



Die lange Leitung – kurz und bündig

Bruno Stuber HB9BAP

Vier Fragen:

- 1) Wieso nehmen die Verluste (trotz Tuner) signifikant zu, wenn wir ein grösseres SWR auf der Leitung haben?
- 2) Wieso sind «Hühnerleiter» viel verlustärmer als Koaxialkabel?
- 3) Können wir bei einem Dipol Leitungsverluste vermeiden?
- 4) Welche Drähte eignen sich für Antennen und Zweidraht-Leitungen?

(Version: 15. Sep. 2023, 11:10)

18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

1

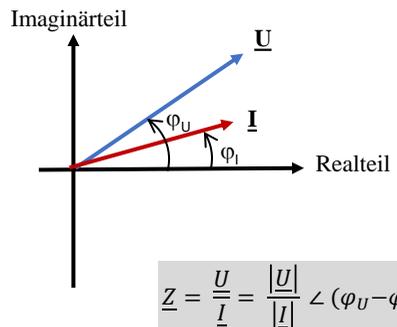
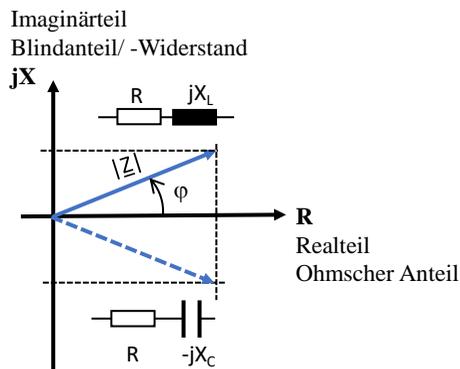
1



Grundlagen Elektrotechnik: Komplexe Notation

Impedanz \underline{Z} : $\underline{Z} = R + jX$

Auch Spannung und Strom als (komplexe) «Zeiger»:



18.09.2023

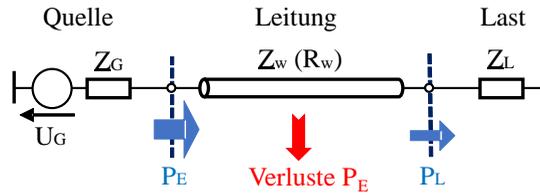
HB9BAP USKA Solothurn

2

2



Die Leitungsdämpfung



Dämpfungsfaktor der Leitung: $A = \frac{P_L}{P_E} \leq 1$

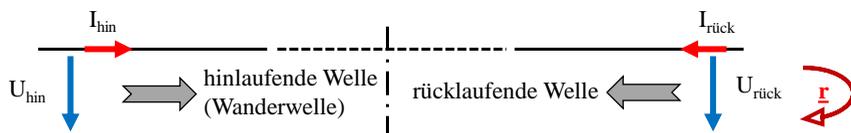
In Dezibel: $A_{dB} = -10 \cdot \log\left(\frac{P_L}{P_E}\right)$

A [dB]	P _L / P _E [%]
0.45	90
1	80
2	63
3	50

3



Leitungs-Grundlagen: Hin- und rücklaufende Wellen



Wellenimpedanz: $Z_w = \frac{U_h}{I_h}$ Z_w ist im Allgemeinen ungefähr ohmsch ($\rightarrow R_w$), d.h. Strom und Spannung der Wanderwellen sind \sim in Phase. $Z_w = \frac{U_r}{I_r}$

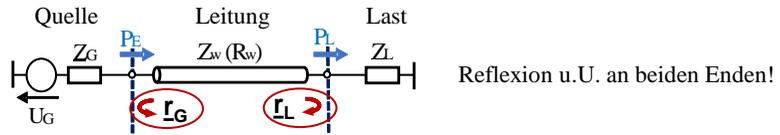
Reflexionsfaktor: $r = \frac{U_r}{U_h} = \frac{I_r}{I_h}$ Network-Analyzer: $S_{11} = r$

Resultierende Spannung: $U = U_h + U_r$
 Strom: $I = I_h - I_r$ ➔ Stehwellen \rightarrow «SWR» (standing wave ratio)

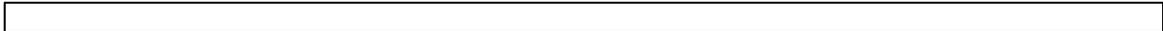
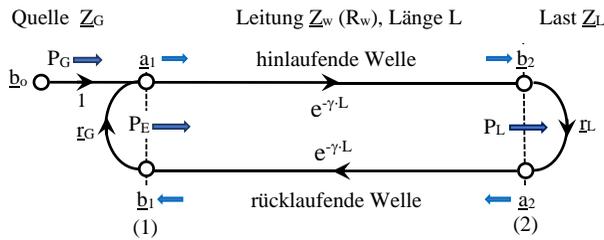
4



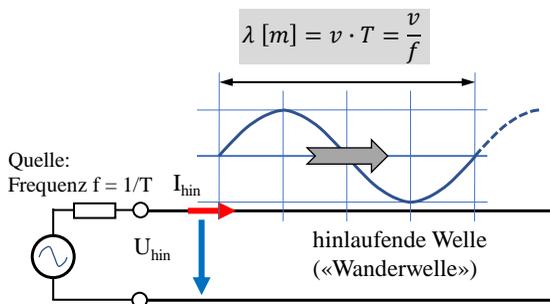
Leitungs-Grundlagen: Reflexionen an den Leitungsenden



Signalfluss-Diagramm der hin- und rücklaufenden Wellen:



