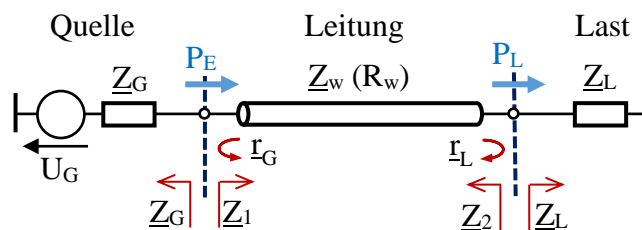


Formelsammlung HF-Leitungen

1) Schema



2) Wellenimpedanz

hinlaufende Welle \underline{U}_h , \underline{I}_h , reflektierte Welle \underline{U}_r , \underline{I}_r : $\underline{Z}_w = \frac{\underline{U}_h}{\underline{I}_h} = \frac{\underline{U}_r}{\underline{I}_r}$

3) Resultierende Spannung/ Strom:

$$\underline{U} = \underline{U}_h + \underline{U}_r \quad ; \quad \underline{I} = \underline{I}_h - \underline{I}_r \quad ;$$

$$\underline{U}_h = \frac{1}{2} \cdot (\underline{U} + \underline{I} \cdot \underline{Z}_w) \quad ; \quad \underline{U}_r = \frac{1}{2} \cdot (\underline{U} - \underline{I} \cdot \underline{Z}_w)$$

4) Reflexionsfaktoren an den Leitungsenden (\underline{r}_L bzw. \underline{r}_G):

$$\underline{r}_L = \frac{\underline{Z}_L - \underline{Z}_w}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_w} = \frac{\frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_w} - 1}{\frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_w} + 1} \rightarrow \underline{Z}_L = \underline{Z}_w \frac{1 + \underline{r}_L}{1 - \underline{r}_L}$$

5) SWR2 am Ende der Leitung:

$$SWR2 = \frac{1 + |\underline{r}_L|}{1 - |\underline{r}_L|} \rightarrow |\underline{r}_L| = \frac{SWR2 - 1}{SWR2 + 1}$$

6) SWR1 und \underline{Z}_1 am Anfang der Leitung:

α [1/m]: Dämpfungskonstante; β [rad/m]: Phasenkonstante; L [m]: Länge der Leitung

\underline{r}_1 : \underline{r}_L an den Leitungsanfang transformiert

$$|\underline{r}_1| = |\underline{r}_L| \cdot e^{-2\alpha L} \quad ; \quad \underline{r}_1 = \underline{r}_L \cdot e^{-j2\beta L} \cdot e^{-2\alpha L}$$

$$SWR1 = \frac{1 + |\underline{r}_1|}{1 - |\underline{r}_1|} \quad ; \quad \underline{Z}_1 = \underline{Z}_w \cdot \frac{1 + \underline{r}_1}{1 - \underline{r}_1}$$

\underline{r}_1 ist identisch mit S_{11} aus den VNA-Messungen. $SWR1$ stets $< SWR2$.

7) Dämpfung der Leitung

7.1) ohne Reflexion ($\underline{r}_L=0$) \rightarrow Matched Line Loss

Datenblatt: Angabe meist in a [dB/100m] $\rightarrow \alpha = a/(100 \cdot 8.686)$

oder a [dB/100 feet] $\rightarrow \alpha = a/(30.5 \cdot 8.686)$

$$A_{ML} = \frac{P_E}{P_L} = e^{2\alpha L} \geq 1 \quad ; \quad \text{in dB: } A_{ML}[\text{dB}] = 10 \cdot \log\left(\frac{P_E}{P_L}\right) = 8.686 \cdot \alpha \cdot L = a[\text{dB/m}] \cdot L$$

7.2) Dämpfung mit Reflexion, exakte Formel (mit $\underline{Z}_w = R_w + jX_w$):

λ [m]: Wellenlänge auf der Leitung; $\underline{r}_L = |\underline{r}_L| \angle \theta$

$$A = \frac{P_E}{P_L} = \frac{e^{2\alpha L} \cdot (1 - |\underline{r}_L|^2 \cdot e^{-4\alpha L}) + K \cdot \sin\left(2\frac{2\pi}{\lambda}L - \theta\right)}{(1 - |\underline{r}_L|^2) - K \cdot \sin(\theta)} \quad ; \quad \text{mit } K = 2 \cdot \frac{X_w}{R_w} \cdot |\underline{r}_L|$$

