Maxwell Gleichungen

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \overset{\text{Stokes}}{\to} \oint_{C(F)} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_F \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{F}$$

$$\mathrm{rot}\,\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \overset{\text{Stokes}}{\to} \oint_{C(F)} \vec{H}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \iint_F \vec{J}\cdot\mathrm{d}\vec{F} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_F \vec{D}\cdot\mathrm{d}\vec{F}$$

$$\mathrm{div}\,\vec{B} = 0 \overset{\text{Gauss}}{\to} \oiint_{O(V)} \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{F} = 0$$

$$\mathrm{div}\,\vec{D} = \rho_{\mathrm{V}} \overset{\text{Gauss}}{\to} \oiint_{O(V)} \vec{D}\cdot\mathrm{d}\vec{F} = \iiint_V \rho_{\mathrm{V}}\,\mathrm{d}V$$

Material Gleichungen

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P} \quad \overset{\text{hli}}{\to} \quad \vec{D} = \varepsilon\vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0\left(\vec{H} + \vec{M}\right) \quad \overset{\text{hli}}{\to} \quad \vec{B} = \mu\vec{H}$$

Kontinuitätsgleichung

$$\mathrm{div}\,\vec{J} = -\frac{\partial \rho_{\mathrm{V}}}{\partial t} \quad \overset{\text{Gauss}}{\to} \quad \oiint_{O(V)} \vec{J}\cdot\mathrm{d}\vec{F} = -\iiint_V \frac{\partial\rho_{\mathrm{V}}}{\partial t}\,\mathrm{d}V$$

Stetigkeitsbedingungen

Für Normalenvektor $\vec{n}$ von 1 nach 2 :

1 | 2 $\to \vec{n}$

$$\vec{n}\times\left(\vec{E}_2-\vec{E}_1\right) = \vec{0}$$

$$\vec{n}\cdot\left(\vec{D}_2-\vec{D}_1\right) = \rho_{\mathrm{F}}$$

$$\vec{n}\times\left(\vec{H}_2-\vec{H}_1\right) = \vec{J}_A$$

$$\vec{n}\cdot\left(\vec{B}_2-\vec{B}_1\right) = 0$$

Orthogonalität, Othonormalität $U_m(x), U_n(x) \in L^2(D)$

$\langle U_m, U_n\rangle = \int_D U_m^\star(x)U_n(x)\mathrm{d}x = \delta_{mn}$ Orthonormalität

$\langle U_m, U_n\rangle = \delta_{mn}c_{mn}, \quad c_{mn} \notin \{0,1\}$ Orthogonatität

Vollständiges Funktionensystem $U_n(x)$

$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n U_n(x)$ mit $c_n = \int_D U_n^\star(x')f(x')\mathrm{d}x'$ (Entwicklung)

$\sum_{n=1}^{\infty} U_n^\star(x')U_n(x) = \delta(x-x')$ (Vollständigkeitsrelation)

Elektrisches Skalarpotential

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = \vec{0} \to \vec{E} = -\mathrm{grad}\,\phi$$

$$\Delta\phi = -\frac{1}{\varepsilon}\rho_{\mathrm{V}} \quad \text{Poisson-Gleichung}$$

Coulomb-Integral

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\iiint_V \frac{\rho_{\mathrm{V}}(\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|}\mathrm{d}^3r'$$

Spannung an $\vec{r}_2$ bezogen auf $\vec{r}_1$

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = \vec{0} \to U_{21} = \phi(\vec{r}_2) - \phi(\vec{r}_1) = \int_{\vec{r}_2}^{\vec{r}_1} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{s} \quad \text{wegunabhängig}$$

Kraft auf q, Arbeit $\vec{r}_1 \to \vec{r}_2$, Energie

$\vec{F} = q\vec{E} \quad A = q\int_{\vec{r}_2}^{\vec{r}_1}\vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{s} = q\left[\phi(\vec{r}_2)-\phi(\vec{r}_1)\right] = qU_{21}$

