

I. Konstanten, Maßeinheiten

II. TEM-Leitungen (Dielektrikum mit $\mu_r = 1$)

III. Felder und Wellen

IV. Antennen

V. Radartechnik

VI. Hohlleiter (Dielektrikum mit $\mu_r = 1$)

VII. Schaltungstechnik

I. Konstanten, Maßeinheiten

$$\epsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \text{ bzw. F/m}$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} = 12,567 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$c_o = 1/\sqrt{\mu_o \epsilon_o} = 2,997\,925 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$Z_o = \sqrt{\mu_o / \epsilon_o} = 377 \, \Omega = 120 \pi \, \Omega$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Erdbeschleunigung

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$$

Newton

$$1 \text{ J} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm}$$

Joule (gesprochen: Dschuhl)

$$1 \frac{Vs}{m^2} = 1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauß}$$

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \frac{Vs}{m^2}$$

$$1 \text{ A/m} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oerstedt}$$

$$1 \text{ Oe} = 79,58 \text{ A/m}$$

$$1 \text{ mile} = 1,609 \text{ km}$$

$$1 \text{ km} = 0,6214 \text{ miles}$$

$$1 \text{ n.m.} = 1,852 \text{ km}$$

$$1 \text{ km} = 0,54 \text{ n.m.}$$

$$1 \text{ foot} = 0,305 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} = 3,281 \text{ feet}$$

$$1 \text{ inch} = 1.000 \text{ mils} = 25,4 \text{ mm}$$

$$1 \text{ mm} = 39,37 \text{ mils} = 0,0394 \text{ inch}$$

$$a = 10 \lg (P_2/P_1) = 20 \lg (U_2/U_1)$$

Dämpfung in dB

$$a = \frac{1}{2} \ln (P_2/P_1) = \ln (U_2/U_1)$$

Dämpfung in Np

$$1 \text{ Neper} = 8,686 \text{ dB}$$

$$1 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}$$

$$P \text{ in dBm} = 10 \lg (P \text{ in mW})$$

Leistungspegel, 0 dBm ist 1 mW, analog dBµV :
0 dBµV ist 1 µV, dBW: 0 dBW ist 1 W etc.

$$\vartheta_1 \text{ in } ^\circ\text{Fahrenheit} = \vartheta_2 \text{ in } ^\circ\text{C} \cdot \frac{9}{5} + 32 \qquad \vartheta_2 \text{ in } ^\circ\text{C} = (\vartheta_1 \text{ in } ^\circ\text{F} - 32) \cdot \frac{5}{9}$$

$$\vartheta \text{ in } ^\circ\text{C} = T \text{ in Kelvin} - 273,15$$

Material	Silber	Kupfer	Gold	Al	Zink	Messing	Zinn	Stahl
elektrische Leitfähigkeit $\sigma/10^6$ in S/m	62	58	41	33	16	12-15	7-9	1-7

$$\alpha \approx -4 \text{ } \text{‰} / ^\circ\text{C}$$

Temperaturkoeffizient von σ für reine Metalle bei 20°C

$$\sigma(20^\circ\text{C} + \Delta\vartheta) = \sigma(20^\circ\text{C})(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pascal}$$

$$1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ rad (Bogenmaß)} = 180^\circ/\pi = 57,296^\circ$$

$$1 \text{ mil} = 1 \text{ mrad}$$

$$1/e = 0,368$$

$$e = 2,718 \ 282$$

$$\pi = 3,141 \ 592 \ 653 \ 590$$

Radius der Erde:

$$6.370 \text{ km}$$

Entfernung eines geostationären Satelliten:

$$38.000 \text{ km}$$

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

Raumwinkel Ω einer Kugelfläche A mit dem Kugelradius r

$$\Omega = 4\pi \sin^2\left(\frac{\alpha}{4}\right)$$

Raumwinkel eines Kegels mit dem (ebenen) Öffnungswinkel α

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K}$$

Boltzmann Konstante

II. TEM-Leitungen (Dielektrikum mit $\mu_r = 1$)

$$\underline{r} = \frac{\underline{Z} - Z_L}{\underline{Z} + Z_L} \quad \frac{\underline{Z}}{Z_L} = \frac{1 + \underline{r}}{1 - \underline{r}}$$

