

Grundlagen

Zeitharmonische Maxwell-Gleichungen

für anisotrope, homogene Medien

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + j\omega\varepsilon\vec{E} && \iff \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A (\vec{J} + j\omega\varepsilon\vec{E}) \cdot d\vec{A} \\ -\nabla \times \vec{E} &= \vec{M} + j\omega\mu\vec{H} && \iff -\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \iint_A (\vec{M} + j\omega\mu\vec{H}) \cdot d\vec{A} \\ \nabla \cdot \vec{H} &= \rho_m/\mu && \iff \oiint_{\partial V} \vec{H} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\mu} \iiint_V \rho_m dV \\ \nabla \cdot \vec{E} &= \rho_e/\varepsilon && \iff \oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\varepsilon} \iiint_V \rho_e dV\end{aligned}$$

für Freiraumausbreitung und allgemein Vakuum: $\rho_e = \rho_m = 0$ und $\vec{J} = \vec{M} = \vec{0}$

Poynting-Vektor; Wirkleistung

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* \quad ; \quad P = \oiint \Re\{\vec{S}\} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{2} \oiint \Re\{\vec{E} \times \vec{H}^*\} \cdot d\vec{A}$$

Berechnung der Transversal- aus den Longitudinalkomponenten

$$\begin{aligned}\underline{E}_x \beta_c^2 &= \mp j\beta \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x} - j\omega\mu \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y} & \underline{E}_y \beta_c^2 &= \mp j\beta \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y} + j\omega\mu \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x} \\ \underline{H}_x \beta_c^2 &= \mp j\beta \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x} + j\omega\varepsilon \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y} & \underline{H}_y \beta_c^2 &= \mp j\beta \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y} - j\omega\varepsilon \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x}\end{aligned}$$

Polarisation

Drehsinn und Form

- $0^\circ < \alpha_x - \alpha_y < 180^\circ$: E_{0x} eilt E_{0y} vor, rechtsdrehend
- $0^\circ < \alpha_y - \alpha_x < 180^\circ$: E_{0y} eilt E_{0x} vor, linksdrehend
- $\alpha_x - \alpha_y = 0^\circ$ oder $\alpha_x - \alpha_y = 180^\circ$: E_{0x} oder E_{0y} gleich- oder gegenphasig, linear
- $\alpha_x - \alpha_y = 90^\circ$ und $|\underline{E}_{0x}| = |\underline{E}_{0y}|$: rechtsdrehend, zirkular
- $\alpha_y - \alpha_x = 90^\circ$ und $|\underline{E}_{0x}| = |\underline{E}_{0y}|$: linksdrehend, zirkular

HowTo: zeichnen einer Polarisationsellipse

1. Realteile der komplexen Amplituden

$$E_{0x} = \Re\{\underline{E}_{0x} e^{j\omega t}\} = A \cos(\omega t) - B \sin(\omega t)$$

$$E_{0y} = \Re\{\underline{E}_{0y} e^{j\omega t}\} = C \cos(\omega t) - D \sin(\omega t)$$

2. Maximalwerte der Komponenten berechnen

$$E_{0x,\max} = |\underline{E}_{0x}| = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$E_{0y,\max} = |\underline{E}_{0y}| = \sqrt{C^2 + D^2}$$

3. Betrag des Ellipsenradius

$$\begin{aligned}\|\vec{E}_0\| &= \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 \cos(2\omega t) - A_2^2 \sin(2\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{A^2 + B^2 + C^2 + D^2}{2} + \frac{A^2 - B^2 + C^2 - D^2}{2} \cos(2\omega t) - (AB + CD) \sin(2\omega t)}\end{aligned}$$

4. Umformen des hinteren Ausdrucks

$$\begin{aligned}A_1 \cos(2\omega t) - A_2 \sin(2\omega t) &= \Re\{(A_1 + jA_2)e^{j2\omega t}\} \\ &= \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \cos\left(2\omega t + \arctan\left(\frac{A_2}{A_1}\right)\right)\end{aligned}$$