$w_{\mathrm{e}} = \frac{1}{2}\vec{E}\cdot\vec{D} \quad W_{\mathrm{e}} = \frac{1}{2}\iiint_V \vec{E}\cdot\vec{D}\,\mathrm{d}V$

Dipol bei $\vec{r}\,'$, Dipoldichte, Kraft, Drehmoment

$$\phi_D(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon}\frac{\vec{p}\cdot(\vec{r}-\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|^3}$$

$$\vec{E}_D(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon}\left[\frac{3\left[\vec{p}\cdot(\vec{r}-\vec{r}\,')\right](\vec{r}-\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|^5} - \frac{\vec{p}}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|^3}\right]$$

$$\phi_D(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon}\iiint_V \frac{\vec{m}\cdot(\vec{r}-\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|^3}\mathrm{d}^3r'$$

$$\vec{F}_D(\vec{r}) = (\vec{p}\cdot\nabla)\vec{E}(\vec{r}) = \mathrm{grad}\left(\vec{p}\cdot\vec{E}(\vec{r})\right) \quad \vec{M}_D(\vec{r})) = \vec{p}\times\vec{E}(\vec{r})$$

Skalarpotential mit Randwerten auf $O(V)$

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\iiint_V \frac{\rho_{\mathrm{V}}(\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|}\mathrm{d}^3r'$$

$$+\frac{1}{4\pi}\oiint_{O(V)}\left[\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|}\frac{\partial\phi(\vec{r}\,')}{\partial n'} - \phi(\vec{r}\,')\frac{\partial}{\partial n'}\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|}\right]\mathrm{d}^2r'$$

Greensche Funktionen von $\Delta G(\vec{r},\vec{r}\,') = -\frac{1}{\varepsilon}\delta(\vec{r}-\vec{r}\,')$

$G(\vec{r},\vec{r}\,') = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|} + \Gamma(\vec{r},\vec{r}\,')$

$\Delta\Gamma(\vec{r},\vec{r}\,') = 0, \quad \Gamma(\vec{r},\vec{r}\,') = \Gamma(\vec{r}\,',\vec{r})$

$$\phi(\vec{r}) = \iiint_V \rho_{\mathrm{V}}(\vec{r}\,')G(\vec{r},\vec{r}\,')\mathrm{d}^3r'$$

$$+\,\varepsilon\oiint_{O(V)}\left[G(\vec{r},\vec{r}\,')\frac{\partial\phi(\vec{r}\,')}{\partial n'} - \phi(\vec{r}\,')\frac{\partial G(\vec{r},\vec{r}\,')}{\partial n'}\right]\mathrm{d}^2r'$$

Dirichlet RB: $G(\vec{r},\vec{r}\,') = 0$ für $\vec{r}\,' \in O(V)$

Neumann RB: $-\varepsilon\oiint_{O(V)}\phi(\vec{r}\,')\frac{\partial G(\vec{r},\vec{r}\,')}{\partial n'}\mathrm{d}^2r' = \phi_0$

Halbraum durch geerdete Ebene. Normale $\vec{n}$ zeigt nach V

$G(\vec{r},\vec{r}\,') = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\left[\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|} - \frac{1}{|\vec{r}-[\vec{r}\,'-2\vec{n}(\vec{n}\cdot\vec{r}\,')]|}\right]$

geerdete Kugeloberfläche $K_a(\vec{0})$

$G(\vec{r},\vec{r}\,') = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\left[\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|} - \lambda\frac{1}{|\vec{r}-\lambda^2\vec{r}\,'|}\right], \quad \lambda = \frac{a}{|\vec{r}\,'|}$

Separation, $\Delta\phi = 0$, Kugelkoordinaten

$$\Delta = \underbrace{\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right)}_{\Delta_r:\ \text{Radialanteil}} + \frac{1}{r^2}\underbrace{\left(\frac{1}{\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial\vartheta}\sin\vartheta\frac{\partial}{\partial\vartheta} + \frac{1}{\sin^2\vartheta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right)}_{\Delta_{\vartheta\varphi}:\ \text{Winkelanteil}}$$