Leitungs-Grundlagen: Die Wellenlänge auf der Leitung



$$v = c \cdot VF$$

$$\lambda [m] = \frac{c}{f} \cdot VF = \lambda_0 \cdot VF = \frac{300 \text{ m}/1\mu\text{s}}{f_{\text{MHz}}} \cdot VF$$

c: Lichtgeschwindigkeit $\approx 300 \text{ m}/\mu\text{s}$
 λ_0 : Wellenlänge im Vakuum

VF: velocity factor (Verkürzungsfaktor)

- Koaxialkabel mit Vollisolation PE (Polyäthylen) wie RG-213, RG-58: ≈ 0.66
- Geschäumte Kabel: ≈ 0.85
- Hühnerleiter (Open Wire): $\approx 0.89 \dots 0.98$

Koax bei ausgeprägtem Skinneffekt:

$$VF \cong \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{PE: } \epsilon_r \approx 2.25 \rightarrow VF \approx 0.66$$

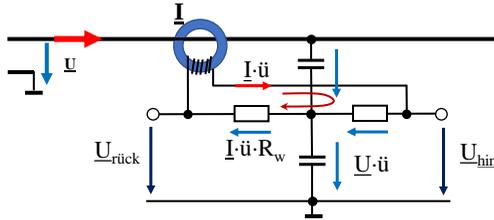
Leitungs-Grundlagen: Messung der hin- und rücklaufenden Wellen

Resultierende Spannung: $\underline{U} = \underline{U}_h + \underline{U}_r$
 Strom: $\underline{I} = \underline{I}_h - \underline{I}_r$ → umgekehrt:

$$\underline{U}_h = \frac{1}{2}(\underline{U} + Z_w \cdot \underline{I})$$

$$\underline{U}_r = \frac{1}{2}(\underline{U} - Z_w \cdot \underline{I})$$

«Richtkoppler»: Messung der Vorwärts- und Rückwärts-Wellenstärke → Reflexionsfaktor → SWR



Reflexionsfaktor: $\underline{r} = \frac{U_{rück}}{U_{hin}}$

18.09.2023

7

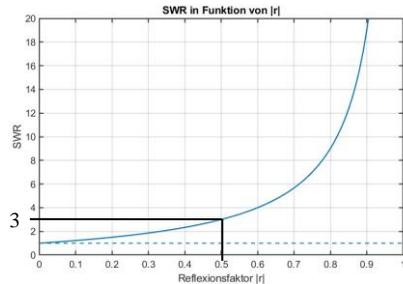
Das gute alte SWR-Meter misst eigentlich den Reflexionsfaktor!



$$SWR = \frac{|U_{hin}| + |U_{rück}|}{|U_{hin}| - |U_{rück}|} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \geq 1$$

Reflexionsfaktor: $|r| = \frac{SWR - 1}{SWR + 1}$

Skale (linear) zeigt eigentlich |r|!



18.09.2023

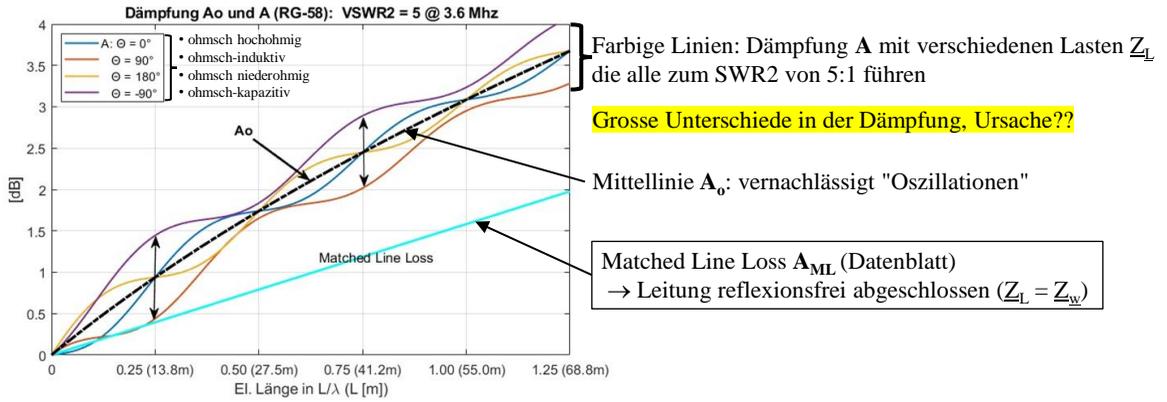
HB9BAP USKA Solothurn

8

8

Leitungsdämpfung in Funktion der Länge mit verschiedenen Leitungsabschlüssen (Last Z_L)

Bsp.: RG-58 Koaxialkabel bei 3,6 MHz und $VSWR_2 = 5$; ($|r| = 0,66$):



9

HF-Leitungen

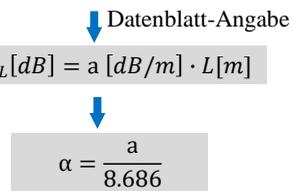
Matched-Line-Loss A_{ML} :