5. maximale und minimale Amplitude

$$E_{\min}^{\max} = \sqrt{A_0 \pm \sqrt{A_1^2 + A_2^2}}$$

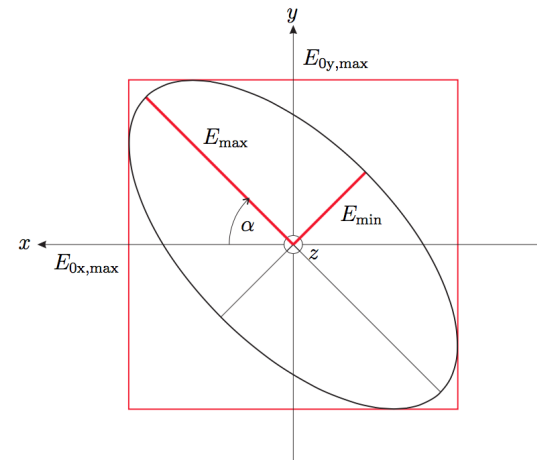
6. Berechnung der Zeitpunkte aus der Phase

$$2\omega t_{\min}^{\max} + \arctan\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = \begin{matrix} 0 \\ +\pi \end{matrix}$$

7. Winkel der maximalen und Minimalen Amplituden

$$\tan(\alpha) = \frac{E_{0y}(t_{\max})}{E_{0x}(t_{\max})} = \frac{C \cos(\omega t_{\max}) - D \sin(\omega t_{\max})}{A \cos(\omega t_{\max}) - B \sin(\omega t_{\max})}$$

8. Ellipse zeichnen



Wellen und Wellenleiter

Hohlleiter

Übertragung von TE- (H-) und TM- (E-) Moden; TEM-Übertragung nicht möglich; erwünscht ist i.d.R. ausschließlich der H₁₀-Mode

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta_c}{\beta_0}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}}$$

Phasengeschwindigkeit

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta_c}{\beta_0}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}}$$

Gruppengeschwindigkeit

$$v_g = c\sqrt{1 - \left(\frac{\beta_c}{\beta_0}\right)^2} = c\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} = c\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}$$

Zusammenhang Geschwindigkeiten

$$c_0^2 = v_g \cdot v_p$$

Kritische Frequenzen ($a > b$)

$$f_{c,m,n} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \qquad f_c = \frac{\beta_c}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{f_{c0}}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \qquad \beta_c^2 = \beta_0^2 - \beta^2$$

Flächenstromdichte auf dem Rand (Auch für Bandleitung geeignet)

$$\vec{J}_F(x = 0, y, z) = \vec{U}_x \times \vec{H}(x = 0, y, z)$$

Zweileitersysteme allgemein

Übertragung von TEM-Wellen mit der Grenzfrequenz $f_c = 0$

Gruppen- und Phasengeschwindigkeit

$$v_g = v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = c$$

Wellenwiderstand

$$\pm Z_L = \frac{U(z)}{I(z)} = \frac{U_0}{I_0}$$

Koaxialleitung

Wellenwiderstand und Leistung

$$Z_L = \frac{1}{2\pi} Z_{F0} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \qquad P = \frac{1}{2} Z_L I_{\max}^2 = \frac{1}{2} \frac{U_{\max}^2}{Z_L} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_d^D \frac{E(r)^2}{Z_F} dA$$

Leitungsbeläge

$$C' = \frac{C}{l} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \qquad L' = \frac{\epsilon\mu}{C'} = \frac{\mu \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2\pi}$$

Feldstärken

$$H_{\max} = \frac{I_{\max}}{\pi d} \qquad E_{\max} = Z_F H_{\max}$$

Strahlungsleistungsdichten Innen- und Außenleiter

$$S_I = \frac{1}{2} E_{\max} \cdot H_{\max} \qquad S_A = S_I \frac{d^2}{D^2}$$

Zweibandleitung

$$\phi = \frac{y}{b} \qquad \vec{E} = -U_0 \nabla \phi e^{-j\beta z} = -\frac{U_0}{b} e^{\mp j\beta z} \vec{u}_y \qquad \vec{H} = \pm \frac{U_0}{Z_F b} e^{\mp j\beta z} \vec{u}_x$$

$$\beta_c = \frac{n\pi}{b} \qquad C' = \frac{C}{l} = \frac{\epsilon a}{b} \qquad L' = \frac{\mu b}{a} \qquad Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{b}{a} = Z_F \frac{b}{a}$$

Feldwellenwiderstand

TE-Wellen

$$\begin{aligned} Z_{FH} &= \pm \frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = \mp \frac{\vec{E}_y}{\vec{H}_x} \\ &= \frac{\omega\mu}{\beta} = \frac{\omega\mu}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_c}{\beta_0}\right)^2}} = \frac{Z_F}{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta_c}{\beta_0}\right)^2}} = \frac{Z_F}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2}} = \frac{Z_F}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \end{aligned}$$

