

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

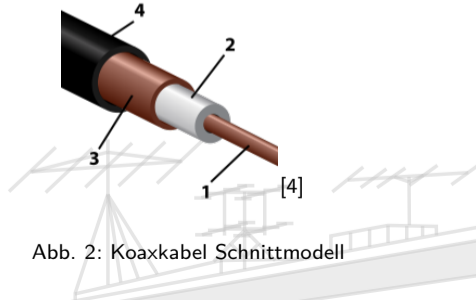


Abb. 2: Koaxkabel Schnittmodell

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

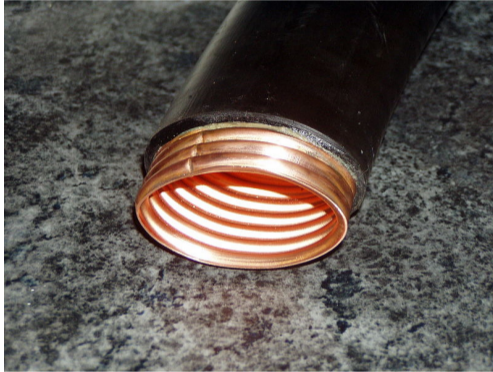
Transformations-
leitungen

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

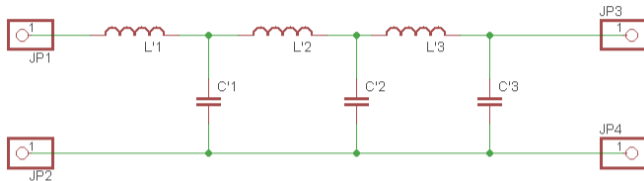


Abb. 4: Ersatzschaltbild

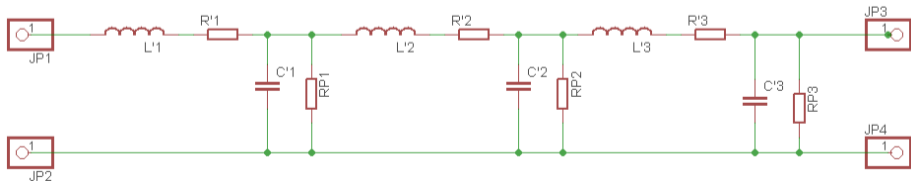


Abb. 5: Genaues Ersatzschaltbild eines Koaxialkabels

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

Transformations-
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

Wellenwiderstand

Wellenwiderstand

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

- Paralleldrahtleitungen: $Z_W = 150\Omega$ bis 600Ω
- Koaxialleitungen: $Z_W = 50\Omega$ bis 95Ω
- 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 600Ω Speiseleitung | $k = 0,98$ |
| Flachleitung mit 300Ω | $k = 0,82$ |

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

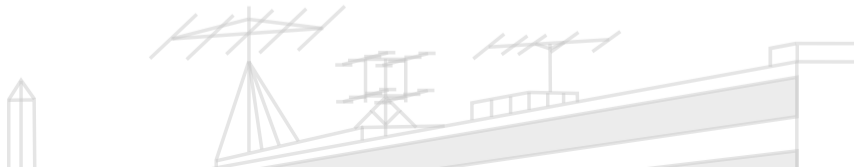
Lecherleitung

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

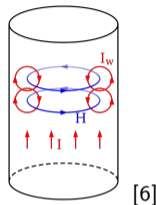
Transformations-
leitungen

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

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

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

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

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

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

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
- **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

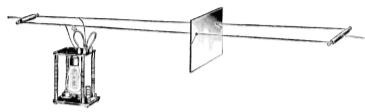


Abb. 7: Lecherleitung Vorführapparat mit Kurzschlusschieber und Lampe für den Resonanzpunkt

- Ist ein Sonderfall einer Transformationsleitung mit einem Abschlusswiderstand von 0Ω 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

