

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

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \text{ bzw. } F/m$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} = 12,567 \cdot 10^{-7} H/m$$

$$c_0 = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2,997\ 925 \cdot 10^8 m/s \approx 3 \cdot 10^8 m/s$$

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \ \Omega = 120 \ \pi \ \Omega$$

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

Erdbeschleunigung

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

Newton

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

Joule (gesprochen: Dschuhl)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

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
---------------------------------------	----	----	----	----	----	-------	-----	-----

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

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 bar = 10^5 Pascal

1 mbar = 1 hPa

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

1 mil = 1 mrad

$1/e = 0,368$

$e = 2,718\ 282$

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

Radius der Erde:

6.370 km

Entfernung eines geostationären Satelliten:

38.000 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

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

1 Lichtjahr = $9,461 \cdot 10^{15}$ m

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

$$\underline{r} = \frac{Z - Z_L}{Z + Z_L} \quad \frac{Z}{Z_L} = \frac{1+r}{1-r} \quad \text{Reflexionsfaktor, } r \text{ in dB} = 20 \lg r$$

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

$$r = \frac{VSWR-1}{VSWR+1} \quad r \ll 1 : \quad r \approx (VSWR-1)/2, \quad VSWR \approx 1+2r$$

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

$$Z_L = \frac{120\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \operatorname{ar} \cosh(D/d) \quad \text{Zweidraht-Leitung, Leiterabstand } D$$

$$Z_L = \frac{120\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(2D/d) \quad \text{für } D > 3,6 d \quad \operatorname{arcosh} x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$$

$$Z_L = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c_0 C_\epsilon} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \frac{\epsilon_0 \sqrt{\epsilon_r} Z_0}{C_\epsilon} = \frac{U_H}{I_H} \quad \text{verlustlose Leitung}$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \sqrt{f_2/f_1} \quad \text{Dämpfungsmaß } \alpha \text{ durch Leiterverluste bei der Frequenz } f; \text{ Skineffekt}$$

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

$$\lambda = \frac{c_0}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad \lambda_0 \text{ in m} = 300/(f \text{ in MHz})$$

$$Q = \pi/(\alpha \lambda_z) \quad \text{Güte eines Leitungsresonators, Leitung mit Dämpfungsmaß } \alpha$$

$$f_c \approx \frac{2c_0}{\pi(D+d)\sqrt{\epsilon_r}} \quad H_{11}\text{-Welle in der Koaxialleitung}$$

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 $\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$, auf der Strecke r, nur gültig für $\tan\delta < 0,1$

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

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

Phasenmaß, Phasendrehung pro Meter; laufende Welle

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

Skineffekt, 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 Skineffekt

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

Luft bei 1 bar und 20⁰ C, homogenes Feld

$$Z_F = \frac{E_H}{H_H} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}}$$

Feldwellenwiderstand, laufende, ebene Welle

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit

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

Strahlungsdichte, zeitlicher Mittelwert

$$C = \epsilon_0\epsilon_r \frac{A}{d}$$

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

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

Anteil durch el. Leitfähigkeit: $\sigma/(\omega\epsilon_0)$

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r - j\epsilon_r \tan\delta - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

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 \bar{S}

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

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

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

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

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

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

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

$$C(\vartheta, \varphi) = \frac{E(\vartheta, \varphi)}{E_{max}}$$

Richtcharakteristik, Richtdiagramm

$$C(\vartheta, \varphi) \text{ in dB} = 20 \lg C(\vartheta, \varphi)$$

Richtcharakteristik

$$D = \frac{S_{max}}{S_{isotrop}}$$

Richtfaktor, Directivity

$$g = \eta D$$

Gewinn, Gain (Wirkungsgrad η berücksichtigt Verluste, für eine verlustlose Antenne ist $\eta = 1$)

$$G \text{ in dB} = 10 \lg g$$

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

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

Strahlungswiderstand

$$U_0 = E_{tan} h_{eff}$$

Leerlaufspannung einer Empfangsantenne

$$EIRP = g P_s$$

Effective Isotropic Radiated Power

	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	$\lambda/(2\pi)$

$$C(\phi, \vartheta) = |\sin \vartheta|$$

Richtdiagramm Hertzscher Dipol bzw. kurzer Dipol

$$C_E(\theta) = \frac{1+K \cos \theta}{1+K} \frac{\sin \left[\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \right]}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta}$$