TM-Wellen

$$\begin{aligned} Z_{FE} &= \pm \frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = \mp \frac{\vec{E}_y}{\vec{H}_x} = \frac{\beta}{\omega\epsilon} = \frac{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_c}{\beta_0}\right)^2}}{\omega\epsilon} \\ &= Z_F \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_c}{\beta_0}\right)^2} = Z_F \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2} = Z_F \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \end{aligned}$$

TEM-Wellen

$$\frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = -\frac{\vec{E}_y}{\vec{H}_x} = \pm \frac{\omega\mu}{\beta} = \pm \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \pm Z_F \qquad Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega = 377\Omega$$

Antennentheorie

Feldgrößen in der Fernfeldnäherung

Vektorpotential

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu e^{-j\beta r}}{4\pi r} \iiint_V \vec{J} e^{j\beta r' \cos(\xi)} dV'$$

Feldstärken

$$\vec{B} \approx -j\beta \vec{u}_r \times \vec{A} \qquad \vec{H} \approx -\frac{j\beta}{\mu} \vec{u}_r \times \vec{A} \qquad \vec{E} \approx j\omega \vec{u}_r \times (\vec{u}_r \times \vec{A})$$

Kenngrößen von Antennen

Strahlungsleistungsdichte (Allgemeine/Kugel/Dipol)

$$S = \frac{P \cdot G}{4\pi r^2} \quad S_0 = \frac{P}{4\pi r^2} \quad S(\vartheta, \varphi) = \frac{1}{2} Z_F \left(\frac{\beta |I_0| l \sin(\vartheta)}{4\pi r} \right)^2 \sim \frac{1}{r^2}$$

Richtfaktor

$$D = \frac{S_{\max}}{S_0} = \frac{S_{\max}}{P} \cdot 4\pi r^2 \quad \text{bzw.} \quad D(\vartheta, \varphi) = \frac{S(\vartheta, \varphi)}{S_0} \quad D_{Kugel} = \frac{S_0}{S_0} = 1$$

Gewinn und Zusammenhang mit Wirkfläche für alle Antennen

$$G = \eta D \quad \frac{A}{G} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Richcharakteristik

$$C(\vartheta, \varphi) = \frac{\|\vec{E}(\vartheta, \varphi)\|}{\|\vec{E}\|_{\max}} = \frac{\|\vec{H}(\vartheta, \varphi)\|}{\|\vec{H}\|_{\max}} = \sqrt{\frac{S(\vartheta, \varphi)}{S_{\max}}}$$

Abgestrahlte Leistung

$$P = \iint S dA = \iint S_0 D C^2(\vartheta, \varphi) dA$$

Empfangene Leistung

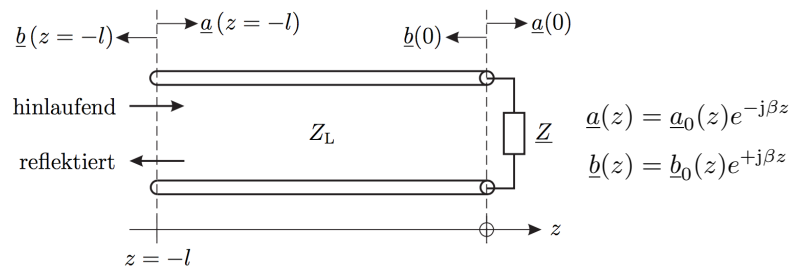
$$P_E = S \cdot A_E$$

Fußpunktimpedanz und Strahlungswiderstand

$$\underline{Z}_A = \frac{U_0}{I_0} \quad R_S = \frac{2P}{|I_0|^2}$$

Reflexion

Abstandsabhängige komplexe Wellenamplituden



$$\underline{\Gamma}_0 = \frac{b_0}{a_0} = \frac{Z - Z_L}{Z + Z_L} = \underline{\Gamma}(z = 0) \quad \underline{\Gamma}(z) = \frac{b(z)}{a(z)} = \frac{b_0 e^{+j\beta z}}{a_0 e^{-j\beta z}} = \underline{\Gamma}_0 e^{+j2\beta z}$$

Wenn $z = 0$ am Anfang des Leiters muss die Phase von $\underline{\Gamma}_0$ zurückgedreht werden. Es gilt (Bsp.):

