

Allgemeines

$$\begin{aligned} \text{Scheinwiderstand} &= \text{Wirkwiderstand} + j \cdot \text{Blindwiderstand} \\ \text{Impedanz} &= \text{Resistanz} + j \cdot \text{Reaktanz} \\ \underline{Z} &= R + j \cdot X \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Scheinleitwert} &= \text{Wirkleitwert} + j \cdot \text{Blindleitwert} \\ \text{Admittanz} &= \text{Konduktanz} + j \cdot \text{Suszeptanz} \\ \underline{Y} &= G + j \cdot B \end{aligned}$$

$$\text{Scheinleistung:} \quad \underline{S} \text{ [VA]} = \frac{1}{2} \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P \text{ [W]} + j \cdot Q \text{ [var]}$$

$$\text{Reflexionsfaktor:} \quad r = \frac{U_r}{U_h} = -\frac{I_r}{I_h} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{Y_0 - Y}{Y_0 + Y} = \frac{U - \underline{I} \cdot Z_0}{U + \underline{I} \cdot Z_0}$$

$$\text{Leitungswellenwiderstand:} \quad \underline{Z}_L = \frac{U_h}{I_h} = -\frac{U_r}{I_r} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

$$\text{Impedanz / Admittanz:} \quad \underline{Z} = Z_0 \cdot \frac{1+r}{1-r} \quad \underline{Y} = Y_0 \cdot \frac{1-r}{1+r}$$

$$\text{Reflexionsdämpfung:} \quad r_{dB} = -20 \cdot \lg |r|$$

$$\text{Stehwellenverhältnis (Welligkeit):} \quad s = SWR = VSWR = \left| \frac{U_{max}}{U_{min}} \right| = \frac{|U_h| + |U_r|}{|U_h| - |U_r|} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

$$\text{Betrag des Reflexionsfaktors:} \quad |r| = \frac{s-1}{s+1}$$

r_{dB}	$-\infty$	-26,4dB	-20,8dB	-17,7dB	-14,0dB	-9,5dB	-6,0dB	-3,5dB	-2,5dB	-1,7dB
s	1	1,1	1,2	1,3	1,5	2	3	5	7	10

$$\begin{aligned} \text{Skin-Eindringtiefe:} \quad \delta_s &= \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \\ \text{elektrischer (Feld-) Strom:} \quad \vec{J} &= \kappa \cdot \vec{E} = n \cdot \mu \cdot q \cdot \vec{E} \quad \vec{v}_{Drift} = \mu \cdot \vec{E} \\ \text{elektrischer Diffusionsstrom:} \quad \vec{J} &= -q \cdot D \cdot \text{grad}(n) \\ \text{Einstein-Beziehung:} \quad D &= \mu \cdot \frac{k \cdot T}{q} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vakuumlichtgeschwindigkeit} \quad c_0 &= 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ \text{elektrische Feldkonstante} \quad \epsilon_0 &= 8,854187871 \text{ pF/m} \\ \text{magnetische Feldkonstante} \quad \mu_0 &= 1,2566370614 \text{ } \mu\text{H/m} \\ \text{Vakuumfeldwellenwiderstand} \quad Z_0 &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Elementarladung} \quad e &= 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ \text{Elektronenmasse} \quad m_e &= 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,51099906 \text{ MeV} \\ \text{atomare Masseneinheit} \quad u &= 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ \text{Ångström (ungefähre Atomgröße)} \quad 1 \text{ Å} &= 10^{-10} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Boltzmann-Konstante} \quad k &= 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \\ \text{Avogadro-Konstante} \quad N_A &= 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol} \\ \text{Plancksche Konstante} \quad h &= 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \end{aligned}$$

Frequenzbereiche

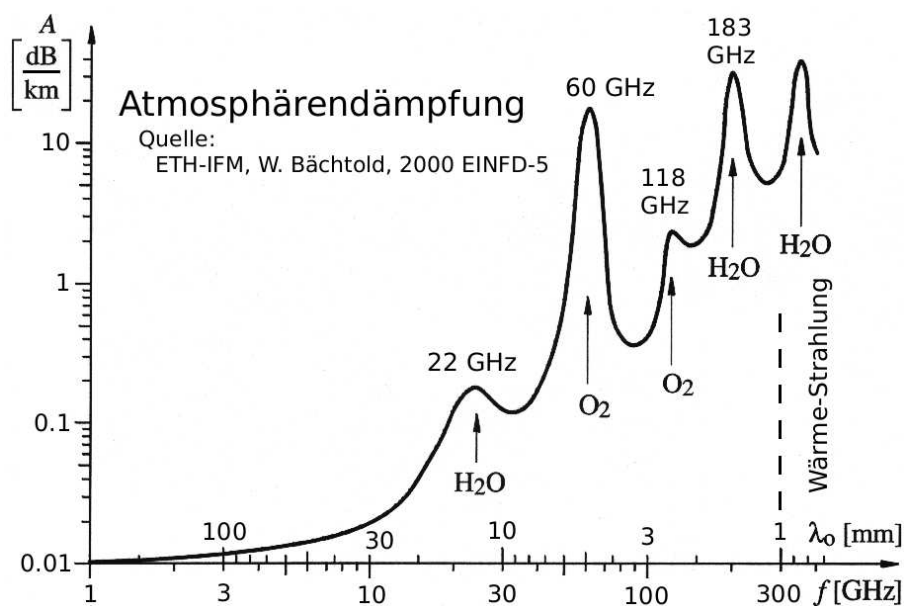
deutsche-sprachige		englische-sprachige		Frequenz	Wellenlänge
Bezeichnung	Abkürzung	Bezeichnung	Abkürzung		
Längstwellen		Very Low Frequencies	VLF	3...30 kHz	100...10 km
Langwellen	LW	Low Frequencies	LF	30...300 kHz	10...1 km
Mittelwellen	MW	Medium Frequencies	MF	0,3...3 MHz	1...0,1 km
Kurzwellen	KW	High Frequencies	HF	3...30 MHz	100...10 m
Meterwellen	UKW	Very High Frequencies	VHF	30...300 MHz	10...1 m
Dezimeterwellen		Ultra High Frequencies	UHF	0,3...3 GHz	10...1 dm
Zentimeterwellen		Super High Frequencies	SHF	3...30 GHz	10...1 cm
Millimeterwellen		Extremly High Frequencies	EHF	30...300 GHz	10...1 mm