Reflexionsfreier Abschluss: $Z_L = Z_w \rightarrow r = 0$; $SWR = 1:1$

Dämpfung: $A_{ML} = \frac{P_E}{P_L} = e^{2\alpha L}$

In dB: $A_{ML}[dB] = a [dB/m] \cdot L[m]$

α [1/m]: Dämpfungskonstante der Leitung
L [m] : Leitungslänge

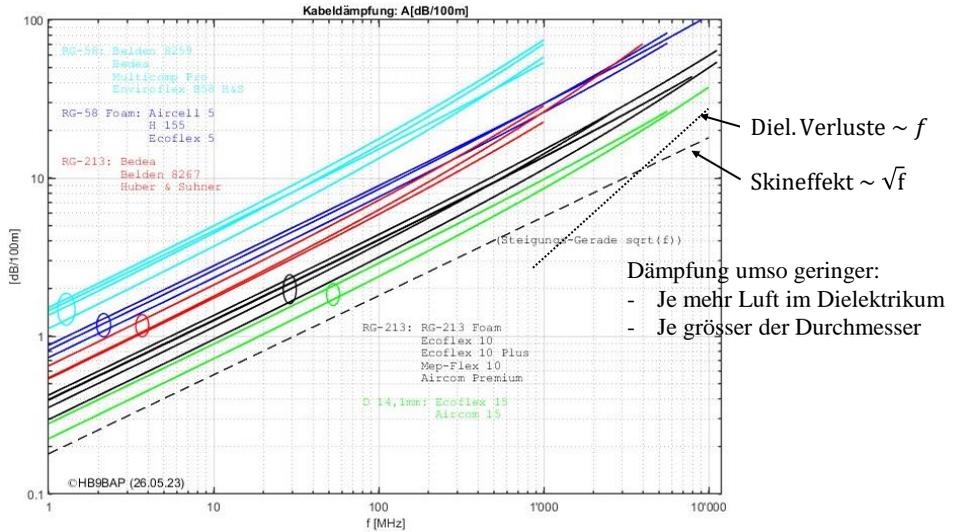


Die ML-Loss können nicht unterschritten werden.

Datenblatt-Angaben meist in:
a [dB/100 m] oder
a [dB/100 feet] = a [dB/30.5 m]

10

Matched-Line-Loss von Koaxialkabeln:



18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

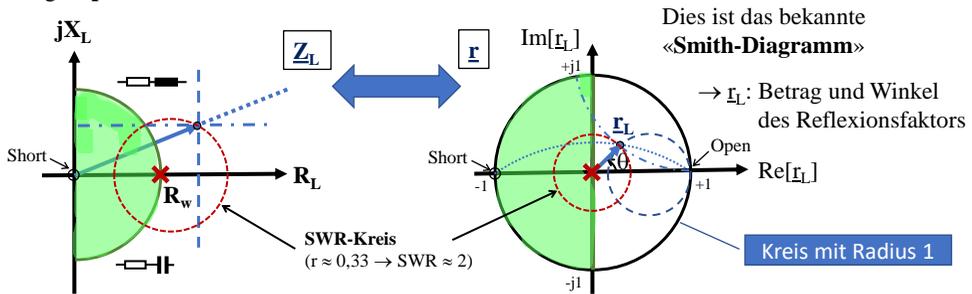
11

11

Der Reflexionsfaktor Γ an den Leitungsenden ($Z_w \approx R_w$)

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - R_w}{Z_L + R_w} = \frac{U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}}}; \quad \Gamma_G = \frac{Z_G - R_w}{Z_G + R_w}; \quad |\Gamma|: 0 \dots 1;$$

Abbildung Impedanz-Ebene \leftrightarrow Reflexions-Ebene:



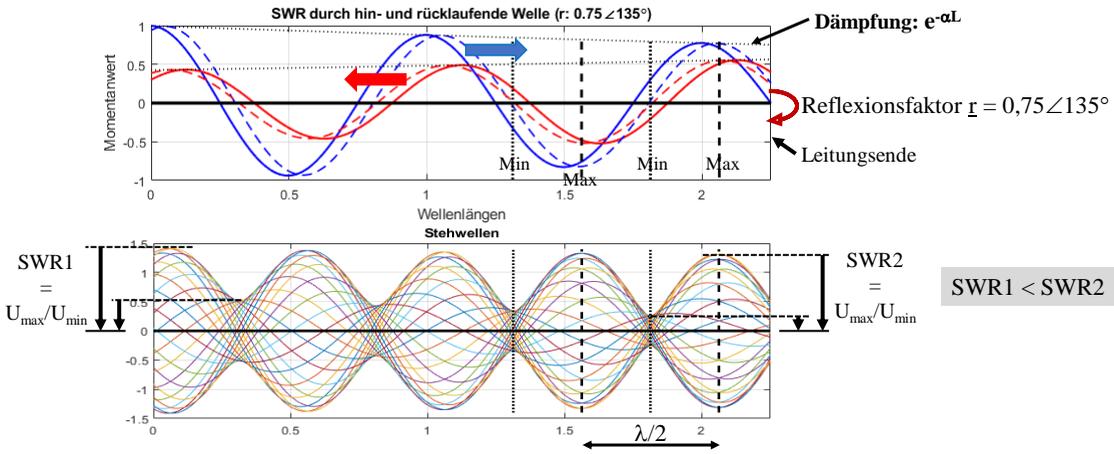
18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

12

12

Stehwellen auf der Leitung durch Reflexionen



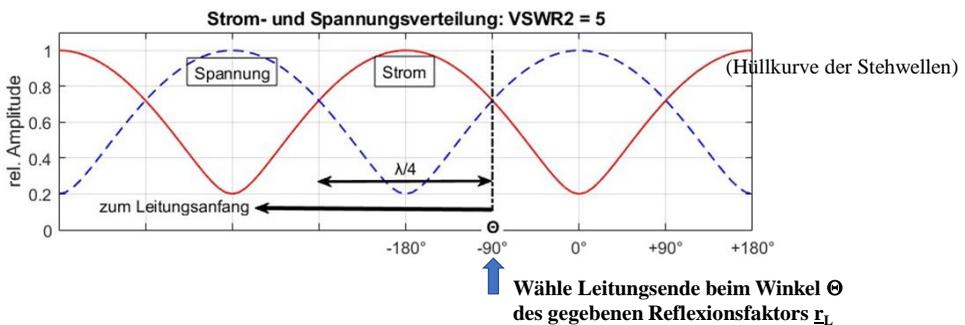
18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

13

13

Spannungs-/ Strom-Bauch und -Knoten auf der Leitung:



Je nach Länge und Abschluss umfasst die Leitung unterschiedlich viele Strom- und Spannungs-Bäuche oder -Knoten → Dies beeinflusst die Verluste!

