Freiraumausbreitung

Elektromagnetisches Feld

Im Fernfeld einer Antenne (d>4λ) stehen elektrische und magnetische Komponente des Feldes senkrecht aufeinander und liegen in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Senkrecht auf dieser Ebene ist der „Poyntingsche Vektor“ $\vec{S}$ in Ausbreitungsrichtung definiert und stellt das Vektorprodukt aus $\vec{E}$ und $\vec{H}$ dar:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$\vec{S}$ = Poyntingscher Vektor
$\vec{E}$ = elektrischer Feldvektor
$\vec{H}$ = magnetischer Feldvektor

$\vec{S}$ wird auch als **Leistungsdichte** bezeichnet und stellt die Leistung pro Flächeneinheit dar.

Bei Betrachtung der stationären Welle in der Ebene können die Vektorprodukte als normale Produkte der Betragsgrössen geschrieben werden:

$$S = \left|\vec{S}\right| = \left|\vec{E}\right| \cdot \left|\vec{H}\right| = E \cdot H \qquad 1)$$

S = Leistungsdichte in $\frac{W}{m^2}$

E = elektrische Feldstärke in $\frac{V}{m}$

H = magnetische Feldstärke in $\frac{A}{m}$

In der Praxis wird S verwendet, um Grenzwerte für die Belastung des Menschen im Bereich strahlender Antennen festzulegen.

Für das Fernfeld ist die Impedanz des freien Raumes, der Feldwellenwiderstand:

$$Z_F = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} = 120 \cdot \pi\ \Omega \qquad 2)$$

Aus den Gleichungen 1) und 2) erhält man:

$$S = E \cdot H = \frac{E^2}{Z_F} \qquad 3)$$

Verwenden wir als Sendeantenne einen isotropen Kugelstrahler, d.h. eine theoretische, punktförmige Antenne, die die zugeführte Leistung gleichmässig in den kugelförmigen Raum abstrahlt, so erzeugt diese Antenne im Abstand d die Leistungsdichte

$$S = \frac{P_s}{A} = \frac{P_s}{4\pi d^2} \qquad 4)$$

P_s = Sendeleistung
A = Kugeloberfläche
d = Radius

Wird als Antenne nicht ein isotroper Kugelstrahler, sondern eine Antenne, die bezogen auf den Kugelstrahler den Gewinn G_s aufweist verwendet, so ist die Leistungsdichte

$$\boxed{S = \frac{P_s G_s}{4\pi d^2}} \qquad 5)$$

Das Produkt $P_s G_s$ wird als **E**quivalent **I**sotropic **R**adiated **P**ower EIRP bezeichent.

$$P_s G_s = \mathrm{EIRP} \qquad 6)$$

In vielen Fällen wird als Referenzantenne der λ/2-Dipol verwendet. Der Halbwellendipol hat gegenüber dem isotropen Strahler einen Gewinn von 1.64 (2.14 dB). Bei Bezug des Antennengewinnes auf den Halbwellendipol wird das Produkt $P_s G_{sD}$ als Effectiv Radiated Power ERP bezeichnet.

$$P_s G_{sD} = \mathrm{ERP} \qquad 7)$$

G_{sD} = Antennengewinn bezogen auf Halbwellenstrahler

Wird eine Empfangsantenne in ein elektromagnetisches Feld gestellt, so wird von ihr folgende Leistung aufgenommen (Empfangssituation):

$$P_e = S \cdot A_e \qquad 8)$$

P_e = Empfangsleistung
A_e = Wirkfläche der Empfangsantenne

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_e}{4\pi} \qquad 9)$$

λ =Wellenlänge
G_e =Gewinn der Empfangsantenne (isotrop)

Aus 5), 8) und 9) erhalten wir die Empfangsleistung zu

$$\boxed{P_e = S \cdot A_e = \frac{P_s G_s}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_e}{4\pi} = \frac{P_s G_s G_e \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}} \qquad 10)$$

Freiraumdämpfung

Die Freiraumdämpfung (Free Space Loss FSL) a_{FSL} erhalten wir

$$\boxed{a_{FSL} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{(4\pi)^2 d^2}{G_s G_e \lambda^2}} \qquad 11)$$