Mikrowellen-Bänder

Bezeichnung	P	L	S	C	X	Ku	K	Ka	mm	sub-mm
Frequenz in GHz	0,2...1	1...2	2...4	4...8	8...12	12...18	18...27	27...40	40...300	> 300

Hohleiter-Bänder

Hohleiter-Name	Band	Frequenz	Cutoff-Frequenz	Flansch	Innenabmessungen
WR-42	K	18...26,5 GHz	14,08 GHz	2,20cm quadr.	10,7×4,3mm
WR-28	Ka	26,5...40 GHz	21,07 GHz	1,19cm quadr.	7,11×3,56mm
WR-22	Q	33...50 GHz	26,34 GHz	2,86cm rund	5,7×2,8mm
WR-19	U	40...60 GHz	31,41 GHz	2,86cm rund	4,8×2,4mm
WR-15	V	50...75 GHz	39,86 GHz	1,91cm rund	3,8×1,9mm
WR-12	E	60...90 GHz	48,35 GHz	1,91cm rund	3,1×1,5mm
WR-10	W	75...110 GHz	59,05 GHz	1,91cm rund	2,54×1,27mm
WR-08	F	90...140 GHz	73,84 GHz	1,90cm rund	2,32×1,02mm
WR-06	D	110...170 GHz	90,84 GHz	1,90cm rund	1,7×0,83mm
WR-05	G	140...220 GHz	115,75 GHz	1,90cm rund	1,3×0,648mm
WR-04	Y	170...260 GHz	137,52 GHz	1,90cm rund	-
WR-03	H (J)	220...325 GHz	173,28 GHz	1,90cm rund	-



Lineare Netzwerke

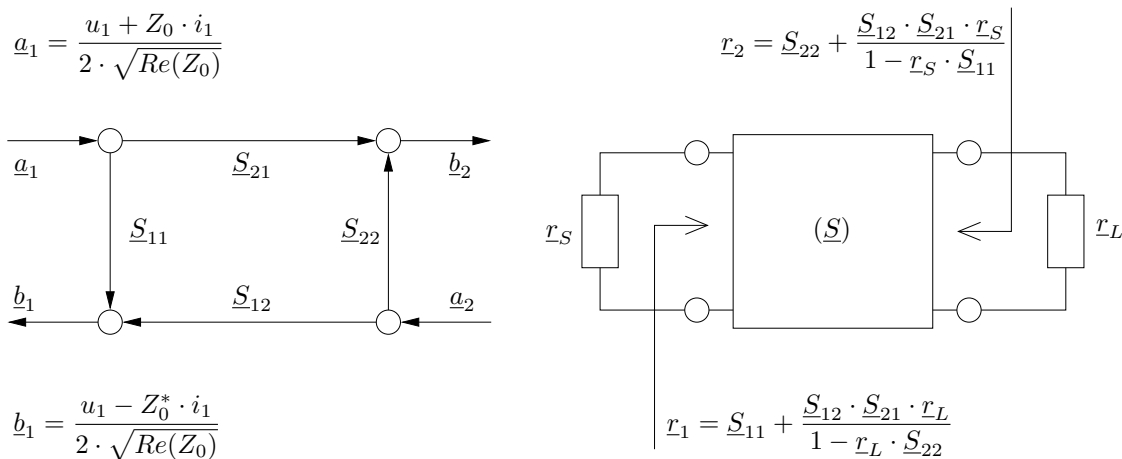


Bild 1: Signalfluß-Diagramm (links) und 2-Tor (rechts)

	allgemein	Folgerung für 2-Tore
unilateral	—	$\underline{S}_{12} = 0$ und $\underline{S}_{21} \neq 0$ (oder umgekehrt)
Reziprozität	$(\underline{S}) = (\underline{S})^T$ bzw. $\underline{S}_{mn} = \underline{S}_{nm}$ Alle passiven Netzwerke, deren Dielektrika und Permeabilitäten symmetrische Tensoren besitzen, sind reziprok.	$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{21}$
Symmetrie	reziprok und $\underline{S}_{nn} = \underline{S}_{mm}$	$\underline{S}_{11} = \underline{S}_{22}$, $\underline{S}_{12} = \underline{S}_{21}$
Verlustfreiheit (Unitarität)	$(\underline{S})^{*T} \cdot (\underline{S}) = (\underline{E})$	$ \underline{S}_{11} = \underline{S}_{22} $, $ \underline{S}_{12} = \underline{S}_{21} $, $ \underline{S}_{11} ^2 + \underline{S}_{21} ^2 = \underline{S}_{22} ^2 + \underline{S}_{12} ^2 = 1$

absolute Stabilität von 2-Toren: $|r_1| \leq 1$ für alle passiven r_L und $|r_2| \leq 1$ für alle passiven r_S

- Ein unilaterales 2-Tor ist absolut stabil genau dann, wenn $|\underline{S}_{11}| < 1$ und $|\underline{S}_{22}| < 1$.
- μ -Faktor (Stabilitätsfaktor der r_L -Ebene): Ein 2-Tor ist absolut stabil genau dann, wenn

$$\mu = \frac{1 - |\underline{S}_{11}|^2}{|\underline{S}_{22} - \underline{S}_{11}^* \cdot \Delta| + |\underline{S}_{21} \cdot \underline{S}_{12}|} > 1 \quad \text{mit} \quad \Delta = \underline{S}_{11} \cdot \underline{S}_{22} - \underline{S}_{12} \cdot \underline{S}_{21}$$

μ ist der minimale Abstand zwischen instabiler Region und Ursprung des Smith-Diagrammes.