18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

14

14

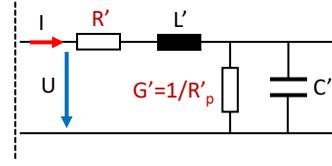
HF-Leitungen

Verluste durch Spannungs-/ Strom-Bauch und -Knoten auf der Leitung:

Die Verluste sind mit R' stromabhängig und mit G' spannungsabhängig:

Leiterverluste : $P_{v R'} = I^2 \cdot R'$
 Dielektrische Verluste: $P_{v G'} = U^2 \cdot G'$ } $P'_v = P_{v R'} + P_{v G'}$

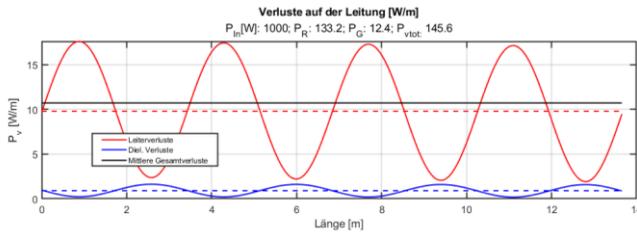
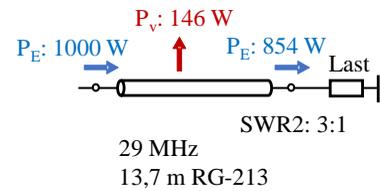
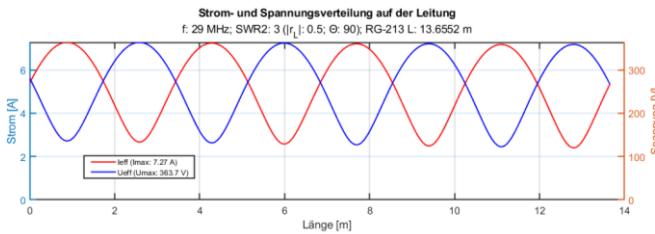
Ersatz-Modell eines kurzen Stücks Leitung:



→ Auf den tieferen Frequenzen dominieren die stromabhängigen Leiterverluste $P_{v R'}$ deutlich und die Verluste werden primär durch die Strom-Bäuche bestimmt!

HF-Leitungen

Beispiel Leiterverluste und dielektrische Verluste:

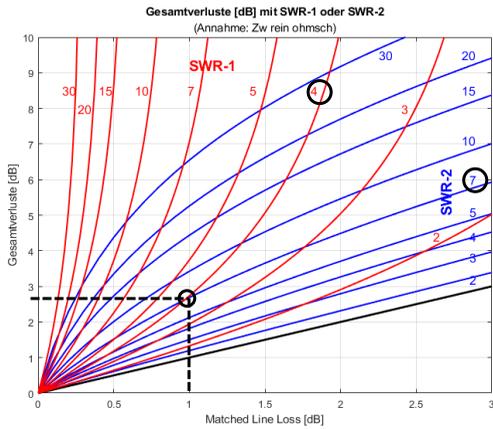


HF-Leitungen

Vereinfachte Formel für die Dämpfung (Mittellinie) A_0

→ wir rechnen nur mit R_w

→ Formel und Diagramme sind vielfach publiziert, sind aber nicht exakt! Rechnet nur die Mittellinie A_0 !



$$A_0 = \frac{P_E}{P_L} = e^{2\alpha L} \cdot \frac{1 - |r_L|^2 \cdot e^{-4\alpha L}}{(1 - |r_L|^2)}$$

ML-Loss Zusatz-Faktor ≥ 1 ,
nur abhängig von $|r_L|$
bzw. SWR2

Gilt annähernd, wenn:

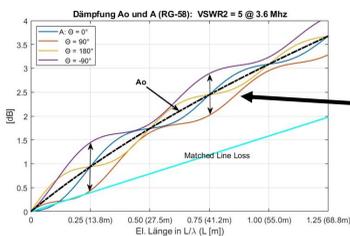
$$SWR_1 \cdot \frac{|X_w|}{R} \lesssim 0.1 \cdot [1 - L/\lambda] \quad (\text{Abweichung } < \pm 10\% \text{ bzw. } \pm 0.45 \text{ dB gegenüber } A)$$

☞ A_0 genügend genau auf den höheren KW-Bändern und VHF-/ UHF-Bereich!