Reflexionsfaktor, r in dB = 20 lg r

$$VSWR = \frac{1 + r}{1 - r} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$$

Stehwellenverhältnis

$$r = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$

$r \ll 1$: $r \approx (VSWR - 1)/2$, $VSWR \approx 1 + 2r$

$$Z_L = \frac{60 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(D/d)$$

Koaxialleitung

$$Z_L = \frac{120 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \operatorname{ar} \cosh(D/d)$$

Zweidraht-Leitung, Leiterabstand D

$$Z_L = \frac{120 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(2D/d)$$

für $D > 3,6 d$ $\operatorname{ar} \cosh x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$

$$Z_L = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c_0 C'_\epsilon} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \frac{\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r} Z_0}{C'_\epsilon} = \frac{U_H}{I_H}$$

verlustlose Leitung

$$\alpha_2 = \alpha_1 \sqrt{f_2 / f_1}$$

Dämpfungsmaß α durch Leiterverluste bei der Frequenz f; Skineneffekt

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$\lambda = \frac{c_0}{f \sqrt{\epsilon_r}}$$

λ_0 in m = 300/(f in MHz)

$$Q = \pi / (\alpha \lambda_z)$$

Güte eines Leitungsresonators, Leitung mit Dämpfungsmaß α

$$f_c \approx \frac{2c_0}{\pi(D+d)\sqrt{\epsilon_r}}$$

H₁₁-Welle in der Koaxialleitung

III. Felder und Wellen

	PE	PP	PTFE	Gore-Tex	PVC	FR4	Al ₂ O ₃	SiO ₂
ϵ_r	2,3	2,3	2,0	$\geq 1,2$	3 - 4	4,2 (3,5 – 6)	10	3,78
$\tan \delta / 10^{-4}$	2	5	1	0,2	400-800	200 (40 – 450)	1	3

$$a_{\text{Diel}} = \tan \delta \cdot 27,3 \text{ dB}$$

Dämpfung einer ebenen Welle bzw. einer TEM-Welle durch dielektrische Verluste: auf der Strecke $\lambda_o / \sqrt{\epsilon_r}$,

$$a_{\text{Diel}} = \frac{f}{\text{GHz}} \cdot \frac{r}{\text{m}} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot \tan \delta \cdot 91 \text{ dB}$$

auf der Strecke r, nur gültig für $\tan \delta < 0,1$

$$\beta = 2\pi / \lambda$$

Phasenmaß, Phasendrehung pro Meter; laufende Welle

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi \mu f \sigma}$$

Skinneffekt, Eindringmaß

$$\delta \text{ in } \mu\text{m} = 66 / \sqrt{f \text{ in MHz}}$$

Eindringmaß für Kupfer

$$R_F = \frac{1}{\sigma \delta} = \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\sigma}}$$

Flächenwiderstand bei extremem Skinneffekt

$$E_{\text{max}} \approx 32 \text{ kV/cm}$$

Luft bei 1 bar und 20⁰ C, homogenes Feld

$$\underline{Z}_F = \underline{E}_H / \underline{H}_H = \sqrt{\frac{\mu_o \mu_r}{\epsilon_o \epsilon_r}}$$

Feldwellenwiderstand, laufende, ebene Welle

$$v = \frac{c_o}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$\bar{S} = \frac{1}{2} EH = \frac{E^2}{2Z_F} = \frac{H^2 Z_F}{2}$$

Strahlungsdichte, zeitlicher Mittelwert

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Plattenkondensator: Fläche A, Abstand d

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}$$

Brechungsgesetz für elektrische Feldlinien, Θ vom Lot

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Magnetfeld eines langen, geraden Leiters

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r (1 - j \tan \delta)$$

komplexe Dielektrizitätszahl

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_o}$$

Anteil durch el. Leitfähigkeit: $\sigma / (\omega \epsilon_o)$

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r - j\epsilon_r \tan \delta - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_o}$$

Anteil durch Polarisationsverluste: $\epsilon_r \tan \delta$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}$$

Brechungsgesetz für den Vektor der Strahlungsdichte \vec{S}

$$\theta_{B1} = \arctan \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}$$