- μ' -Faktor (Stabilitätsfaktor der r_S -Ebene): Ein 2-Tor ist absolut stabil genau dann, wenn

$$\mu' = \frac{1 - |\underline{S}_{22}|^2}{|\underline{S}_{11} - \underline{S}_{22}^* \cdot \Delta| + |\underline{S}_{21} \cdot \underline{S}_{12}|} > 1 \quad \text{mit} \quad \Delta = \underline{S}_{11} \cdot \underline{S}_{22} - \underline{S}_{12} \cdot \underline{S}_{21}$$

μ' ist der minimale Abstand zwischen instabiler Region und Ursprung des Smith-Diagrammes.

- Stabilitätsfaktor K nach Rollet: Ein 2-Tor ist absolut stabil genau dann, wenn

$$K = \frac{1 - |\underline{S}_{11}|^2 - |\underline{S}_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2 \cdot |\underline{S}_{12} \cdot \underline{S}_{21}|} > 1 \quad \text{und} \quad |\Delta| < 1 \quad \text{mit} \quad \Delta = \underline{S}_{11} \cdot \underline{S}_{22} - \underline{S}_{12} \cdot \underline{S}_{21}$$

$K > 1$ bedeutet, der Stabilitätskreis schneidet Peripherie des Smith-Diagrammes nicht.

- Verlustlose Anpaßschaltungen ändern die Eigenschaft der absoluten Stabilität nicht.
- Stabilitätsfaktoren eignen sich sehr gut für Transistoren und einstufige Verstärker. Sie sagen nichts über die innere Stabilität mehrstufiger Verstärker aus.

S-Parameter-Kalibrierung

1. **SOLT** = Short, Open, Load, Thru
oder
TOSM = Thru, Open, Short, Match

Eigenschaften aller Kalibrierstandards müssen bekannt sein
hauptsächlich für koaxiale Leitungstechnik
besonders genau bei Verwendung einer „Sliding-Load“

2. **TRL** = Thru, Reflect, (Delay-) Line
oder
LRL = Line, Reflect, (Delay-) Line

„Reflect“ ist Leerlauf oder Kurzschluß (muß nicht perfekt sein)
berücksichtigt kein Übersprechen von Tor 1 nach Tor 2
hauptsächlich für Mikrostreifen- oder Koplanar-Technik
für größere Frequenzbereiche sind mehrere „Delay-Lines“ nötig
für sehr niedrige Frequenzen unbrauchbar
kalibriert auf Wellenwiderstand der Kalibrierleitungen (dispersiv!)

3. **TRM** = Thru, Reflect, Match
oder
LRM = Line, Reflect, Match

setzt idealen „Match“ voraus
wie TRL/LRL aber für niedrige Frequenzen gut geeignet

Um einen weiten Frequenzbereich abzudecken, wird meistens TRL und TRM gemeinsam verwendet.

Zeitbereichskalibrierung

1. Schritt: Koaxiale Kalibrierung
2. Schritt: Kalibrierung im Zeitbereich mit

Durchgangsleitung

zwei unterschiedlich langen Leitungen mit identischen, stark reflektierenden Elementen ($|r| \approx 1$)

Coaxiale Stecker-Normen

Bezeichnung	Typ	Imped.	max f	
SMA (Sub-Miniature-A)	Schraube	50Ω	18GHz	3,5mm 100W sehr weit verbreitet
reverse-SMA (RP-SMA)	Schraube	50Ω	18GHz	3,5mm 100W WLAN-Antennen
K	Schraube	50Ω	40GHz	2,92mm
-	Schraube	50Ω	50GHz	2,4mm
V	Schraube	50Ω	67GHz	1,85mm
W	Schraube	50Ω	110GHz	1,0mm
N	Schraube	50Ω	11GHz	7mm 300W sehr robust, Funktechnik
UHF (PL-259)	Schraube	50Ω	0,3GHz	500W KW-Funkgeräte
BNC (Bayonet Nut Connector)	Bajonett	50/75Ω	1GHz	80W Funk, Video, Oszilloskop u.ä.
Belling-Lee (Antennenstecker)	Stecken	undef.		75Ω-Fernseh-/Radio-Apparate
F	Schraube	75Ω	5GHz	Satellitenfernsehen
I.PEX (U.FL, MHF)	Stecken			WLAN-Karten
GPO (SMP)	Stecken	50Ω	40GHz	
GPPO (SMPM, SSMP)	Stecken	50Ω	65GHz	

Rauschgrößen

folgende Notation am Beispiel einer Rauschspannung

Leistungsdichte-spektrum (LDS)	$S_u(f)$
Schwankungsquadrat	$\overline{u^2(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} S_u(f) \cdot df$
äquivalente Rauschspannungsdichte	$e_u(f) = \sqrt{S_u(f)} = \frac{\overline{u_{RMS}(t)}}{\sqrt{\Delta f}}$
Rauschleistung	$P = \frac{1}{R} \cdot \int_{f_0}^{f_0+\Delta f} S_u(f) \cdot df = \frac{\overline{u_{\Delta f}^2(t)}}{R}$

Superposition korrelierter Rauschgrößen:

$$S_{u,ges} = S_{u1} + S_{u2} + 2 \cdot \text{Re}(S_{u1,u2}) = S_{u1} + S_{u2} + 2 \cdot \sqrt{S_{u1} \cdot S_{u2}} \cdot \text{Re}(K)$$

with Kreuzspektrum $S_{u1,u2}$ und Korrelationskoeffizient K .

