

# AfuTUB-Kurs

## Technik Klasse A 10: HF-Leitungen, Kabel

DL0XK

Amateurfunk Forschungs Gruppe der TU Kaiserslautern

<https://www.amateurfunk.uni-kl.de/home/>



This work is licensed under the *Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 License*.

Amateurfunkgruppe der Technische Universität Kaiserslautern, DL0XK, Stand: Mon Jun 17 09:25:03 2019 +0200  
basierend auf dem Kurs der Amateurfunkgruppe der Technische Universität Berlin (AfuTUB), DKØTU

# Hochfrequenzleitungen



Abb. 1: Paralleldrahtleitung

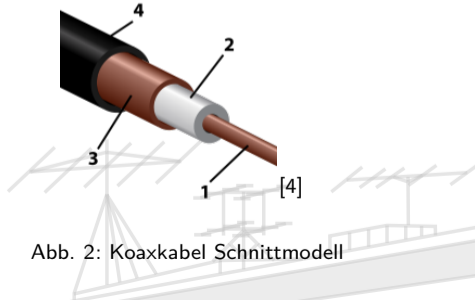


Abb. 2: Koaxkabel Schnittmodell

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

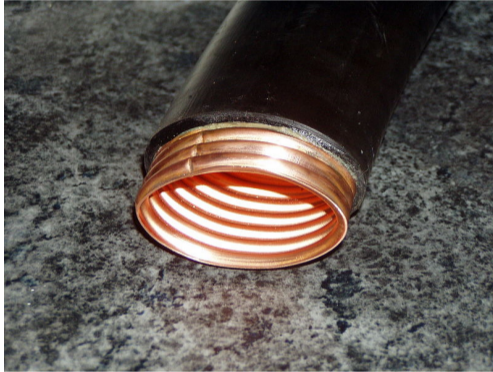
Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

# Hochfrequenzleitungen



[5]

Abb. 3: Elliptischer Hohlleiter für den Frequenzbereich von 3,8 bis 5,8 GHz. Zwischen dem gewellten Kupferrohr und dem schwarzen Mantel befindet sich eine klebrige Schicht, welche die Rillen des Kupferrohrs ausfüllt und somit eine bessere Biegsamkeit bewirkt. An der Luft härtet diese klebrige Schicht aus und bewirkt so einen gewissen Selbstheilungseffekt bei kleineren Defekten.

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

# Wellenwiderstand

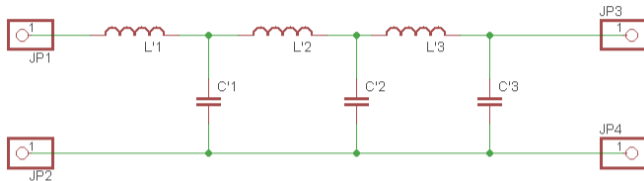


Abb. 4: Ersatzschaltbild

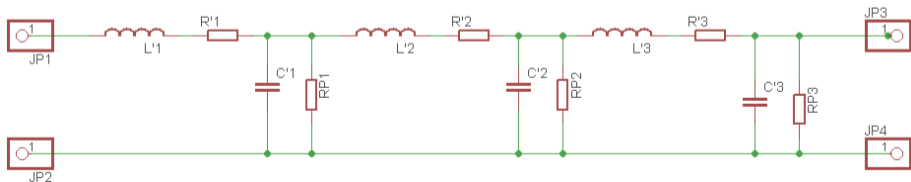


Abb. 5: Genaues Ersatzschaltbild eines Koaxialkabels

- HF-Leitung
- Wellenwiderstand
- Verkürzungsfaktor
- Skin-Effekt
- Dämpfung
- SWR
- Lecherleitung
- Transformationsleitungen
- Symmetrierung
- Topfkreis
- Referenzen

# Wellenwiderstand

## Wellenwiderstand

$$Z_W = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

- Paralleldrahtleitungen:  $Z_W = 150\Omega$  bis  $600\Omega$
- Koaxialleitungen:  $Z_W = 50\Omega$  bis  $95\Omega$
- Der Wellenwiderstand entspricht dem Abschlusswiderstand einer Leitung, bei dem keine stehenden Wellen auftreten.