Brewster-Winkel bei vertikaler Polarisation; von 1 \rightarrow 2

$$\underline{r}_{v.P.} = \frac{\underline{\epsilon}_r \cos \Theta - \sqrt{\underline{\epsilon}_r - \sin^2 \Theta}}{\underline{\epsilon}_r \cos \Theta + \sqrt{\underline{\epsilon}_r - \sin^2 \Theta}}$$

$$\underline{t}_{v.P.} = \frac{2\sqrt{\underline{\epsilon}_r} \cos \Theta}{\underline{\epsilon}_r \cos \Theta + \sqrt{\underline{\epsilon}_r - \sin^2 \Theta}}$$

vert. Pol.

$$\underline{r}_{h.P.} = \frac{\cos \Theta - \sqrt{\underline{\epsilon}_r - \sin^2 \Theta}}{\cos \Theta + \sqrt{\underline{\epsilon}_r - \sin^2 \Theta}}$$

$$\underline{t}_{h.P.} = \frac{2 \cos \Theta}{\cos \Theta + \sqrt{\underline{\epsilon}_r - \sin^2 \Theta}}$$

horiz. Pol.

$$\underline{t}_{h.P.} = 1 + \underline{r}_{h.P.}$$

ebene Grenzschicht, Welle von 1 nach 2

$$\underline{\epsilon}_r = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}$$

Einfallswinkel Θ von der Flächennormalen

$$f_g \approx c_0 / (16 h \cos \psi)$$

Übergang von spiegelnder ($f < f_g$) zu diffuser Reflexion;
Bodenunebenheit h ; Elevationswinkel ψ

$$\theta_{g1} = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}$$

Grenzwinkel der Totalreflexion; Welle von 1 nach 2

$$\alpha_x = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_z}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2}$$

ebene Oberflächenwelle, aperiodisches Dämpfungsmaß

senkrecht zur Oberfläche des Dielektrikums

IV. Antennen

$G \text{ in dB} = 10 \lg \frac{S_{\max}}{S_{\text{isotrop}}} = 10 \lg g$ Gewinn

$P_S = \frac{1}{2} I_S^2 R_S$ Sendeleistung bei Antennenfußpunktstrom I_S

$E_{\max} = \frac{\sqrt{60\Omega \cdot P_S g}}{r}$ Feldstärkeamplitude im Abstand r

$R_S \approx 80\Omega \left[\pi \frac{h_{\text{eff}}}{\lambda} \right]^2$ Strahlungswiderstand

$U_0 = E_{\tan} h_{\text{eff}}$ Leerlaufspannung einer Empfangsantenne

	Gewinn g	G in dB	R_S in Ω	effektive Höhe h_{eff}
kurzer Dipol, Gesamtlänge s	1,5	1,76	$20 \left[\frac{\pi s}{\lambda} \right]^2$	$s/2$
$\lambda/2$ – Dipol	1,64	2,15	73	λ/π
$\lambda/4$ – Monopol, auf leitender Ebene	3,28	5,16	37	$\lambda/(2\pi)$

$C(\varphi, \vartheta) = |\sin \vartheta|$ Richtdiagramm Hertzscher Dipol bzw. kurzer Dipol

$C(\varphi, \vartheta) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta} \right|$ Richtdiagramm $\lambda/2$ -Dipol

$r_{\text{Blind}} \approx \lambda/(2\pi)$ Ausdehnung Blindfeld mit $E \sim 1/r^2, 1/r^3$; Dipolantenne

$r_{\text{Blind}} \approx 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ Ausdehnung Blindfeld, großflächige Antenne

$r_{\text{min}} = 2 D^2/\lambda$ Fernfeldbeginn; D : max. Linearabmessung

$P_E = P_S \cdot g_S \cdot g_E \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$
 E: Empfangsantenne; S: Sendeantenne;
 r: Antennenabstand, beidseitig Anpassung

$a = 10 \lg(P_S/P_E)$ Dämpfung zwischen 2 Antennen

$$a = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)$$

Ausbreitungsdämpfung

$$A_w = \frac{\lambda^2}{4\pi} g$$

Wirkfläche (nur gültig für symmetrische Antennen;
also nicht für Monopole)

$$g = \eta_{\text{Fläche}} A \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

realer Flächenstrahler, Fläche A, $\eta_{\text{Fläche}} = 0,5 \dots 0,8$

$\eta_{\text{Fläche}} \approx 1$ für eine active array Antenne ohne Taper

$\eta_{\text{Fläche}} \approx 0,5 \dots 0,6$ für eine Parabolantenne

$$\Delta\varphi = \Delta\vartheta \approx 1,02 \cdot \frac{\lambda}{D} = 58,4^\circ \cdot \frac{\lambda}{D}$$

runde strahlende Apertur mit konstanter Belegung;