$\phi(r,\vartheta,\varphi) = R_l(r)\cdot Y_{lm}(\vartheta,\varphi)$ Produktansatz

$R_l(r) = Ar^l + Br^{-(l+1)}$ Radiallösung

$Y_{lm} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\frac{2l+1}{2}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}}P_{lm}(\cos\vartheta)e^{jm\varphi}$ Kugelflächenfunktionen

$P_{lm}(x) = (-\sqrt{1-x^2})^m\frac{\mathrm{d}^m P_l(x)}{\mathrm{d}x^m}$ zugeord. Legendrefunktionen

$P_l(x) = P_{l0}(x) = \frac{1}{2^l l!}\frac{\mathrm{d}^l(x^2-1)^l}{\mathrm{d}x^l}$ Legendre Polynome

Separation, $\Delta\phi = 0$, Zylinderkoordinaten

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial\varrho^2} + \frac{1}{\varrho}\frac{\partial}{\partial\varrho} + \frac{1}{\varrho^2}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

$\phi(\vec{r}) = R(\varrho)\cdot P(\varphi)\cdot Z(z)$ Produktansatz

für: $\frac{\mathrm{d}^2Z}{\mathrm{d}z^2} = +k^2Z, \ \frac{\mathrm{d}^2P}{\mathrm{d}\varphi^2} = -\nu^2P, \ x = k\varrho$

$x^2\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}x^2} + x\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}x} + (x^2-\nu^2)R = 0$ Bessel-DGL, Ordnung ν

Lösungen: Bessel Funktionen 1. Art $J_\nu(x)$ und 2. Art $Y_\nu(x)$ (Weber, Neumann)

für: $\frac{\mathrm{d}^2Z}{\mathrm{d}z^2} = -k^2Z$

$x^2\frac{\mathrm{d}^2R}{\mathrm{d}x^2} + x\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}x} - (x^2+\nu^2)R = 0$ mod. Bessel-DGL, Ordnung ν

Lösungen: mod. Bessel Funktionen 1. Art $I_\nu(x)$ und 2. Art $K_\nu(x)$

Stationäre Stromdichte, Strom

Allg.: $\vec{J}(\vec{r},t)=\rho_{\mathrm{V}}(\vec{r},t)\vec{v}(\vec{r},t)$ Stationär: $\frac{\partial \rho_{\mathrm{V}}}{\partial t}=0$ und $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}=0$

Strom durch Fläche: $I=\iint_F \vec{J}\cdot \mathrm{d}\vec{F}$

$\operatorname{div}\vec{J}=0 \overset{\text{Gauss}}{\rightarrow} \oiint_{O(V)} \vec{J}\cdot\mathrm{d}\vec{A}=0$ (Kirchhoffscher Knotensatz)

$\vec{J}=\kappa\vec{E}$ (außerhalb von Quellen, Ohmsches Gesetz)

Elektromotorische Kraft (EMK), Urspannung

Eingeprägte elektrische Feldstärke $\vec{E}_E$:

$\oint_C \vec{E}_E\cdot\mathrm{d}\vec{s}=U$ EMK, Urspannung

$\vec{J}=\kappa(\vec{E}+\vec{E}_E)$

$\rightarrow \oint_C \vec{J}\cdot\mathrm{d}\vec{s}=\oint_C \kappa\vec{E}_E\cdot\mathrm{d}\vec{s}=\kappa U$ (Kichhoffscher Maschensatz)

Leistungsdichte

$p_{\mathrm{V}}=\vec{E}\cdot\vec{J}$, für dünne Leiter: $P=UI$ (Joulsches Gesetz)

magnetisches Vektorpotential

$\vec{B}(\vec{r})=\operatorname{rot}\vec{A}(\vec{r})$

$\operatorname{grad}\operatorname{div}\vec{A}(\vec{r})-\Delta\vec{A}(\vec{r})=\mu\vec{J}(\vec{r})$