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

# Verkürzungsfaktor

- das Dielektrikum verlangsamt die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kabel:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

- durch geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit verkürzt sich die Wellenlänge auf der Leitung:

$$k = \frac{v}{c}$$

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

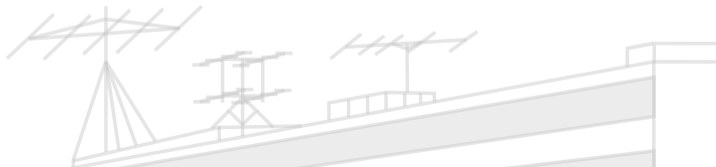
Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen



# Typische Verkürzungsfaktoren

Kabeltyp	Verkürzungsfaktor
Koaxialkabel, normal	$k = 0,66$
Koaxialkabel mit Luftisolation	$k = 0,85$
offene $600\Omega$ Speiseleitung	$k = 0,98$
Flachleitung mit $300\Omega$	$k = 0,82$

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

# Der Skin-Effekt (Wiederholung aus A02)

- tritt bei höherfrequenter Wechselspannung auf
- verdrängt Elektronen aus dem Leitungsinnen an die Leiteroberfläche  
→ Widerstand im Leiter steigt

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

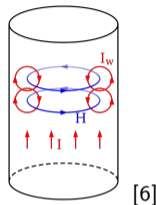
Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen



# Ursachen des Skin-Effektes



[6]

Abb. 6: Überlagerung von Wechsel- und Wirbelströmen

- Ursache des Skin-Effektes ist das magnetische Feld
- Es erzeugt Wirbelströme im Innern des Leiters
- Diese sind dem Erzeugerstrom entgegengerichtet
- Das wechselnde Magnetfeld erzeugt im Leiter eine höhere Gegenspannung als am Rand

# Die Dämpfung

- Gibt den Leistungsverlust über das Kabel an
- Hängt vom Verlustwiderstand und dem Dielektrikum ab
- Wird meist in dB pro 100m angegeben
- $n = \sqrt{\frac{f_{hoch}}{f_{niedrig}}}$

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

# Kabeldämpfung Beispiel 1

RG 213/U hat bei  $100\text{MHz}$  eine Dämpfung von  $6,7\text{dB}$ . Wie groß ist die Dämpfung bei  $145\text{MHz}$ ?

Hinweis:  $n = \sqrt{\frac{f_{\text{hoch}}}{f_{\text{niedrig}}}}$

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

# Kabeldämpfung Beispiel 1

RG 213/U hat bei  $100\text{MHz}$  eine Dämpfung von  $6,7\text{dB}$ . Wie groß ist die Dämpfung bei  $145\text{MHz}$ ?

$$n = \sqrt{\frac{f_2}{f_1}} = \sqrt{\frac{145}{100}} = \sqrt{1,45} = 1,2$$

Bei  $145\text{MHz}$  ist die Dämpfung also:  $1,2 \cdot 6,7\text{dB} = 8\text{dB}$

## Kabeldämpfung Beispiel 2

Löse mit Hilfe des Dämpfungsdiagramms aus der Formelsammlung:

- **RG58**
- 20 m
- 29 MHz

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

## Kabeldämpfung Beispiel 2

Löse mit Hilfe des Dämpfungsdiagramms aus der Formelsammlung:

- **RG58**
- 20 m
- 29 MHz
- Lösung: 1,8 dB

## Kabeldämpfung Beispiel 2

Löse mit Hilfe des Dämpfungsdiagramms aus der Formelsammlung:

- **RG58**
- 20 m
- 29 MHz
- Lösung: 1,8 dB
- **Aircell7**
- 25 m
- 145 MHz

## Kabeldämpfung Beispiel 2

Löse mit Hilfe des Dämpfungsdiagramms aus der Formelsammlung:

- **RG58**
- 20 m
- 29 MHz
- Lösung: 1,8 dB
- **Aircell7**
- 25 m
- 145 MHz
- Lösung: 1,9 dB



# Stehwellenverhältnis (Wiederholung)

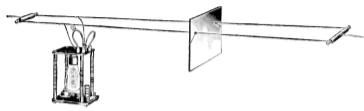
- ist ein Maß für die Anpassung  $SWR = s = \frac{U_{max}}{U_{min}}$
- hängt vom Verhältnis Abschlusswiderstand  $R_a$  zu Wellenwiderstand  $Z_W$  ab

$$SWR = s = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{Z}{R_a} \text{ für } R_a \geq Z$$

$$SWR = s = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{R_a}{Z} \text{ für } Z \geq R_a$$

- ist das Verhältnis von vorlaufender zu zurücklaufender Welle
- [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stehwelle\\_\(Animation\).gif](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stehwelle_(Animation).gif)

# Lecherleitung



[7]

Abb. 7: Lecherleitung Vorführapparat mit Kurzschlusschieber und Lampe für den Resonanzpunkt

- Ist ein Sonderfall einer Transformationsleitung mit einem Abschlusswiderstand von  $0\Omega$  oder  $\infty\Omega$
- Gibt man HF-Signal auf Doppelleitung, mit  $R_a = 0\Omega$  wird die gesamte Energie reflektiert
- Dadurch entstehen Auslöschungen und Anhebungen
- Wellenwiderstand kehrt sich alle  $\lambda/4$  um
- Lässt man das Leitungsende offen, kehren sich alle Verhältnisse um
- Dieser Effekt tritt auch bei einer  $\lambda/2$  Leitung auf