Durchmesser D; $D \gg \lambda$

$$\Delta\varphi = \Delta\vartheta \approx 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} = 70^\circ \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Parabolantenne, Durchmesser D; $D \gg \lambda$

$$\Delta\varphi \approx 51^\circ \cdot \lambda / b = 0,88 \lambda / b$$

lineares Array mit konstanter Belegung oder

rechteckige strahlende Apertur mit konstanter Belegung;

Fläche A = a · b; a, b $\gg \lambda$, Öffnungswinkel

$$\Delta\vartheta \approx 51^\circ \cdot \lambda / a$$

$\Delta\varphi$ bzw. $\Delta\vartheta$ zwischen den beiden 3-dB-Punkten.

$$\Delta\varphi_0 \approx 2 \cdot \lambda / b = 114,6^\circ \cdot \lambda / b$$

Winkel zwischen den ersten Nullstellen des Diagramms

$$\Delta\vartheta_0 \approx 2 \cdot \lambda / a = 114,6^\circ \cdot \lambda / a$$

$$g \leq \frac{32.400}{\Delta\varphi \Delta\vartheta}$$

stark bündelnde Richtantenne mit 15-dB-Gauss Taper;

$\Delta\varphi$ und $\Delta\vartheta$ in Grad; Nebenzipfeldämpfung 30 dB.

$$g \leq \frac{41.253}{\Delta\varphi \Delta\vartheta}$$

stark bündelnde Richtantenne mit konstanter Belegung;

$\Delta\varphi$ und $\Delta\vartheta$ in Grad; Nebenzipfeldämpfung 13 dB,

$\eta_{\text{Fläche}} = 1$.

$$g = N g_E$$

Gewinn einer Phased Array Antenne mit N identischen Einzelantennen, die jeweils den Gewinn g_E haben

Uniform linear array with isotropic radiators, length $L \gg \lambda$			
	Broadside Array disc beam	End-Fire Array pencil beam	optimized End-Fire Array pencil beam
max. Directivity D_{Gruppe}	$2 L/\lambda$	$4 L/\lambda$	$7,16 L/\lambda$
3-dB-Beamwidth $\Delta \varphi$	$51^\circ \lambda / L$	$108^\circ \sqrt{\lambda / L}$	$60,7^\circ \sqrt{\lambda / L}$
$2 \varphi_{01}$ (1. Nullstelle)	$114^\circ \lambda / L$	$162^\circ \sqrt{\lambda / L}$	$115^\circ \sqrt{\lambda / L}$
Nebenzipfeldämpfung	$\leq 13,5 \text{ dB}$		

$\text{Richtdiagramm}_{\text{gesamt}} = \text{Richtdiagramm}_{\text{Einzelement}} \cdot \text{Richtdiagramm}_{\text{Gruppe}}$

$g \approx 4 L/\lambda$
 $g \approx 2 L/\lambda$

Dipol-Zeile, $\lambda/2$ -Dipole, Abstand $0,9 \lambda$
 Dipol-Linie, $\lambda/2$ -Dipole, Abstand $0,9 \lambda$