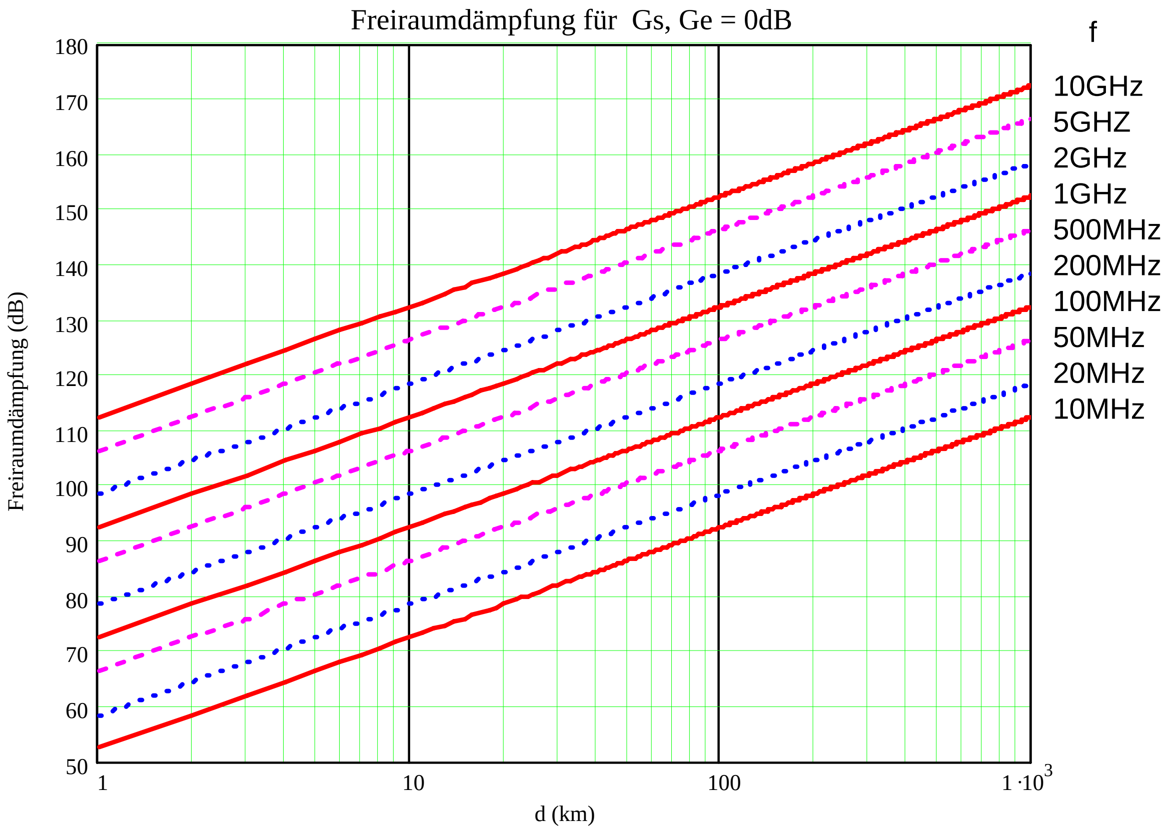
mit $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \ m \cdot s^{-1}}{f}$

$$\boxed{a_{FSL} = \frac{(4\pi)^2 d^2 \ f^2}{G_s G_e \left(3 \cdot 10^8\right)^2}} \qquad 12)$$

Diese Gleichung kann auch als zugeschnittene Grössengleichung in logarithmischer Form geschrieben werden:

$$\boxed{a_{FSL} / dB = 10 \log\left(\frac{P_s}{P_e}\right) = 32.45 + 20 \log\left(\frac{d}{km}\right) + 20 \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 10 \log\left(G_s\right) - 10 \log\left(G_e\right)} \qquad 13)$$

G_s, G_e bezogen auf isotropen Strahler


Freiraumdämpfung für Gs, Ge = 0dB
Freiraumdämpfung (dB)
180
170
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
1
10
100
1 ·10^3
d (km)
f
10GHz
5GHZ
2GHz
1GHz
500MHz
200MHz
100MHz
50MHz
20MHz
10MHz

Bestimmung der Feldstärke

Aus den Gleichungen 2), 3) und 5) erhalten wir

$$E^2 = \frac{P_s G_s 2\pi \cdot 60\Omega}{4\pi d^2} = \frac{P_s G_s 30\Omega}{d^2} \qquad 14)$$

oder

$$\boxed{E = \frac{\sqrt{P_s G_s 30\Omega}}{d} = \frac{\sqrt{EIRP \cdot 30\Omega}}{d} = \frac{\sqrt{EIRP} \cdot 5.477\sqrt{\Omega}}{d}} \qquad 15)$$

Bezieht man den **Antennengewinn auf den λ/2-Dipol (** G_{sD} **)** so erhält man:

$$\boxed{E = \frac{\sqrt{P_s G_{sD} \cdot 1.64 \cdot 30\Omega}}{d} = \frac{\sqrt{ERP \cdot 1.64 \cdot 30\Omega}}{d} = \frac{\sqrt{ERP} \cdot 7.014\sqrt{\Omega}}{d} \qquad 16)}$$

Bestimmung der Empfangsspannung an einem 50Ω-System

$$U_{RX} = \sqrt{P_e \cdot 50\Omega} = \frac{E \cdot \lambda}{\pi} \cdot \sqrt{G_{eD}} \cdot \sqrt{\frac{1.64 \cdot 50}{8 \cdot 60}} = E \cdot \lambda \cdot \sqrt{G_{eD}} \cdot 0.1316$$

$$\boxed{U_{RX} = E \cdot \lambda \cdot \sqrt{G_{eD}} \cdot 0.1316} \qquad 17)$$

oder mit $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \ m \cdot s^{-1}}{f}$

$$\boxed{\frac{U_{RX}}{V} = \frac{E}{V/m} \cdot \frac{MHz}{f} \cdot \sqrt{G_{eD}} \cdot 39.48} \qquad 18)$$