Eichtransformation

$\vec{A}'(\vec{r})=\vec{A}(\vec{r})+\operatorname{grad}\psi(\vec{r})\rightarrow\vec{B}'(\vec{r})=\vec{B}(\vec{r})$

Coulomb-Eichung: $\operatorname{div}\vec{A}(\vec{r})=0$

$\Delta\vec{A}(\vec{r})=-\mu\vec{J}(\vec{r})$

Lösung in Coulomb Eichung

$\vec{A}(\vec{r})=\frac{\mu}{4\pi}\iiint_V \frac{\vec{J}(\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|}\mathrm{d}^3r'$ (allgemein)

$\vec{A}(\vec{r})=\frac{\mu}{4\pi}\oint_{\text{Stromweg}}\frac{I}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|}\mathrm{d}\vec{s}\,'$ (Stromfaden)

Biot-Savart

$\vec{B}(\vec{r})=\frac{\mu}{4\pi}\iiint_V \frac{\vec{J}(\vec{r}\,')\times(\vec{r}-\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|^3}\mathrm{d}^3r'$ (allgemein)

$\vec{B}(\vec{r})=-\frac{\mu}{4\pi}\oint_{\text{Stromweg}} I\frac{(\vec{r}-\vec{r}\,')\times\mathrm{d}\vec{s}\,'}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|^3}$ (Stromfaden)

magnetische Energiedichte, Energie

$w_{\mathrm{m}}(\vec{r})=\frac{1}{2}\vec{H}(\vec{r})\cdot\vec{B}(\vec{r})=\frac{1}{2}\left(\vec{A}(\vec{r})\cdot\vec{J}(\vec{r})+\frac{1}{\mu}\operatorname{div}\left(\vec{A}(\vec{r})\times\vec{B}(\vec{r})\right)\right)$

$W_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}\iiint_V \vec{H}(\vec{r}\,')\cdot\vec{B}(\vec{r}\,')\mathrm{d}^3r'=\frac{1}{2}\iiint_V \vec{A}\cdot\vec{J}\,\mathrm{d}V+\frac{1}{2\mu}\oiint_{O(V)}\vec{A}\times\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{F}$

$w_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}\vec{A}\cdot\vec{J}$, $W_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}\cdot\iiint_V \vec{A}\cdot\vec{J}\,\mathrm{d}V$ (endliche Stromverteilungen)

Induktivität

$M_{21}=\frac{\phi_{m,2}}{I_1}=\frac{\mu_0}{4\pi}\oint_{C_2}\oint_{C_1}\frac{\mathrm{d}\vec{s}_1\cdot\mathrm{d}\vec{s}_2}{|\vec{r}\,'_2-\vec{r}\,'_1|}$

$L=M_{11}=\frac{\phi_m}{I}=\frac{1}{I}\iint_F \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{F}=\frac{1}{I}\oint_C \vec{A}\cdot\mathrm{d}\vec{s}=\frac{2}{I^2}W_{\mathrm{m}}$

magnetisches Moment

$\vec{m}(\vec{r})=\frac{1}{2}\iiint_V \vec{r}\,'\times\vec{J}(\vec{r}\,')\,\mathrm{d}V'$

$\vec{A}(\vec{r})=\frac{\mu}{4\pi}\frac{\vec{m}(\vec{r})\times\vec{r}}{r^3}+\ldots,\qquad \vec{B}(\vec{r})=\frac{\mu}{4\pi}\left[\frac{3(\vec{r}\cdot\vec{m}(\vec{r}))\vec{r}}{r^5}-\frac{\vec{m}(\vec{r})}{r^3}\right]+\ldots$

magnetisches Skalarpotential

$\operatorname{rot}\vec{H}=\vec{0}\rightarrow\vec{H}(\vec{r})=-\operatorname{grad}\phi_m(\vec{r})$