Rauschursachen

Hochfrequenzrauschen:

thermisches Rauschen:	$S_u = 4 \cdot k \cdot T \cdot R$	bzw.	$S_i = \frac{4 \cdot k \cdot T}{R}$
Diffusionsrauschen:	$S_u = 4 \cdot k \cdot T_e \cdot R$	bzw.	$S_i = \frac{4 \cdot k \cdot T_e}{R}$
Schrottrauschen:	$S_i = 2 \cdot q \cdot I_{DC}$		

Niederfrequenzrauschen:

Generations-Rekombinations-Rauschen:	$\frac{S_N}{N^2} = \frac{S_R}{R^2} = \frac{\overline{\Delta N^2}}{N^2} \cdot \frac{4 \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} = \frac{\overline{\Delta N^2}}{N^2} \cdot \frac{4 \cdot \tau}{1 + (f/f_g)^2}$
1/f-Rauschen:	$\frac{S_R}{R^2} = \frac{S_G}{G^2} = \frac{S_U}{U^2} = \frac{S_I}{I^2} = \frac{\alpha}{N \cdot f}$

Rauschende n-Tore

Korrelationsmatrizen: $(\underline{C})^T = (\underline{C})^*$

Wellen (S-Parameter):	(\underline{C})	mit	$\underline{c}_{ij} = \overline{\underline{b}_{noise,i} \cdot \underline{b}_{noise,j}^*}$
Strom (Y-Parameter):	(\underline{C}_Y)	mit	$\underline{c}_{ij} = \overline{\underline{i}_{noise,i} \cdot \underline{i}_{noise,j}^*}$
Spannung (Z-Parameter):	(\underline{C}_Z)	mit	$\underline{c}_{ij} = \overline{\underline{u}_{noise,i} \cdot \underline{u}_{noise,j}^*}$

Bosman-Theorem (gültig für passive, lineare Schaltungen):

$$\begin{aligned} (\underline{C}) &= kT \cdot ((\underline{E}) - (\underline{S}) \cdot (\underline{S})^{*T}) \\ (\underline{C}_Y) &= 4kT \cdot \text{Re}[(\underline{Y})] \\ (\underline{C}_Z) &= 4kT \cdot \text{Re}[(\underline{Z})] \end{aligned}$$

Rauschzahl

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{SNR_{ein}}{SNR_{aus}} = \frac{N_{aus}}{N_{ein} \cdot G} = \frac{N_{aus}}{k \cdot T_0 \cdot B \cdot G} = \frac{N_{z,aus}}{k \cdot T_0 \cdot B \cdot G} + 1 = F_z + 1 = \frac{T_e}{T_0} + 1 \\
 &= F_{min} + \frac{R_n}{G_S} \cdot ((G_S - G_{opt})^2 + (B_S - B_{opt})^2) = F_{min} + \frac{R_n}{G_S} \cdot |\underline{Y}_S - \underline{Y}_{opt}|^2 \\
 &= F_{min} + 4 \cdot \frac{R_n}{Z_0} \cdot \frac{|r_{opt} - r_S|^2}{(1 - |r_S|^2) \cdot |1 + r_{opt}|^2}
 \end{aligned}$$

mit F, F_z	- Rauschzahl bzw. Zusatzrauschzahl (linear, nicht in dB)
G	- Leistungsverstärkung
SNR_{ein}, SNR_{aus}	- Signal-Rausch-Abstand am Ein- bzw. Ausgang
N_{ein}, N_{aus}	- Rauschleistungsdichte am Ein- bzw. Ausgang
$N_{z,aus}$	- vom 2-Tor am Ausgang erzeugte Rauschleistungsdichte
B	- Meßbandbreite
k	- Boltzmann-Konstante $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
T_0	- Rauschbezugstemperatur $T_0 = 290\text{K} = 16,85$ C (ca. -0,12dB Abweichung bei Verwendung von 25 C)
T_e	- effektive (Eingangs-) Rauschtemperatur
Z_0	- (reelle) Bezugsimpedanz (der Reflexionsfaktoren)
$\underline{Y}_S = G_S + j \cdot B_S$	- Innenadmittanz der (Signal- und Rausch-) Quelle am 2-Tor-Eingang
r_S	- Innenreflexionsfaktor der Quelle am 2-Tor-Eingang

Rauschparameter des 2-Tores:

F_{min}	- minimale Rauschzahl
R_n	- (äquivalenter) Rauschwiderstand
$\underline{Y}_{opt} = G_{opt} + j \cdot B_{opt}$	- optimale Innenadmittanz der Quelle am 2-Tor-Eingang
r_{opt}	- optimaler Innenreflexionsfaktor der Quelle am 2-Tor-Eingang

Rauschzahl von angepaßten Dämpfungsgliedern mit Dämpfung D : $F = 1 + \frac{T}{T_0} \cdot (D - 1)$