HF-Leitungen

Exakte Formel für die Dämpfung A :

→ wir rechnen mit $Z_w = R_w + j X_w$; [siehe P1, P2, P3]



$$A = \frac{P_E}{P_L} = \frac{e^{2\alpha L} \cdot (1 - |r_L|^2 \cdot e^{-4\alpha L})}{(1 - |r_L|^2)} + \frac{K \cdot \sin(4\pi \frac{L}{\lambda} - \theta)}{K \cdot \sin(\theta)}$$

verantwortlich für "Oszillationen"
Winkel des Reflexionsfaktors

Mittellinie A_0
Zusatzterme in Zähler und Nenner mit:

K und damit die Oszillationen werden umso grösser, je grösser:

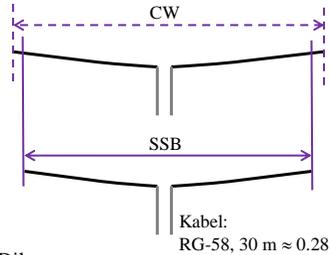
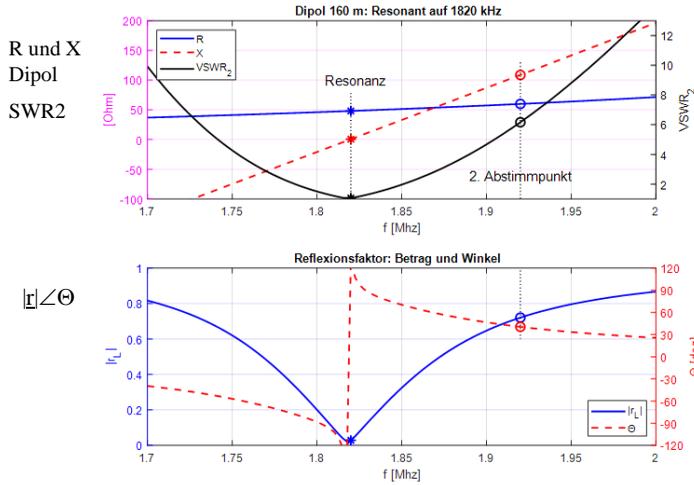
- der Reflexionsfaktor $|r|$ bzw. das SWR
- der Blindwiderstand X_w der Wellenimpedanz

$$K = 2 \cdot \left(\frac{X_w}{R_w} \right) \cdot |r_L|$$

- die grösste Zunahme gegenüber A_0 ergibt sich für: $L = \lambda/4, 3 \cdot \lambda/4, \dots$ und $\theta = -90^\circ$
- die grösste Abnahme gegenüber A_0 ergibt sich für: $L = \lambda/4, 3 \cdot \lambda/4, \dots$ und $\theta = +90^\circ$

HF-Leitungen

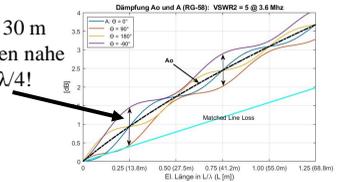
Verluste vermindern! Geht das? Beispiel 160m Dipol



Dilemma:

- (1) Resonanz CW \rightarrow Tunen auf SSB
- (2) Resonanz SSB \rightarrow Tunen auf CW

Die 30 m liegen nahe bei $\lambda/4$!



18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

19

19

HF-Leitungen

Vergleich der Dipol-Abstimmung auf 160m:

	Tuner	VSWR1	P_E [W]	P_D [W]	P_L [W]	VSWR2 (r_L)	Att A	
(1)	Res 1820 kHz	nein	1.1	≈ 100	13	87	1.1 (0.04 \angle 141°)	0.6 dB
	1920 kHz	ja	4.3	100	26	74	6.2 (0.72 \angle 41°)	1.3 dB
(2)	1820 kHz	ja	4.4	100	41	59	6.2 (0.72 \angle -48°)	2.3 dB
	Res 1920 kHz	nein	1.0	≈ 100	13	87	1.1 (0.03 \angle 96°)	0.6 dB

Fazit: Variante (1) deutlich besser! \rightarrow Last induktiv $\rightarrow \Theta$ in Richtung 90°

18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

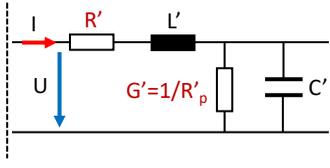
20

20

HF-Leitungen

Die Leitungskonstanten:

Modell eines «kurzen» Stücks Leitung:



L' [H/m]: Induktivitätsbelag } Speicher, Transport
 C' [F/m]: Kapazitätsbelag }
 R' [Ω /m]: Widerstandsbelag } Verluste $\left\{ \begin{array}{l} P_{R'} = I^2 \cdot R' \\ P_{R_p} = U^2 / R_p' \end{array} \right.$
 G' [S/m]: Ableitbelag

Modell legt alle Parameter der Leitung fest:

Die Wellenimpedanz: $Z_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$
 Die Ausbreitungskonstante γ : $\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$
 α : Dämpfungskonstante
 β : Phasenkonstante
 v : Ausbreitungsgeschwindigkeit $\beta = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$
 λ : Wellenlänge auf der Leitung

HF-Leitungen

Die Leitungskonstanten:

	Ohne Verluste:	Mit Verlusten:
Wellenimpedanz:	$Z_w \rightarrow R_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$	$Z_w \approx R_w - j \cdot R_w \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{R'}{\omega L'} - \frac{1/\omega C'}{R_p} \right)$ Blindwiderstand: Differenz
Dämpfungskonstante α :	$\alpha = 0$	$\alpha \approx \frac{1}{2} \left(\frac{R'}{R_w} + \frac{R_w}{R_p} \right)$ Verluste: Summe
Phasenkonstante β :	$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}; \lambda = \frac{v}{f}; v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}$	

HF-Leitungen

Beziehung zwischen Dämpfung und Blindanteil X_w der Wellenimpedanz:

Leitung mit Verlusten: $\alpha \approx \frac{1}{2} \left(\frac{R'}{R_w} + \frac{R_w}{R_p'} \right)$ $X_w \approx -j \frac{R_w}{2} \cdot \left(\frac{R'}{\omega L'} - \frac{1}{\omega C_p'} \right)$

Beide Dämpfungen gleich gross, falls: $R' \cdot R_p' = R_w^2$ \rightarrow In diesem Fall ist $X_w = 0$

Fazit:
 Sind die Leiterverluste und die dielektrischen Verluste in einem Leitungs-Element gleich gross, wird die Wellenimpedanz **rein reell**. (So auch im verlustlosen Fall).
 → Die Verluste in der Leitung sind dann nur von $|\gamma_L|$ bzw. vom SWR abhängig
 → es gilt die vereinfachte Formel A0
Aber: Die **Leiterverluste dominieren bis in den GHz-Bereich**, der Blindwiderstand X_w ist also in der Regel **immer negativ bzw. kapazitiv**.

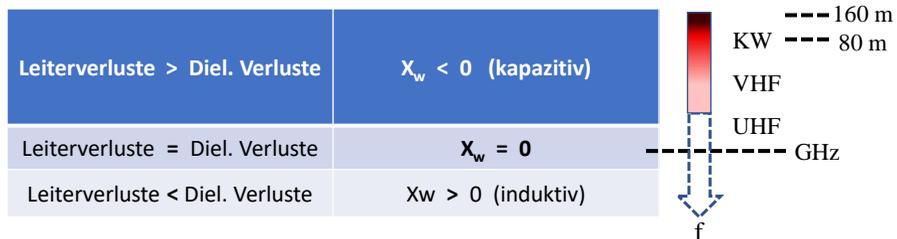
HF-Leitungen

Verluste und Blindanteil X_w in Funktion der Frequenz:

R' : Leiterverluste: Wegen Skineneffekt (primär Innenleiter) $R' \sim \sqrt{f} \rightarrow X_w \sim \left(\frac{-R'}{\omega L'} \right) \sim \frac{1}{\sqrt{f}}$

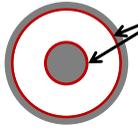
G' : Dielektrische Verluste (Umpolarisierung) $G' \sim f \rightarrow X_w \sim \left(\frac{G'}{\omega C'} \right) \sim \text{konstant}$

Leiterverluste dominieren bis in den GHz-Bereich



HF-Leitungen

Koaxialkabel:



Skineffekt: Strom fließt auf der Aussen- bzw. Innenseite
→ Strom-Querschnitt innen viel kleiner



Technische Daten

Innenleiter	Hybrid CCA - kupferkaschierte Aluminium-Litze verseilt
Innenleiter Ø	2,85 mm (7 x 1,0 mm, 10 AWG)
Dielektrikum	geschäumtes Zell-Polyethylen (PE) mit Haut
Dielektrikum Ø	7,2 mm
Außenleiter 1	Cu-Folie überlappend
Bedeckungsgrad	100%
Außenleiter 2	Cu-Geflecht



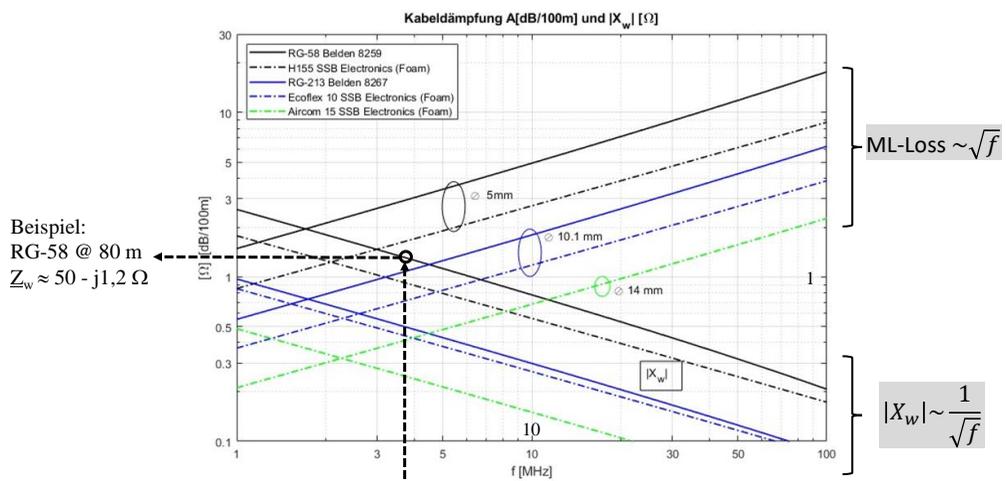
Cu-Litze
Al-Folie
Cu-Sn Schirm
Schirm

(Bilder: SSB-Electronics Datenblatt)

	Ecoflex 10 Plus	RG 213/U	RG 58/U
Kapazität	78 pF/m	101 pF/m	102 pF/m
Verkürzungsfaktor	0,85	0,66	0,66
Dämpfung (dB/100m)			
10 MHz	1,14	2,00	5,00
100 MHz	3,80	7,00	17,00
500 MHz	9,12	17,00	39,00
1000 MHz	13,49	22,50	54,60
3000 MHz	25,37	58,50	118,00

HF-Leitungen

Kabeldämpfung (ML) und Blindwiderstand $|X_w|$ für verschiedene Kabel:



HF-Leitungen

Zweidrahtleitungen: Was macht sie besser?