# Lecherleitung

## Zusammenfassung:

- $\lambda/4$  Leitung kehrt Impedanzverhältnisse um (niederohmig  $\leftrightarrow$  hochohmig), wirkt wie Schwingkreis
- $\lambda/2$  Leitung transformiert 1:1, wirkt auch wie ein Schwingkreis

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

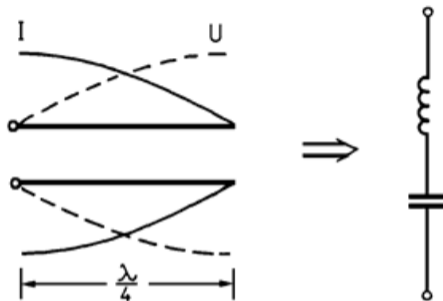
Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen



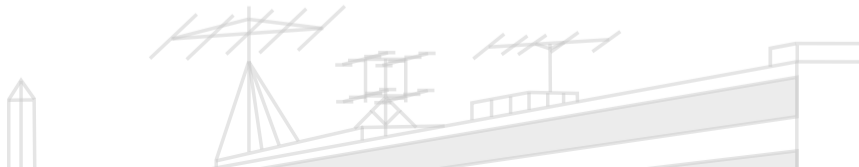
### TH326

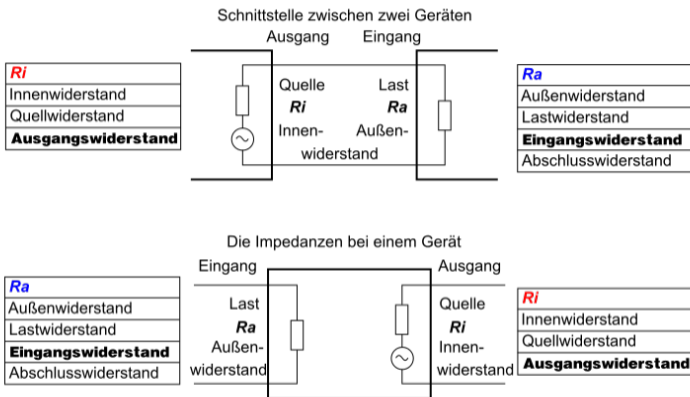
Diese Darstellung zeigt die Strom- und Spannungsverteilung an einer offenen  $\lambda/4$ -Lecherleitung. Sie wirkt als Reihenschwingkreis.

- HF-Leitung
- Wellenwiderstand
- Verkürzungsfaktor
- Skin-Effekt
- Dämpfung
- SWR
- Lecherleitung
- Transformationsleitungen
- Symmetrierung
- Topfkreis
- Referenzen

# Transformationsleitungen

- Transformationsleitungen dienen der Anpassung von Antenne zum Sender zur ...
  - Anpassung des Sender-Widerstandes an die HF-Leitung.
  - Anpassung der Antennenimpedanz an das Kabel.
- $R_i = Z_w = Z_{Antenne}$



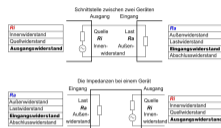


- HF-Leitung
- Wellenwiderstand
- Verkürzungsfaktor
- Skin-Effekt
- Dämpfung
- SWR
- Lecherleitung
- Transformationsleitungen
- Symmetrierung
- Topfkreis
- Referenzen

[8]

Abb. 8: Die Widerstände bzw. Impedanzen am Eingang und Ausgang von elektrischen Geräten

# Prinzip der Transformationsleitung



[8]

Abb. 9: Die Widerstände bzw. Impedanzen am Eingang und Ausgang von elektrischen Geräten

- Eine  $\lambda/4$ -Leitung kann Widerstände transformieren
- Aber nur in einer begrenzten Bandbreite
- Leitung wirkt als Transformator
- Eine solche Leitung bestimmter Länge wird auch als abgestimmte Speiseleitung bezeichnet
- Mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossenen Leitungen zur Vermeidung von Stehwellen, nennt man unabgestimmte Speiseleitung

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

Will man zwei Impedanzen  $Z_E$  &  $Z_A$  mit einem Viertelwellentransformator anpassen, so muss die Transformationsleitung folgende Werte besitzen:

- Wellenwiderstand:

$$Z = \sqrt{Z_E \cdot Z_A}$$

- Länge:

$$\ell = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot k$$

- Bei Koaxialkabeln sieht das Ganze wie folgt aus:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \\ &= \frac{138\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \lg\left(\frac{D}{d}\right) \end{aligned}$$