Richtdiagramm Hornstrahler, E-Ebene

$$C_H(\phi) = \frac{K + \cos \phi}{1+K} \frac{\cos \left[\frac{\pi a}{\lambda} \sin \phi \right]}{1 - 4 \left(\frac{a}{\lambda} \sin \phi \right)^2}$$

Richtdiagramm Hornstrahler, H-Ebene

$$K = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}$$

a: Breite des Horns in der H-Ebene

b: Höhe des Horns in der E-Ebene

$$C(\phi, \vartheta) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta} \right|$$

Richtdiagramm $\lambda/2$ -Dipol

$$C(\theta) = 2 \left| \frac{J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta} \right|$$

Richtdiagramm Phased Array, Durchmesser D

$$C(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi H}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi H}{\lambda} \sin \theta}$$

Richtdiagramm Phased Array, Höhe H

$$C(\phi) = \frac{\sin\left(\frac{\pi B}{\lambda} \sin \phi\right)}{\frac{\pi B}{\lambda} \sin \phi}$$

Richtdiagramm Phased Array, Breite B

$$r_{Blind} \approx \frac{\lambda}{(2\pi)}$$

Ausdehnung Blindfeld mit $E \sim 1/r^2, 1/r^3$; Dipolantenne

$$r_{Blind} \approx 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

Ausdehnung Blindfeld, großflächige Antenne

$$r_{min} = 2 D^2/\lambda$$

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)

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

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

$\eta_{Fläche} \approx 1$ für eine Active Array Antenne ohne Taper

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

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

runde strahlende Apertur mit konstanter Belegung;
Durchmesser D; $D \gg \lambda$, $\eta_{Fläche} = 1$.

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

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

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

lineares Array mit konstanter Belegung oder
rechteckige strahlende Apertur mit konstanter Belegung;
Fläche $A = a \cdot b$; $a, b \gg \lambda$, Öffnungswinkel

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

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

$\Delta\phi_0 \approx 2 \cdot \lambda/b = 114,6^\circ \cdot \lambda/b$ Winkel zwischen den ersten Nullstellen des Diagramms

$\Delta\vartheta_0 \approx 2 \cdot \lambda/a = 114,6^\circ \cdot \lambda/a$ (140° für die runde Apertur)

$g < \frac{41.253}{\Delta\phi \Delta\vartheta}$ Näherung für Antennen geringer Bündelung, ohne Nebenkeulen, $\Delta\phi$ und $\Delta\vartheta$ in Grad

$g \leq \frac{32.383}{\Delta\phi \Delta\vartheta}$ stark bündelnde rechteckige Richtantenne mit konstanter Belegung; $\Delta\phi$ und $\Delta\vartheta$ in Grad; Nebenzipfeldämpfung 13 dB, $\eta_{\text{Fläche}} = 1$.

$g \leq \frac{25.732}{\Delta\phi \Delta\vartheta}$ stark bündelnde Richtantenne mit 15-dB-Gauss- Taper; $\Delta\phi$ und $\Delta\vartheta$ in Grad; Nebenzipfeldämpfung 30 dB.

$g = N g_E$ 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 $\Delta\phi$	$51^\circ \lambda/L$	$108^\circ \sqrt{\lambda/L}$	$60,7^\circ \sqrt{\lambda/L}$
2 ϕ_{01} (1. Nullstelle)	$114^\circ \lambda/L$	$162^\circ \sqrt{\lambda/L}$	$115^\circ \sqrt{\lambda/L}$
Nebenzipfeldämpfung	$\leq 13,5 \text{ dB}$		

Richtdiagramm_{gesamt} = Richtdiagramm_{Einzelelement} · Richtdiagramm_{Gruppe}

$g \approx 4 L/\lambda$ Dipol-Zeile, $\lambda/2$ -Dipole, Abstand $0,9 \lambda$

$g \approx 2 L/\lambda$ Dipol-Linie, $\lambda/2$ -Dipole, Abstand $0,9 \lambda$

$r_F = \sqrt{\frac{\lambda}{1/r_E + 1/r_S}}$ Radius der 1. Fresnelzone ($\lambda/2$ Umweg),
Antennenabstand: $r_E + r_S$