(Bild: www.sotabeams.co.uk)



↙ ↘
Skinneffekt ähnlich wie bei
Koaxialkabel Innenleiter

Hühnerleiter/ Open Wire

Zweidrahtleitung: $D \approx 12 \text{ cm}$
 R_w typ. 600Ω

Ladder Line/ Window Line

z.B. Wireman-551/ 553; $D \approx 20,5 \text{ mm}$
 R_w : $(450 \Omega) \rightarrow$ eher 392Ω

- Vorteile:
- Geringere Ströme gegenüber Koaxkabel bei gleicher übertragener Leistung \rightarrow geringere Verluste in den Leiter-Widerständen, geringere Dämpfung
- Nachteile:
- Keine Schirmung (Abstand zur Umgebung halten)
 - Vorallem bei Window-Lines: Erhöhte Verluste bei Regen, Reif, Vereisung \rightarrow die ML-Verluste (in dB) können sich verdoppeln [FA 2]
- +/- :
- El. Symmetrie kann Vorteile haben, erfordert aber meist einen Balun

18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

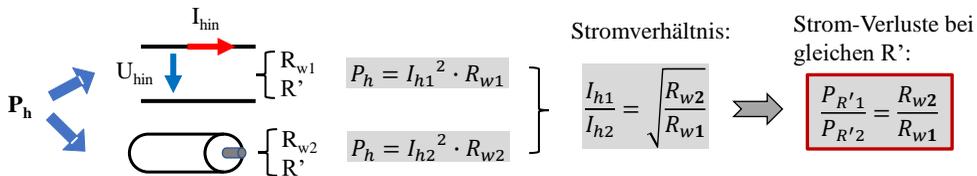
27

27

HF-Leitungen

Vergleich der Leitungs-Verluste:

\rightarrow Dieselbe Leistung auf reflexionsfreien Leitungen, identische Leiterwiderstände angenommen



Fazit:

Bei gleicher übertragener Leistung führt eine Leitung mit Wellenwiderstand 500Ω gegenüber der Leitung mit 50Ω rund 3,2-fach weniger Strom und die Verluste betragen nur etwa 1/10.

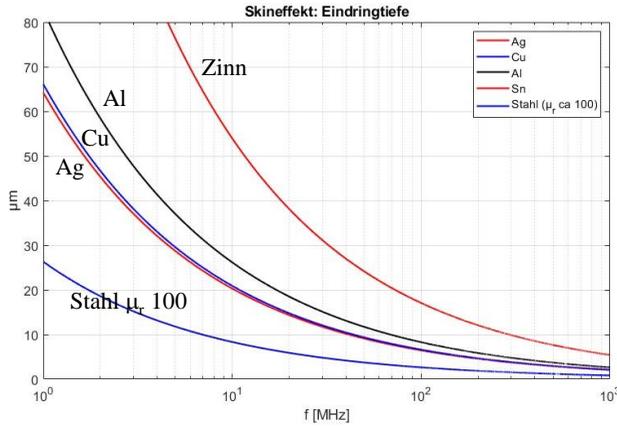
18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

28

28

Leiter: Die Eindringtiefe (Skinneffekt) in Funktion der Frequenz:



Leiter-Beschichtungen

Silber: 0,4 ... 10 µm

Zinn: ca. 1,5 µm

Rel. Leitfähigkeit:

Silber	6,1
Kupfer	5,8
Aluminium	3,7
Zinn	0,9
Stahl	0,7 µ _r ≈ 10 ... 100

18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

29

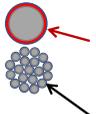
29

HF-Leitungen

Leitermaterial für Leitungen und Antennendrähte

Leitermaterial: (z.B. [L1]: www.thewireman.com oder [L2]: www.dx-wire.de)

- **Kupferleiter** : Elektro-Kupferdrähte sind weichgeglüht → zu weich für Antennen
- **Hard Drawn Copper** : Antennen und Zweidraht-Leitungen
- **Kupferbeschichtete Stahlleiter (CCS: Copper Clad Steel 30% oder 40%)**



Hochfester Stahlkern → 30 (40) % Leitfähigkeit eines reinen Kupferleiters

Kupfer-Ummantelung → Antennen u. Zweidraht-Leitungen

≈ 60 (90) µm @ → Reissfestigkeit ≈ 70 kg

Ø 1 mm (18 AWG)

CCS-Litze: HF-Widerstand etwas erhöht, da geringere Kupfereauflage
- Kupferbeschichteter Alu-Leiter : Innenleiter Koaxialkabel
- "Armeedraht" : Litze 7-fach: 3xStahl Ø 0.28 (Kern) → Antennen u. Zweidrahtleitungen
 umwickelt mit 4xCu Ø 0.28
 $D_{aq} \approx 0.75$ mm; DC: → 71 Ω/km