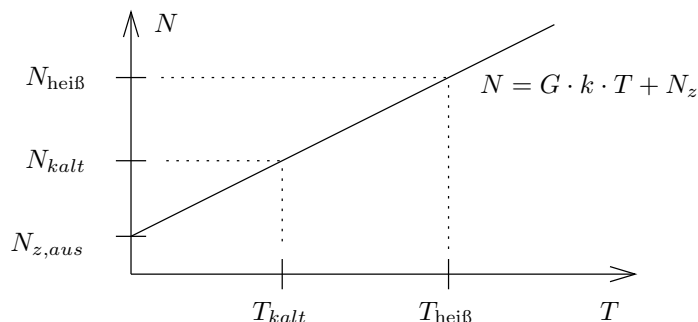
Heiß-Kalt-Meßverfahren der Rauschzahl

y-Faktor: $y = \frac{N_{heiß}}{N_{kalt}} = \frac{G \cdot k \cdot T_{heiß} + N_{z,aus}}{G \cdot k \cdot T_{kalt} + N_{z,aus}}$

Excess-Noise-Ratio der Rauschquelle: $ENR_{dB} = 10 \cdot \lg(ENR_{lin}) = 10 \cdot \lg\left(\frac{T_{heiß}}{T_0} - 1\right)$

Rauschzahl: $F = \frac{ENR_{lin} - y \cdot \left(\frac{T_{kalt}}{T_0} - 1\right)}{y - 1}$

Rauschzahl für $T_{kalt} = T_0$: $F = \frac{ENR_{lin}}{y - 1}$



Rauschzahl in Mischern

konventionelle Definition:

$$F_{SSB} = \frac{N_{A,HF} + N_{A,SP} + N_{A,Z,HF}}{G_{HF} \cdot N_{E,HF}} = 1 + \frac{G_{SP}}{G_{HF}} + \frac{T_{SSB}}{T_0}$$

$$F_{DSB} = \frac{N_{A,HF} + N_{A,SP} + N_{A,Z,HF}}{G_{HF} \cdot (N_{E,HF} + N_{E,SP})} = \frac{1}{2} \cdot F_{SSB}$$

in idealen, passiven Mischern:

$$F_{SSB} = L_c$$

$$F_{DSB} = \frac{L_c}{2}$$

rauschfreie Spiegelfrequenz:

$$F_{SSB,IEEE} = \frac{N_{A,HF} + N_{A,Z,HF}}{G_{HF} \cdot N_{E,HF}} = F_{SSB} - 1$$

$$F_{DSB}^* = \frac{N_{A,HF} + N_{A,Z,HF}}{G_{HF} \cdot (N_{E,HF} + N_{E,SP})} = \frac{1}{2} \cdot F_{SSB,IEEE}$$

$$F_{SSB,IEEE} = L_c - 1$$

$$F_{DSB}^* = \frac{1}{2} \cdot (L_c - 1)$$

Voraussetzung:

$$G_{HF} = G_{SP}$$

Per Definition gilt:

$$N_{E,HF} = N_{E,SP} = k \cdot T_0 = k \cdot 290K$$

$$N_{A,HF} = G_{HF} \cdot N_{E,HF} \text{ bzw. } N_{A,SP} = G_{SP} \cdot N_{E,SP}$$

- mit
- F_{SSB}, F_{DSB} - Ein- bzw. Zweiseitenband-Rauschzahl (linear, nicht in dB)
 - $N_{A,HF}, N_{A,SP}$ - Rauschleistungsdichte am Ausgang von Nutz- und Spiegelfrequenz
 - $N_{E,HF}, N_{E,SP}$ - Rauschleistungsdichte am Eingang von Nutz- und Spiegelfrequenz
 - $N_{A,Z}$ - vom Mischer erzeugte Rauschleistungsdichte am Ausgang
 - G_{HF}, G_{SP} - Konversionsgewinn für Nutzfrequenz und für Spiegelfrequenz
 - k - Boltzmann-Konstante $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
 - T_0 - Rauschbezugstemperatur $T_0 = 290K = 16,85$ C
 - T_{SSB} - Einseitenband-Rauschtemperatur des Mischers
 - L_c - Konversionsverlust des Mischers

Die Bezeichnungen Ein- und Zweiseitenband-Rauschzahl geben an, daß sich das Nutzsinal nur in einem bzw. in beiden Seitenbändern (Spiegelfrequenzen) befindet.

Ein Meßgerät nach der Heiß-Kalt-Methode bestimmt den Zweiseitenband-Konversionsgewinn und F_{DSB} .

Direkte Messungen mit Signalgenerator und Spektrumanalysator ergeben F_{SSB} .

$F_{SSB,IEEE}$ und F_{DSB}^* sind in der Realität praktisch nicht meßbar. In Simulationsprogrammen werden sie dagegen recht häufig benutzt (z.B. in ADS von Agilent).

Leistungsgewinne

verfügbarer Gewinn	available power gain	→	$P_{\text{aus,verfügbar}}/P_{\text{ein,verfügbar}}$
Übertragungsgewinn	transducer power gain	→	$P_{\text{aus}}/P_{\text{ein,verfügbar}}$
effektiver Gewinn	(effective) power gain	→	$P_{\text{aus}}/P_{\text{ein}}$

TEM-Welle

Freiraum-Streckendämpfung:

$$\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = G_{RX} \cdot G_{TX} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2$$