$g = \eta D$

Wirkungsgrad η berücksichtigt Verluste, Directivity D

$r_F = \sqrt{\frac{\lambda}{1/r_E + 1/r_S}}$

Radius der 1. Fresnelzone ($\lambda/2$ Umweg),

Antennenabstand: $r_E + r_S$

$D_F = \sqrt{\lambda d}$

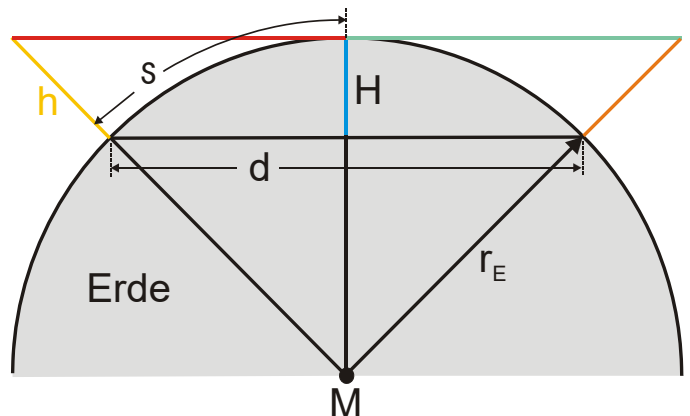
max. Durchmesser des 1. Fresnel-Ellipsoids,
 Antennenabstand d

Antenne in der Höhe h über der Erde:

$r_E = 6.370 \text{ km}$

Näherungen für $h \ll r_E$ und $s \ll r_E$.

$h \approx H$ und $s \approx d/2$



$H \approx s^2 / (2r_E)$

$s \approx \sqrt{2hr_E}$ geometrischer Horizontabstand

$$s \approx \sqrt{2h \left(\frac{4}{3} r_E \right)}$$

Abstand Radio-Horizont; der Faktor 4/3 berücksichtigt die Beugung der elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre

Exakte Gleichungen:

$$s = r_E \arccos \frac{1}{1 + h/r_E}$$

bzw.

$$h = \frac{r_E}{\cos(s/r_E)} - r_E$$

$$H = r_E \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r_E} \right)^2} \right)$$

bzw:

$$d = 2r_E \sqrt{1 - \left(1 - \frac{H}{r_E} \right)^2}$$

$$s = r_E \arccos(1 - H/r_E)$$

bzw:

$$H = r_E [1 - \cos(s/r_E)]$$

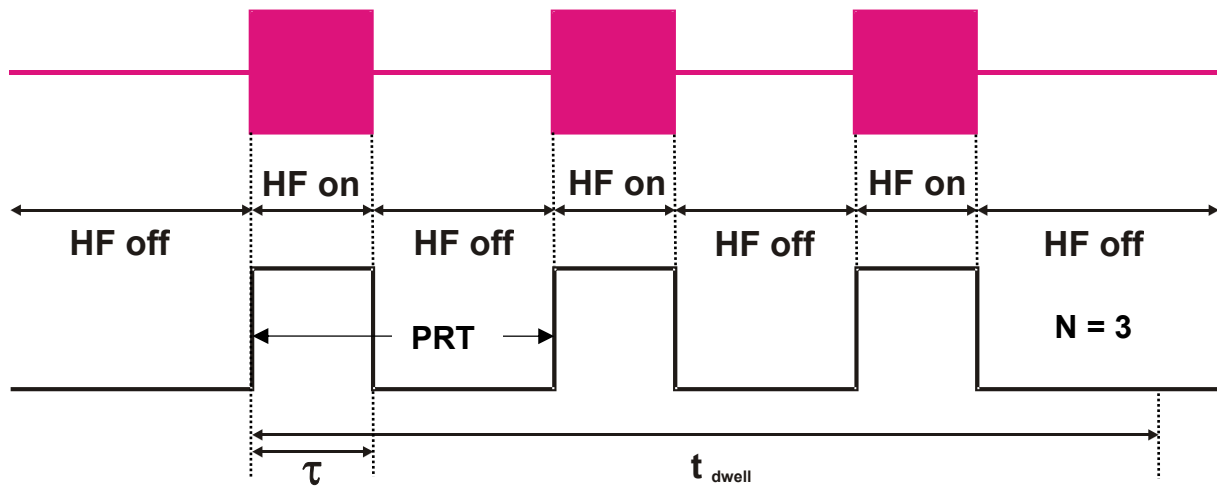
Strahlende Linie, Länge $L \gg \lambda$, $u = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \varphi$, $\varphi = 0$ ist senkrecht zur Linie