18.09.2023

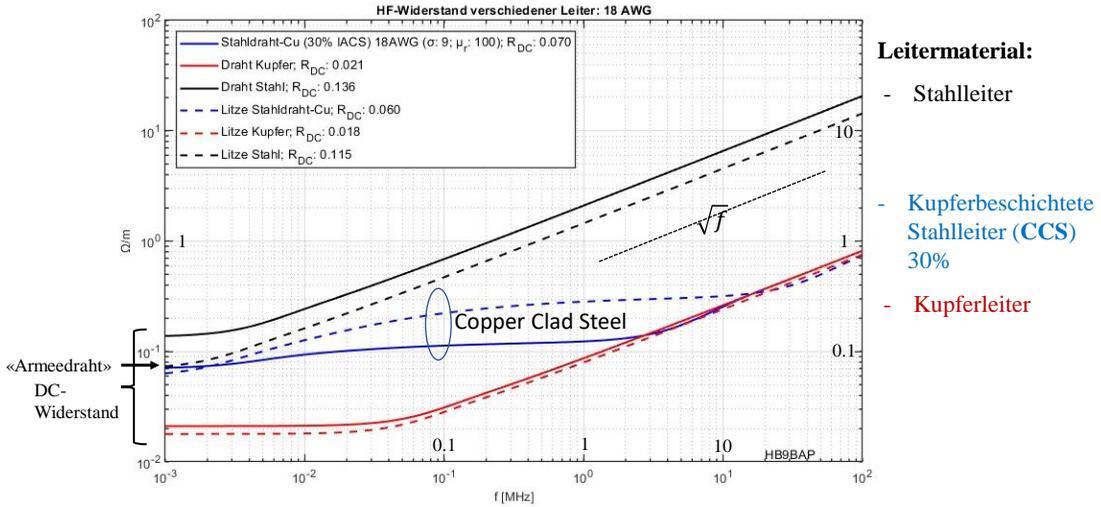
HB9BAP USKA Solothurn

30

30

HF-Leitungen

Leitermaterial: HF-Widerstand verschiedener Leiter (18 AWG \varnothing ca. 1 mm) für Leitungen und Antennendrähte:



Leitermaterial:

- Stahlleiter
- Kupferbeschichtete Stahlleiter (CCS) 30%
- Kupferleiter

18.09.2023

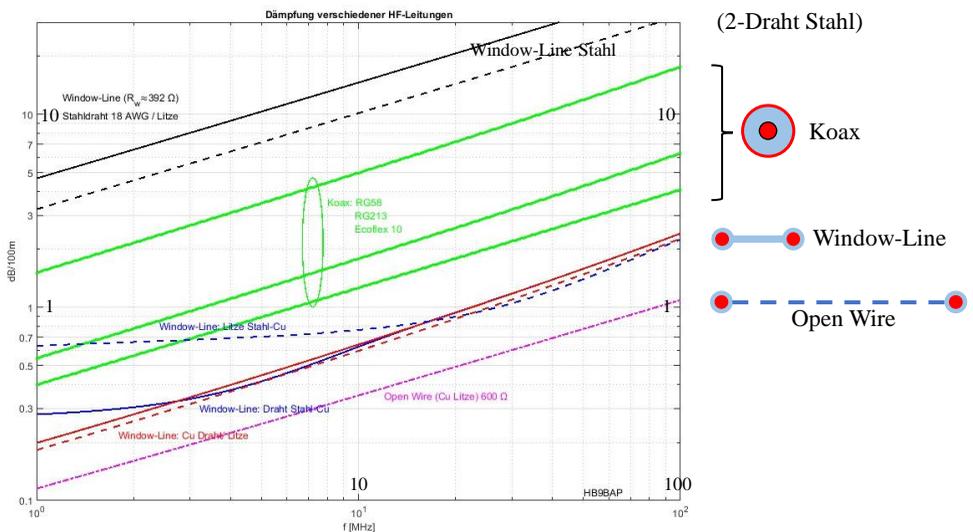
HB9BAP USKA Solothurn

31

31

HF-Leitungen

Vergleich der Dämpfung: Koaxialkabel, Window-Line, Open Wire



18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

32

32

HF-Leitungen

Literatur:

- [1] HBRadio 4/ 2022, HB9BAP, *Leitungen: Verluste, Leistungs- und Wellenanpassung*
- [2] HB9BAP, *Leistungsverluste reduzieren*, Feb. 2023 (nicht publiziert)
- [FA 1] Dämpfung und Verkürzungsfaktor von Zweidrahtleitungen, DL4AAE, Funk Amateur 11/ 2016
- [FA 2] Neue Erkenntnisse über Zweidrahtleitungen (1), DJ8UL & DL4AAE, Funk Amateur 2/ 2023
- [FA 3] Neue Erkenntnisse über Zweidrahtleitungen (2), DJ8UL & DL4AAE, Funk Amateur 3/ 2023

Leitungs-Berechnungsprogramme:

- [P1] RF Transmission Line Calculator: <https://owenduffy.net/calc/tl/tlcc.php>
- [P2] Transmission Line Details: <https://ac6la.com>
- [P3] Transmission Line for Windows: Beilage ARRL Antenna Book

Antennen-Berechnungsprogramme:

- [A1] EZNEC: <https://www.eznec.com>

Leitungen, Antennendrähte, etc.:

- [L1] www.thewireman.com
- [L2] www.dx-wire.de

18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

33

33

Die lange Leitung – kurz und bündig

Vier Fragen:

- 1) Wieso nehmen die Verluste (trotz Tuner) signifikant zu, wenn wir ein grösseres SWR auf der Leitung haben?
→ **Dominieren Strom-Bäuche in der Leitung, überhöhen sich die Leiterverluste da $\sim I^2$**
- 2) Wieso sind «Hühnerleiter» viel verlustärmer als Koaxialkabel?
→ **Der höhere Wellenwiderstand führt zu kleineren Strömen, somit kleinere Leiterverluste**
- 3) Können wir bei einem Dipol Leitungsverluste vermeiden?
→ **ja, auf 160 m (80 m) die Resonanz auf das untere Bandende legen**
- 4) Welche Drähte eignen sich für Antennen und Zweidraht-Leitungen?
→ **Hard-Drawn Kupfer, sowie Copper Clad Steel Leiter oder Litze**

18.09.2023

HB9BAP USKA Solothurn

34

34