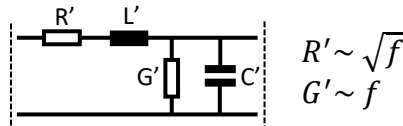
Vereinfachte Formel (K vernachlässigbar, Gültigkeit s. unten):

$$\text{Gilt annähernd im höheren HF- bis UHF-Bereich: } A_o = \frac{P_E}{P_L} = e^{2\alpha L} \cdot \frac{1 - |\underline{r}_L|^2 \cdot e^{-4\alpha L}}{(1 - |\underline{r}_L|^2)}$$

Im tieferen KW-Bereich gültig ($< \pm 10\%$ gegenüber A), falls:

$$SWR1 \cdot \frac{|X_w|}{R_w} < 0.1 \cdot \left[1 - \left(\frac{L}{\lambda}\right)\right]; \quad \text{mit: } \frac{|X_w|}{R_w} \approx 0.055 \cdot \frac{a[\text{dB}/100\text{m}] \cdot \text{VF}}{f_{\text{MHz}}}$$

8) Leitungsparameter:



8.1) Wellenimpedanz: $Z_w = R_w + jX_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$

Verlustlos ($R' = G' = 0$): $Z_w \rightarrow R_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$

Mit Verlusten: $Z_w \cong \sqrt{\frac{L'}{C'}} - j \frac{1}{2} \left[\frac{R'}{\omega \sqrt{L'C'}} - \frac{G' \cdot R_w^2}{\omega \sqrt{L'C'}} \right]$; auch: $X_w \cong -R_w \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \left[\frac{R'}{R_w} - G' \cdot R_w \right]$

KW und VHF: G' meist vernachlässigbar $\rightarrow X_w \approx -R_w \frac{\alpha}{\beta}$; $X_w \sim 1/\sqrt{f}$

8.2) Ausbreitungsgeschwindigkeit v und Wellenlänge λ :

Lichtgeschwindigkeit $c \cong 300 \frac{m}{\mu s}$; Wellenlänge im Vakuum: $\lambda_o [m] \cong \frac{300}{f_{MHz}}$

Auf der Leitung:

$v [m/s] \cong \frac{1}{\sqrt{L'C'}} < c$

Velocity Factor (Verkürzungsfaktor): $VF = \frac{v}{c}$

$\lambda [m] = \frac{v}{f} = \frac{c \cdot VF}{f} = VF \cdot \lambda_o$

Koaxialkabel: $VF \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \rightarrow v [m/s] \cong \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$; (PE Vollisolation: $VF \approx 0.66$)

8.3) Phasenkonstante β [rad/m]:

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi \frac{f}{v} = \frac{2\pi}{300} \cdot \frac{f_{MHz}}{VF}$

8.4) Dämpfungskonstante α [1/m]:

$\alpha \cong \frac{1}{2} \left(\frac{R'}{R_w} + G' \cdot R_w \right)$; $a[\text{dB/m}] = \alpha \cdot 8.686$

umrechnen auf andere Frequenz: $a_{f2} \cong a_{f1} \cdot \sqrt{\frac{f_2}{f_1}}$

	$R_w [\Omega]$	$a[\text{dB}/100\text{m}]$ @ 10 MHz	VF
RG-58	50	4.8	0.66
RG-213	50	1.8	0.66
Ecoflex 10 (Foam)	50	1.2	0.85
Ladder-/ Window-Line CQ553 2)	390 (450)	0.75	0.89

2) trockener Zustand

9) Skineffekt

Eindringtiefe: $\delta [\mu m] = \frac{160}{\sqrt{\sigma_{rel} \cdot \mu_r \cdot f_{MHz}}}$

Runder Leiter $\varnothing D, \delta < D/10$: $\frac{R_{HF}}{R_{DC}} \cong \frac{D}{4 \cdot \delta}$

	σ_{rel}	μ_r	$\delta [\mu m]$ @ 1/ 10/ 100/ 1000 MHz
Ag	6.1	1	64/ 20/ 6.4/ 2.0
Cu	5.8	1	66 / 21 / 6.6/ 2.1
Al	3.7	1	83 / 26 / 8.3/ 2.6
Sn	0.9	1	171/ 54/ 17/ 5.4
Stahl	≈ 0.4	≈ 100	26 / 8.3 / 2.6/ 0.8