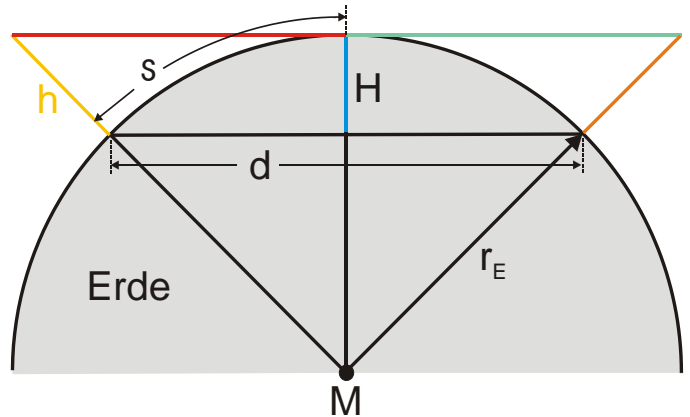
$D_F = \sqrt{\lambda d}$ max. Durchmesser des 1. Fresnel-Ellipsoids,
Antennenabstand d

Antenne in der Höhe h über der Erde:

$$r_E = 6.370 \text{ km}$$

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

$$h \approx H \text{ und } s \approx d/2$$



$$H \approx \frac{s^2}{(2r_E)}$$

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

$$s \approx \sqrt{2h \left(\frac{4}{3}r_E\right)} \quad \text{Abstand Radio-Horizont; der Faktor } 4/3 \text{ berücksichtigt die Beugung der elektromagnetischen Wellen in der Atmosphäre}$$

Exakte Gleichungen, die nur die Geometrie berücksichtigen (ohne Faktor 4/3):

$$s = r_E \arccos \frac{1}{1+h/r_E} \quad \text{bzw.:} \quad h = \frac{r_E}{\cos(s/r_E)} - r_E$$

$$H = r_E \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r_E}\right)^2}\right) \quad \text{bzw.:} \quad d = 2r_E \sqrt{1 - \left(1 - \frac{H}{r_E}\right)^2}$$

$$s = r_E \arccos(1 - H/r_E) \quad \text{bzw.:} \quad H = r_E [1 - \cos(s/r_E)]$$

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

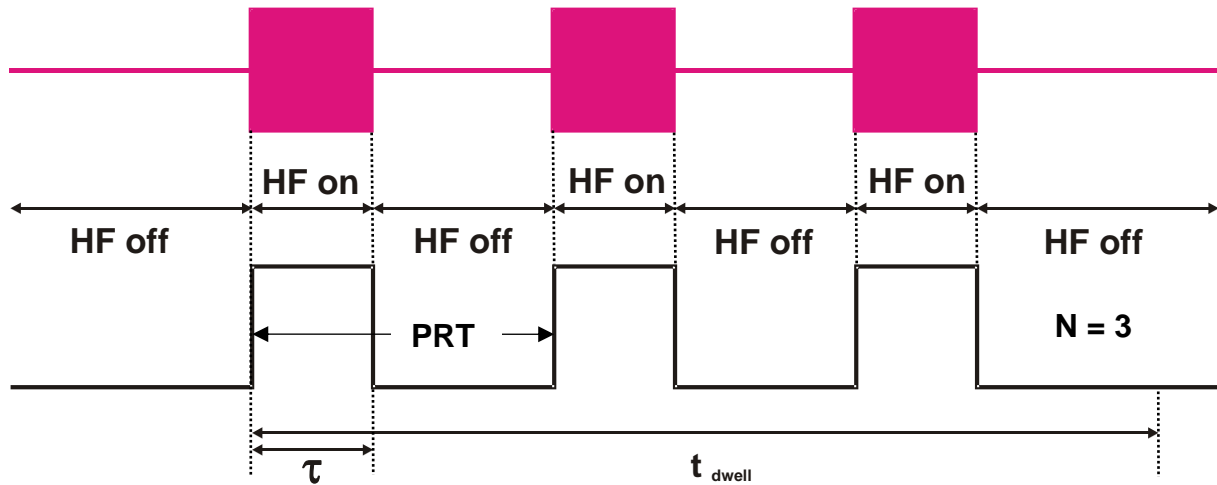
Belegung von $x = -L/2$ bis $x = +L/2$	Richtdiagramm $C(\varphi)$	3-dB-Beamwidth	Erste Nullstelle bei $\varphi =$	Nebenzipfel-dämpfung	Gewinn bezogen auf 1
$f(x) = 1$	$L \frac{\sin u}{u}$	$50,8^\circ \lambda/L$	$57,3^\circ \lambda/L$	13,2 dB	1
$f(x) = \cos \frac{\pi x}{L}$	$\frac{\pi L}{2} \frac{\cos u}{(\pi/2)^2 - u^2}$	$68,8^\circ \lambda/L$	$85,9^\circ \lambda/L$	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° λ/L	114,6° λ/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° λ/L	114,6° λ/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 (Pulse Repetition Interval)