$\Delta\phi_m=\operatorname{div}\vec{M}$ für räumlich konstantes μ

Zeiger

$E(\vec{r},t)=\hat{E}(\vec{r})\cos(\omega t+\varphi)=\mathfrak{Re}\left\{\hat{E}(\vec{r})\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi)}\right\}=\mathfrak{Re}\left\{\underline{E}(\vec{r})\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\right\}$

EQS

$\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}=\vec{0}$ und $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}\neq\vec{0}$

$\vec{J}=\vec{J}_{\mathrm{L}}+\vec{J}_{\mathrm{E}}+\vec{J}_{\mathrm{K}}=\kappa\cdot\vec{E}+\vec{J}_{\mathrm{E}}+\vec{J}_{\mathrm{K}}$

$\underline{\vec{E}}=-\operatorname{grad}\underline{\phi}$ komplexes Skalarpotential

$\Delta\underline{\phi}=\frac{1}{\kappa+\mathrm{j}\omega\varepsilon}\operatorname{div}(\underline{\vec{J}}_{\mathrm{E}}+\underline{\vec{J}}_{\mathrm{K}})$ Poisson-Gleichung (komplex)

MQS

$\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\neq\vec{0}$ und $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}=\vec{0}$

$\vec{J}=\vec{J}_{\mathrm{L}}+\vec{J}_{\mathrm{E}}+\vec{J}_{\mathrm{K}}=\kappa\cdot\vec{E}+\vec{J}_{\mathrm{E}}+\vec{J}_{\mathrm{K}}$

Homogene Diffusionsgleichung:

$\Delta\Psi(\vec{r},t)-\mu\kappa\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\vec{r},t)=0\quad \Delta\underline{\Psi}(\vec{r},t)-\mathrm{j}\omega\mu\kappa\underline{\Psi}(\vec{r},t)=0$

Eindringtiefe: $\delta=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\kappa}}$

Oberflächenimpedanz: $\underline{Z}_A=\frac{1+\mathrm{j}}{\kappa\delta}=(1+\mathrm{j})\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\kappa}}=\sqrt{\frac{\mathrm{j}\omega\mu}{\kappa}}$

Oberflächenwiderstand: $R_A=\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\kappa}}=\frac{1}{\kappa\delta}$

Verlustleistung: $P=\iiint_V \vec{E}\cdot\vec{J}\mathrm{d}V=\iiint_V \frac{1}{\kappa}\left|\vec{J}\right|^2\mathrm{d}V$

$\langle P\rangle_T=A\int_0^\infty \frac{1}{\kappa}\frac{\kappa^2E_0^2}{2}\mathrm{e}^{-2\frac{x}{\delta}}\mathrm{d}x=A\frac{\kappa E_0^2}{4}\delta$

Induktion:

$U_{\mathrm{ind}}=\oint_{C(A)}\vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{s}=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_A \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{A}=-\dot{\Phi}$

$U_{\mathrm{ind}}=\oint_{C(A(t))}\left(\vec{E}+\vec{v}\times\vec{B}\right)\cdot\mathrm{d}\vec{s}=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_{A(t)}\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{A}=-\dot{\Phi}$

SRT: System S' bewegt sich mit $\vec{v}$ relativ zum System S ($v\ll c$):

$$\vec{E}'_{\|}=\vec{E}_{\|}\qquad\qquad \vec{B}'_{\|}=\vec{B}_{\|}$$
$$\vec{E}'_{\perp}=\vec{E}_{\perp}+\vec{v}\times\vec{B}\qquad\qquad \vec{B}'_{\perp}=\vec{B}_{\perp}$$

Energieerhaltung, Poyntingscher Vektor

Poynting-Vektor: $\vec{S}(\vec{r},t)=\vec{E}(\vec{r},t)\times\vec{H}(\vec{r},t)$

$\frac{\partial w_{\mathrm{mech}}}{\partial t}=\vec{E}\cdot\vec{J}=-\operatorname{div}\vec{S}-\vec{H}\cdot\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}-\vec{E}\cdot\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$ (allgemein)

