [\![\vec{H}]\!], \\ \rho^f &= -\nabla \cdot \vec{P}, & \sigma^f &= -\vec{n} \cdot [\![\vec{P}]\!], \\ \rho^e &= \varepsilon_0 (\nabla \cdot \vec{E}), & \sigma^e &= \varepsilon_o \vec{n} \cdot [\![\vec{E}]\!], \\ \rho &= \nabla \cdot \vec{D}, & \sigma &= \vec{n} \cdot [\![\vec{D}]\!] \end{aligned}$$

Materialgleichungen

Ideal elektrisch leitfähiger Körper:	$\vec{E} = \vec{0}$
supraleitender Körper:	$\vec{E} = \vec{0}, \quad \vec{B} = \vec{0}$
ideal isolierender Körper:	$\vec{J} = \vec{0}$
linear homogen isotrop einfach elektrisch leitfähiger Körper:	$\vec{J} = \gamma\vec{E}, \qquad \gamma > 0$ lokales ohmsches Gesetz
linear isotrop u. einfach elektrisch leitfähig, aber inhomogen:	$\gamma(\vec{r})$ explizit bekannt
linear homogen anisotrop elektrisch leitfähig:	$\vec{J} = \underset{\sim}{\gamma} \cdot \vec{E}$
nicht einfache Leitungsvorgänge:	Abhängigkeiten von anderen Feldern (z.B. mechanische, magnetische, thermische), piezogalvanische, magnetogalvanische, thermogalvanische Effekte
elektrisch nichtpolarisierbarer Körper:	$\vec{P} = \vec{0}$ gilt mit hinreichender Genauigkeit
nicht magnetisierbarer Körper:	$\vec{M} = \vec{0}$ gilt mit hinreichender Genauigkeit
linear isotrope elektrische Polarisierbarkeit:	$\vec{P} = \varepsilon_0\chi\vec{E}$ $\vec{D} = \varepsilon\vec{E} = \varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E} = \varepsilon_0(1+\chi)\vec{E} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$ $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r, \quad \varepsilon_r = 1 + \chi$
linear isotrope Magnetisierbarkeit:	$\vec{M} = \kappa\vec{H} = \frac{\kappa}{\mu_0(1+\kappa)}\vec{B}$ $\vec{B} = \mu\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu_0(1+\kappa)\vec{H} = \mu_0(\vec{H}+\vec{M})$ $\mu = \mu_0\mu_r, \quad \mu_r = 1 + \kappa$
Körper mit lokalem u. instantanem Werkstoffverhalten:	Die Werte physikalischer Größen werden in einem Körperpunkt zu einem Zeitpunkt mit Werten anderer physikalischer Größen im selben Körperpunkt zum selben Zeitpunkt verknüpft.
Nichtlokales Verhalten:	muß bei sehr kurzen, d.h. in der Größenordnung der Gitterkonstanten liegenden, Wellenlängen bei akkustischen od. elektromagnetischen Wellen berücksichtigt werden.
Nichtinstantanes Verhalten:	macht sich vorallem durch molekulare, atomare od. elektronische Trägheitseffekte bei großen zeitlichen Änderungsraten bemerkbar. Anstatt der Materialfunktionen werden Funktionale benötigt. Sie bilden Funktionen auf Werte ab.

Ergänzungen für bewegte Körper

Version der Lorentz-Transformation für kleine Geschwindigkeiten.

$$\begin{aligned} \vec{E}' &= \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}, & \vec{B}' &= \vec{B}, \\ \vec{H}' &= \vec{H} - \vec{v} \times \vec{D}, & \vec{D}' &= \vec{D}, \\ \vec{M}' &= \vec{M} + \vec{v} \times \vec{P}, & \vec{P}' &= \vec{P}, \\ \vec{J}' &= \vec{J} - \vec{v}\rho, & \rho' &= \rho \end{aligned} \tag{43}$$

2.2 Die Feldgleichungen in Sonderfällen

Wenn ein Teil der Kopplungen der Maxwellgleichungen, entfällt, d.h. entweder die Kopplungen über die zeitlichen Änderungsraten oder über die Materialgleichungen sind schwach oder überhaupt nicht vorhanden, vereinfachen sich die Gleichungen beträchtlich.

Statische elektrische Felder

Hier gilt der elektrostatische Spannungsbegriff, die elektrische Feldstärke ist wirbelfrei.

$$\text{Induktionsgesetz:} \quad U(\partial\mathcal{A}) = -\underbrace{\dot{\Phi}(\mathcal{A})}_{0} \quad \rightarrow \quad \nabla \times \vec{E} = \vec{0}, \quad \vec{n} \times [\![\vec{E}]\!] = \vec{0}$$

$$\text{Satz vom el. Hüllenfluß:} \quad \Psi(\partial\mathcal{V}) = Q(\mathcal{V}) \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot D = \rho, \quad \vec{n} \cdot [\![\vec{D}]\!] = \sigma$$

Die Felder $\vec{D}$ und $\vec{E}$ sind über Materialgleichungen oder die Beziehung

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \tag{56}$$

verknüpft. $\vec{P}$, ρ und σ sind entweder als zeitlich konstante Felder vorgegeben, oder sie hängen auf bekannte Weise von der elektrischen Feldstärke ab.

Stationäre elektromagnetische Felder

Satz vom magnetischen Hüllenfluß:

$$\Phi(\partial\mathcal{V}) = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \vec{n} \cdot [\![\vec{B}]\!] = 0$$

Ampere-Maxwell-Satz:

$$V(\partial\mathcal{A}) = I(\mathcal{A}) + \underbrace{\dot{\Psi}(\mathcal{A})}_{0} \quad \rightarrow \quad \underbrace{\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad \vec{n} \times [\![\vec{H}]\!] = \vec{K}}_{\text{Durchflutungssatz}}$$

Aus dem Durchflutungssatz folgt mit $\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = 0$:

$$I(\partial\mathcal{V}) = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot \vec{J} = 0, \quad \vec{n} \cdot [\![\vec{J}]\!] = 0$$

Verknüpfung zwischen $\vec{B}$ und $\vec{H}$ erfolgt entweder über Materialgleichungen oder über die Verknüpfungsbeziehung:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0}\vec{B} - \vec{M} \tag{60}$$

$\vec{M}$, $\vec{J}$ und $\vec{K}$ sind entweder zeitlich konstante Felder oder sie hängen in bekannter Weise von $\vec{B}$ bzw. $\vec{H}$ ab.

$$H = \frac{N}{l} I \quad \text{Durchflutungssatz, mit:} \quad \frac{N}{l} I = K$$