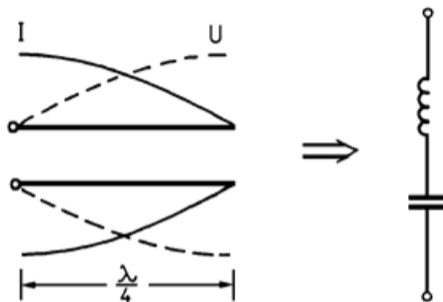
Lecherleitung

Transformations-
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen



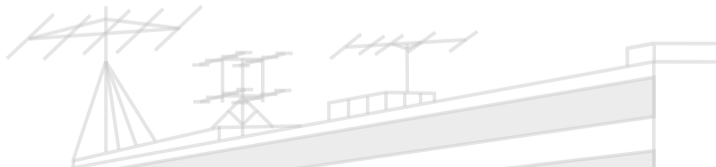
TH326

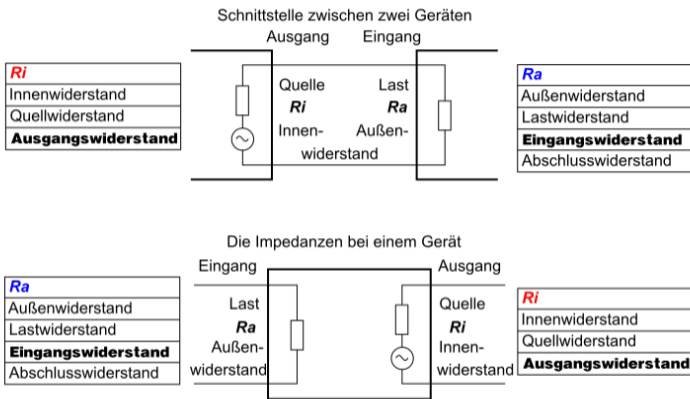
Diese Darstellung zeigt die Strom- und Spannungsverteilung an einer offenen $\lambda/4$ -Lecherleitung. Sie wirkt als Reihenschwingkreis.

- 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.
- $R_i = Z_w = Z_{Antenne}$



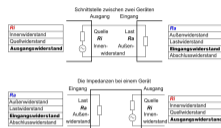


- HF-Leitung
- Wellenwiderstand
- Verkürzungsfaktor
- Skin-Effekt
- Dämpfung
- SWR
- Lecherleitung
- Transformationsleitungen
- Symmetrierung
- Topfkreis
- Referenzen

[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

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

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR

Lecherleitung

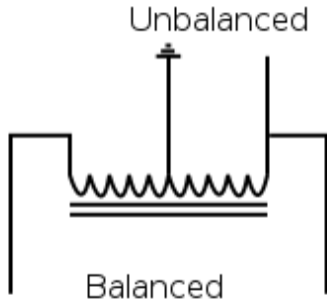
Transformations-
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

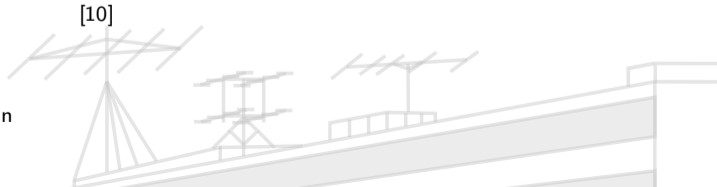
Referenzen

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

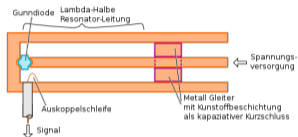


[11]

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

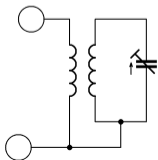
- An der Einspeisestelle teilt sich der Strom je zur Hälfte auf
- Eine Hälfte geht direkt zur Antenne, die andere in die Umwegleitung
- Nach dem ohmschen Gesetz verdoppelt sich dadurch der Widerstand
- Bei 50Ω ergeben sich also 100Ω
- Die Umwegleitung stellt den Widerstand auf der anderen Seite nochmal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

[4] Koaxkabel Schnittmodell:

 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coaxial_cable_cutaway_new.svg

[5] Elliptischer Hohlleiter:  https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elli_holl.jpg

[6] Wechsel- und Wirbelströme:

 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skineffect_reason.svg

[7] Lecherleitung:

 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lecher_wires_and_oscillator_1932.png

AfuTUB-Kurs

Technik A 10

HF-Leitung

Wellenwiderstand

Verkürzungsfaktor

Skin-Effekt

Dämpfung

SWR




Lecherleitung

Transformations-
leitungen

Symmetrierung

Topfkreis

Referenzen

- [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