Belegung von $x = -L/2$ bis $x = +L/2$	Richtdiagramm $C(\varphi)$	3-dB-Beamwidth	Erste Nullstelle bei $\varphi =$	Nebenzipfel-dämpfung	Gewinn bezogen auf 1
$f(x) = 1$	$L \frac{\sin u}{u}$	$50,8^\circ \lambda/L$	$57,3^\circ \lambda/L$	13,2 dB	1
$f(x) = \cos \frac{\pi x}{L}$	$\frac{\pi L}{2} \frac{\cos u}{(\pi/2)^2 - u^2}$	$68,8^\circ \lambda/L$	$85,9^\circ \lambda/L$	23 dB	0,81
$f(x) = \cos^2 \frac{\pi x}{L}$	$L \frac{\sin u}{u} \frac{\pi^2}{\pi^2 - u^2}$	$83,2^\circ \lambda/L$	$114,6^\circ \lambda/L$	32 dB	0,667
$f(x) = 1 - \left \frac{2x}{L} \right $	$\frac{L}{2} \left[\frac{\sin(u/2)}{u/2} \right]^2$	$73,4^\circ \lambda/L$	$114,6^\circ \lambda/L$	26,4 dB	0,75

Strahlende rechteckige Fläche, bestehend aus Einzelementen mit dem Richtdiagramm $C_E(\varphi, \vartheta)$, mit dem Richtdiagramm $C_x(\varphi, \vartheta)$ der Linie in x-Richtung und $C_y(\varphi, \vartheta)$ der Linie in y-Richtung:

$$C_{\text{gesamt}}(\varphi, \vartheta) = C_E(\varphi, \vartheta) C_x(\varphi, \vartheta) C_y(\varphi, \vartheta)$$

V. Radartechnik



PRF

Pulse Repetition Frequency

$PRT = 1/PRF$

Pulse Repetition Time

$r_{\text{eindeutig}} = c_0 (PRT - \tau) / 2$

Instrumented Range, eindeutiger Entfernungsmeßbereich

$r_{\text{min}} = c_0 \tau / 2$

Minimum Range, innere Totzone; $\tau =$ Pulsdauer

DC

Duty Cycle (< 1)

$\tau = DC/PRF$

Pulsdauer

$\tau = 1/B$

$B =$ Bandbreite, Pulsradar

$t_{\text{kl}} = N PRT$

Dauer der kohärenten Integration, $N =$ Anzahl der Pulse pro Zielverweilzeit (Dwell Time, Time on Target)

$$\frac{P_E}{P_S} = \frac{g^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4}$$

$P_{\text{Empfang}}/P_{\text{Sende}}$, monostat. Radar, Zielentfernung r

(Radargleichung)

$$r_{\text{max}}^4 = \frac{P_{S\text{Peak}} \tau g_S g_E \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 \text{SNR}_1 L_{\text{ges}} F kT_0}$$

max. Reichweite eines Pulsradars, das einen

Einzelimpuls der Länge τ aussendet

g_S, g_E : Gewinn der Sende- bzw. Empfangsantenne

SNR_1 : minimaler Störabstand, der notwendig ist, um einen Einzelpuls zu entdecken

L_{ges} : Gesamtverluste (System Loss), $L > 1$

F : System-Rauschzahl (Antenne+Leitung+Empfänger)

$kT_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Ws (siehe letzte Seite, Rauschzahl)

$$r_{\max}^4 = \frac{P_{S\text{Peak}} \tau g_S g_E \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 \text{SNR}_1 L_{\text{ges}} F k T_0} g_{kl} g_{PK} \quad \text{max. Reichweite eines Pulsradars, mit kohärenter}$$

Integration und Pulskompression,
 τ : Pulsdauer am Schwellwertdetektor

$$g_{kl} = N$$

Gewinn durch kohärente Integration von N Pulsen

$$g_{kl} = N^k$$

Gewinn durch nicht-kohärente Integration von N Pulsen,
 $k = 0,5 \dots 0,8$

$$g_{PK} \approx K$$

Gewinn durch Pulskompression,
 Kompressionsfaktor $K = \tau B_{PK}$,
 B_{PK} : Modulations-Bandbreite bzw. Frequenzhub bei FM

$$\sigma = P_{\text{reflektiert}}/S_{\text{einfallend}}$$

Radar-Rückstreuquerschnitt, σ in $\text{dBm}^2 = 10 \lg \sigma$
 dBm^2 : $\sigma = 1 \text{ m}^2 = 0 \text{ dB}$; $\text{dBm}^2 = \text{dBsm}$ (square meter)