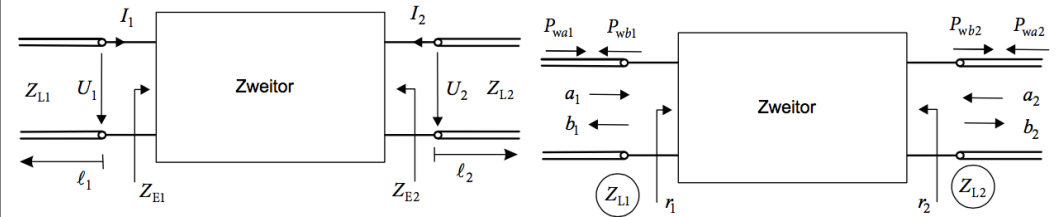
$$\underline{\Gamma}_0 = \frac{Z - Z_L}{Z + Z_L} e^{-j2\beta l}$$

$U(z)$ und $I(z)$ können so berechnet werden wie an einem Tor eines Zweitores. Dafür Ausdruck so umformen, dass Abhängigkeit nur noch von \underline{a}

$$\underline{a}(z) = \frac{U(z)}{\sqrt{Z_L}} = \pm \sqrt{Z_L} I(z) \quad \underline{c}(z) = \underline{a}(z) + \underline{b}(z)$$

Zweitore

Wellengrößen



Komplexe Wellenamplituden

$$\underline{a}_i = \frac{U_{hi}}{\sqrt{Z_{Li}}} \quad (\text{hinlaufende normierte Spannungswelle an Tor } i)$$

$$\underline{b}_i = \frac{U_{ri}}{\sqrt{Z_{Li}}} \quad (\text{rücklaufende normierte Spannungswelle an Tor } i)$$

Spannung und Strom an Tor i

$$\underline{U}_i = (\underline{a}_i + \underline{b}_i) \sqrt{Z_{Li}} \quad \underline{a}_i = \frac{\underline{U}_i + Z_{Li} \underline{I}_i}{2\sqrt{Z_{Li}}}$$

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{a}_i - \underline{b}_i}{\sqrt{Z_{Li}}} \quad \underline{b}_i = \frac{\underline{U}_i - Z_{Li} \underline{I}_i}{2\sqrt{Z_{Li}}}$$

Wirkleistung

$$P_{wai} = \frac{1}{2} \underline{a}_i \underline{a}_i^* = \frac{U_{hi} U_{hi}^*}{2Z_{Li}} = \frac{1}{2} |\underline{a}_i|^2 \quad P_{wbi} = \frac{1}{2} \underline{b}_i \underline{b}_i^* = \frac{U_{ri} U_{ri}^*}{2Z_{Li}} = \frac{1}{2} |\underline{b}_i|^2$$

Matrizen

Streumatrix

$$\underline{b} = \underline{S} \cdot \underline{a} \quad \underline{S}^{*T} \cdot \underline{S} = \underline{E} \quad \text{Unitaritätskriterium, Voraussetzung für Verlustfreiheit}$$

Transmissionsmatrix

$$\begin{pmatrix} \underline{a}_1 \\ \underline{b}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{T}_{11} & \underline{T}_{12} \\ \underline{T}_{21} & \underline{T}_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{b}_2 \\ \underline{a}_2 \end{pmatrix}$$

$$\underline{T} = \frac{1}{\underline{S}_{21}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\underline{S}_{22} \\ \underline{S}_{11} & -\det(\underline{S}) \end{pmatrix} \quad \underline{S} = \frac{1}{\underline{T}_{11}} \cdot \begin{pmatrix} \underline{T}_{21} & \det(\underline{T}) \\ 1 & -\underline{T}_{12} \end{pmatrix}$$

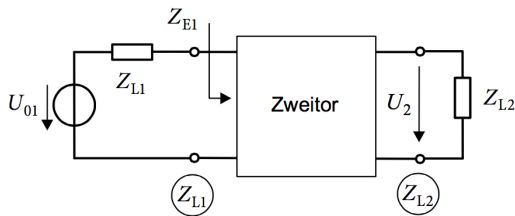
Kettenmatrix

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ -\underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

Verkettung

$$\underline{T} = \underline{T}^{(1)} \cdot \underline{T}^{(2)} \quad \underline{S} \neq \underline{S}^{(1)} \cdot \underline{S}^{(2)}!!!$$

Streuparameter



(Oft statt Z_L auch R_N)

Reflexions- und Transmissionsfaktoren

$$\underline{S}_{ii} = \frac{Z_{Ei} - Z_{Li}}{Z_{Ei} + Z_{Li}} \quad \underline{S}_{ji} = 2 \frac{U_j}{U_{0i}} \sqrt{\frac{Z_{Li}}{Z_{Lj}}}$$