$\vec{E}\cdot\vec{J}=-\operatorname{div}\vec{S}-\frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{1}{2}\vec{H}\cdot\vec{B}+\frac{1}{2}\vec{E}\cdot\vec{D}\right]=-\operatorname{div}\vec{S}-\frac{\partial w_{\mathrm{em}}}{\partial t}$ (lhi)

$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V (w_{\mathrm{mech}}+w_{\mathrm{em}})\,\mathrm{d}V=-\oiint_{O(V)}\vec{S}\cdot\mathrm{d}\vec{F}$ (lhi)

harmonische Zeitabhängigkeit:

$\vec{E}(\vec{r},t)=\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{E}}(\vec{r})\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\right\}=\frac{1}{2}\left[\underline{\vec{E}}(\vec{r})\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}+\underline{\vec{E}}^\star(\vec{r})\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}\right]$

$w_e=\frac{1}{4}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{E}}\cdot\underline{\vec{D}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\omega t}\right\}+\frac{1}{4}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{E}}\cdot\underline{\vec{D}}^\star\right\}\overset{\varepsilon\in\mathbb{R}}{=}\cdots+\frac{1}{4}\underline{\vec{E}}\cdot\underline{\vec{D}}^\star$

$w_m=\frac{1}{4}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{H}}\cdot\underline{\vec{B}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\omega t}\right\}+\frac{1}{4}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{H}}\cdot\underline{\vec{B}}^\star\right\}\overset{\mu\in\mathbb{R}}{=}\cdots+\frac{1}{4}\underline{\vec{H}}\cdot\underline{\vec{B}}^\star$

$\langle w_e\rangle=\frac{1}{4}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{E}}\cdot\underline{\vec{D}}^\star\right\}\overset{\varepsilon\in\mathbb{R}}{=}\frac{1}{4}\underline{\vec{E}}\cdot\underline{\vec{D}}^\star$

$\langle w_m\rangle=\frac{1}{4}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{H}}\cdot\underline{\vec{B}}^\star\right\}\overset{\mu\in\mathbb{R}}{=}\frac{1}{4}\underline{\vec{H}}\cdot\underline{\vec{B}}^\star$

$\langle p_V\rangle=\frac{1}{2}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{E}}\cdot\underline{\vec{J}}^\star\right\}\overset{\kappa\in\mathbb{R}}{=}\frac{1}{2}\underline{\vec{E}}\cdot\underline{\vec{J}}^\star$

$\underline{\vec{S}}=\frac{1}{2}\underline{\vec{E}}\times\underline{\vec{H}}^\star\quad\langle\vec{S}\rangle=\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{S}}\right\}$ komplexer Poynting Vektor

$\mathfrak{Re}\left\{\operatorname{div}\underline{\vec{S}}\right\}+\langle p_V\rangle=0\quad\mathfrak{Im}\left\{\operatorname{div}\underline{\vec{S}}\right\}+2\omega(\langle w_m\rangle-\langle w_e\rangle)=0$

$\oiint_{O(V)}\underline{\vec{S}}\cdot\mathrm{d}\vec{A}+\iiint_V\langle p_V\rangle\mathrm{d}V+\mathrm{j}2\omega\iiint_V(\langle w_m\rangle-\langle w_e\rangle)\,\mathrm{d}V=0$

$\langle P_V\rangle=\iiint_V\langle p_V\rangle\mathrm{d}V=-\oiint_{O(V)}\mathfrak{Re}\left\{\underline{\vec{S}}\right\}\cdot\mathrm{d}\vec{A}$ (Wirkleistung)

$2\omega\iiint_V(\langle w_m\rangle-\langle w_e\rangle)\,\mathrm{d}V=-\oiint_{O(V)}\mathfrak{Im}\left\{\underline{\vec{S}}\right\}\cdot\mathrm{d}\vec{A}$ (Blindleistung)