Leistungsfluß (Poyntingscher Vektor):

$$S = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \cdot G_{TX}$$

Materialien

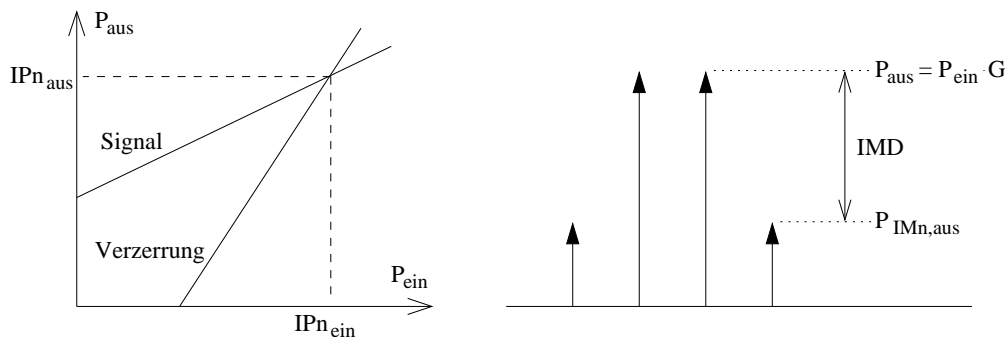
Material	ϵ_r	dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$
PE	2,28	0,0002 bei 1 MHz
PTFE (Teflon)	2,1	0,0003 bei 3 GHz
PVC	3...5	0,05 bei 1 MHz
GaAs	12,9	0,002 bei 10 GHz
Si	11,8	0,005 bei 1 GHz; 0,015 bei 10 GHz
FR2	4,5	
FR4	4,2...4,9	0,008 bei VHF; 0,02 bei 1 GHz; 0,03 bei 10 GHz
RO4003	3,38	0,002 bei 10 GHz
RT/duroid 5880	2,20	0,0009 bei 10 GHz
Al ₂ O ₃ -Keramik	9,8	0,0002 bei 10 GHz
Quarz-Glas	3,8	0,0001 bei 10 GHz

Güte

	Leerlaufgüte	belastete Güte
Serienresonanz	$Q_0 = \frac{U_L}{U_{ges}} = \frac{U_C}{U_{ges}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C \cdot R} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R} = \frac{f_0}{B_0}$	$Q_L = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R + Z_L} = \frac{f_0}{B_L}$
Parallelresonanz	$Q_0 = \frac{I_L}{I_{ges}} = \frac{I_C}{I_{ges}} = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 L \cdot G} = \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \frac{1}{G} = \frac{f_0}{B_0}$	$Q_L = \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \frac{1}{G + Y_L} = \frac{f_0}{B_L}$
Induktivität	$Q_0 = \frac{\omega L}{R}$ (frequenzabhängig!)	

mit 3dB-Bandbreite B_0 und Resonanzfrequenz $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$

Interzept-Punkte



Interzeptpunkte n-ter Ordnung (alle Angaben in dBm):

$$\text{bezogen auf den Eingang: } IPn_{ein} = \frac{P_{aus} - P_{IMn,aus}}{n-1} + P_{ein} = \frac{n \cdot P_{ein} - P_{IMn,aus} + G}{n-1}$$

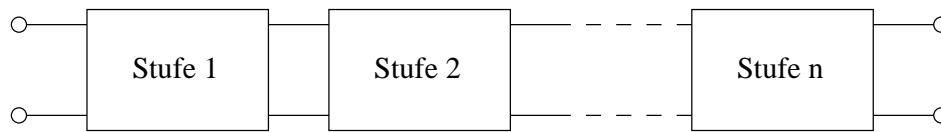
$$\text{bezogen auf den Ausgang: } IPn_{aus} = \frac{P_{aus} - P_{IMn,aus}}{n-1} + P_{aus} = \frac{n \cdot P_{aus} - P_{IMn,aus}}{n-1} = IPn_{ein} + G$$

Interzeptpunkt 3. Ordnung (alle Angaben in dBm):

$$IP3_{ein} = P_{ein} + \frac{IMD}{2} \quad IP3_{aus} = \max(P_{aus1}, P_{aus2}) + \frac{\min(P_{aus1}, P_{aus2}) - \max(P_{IM1}, P_{IM2})}{2}$$

für 2-Tore mit Verzerrungen der Ordnung $n \leq 3$: $IP3 = CP_{1dB} + 10,26dB$

Kaskade-Schaltungen



Angaben gelten bei Anpassung in allen Stufen und im ungünstigsten Fall (bei Kompressions- und Interzeptpunkten).

Im Index steht die Nummer der Stufe.

Sämtliche Größen sind im linearen Maßstab (nicht in dB).

Leistungsverstärkung:

$$G_{ges} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots \cdot G_n$$

Rauschzahl:

$$F_{ges} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{n-1}}$$

1dB-Kompressionspunkt:

$$CP_{aus} = CP_{ein} \cdot G \cdot 10^{-0,1} \quad \text{oder in dB:} \quad P_{1dB,aus} = P_{1dB,ein} + G - 1\text{dB}$$

Eingangs-Kompressionspunkt:

$$\frac{1}{CP_{ein,ges}} = \frac{1}{CP_{ein,1}} + \frac{G_1}{CP_{ein,2}} + \frac{G_1 \cdot G_2}{CP_{ein,3}} + \dots + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{n-1}}{CP_{ein,n}}$$

Ausgangs-Kompressionspunkt:

$$\frac{G_{ges}}{CP_{aus,ges}} = \frac{G_1}{CP_{aus,1}} + \frac{G_1 \cdot G_2}{CP_{aus,2}} + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3}{CP_{aus,3}} + \dots + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_n}{CP_{aus,n}}$$

Eingangs-Interzeptpunkt 3. Ordnung:

$$\frac{1}{IP3_{ein,ges}} = \frac{1}{IP3_{ein,1}} + \frac{G_1}{IP3_{ein,2}} + \frac{G_1 \cdot G_2}{IP3_{ein,3}} + \dots + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{n-1}}{IP3_{ein,n}}$$