$$\sigma = \pi r^2$$

Radar Cross Section einer leitenden Kugel, $2\pi r \ll \lambda$

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}$$

RCS eines Corner-Reflektors, Kantenlänge $a \ll \lambda$

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{\lambda^2}$$

RCS einer quadratischen Metallplatte, Seitenlänge a

$$\sigma = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2}$$

RCS einer Metallplatte, Fläche A

Radarmessfehler:

$$\delta_{\Theta} \approx 0,1 \Theta_{3dB}$$

1- σ -Fehler der Winkelmessung,
 $\Theta_{3dB} = 3\text{-dB-Keulbreite}$

$$\delta_{\Theta} \approx 0,42 \frac{\Theta_{3dB}}{\sqrt{\text{SNR}}}$$

bei großen Entfernungen, $\text{SNR} \leq 100$

$$\sigma_{\Theta} = \frac{2\delta_{\Theta}}{\sqrt{n}}$$

1- σ -Fehler der Winkelmessung nach n Messungen

$$\text{SNR} = N \text{SNR}_1$$

SNR-Verbesserung durch kohärente Integration über N Pulse

$$\text{SNR} = N^k \text{SNR}_1$$

SNR-Verbesserung durch nicht-kohärente Integration

	über N Pulse, $k = 0,5 \dots 0,8$
$P_D(n) = 1 - (1 - P_D)^n$	Zunahme der Entdeckungswahrscheinlichkeit P_D nach n Messungen (P_D : Single Scan Probability of Detection; $P_D(n)$: Cumulative Probability of Detection)
$\Delta\Theta = \Theta_{3dB}$	Winkelauflösung
$\delta_r \approx k \frac{\tau c_0}{\sqrt{SNR}}$	1- σ -Fehler der Entfernungsmessung, $k = 0,12 \dots 0,3$, je nach Pulsform bzw. Definition von τ
$\Delta r = \tau c_0/2$	Entfernungsauflösung, Pulsradar, τ = Pulsdauer
$\Delta r = \tau c_0/(2K)$	Entfernungsauflösung, Pulskompressionsradar, K = Kompressionsfaktor (s.o.)
$\Delta R = c_0/(2B)$	Breite eines Range-Gates, B = Radarbandbreite
$N_{RG} = (1-DC) B / PRF$	max. Anzahl Range Gates
$\Delta r = c_0/(2 \Delta f)$	Entfernungsauflösung, FMCW-Radar, Δf = Frequenzhub
Doppler Radar	
$f_D = -2 v_{rad} / \lambda$	Dopplerverschiebung, Ziel mit Radial-Geschwindigkeit; f_D ist positiv, wenn sich das Ziel dem Radar nähert
$v_{min} = \lambda B/4$	Dopplerfilter, Minimal-Geschwindigkeit
$v_{max} = \lambda PRF/2$	Dopplerfilter, maximale, eindeutige Geschwindigkeit
$v_b = n \lambda PRF/2 = n c_0 PRF/(2 f)$	Blindgeschwindigkeit; $f = c_0/\lambda$ Trägerfrequenz des Radars, $n = 1, 2, \dots$
Planar Phased Array Antenne:	
$g(\alpha) = g(\alpha=0) (\cos \alpha)^m$	Verringerung des Antennengewinns bei elektronischer Strahlschwenkung um den Winkel α von der Flächennormalen (Auslenkungsverlust), $m = 1,2 \dots 1,5$
$g(\alpha) = g(\alpha=0) (\cos \alpha)^{2m}$	Auslenkungsverluste im Radarbetrieb (Tx + Rx), Round Trip Loss

VI. Hohlleiter (Dielektrikum mit $\mu_r = 1$)

$$\lambda_z = \frac{c_o}{\sqrt{\epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}} \quad \text{Hohlleiterwellenlänge}$$

$$v_G = \frac{c_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{1 - (f_c / f)^2} \quad \text{Gruppengeschwindigkeit}$$

$$\tau_G' = 1 / v_G \quad \text{Signallaufzeit pro m}$$

$$Z_{FH} = Z_o \frac{\lambda_z}{\lambda_o} \quad \text{Feldwellenwiderstand H-Wellen}$$

$$Z_{FE} = Z_o \frac{\lambda_o}{\lambda_z \epsilon_r} \quad \text{Feldwellenwiderstand E-Wellen}$$