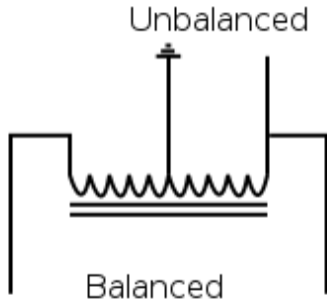
# Symmetrierung



Abb. 10: Balun 4:1, 13 Windungen auf T200A/2 Ringkern

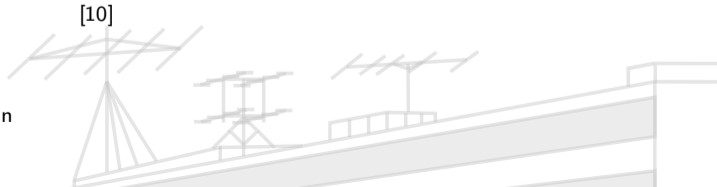
- Wird bei Verbindungen zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Punkten verwendet
- Koaxialkabel ist unsymmetrisch
- Paralleldraht ist symmetrisch
- Alle Dipole sind symmetrisch
- Alle Antennen, die gegen Erde erregt werden sind unsymmetrisch
- Ohne Symmetrierung entstehen Mantelwellen

## Balun



- Balun kann symmetrieren und gleichzeitig die Impedanz anpassen
- Wird der Eingang an halber Windungszahl des Ausganges angeschlossen, erhält man einen 1:4 Übertrager

Abb. 11: Spartrafo als Balun



# Die $\lambda/2$ -Umwegleitung

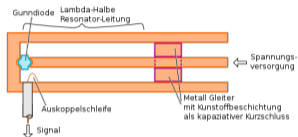


[11]

Abb. 12:  $\lambda/2$ -Umwegleitung

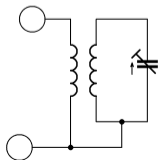
- An der Einspeisestelle teilt sich der Strom je zur Hälfte auf
- Eine Hälfte geht direkt zur Antenne, die andere in die Umwegleitung
- Nach dem ohmschen Gesetz verdoppelt sich dadurch der Widerstand
- Bei  $50\Omega$  ergeben sich also  $100\Omega$
- Die Umwegleitung stellt den Widerstand auf der anderen Seite nochmal mit  $100\Omega$  zur Verfügung
- Somit ergeben sich insgesamt  $200\Omega$  Impedanz an der Antenne

# Der Topfkreis



[12]

Abb. 13: Topfkreis



- Im UHF-Bereich werden Aluminium- oder versilberte Messingbecher als Leiter genutzt
- Sie besitzen einen Mittelleiter, wodurch sie wie eine Koaxleitung wirken
- Sie lassen sich wie auch die Lecherleitung durch einen Kurzschlusschieber abstimmen
- Dieser Schwingkreis ist vollkommen abgestimmt und von außen nicht beeinflussbar
- Versilbert man die Innenflächen, lassen sich die Verluste minimieren
- Dadurch werden die elektrischen Eigenschaften für hohe Frequenzen verbessert

# Referenzen/Links

[1] DARC Online-Lehrgang Lektion A08:

<https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-ta/a10/>


[2] Fragenkatalog Bundesnetzagentur Technik Klasse A: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Amateurfunk/Fragenkatalog/TechnikFragenkatalogKlasseAf252rId9014pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

[Institutionen/Frequenzen/Amateurfunk/Fragenkatalog/](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Amateurfunk/Fragenkatalog/TechnikFragenkatalogKlasseAf252rId9014pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3)


[TechnikFragenkatalogKlasseAf252rId9014pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Amateurfunk/Fragenkatalog/TechnikFragenkatalogKlasseAf252rId9014pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

Abbildungen:

[3] Paralleldrahtleitung:

 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Twin-lead\\_cable\\_dimension.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Twin-lead_cable_dimension.svg)


[4] Koaxkabel Schnittmodell:

 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coaxial\\_cable\\_cutaway\\_new.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coaxial_cable_cutaway_new.svg)


[5] Elliptischer Hohlleiter:













 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elli\\_holl.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elli_holl.jpg)

[6] Wechsel- und Wirbelströme:

 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skineffect\\_reason.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skineffect_reason.svg)

[7] Lecherleitung:

 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lecher\\_wires\\_and\\_oscillator\\_1932.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lecher_wires_and_oscillator_1932.png)

- [8] Impedanzen:   <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EingangswiderstandAusgangswiderstandA.svg>
- [9] Balun:   <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:T200A2.jpg>
- [10] Spartafo als Balun:    <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cdbalun2.svg>
- [11] Umwegleitung:    [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Balun\(semirigid\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Balun(semirigid).jpg)
- [12] Topfkreis:   <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Topfkreis.svg>

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-  
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