Eingangs-Interzeptpunkt 2. Ordnung:

$$\sqrt{\frac{1}{IP2_{ein,ges}}} = \sqrt{\frac{1}{IP2_{ein,1}}} + \sqrt{\frac{G_1}{IP2_{ein,2}}} + \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2}{IP2_{ein,3}}} + \dots + \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{n-1}}{IP2_{ein,n}}}$$

Eingangs-Interzeptpunkt n-ter Ordnung:

$$\left(\frac{1}{IPn_{ein,ges}}\right)^{\frac{n-1}{2}} = \left(\frac{1}{IPn_{ein,1}}\right)^{\frac{n-1}{2}} + \left(\frac{G_1}{IPn_{ein,2}}\right)^{\frac{n-1}{2}} + \left(\frac{G_1 \cdot G_2}{IPn_{ein,3}}\right)^{\frac{n-1}{2}} + \dots \\ \dots + \left(\frac{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{n-1}}{IPn_{ein,n}}\right)^{\frac{n-1}{2}}$$

Magnetismus

	Eigenschaften	Kraft auf Materie	Stärke	Temperaturabhängigkeit
Dia-magnetismus	alle Stoffe sind diamagnetisch	aus Magnetfeld hinaus ($\mu_r < 1$)	sehr schwach $10^{-9} < 1 - \mu_r < 10^{-4}$	unabhängig
Para-magnetismus		in Magnetfeld hinein ($\mu_r > 1$)	sehr schwach $10^{-6} < \mu_r - 1 < 10^{-4}$	anti-proportional
Ferro-magnetismus	sehr seltene und nicht-lineare (Hysteresis) Eigenschaft, Weißsche Bezirke	in Magnetfeld hinein	sehr stark $\mu_r \gg 1$	anti-proportional, oberhalb Curie-Temperatur paramagnetisch
Antiferro-magnetismus	Stoffe mit gleich großen, antiparallelen magnetischen Momenten	in Magnetfeld hinein	schwach ($\mu_r \gtrsim 2$)	wie Ferro-magnetismus
Ferri-magnetismus	Stoffe mit ferro- und anti-ferromagnetischen Eigenschaften; Ferrite haben hohen spezifischen Widerstand	in Magnetfeld hinein	stark	wie Ferro-magnetismus

Elektromagnetische Feldtheorie

Die Maxwellschen Gleichungen stellen die grundlegenden Axiome des Elektromagnetismus dar. Sämtliche Phänomene der (klassischen) Elektrotechnik lassen sich aus ihnen herleiten. Nicht berücksichtigt sind Eigenschaften der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik, sowie Bereiche anderer Naturwissenschaften mit elektromagnetischen Auswirkungen (z.B. elektrochemische Energiewandler).

Maxwellsche Gleichungen	Integralform	Differentialform
Durchflutungsgesetz	$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{F} + \frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{D} \cdot d\vec{F}$	$\text{rot} \vec{H} = \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
Induktionsgesetz	$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{F}$	$\text{rot} \vec{E} = \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Gaußscher Satz	$\oiint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{F} = \iiint_V q_V \cdot dV$	$\text{div} \vec{D} = \nabla \cdot \vec{D} = q_V$
Quellenfreiheit	$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{F} = 0$	$\text{div} \vec{B} = \nabla \cdot \vec{B} = 0$

Bei der Integralform handelt es sich um die präzisere und vollständigere Darstellung. Trotzdem wird zur Vereinfachung der Rechnung oft auf die Differentialform zurückgegriffen. Stetigkeitsbedingungen (z.B. an den Grenzflächen verschiedener Materialien) müssen dann explizit berücksichtigt werden.

In den Maxwellschen Gleichungen tauchen für das elektrische und das magnetische Feld je zwei Vektor-Größen auf. Sie beschreiben jeweils die Ursache und die Wirkung. Verknüpft sind sie über die Stoff-Eigenschaften ϵ und μ der Materie, in der sich das Feld befindet:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \end{aligned}$$

In den meisten Materialien kann man die Durchlässigkeiten ϵ und μ als konstant betrachten, was die Gleichungen erheblich vereinfacht. Es existieren allerdings auch Stoffe, in denen die elektromagnetischen Eigenschaften nicht linear (ϵ und μ feldstärke-abhängig) und/oder nicht isotrop (ϵ und μ richtungs-abhängig und daher Tensoren) sind. Weiterhin besitzen einige Material-Klassen die Fähigkeit, aufgrund ihres molekularen Aufbaus selber ein Feld zu erzeugen (Elektrete bzw. Magnete).