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

Instrumented Range, eindeutiger Entfernungmeßbereich

$$x = c_0 \tau$$

Länge eines Radarpulses, 300 km für 1 ms

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

Minimum Range, innere Totzone; τ = Pulsdauer

$$RTT = 2 r / c_0$$

Round Trip Time, 1 ms für 150 km, 20 ms für 3.000 km

DC

Duty Cycle (< 1)

$$\tau = DC/PRF$$

Pulsdauer

$$\tau = 1/B$$

B = Basis-Bandbreite = ZF-Bandbreite, nur gültig für ein Pulsradar mit Matched Filter

$$t_{kI} = N PRT$$

Dauer der kohärenten Integration (Coherent Processing Interval, CPI), 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)

$$r_{\text{max}}^4 = \frac{P_{S \text{ Peak}} \tau g_S g_E \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 \text{SNR}_1 L_{\text{ges}} F k T_0}$$

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)

$$r_{max}^4 = \frac{P_{S\ Peak} \tau g_S g_E \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 SNR_1 L_{ges} F kT_0} g_{kl} g_{PK}$$

max. Reichweite eines Pulsradars, mit Integration einer Pulsfolge 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,
 $k = 0,5 \dots 0,8$ für SW0, SW1 und SW3,
 $k = 0,8 \dots 2,5$ für SW2, $k = 0,75 \dots 1,7$ für SW4

$$g_{PK} \approx K$$

Gewinn durch Pulskompression, Dann ist für τ die Pulslänge am Schwellwertdetektor τ/K einzusetzen, so dass sich als Gesamtgewinn 1 ergibt.
 Kompressionsfaktor $K = \tau B_{PK}$,
 B_{PK} : Modulations-Bandbreite bzw. Frequenzhub bei FM

Radar-Rückstreuquerschnitt (Radar Cross Section, RCS)

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

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

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

Radar Cross Section einer leitenden Kugel, $2\pi r \gg \lambda$
 11,3 cm Durchmesser ergibt $\sigma = 0,01 \text{ m}^2$

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

max. RCS eines Corner-Reflektors (Triangular Trihedral, Tripel-Spiegel), Kantenlänge $a \gg \lambda$

$$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$$

max. RCS eines Square Corner-Reflektors, Kantenlänge $a \gg \lambda$

$$\sigma = \frac{8\pi a^2 h^2}{\lambda^2}$$

max. RCS einer rechtwinklig geknickten Metallplatte, Schenkellänge a, Höhe h

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

max. RCS einer Metallplatte, Fläche A

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

max. RCS einer rechteckigen Metallplatte, Seiten a, b

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{16\pi} \tan^4 \left(\frac{\alpha}{2} \right)$$

RCS eines spitzen Konus, direkt von vorne, Öffnungswinkel α

$$\sigma = \frac{2\pi r L^2}{\lambda}$$

max. RCS eines Zylinders, Radius r, Länge L

$\sigma = \frac{\pi a^2 b^2}{c^2}$	max. RCS eines Ellipsoids, Halbachsen $a \geq b \geq c$
$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} (\pi^2 r^4)$	max. RCS einer offenen Halbkugel, Radius r , Welleneinfall senkrecht zur Querschnittsebene, in die Öffnung hinein
$\sigma = 0,86 \lambda^2$	max. RCS eines dünnen Metalldrahts (Chaff), Länge $\lambda/2$, Einfall senkrecht zur Drahtachse
$\sigma = 0,93 \lambda^2$	max. RCS eines dünnen Metalldrahts (Chaff), Länge λ , Einfall senkrecht zur Drahtachse
$\sigma = 0,15 \text{ bis } 0,18 \lambda^2$	mittlerer RCS eines dünnen Metalldrahts (Chaff Dipole), Länge $\lambda/2$ bis $1,5 \lambda$, Drahtachse beliebig orientiert bezogen auf die Richtung der elektrischen Feldstärke der einfallenden Welle
$\sigma = 9\pi r^2 \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^4$	RCS einer leitenden Kugel, $r < \lambda/10$ (Rayleigh Region)
$\sigma = 0,72\pi r^2 \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^4$	max. RCS einer leitenden Kreisscheibe, $r < \lambda/10$ (Rayleigh Region)

Radarmessfehler:

$\delta_{\Theta} \approx 0,1 \Theta_{3dB}$	1- σ -Fehler der Winkelmessung, Θ_{3dB} = 3-dB-Keulbreite
$\delta_{\theta} \approx 0,42 \frac{\Theta_{3dB}}{\sqrt{SNR}}$	bei großen Entfernungen, $SNR \leq 100$
$\sigma_{\theta} = \frac{2\delta_{\theta}}{\sqrt{n}}$	1- σ -Fehler der Winkelmessung nach n Messungen
$SNR = N SNR_1$	SNR-Verbesserung durch kohärente Integration über N Pulse
$SNR = N^k SNR_1$	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

$$\Delta r = \tau c_0/2 = c_0/(2B)$$

Entfernungsauflösung, Pulsradar, τ = Pulsdauer

$$\Delta r = \tau c_0/(2K)$$

Entfernungsauflösung, Pulscompressionsradar, K = Kompressionsfaktor (s.o.)

$$\Delta R = c_0/(2B)$$

Breite eines Range-Gates, B = Radarbasisbandbreite

$$N_{RG} = (1-DC) B / PRF$$

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, B = Bandbreite des Dopplerfilters

$$v_{max} = \lambda PRF/4$$

Dopplerfilter, maximale, eindeutige Geschwindigkeit

$$v_b = n \lambda PRF/4 = n c_0 PRF/(4 f)$$

Blindgeschwindigkeit; $f = c_0/\lambda$ Trägerfrequenz des Radars, $n = 1, 2, \dots$

$$\Delta v = c_0/(2 f N PRT)$$

Geschwindigkeits-Auflösung, Doppler Velocity Resolution, $N PRT = t_{dwell} = CPI$, Breite eines Doppler-Gates

$$\sigma_{vD} = \frac{\Delta v}{\sqrt{2 SNR}}$$

Standardabweichung der Radialgeschwindigkeit (Einzelmessung)

$$\sigma_{vC} = \frac{\sqrt{2} R \sigma_\theta}{\Delta t}$$

Standardabweichung der Tangentialgeschwindigkeit (Zwei Einzelmessungen). Die Tangentialgeschwindigkeit wird aus der Differenz zweier um Δt zeitversetzter Messungen des Zielwinkels berechnet.

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 $\mu_r = 1$)

$\lambda_z = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}}$ Hohlleiterwellenlänge

$v_G = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{1 - (f_c/f)^2}$ Gruppengeschwindigkeit

$\tau_G' = 1/v_G$ Signallaufzeit pro m

$Z_{FH} = Z_0 \frac{\lambda_z}{\lambda_0}$ Feldwellenwiderstand H-Wellen

$Z_{FE} = Z_0 \frac{\lambda_0}{\lambda_z \epsilon_r}$ Feldwellenwiderstand E-Wellen

H₁₀-Welle im Rechteckhohlleiter (Querschnitt a · b)

$f_c = \frac{c_0}{2a\sqrt{\epsilon_r}}$ Ausbreitungsbeginn; kritische Frequenz

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

$E_{max} = \sqrt{\frac{\frac{4}{ab} Z_0 P}{\sqrt{\epsilon_r [1 - (f_c/f)^2]}}}$ 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)

$f_r = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left[\frac{m}{a}\right]^2 + \left[\frac{n}{b}\right]^2 + \left[\frac{p}{c}\right]^2}$ H_{mnp} – bzw. E_{mnp} – Resonanz

H₁₁-Welle im Rundhohlleiter (Innendurchmesser D)

$f_c = \frac{c_0}{1,71 \cdot D \sqrt{\epsilon_r}}$ Ausbreitungsbeginn; kritische Frequenz

VII. Schaltungstechnik

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

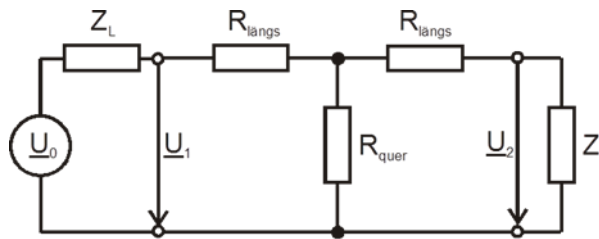
Reflexionsfaktor der Lastimpedanz Z_L ; $Z_{ref} = 50 \Omega$ i.a.

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

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

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

Dämpfung in dB



beidseitig angepaßtes T-Glied

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

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 Grundschiwingung 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

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

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

$$F = \frac{P_r \text{ output}}{k T_0 B g} = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}}$$

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

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

Einschwingzeit, Tiefpaß-Filter

$$\tau = 1/B$$

Einschwingzeit, Bandpaß-Filter