Statt Einzelspannungen Spannungsteiler einsetzen. Auf Parallelschaltungen Achten

Serienimpedanz, Paralleladmittanz und Parallelimpedanz

$$\underline{S}_{-} = \frac{1}{\underline{Z} + 2Z_L} \begin{pmatrix} \underline{Z} & 2Z_L \\ 2Z_L & \underline{Z} \end{pmatrix} \quad \underline{S}_{||} = \frac{1}{2 + \underline{Y}Z_L} \begin{pmatrix} -\underline{Y}Z_L & 2 \\ 2 & -\underline{Y}Z_L \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{2\underline{Z} + Z_L} \begin{pmatrix} -Z_L & 2\underline{Z} \\ 2\underline{Z} & -Z_L \end{pmatrix}$$

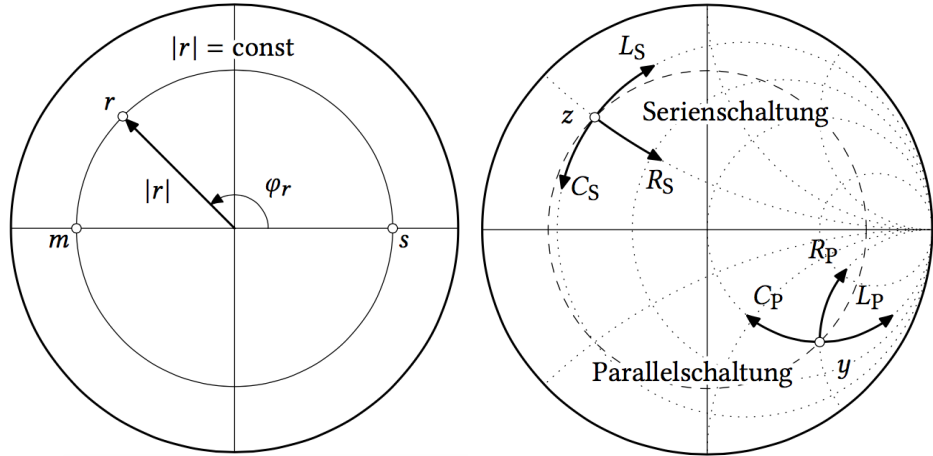
Zusammenhang Impedanz-, Admittanz- und Streumatrix

$$\underline{S} = \underline{E} - 2Z_L(\underline{Z} + Z_L \underline{E})^{-1} \quad \underline{Z} = -Z_L(\underline{E} + 2(\underline{S} - \underline{E})^{-1})$$

$$= -\underline{E} + 2(Z_L \underline{Y} + \underline{E})^{-1} \quad \underline{Y} = -\frac{1}{Z_L}(\underline{E} - 2(\underline{S} + \underline{E})^{-1})$$

Smith-Diagramme

Ablesen und Antragen der Werte



$$|\underline{\Gamma}| = r = \frac{\underline{Z} - Z_L}{\underline{Z} + Z_L} = \frac{z - 1}{z + 1} = \frac{s - 1}{s + 1} = \frac{1 - m}{1 + m} \quad s = \frac{1}{m} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

Allgemeines

$$\text{dB} = 10 \log(\dots) \quad \text{dB}_m = 10 \log\left(\frac{P}{1 \text{ mW}}\right)$$

Additionstheoreme

$$\cos^2(\alpha) = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\alpha)) \quad \sin^2(\alpha) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2\alpha))$$

$$\sin(\alpha) \cos(\beta) = \frac{1}{2}(\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta))$$

SI-Präfixe

| Präfix | Zeichen | Faktor | Präfix | Zeichen | Faktor |
|--------|---------|-------------------|--------|---------|------------------|
| Yocto | y | 10 ⁻²⁴ | Deka | da | 10 ¹ |
| Zepto | z | 10 ⁻²¹ | Hekto | h | 10 ² |
| Atto | a | 10 ⁻¹⁸ | Kilo | k | 10 ³ |
| Femto | f | 10 ⁻¹⁵ | Mega | M | 10 ⁶ |
| Piko | p | 10 ⁻¹² | Giga | G | 10 ⁹ |
| Nano | n | 10 ⁻⁹ | Tera | T | 10 ¹² |
| Mikro | μ | 10 ⁻⁶ | Peta | P | 10 ¹⁵ |
| Milli | m | 10 ⁻³ | Exa | E | 10 ¹⁸ |
| Zenti | c | 10 ⁻² | Zetta | Z | 10 ²¹ |
| Dezi | d | 10 ⁻¹ | Yotta | Y | 10 ²⁴ |