H₁₀-Welle im Rechteckhohlleiter (Querschnitt a · b)

$$f_c = \frac{c_o}{2a\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Ausbreitungsbeginn; kritische Frequenz}$$

$$1,25 f_{ach} \leq f \leq 1,9 f_{ach} \quad \text{Betriebsfrequenzbereich}$$

$$E_{max} = \sqrt{\frac{\frac{4}{ab} Z_o P}{\sqrt{\epsilon_r} [1 - (f_c / f)^2]}} \quad \text{maximale elektrische Feldstärke}$$

X-Band: 8,2 – 12,4 GHz
 R 100: a = 22,86 mm b = 10,16 mm

P-Band: 12,4 – 18 GHz
 R 140: a = 15,8 mm b = 7,9 mm

Quaderförmiger Hohlraumresonator (Innenabmessungen a · b · c)

$$f_r = \frac{c_o}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left[\frac{m}{a}\right]^2 + \left[\frac{n}{b}\right]^2 + \left[\frac{p}{c}\right]^2} \quad \text{H}_{mnp} - \text{bzw. } E_{mnp} - \text{Resonanz}$$

H₁₁-Welle im Rundhohlleiter (Innendurchmesser D)

$$f_c = \frac{c_o}{1,71 \cdot D \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Ausbreitungsbeginn; kritische Frequenz}$$

VII. Schaltungstechnik

$$\underline{r}_L = \frac{Z_L - Z_{ref}}{Z_L + Z_{ref}}$$

Reflexionsfaktor der Lastimpedanz Z_L ; $Z_{ref} = 50 \Omega$ i.a.

$$\underline{r}_1 = \underline{S}_{11} + \frac{\underline{S}_{12} \cdot \underline{S}_{21} \cdot \underline{r}_L}{1 - \underline{S}_{22} \underline{r}_L}$$

Eingangsreflexionsfaktor, Zweitor mit \underline{r}_L am Ausgang

$$a = 20 \lg S_{21}$$

Dämpfung in dB

$$R_{quer} = 2 S_{21} Z_L / (1 - S_{21}^2)$$

angepaßtes T-Dämpfungsglied,

$$R_{längs} = Z_L (1 - S_{21}) / (1 + S_{21})$$

Aufbau: $R_{längs} - R_{quer} - R_{längs}$

$$P(f_1) = IP3 - \Delta a$$

Ausgangspegel der Grundschwingung in dBm ist um Δa in dB kleiner als der IP3

$$P(2f_1 - f_2) = IP3 - 3\Delta a = P(f_1) - 2\Delta a$$

Ausgangspegel des Intermodulationsprodukts 3.

Ordnung in dBm, $IP3 = IP3_{output, double tone}$

$$P(3f_1) = P(f_1) - 2 [IP3 - P(f_1)]$$

Pegel der dreifachen Frequenz am Verstärkerausgang,

$IP3 = IP3_{output, single tone}$

$$\det \underline{S} = \underline{S}_{11} \underline{S}_{22} - \underline{S}_{21} \underline{S}_{12}$$

Determinante der Streumatrix

$$g = S_{21}^2 \frac{1 - r_L^2}{(1 - r_1^2) |1 - \underline{S}_{22} \underline{r}_L|^2}$$

Leistungsverstärkung

$$T = Q / (\pi f_{res}) = 1 / (\pi B)$$

Zeitkonstante Resonator, Güte Q, Bandbreite B

$$P_R = k \cdot T \cdot B$$

thermische Rauschleistung in der Bandbreite B

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K}$, Temperatur T

$$F_{ges} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{g_1} + \frac{F_3 - 1}{g_1 g_2}$$

Cascaded amplifier noise figure

$$T_R = (F - 1) T_0$$

Rauschtemperatur, $T_0 = 290 \text{ K} = 16,8 \text{ °C}$

$$F = \frac{P_{r output}}{k T_0 B g} = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}}$$

Rauschzahl, Verstärkung g, F in dB = $10 \lg F$

$$\tau = 1 / (2f_g)$$

Einschwingzeit, Tiefpaß-Filter

$$\tau = 1 / B$$

Einschwingzeit, Bandpaß-Filter