	Elektrisches Feld	Magnetisches Feld
Wirkung	$\vec{E} = \frac{\vec{F}_q}{Q}$ bzw. $\text{div}\vec{E} = \frac{q_{V,frei} + q_{V,pol}}{\epsilon_0}$	\vec{B} mit $\vec{F}_q = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ bzw. $\text{rot}\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{J}_{frei} + \vec{J}_{mag})$
„(freie) Quellen“	\vec{D} mit $\text{div}\vec{D} = q_{V,frei}$	\vec{H} mit $\text{rot}\vec{H} = \vec{J}_{frei}$
Zusammenhang	$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} + \vec{P}_s = \epsilon \vec{E} + \underbrace{\vec{P}_s}_{\text{Elektret}}$ mit $\text{div}(\vec{P} + \vec{P}_s) = -q_{V,pol}$	$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M} + \vec{M}_s) = \mu \vec{H} + \underbrace{\mu_0 \vec{M}_s}_{\text{Magnet}}$ mit $\text{rot}(\vec{M} + \vec{M}_s) = \vec{J}_{mag}$
Feldeigenschaften	$\text{rot}\vec{E} = \vec{0}$ (konservativ)	$\text{div}\vec{B} = 0$ (solenoidal)
Potential	Φ mit $\vec{E} = -\text{grad}\Phi$ $\Rightarrow \Phi$ nimmt in \vec{E} -Richtung ab	\vec{A} mit $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ (mit $\text{div}\vec{A} = 0$) $\Rightarrow \vec{A}$ zeigt in „Richtung von \vec{J} “
Laplace-Gleichung	$\Delta\Phi = 0$	$\Delta\vec{A} = \vec{0}$
Poisson-Gleichung	$\Delta\Phi = -\frac{q_{V,frei} + q_{V,pol}}{\epsilon_0}$	$\Delta\vec{A} = -\mu_0 \cdot (\vec{J}_{frei} + \vec{J}_{mag})$
Feldberechnung	$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_{V_q} \frac{q_V(\vec{r}_q) \cdot \vec{r}}{r^3} dV$	$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{V_j} \frac{\vec{J}(\vec{r}_j) \times \vec{r}}{r^3} dV$
Stetigkeitsbedingungen	$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = q_{F,frei}$ $\vec{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = \vec{0}$	$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0$ $\vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_F$
Speicherfähigkeit	Kapazität $C = \frac{Q}{U}$	Induktivität $L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\vec{B} \cdot \vec{F}}{I}$
Energiedichte	$w_e = \frac{1}{2} \cdot \vec{E} \cdot \vec{D}$	$w_m = \frac{1}{2} \cdot \vec{H} \cdot \vec{B}$
Energie	$W_e = \frac{1}{2} \cdot \iiint \vec{E} \cdot \vec{D} \cdot dV = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$	$W_m = \frac{1}{2} \cdot \iiint \vec{H} \cdot \vec{B} \cdot dV = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$

Obige Tabelle enthält gängige Nomenklatur. Abweichungen sind jedoch trotzdem des öfteren zu finden. Die Definition des magnetischen Vektorpotentials und der Magnetisierung ist ebenfalls nicht einheitlich.

E	- elektrische Feldstärke	H	- magnetische Feldstärke
D	- elektrische Flußdichte	B	- magnetische Flußdichte
Φ	- elektrisches Potential	Ψ	- magnetische Fluß
Q	- elektrische Ladung	μ	- Permeabilität
q_V	- elektrische (Volumen-) Ladungsdichte	L	- Induktivität
q_F	- elektrische Flächen-Ladungsdichte	M	- Magnetisierung
C	- Kapazität	J	- elektrische Stromdichte
ϵ	- Permittivität	I	- elektrischer Strom
W	- Energie, Arbeit	V	- Volumen
w	- (räumliche) Energiedichte	A	- magnetisches Vektorpotential
r	- Ortszeiger (Raumkoordinate)	n	- Flächennormale
U	- elektr. Potentialdifferenz (Spannung)	F	- Flächeninhalt
F_q	- Kraft auf Ladung q	v	- Geschwindigkeit
P	- elektrische Polarisierung		

Wärmetransport

$$\text{thermischer Widerstand: } R_{th} = \frac{T_2 - T_1}{\Theta} \quad \text{elektrisches Analogon: } R = \frac{U_2 - U_1}{I}$$

mit Wärmestrom Θ (= transportierte Leistung in Joule/sec=Watt).

Näherungsformel für Wärmeabgabe in Alltagsumgebung:

$$R_{th}^{\text{Konduktion}} \approx 0, \quad R_{th}^{\text{Emission}} \approx R_{th}^{\text{Konvektion}}, \quad R_{th}^{\text{gesamt}} \approx \frac{1}{10 \cdot A}$$

Bedingungen:

ebene Fläche A
Emissionskoeffizient hoch
freie Konvektion und freie Emission

1. Wärmeleitung (Konduktion) → hauptsächlich in Festkörpern (mittels Phononen und freie Elektronen)

$$\text{thermischer Widerstand} \quad R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$$

mit Wärmeleitfähigkeit λ :

Diamant: 2300 W/m/K

Kupfer: 401 W/m/K

Aluminium: 237 W/m/K

Al₂O₃: 28 W/m/K

Quarzglas: 0.81 W/m/K

2. Wärmestrahlung (Emission) → hauptsächlich durch Luft oder Vakuum

$$\text{Plancksche Strahlungsformel (für ideale schwarze Strahler):} \quad W_\lambda = \int \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda$$

$$\text{Wiensches Verschiebungsgesetz:} \quad \lambda_{max} = \frac{2897,8 \mu m}{T} \approx 10 \mu m \text{ bei } 300K$$

$$\text{Stephan-Boltzmann Strahlungsgesetz:} \quad \Theta = 5,669 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T_S^4 - T_A^4)$$

$$\text{Kirchhoffsches Gesetz:} \quad \epsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \quad \text{wenn } T = \text{const}$$

mit Emissionskoeffizient ϵ und Absorptionsgrad α :

ca 5% für polierte Metalle
ca 95% für fast alle anderen Stoffe mit Dicke $> 10 \mu m$

3. Wärmemitführung (Konvektion) → durch Flüssigkeiten und Gase

$$\text{thermischer Widerstand} \quad R_{th} = \frac{1}{\alpha \cdot A}$$

mit Wärmeübergangskoeffizient α :

$$5 \dots 50 \frac{W}{m^2 K} \quad \text{Luft ohne...starke Strömung}$$

$$500 \dots 5000 \frac{W}{m^2 K} \quad \text{Wasser ohne...starke Strömung}$$