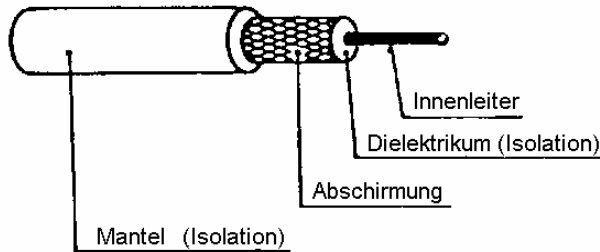


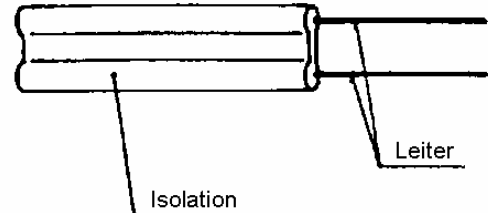
Hochfrequenzleitungen (HF-Kabel)

Eine Hochfrequenzleitung (HF-Kabel) dient dazu, die vom Sender kommende HF-Energie zur Antenne, bzw. die von der Antenne aufgefangene HF-Energie zum Empfänger zu transportieren.

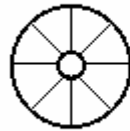
Unterscheidung: Unsymmetrische (Koaxial-)Kabel



Symmetrische Kabel



Feldverteilung: Unsymmetrische (Koaxial-)Kabel



Symmetrische Kabel



Vorteile: geschlossenes HF-Feld
Abschirmung nach Aussen
(fast) kein Streufeld
gute Anpassung an TX/RX

geringe Dämpfung
leichte Herstellung

Nachteile: etwas höhere Dämpfung
etwas höherer Preis

offenes HF-Feld
hohes Streufeld
komplizierte Verlegung
schlechte Anpassung an TX/RX

Aus diesen Gründen finden in der HF-Technik heute fast ausschließlich Koaxialkabel Verwendung. Diese gibt es in (fast) allen Größen (Ø 3mm - 300mm), elektrischen und mechanischen Werten (z.B. Stahlgeflechtmantel, Teflonisolierung, diverse Farben, etc.)

Verkürzungsfaktor:

Da sich EM-Wellen in einem Medium (Kabel → Dielektrikum) langsamer ausbreiten, als durch Vakuum, wirken Kabel elektrisch länger als sie wirklich sind, bzw. Kabel sind mechanisch kürzer als theoretisch (ideal, Vakuum/Luft) berechnet .

Der Verkürzungsfaktor (meist "VF" oder "V") ist von dem verwendeten Material des Dielektrikums abhängig.

$$\lambda_{\text{Kabel}} = \lambda_0 \cdot \text{VF}$$

$$\text{VF} = 1 / \sqrt{\epsilon_r}$$

λ_{Kabel} : mechanische (reale) Wellenlänge

λ_0 : Wellenlänge in Luft (Vakuum)

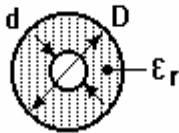
VF : Verkürzungsfaktor

ϵ_r : Dielektrizitätszahl (Epsilon, relativ)

Material	VF	ϵ_r
PE (Polyethylen)	0,66	2,25
Teflon	0,7	2,0
PE-Schaum	0,85 (ca.)	1,38
PE-Wendel	0,89 - 0,99	1,25 - 1,02
Luft/Vakuum	1,0	1,0

Wellenwiderstand (Impedanz) "Z" in [Ω]

Der Wellenwiderstand "Z" ist das Verhältnis von HF-Spannung und HF-Strom auf jedem beliebigen Punkt einer HF-Leitung (Kabel). Obwohl "Z" die Einheit Ω (Ohm) hat, ist "Z" kein ohmscher Widerstand, d.h. man kann ihn nicht mit einem Ohmmeter messen und es entstehen keine Verluste durch "Z". Er stellt nur das zahlenmäßige Verhältnis von Spannung und Strom auf dem Kabel dar. Der Wellenwiderstand ist der wichtigste Kennwert eines HF-Kabels.

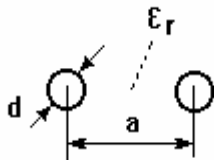


$$Z = 138 \cdot VF \cdot \log \left[\frac{D}{d} \right] \quad [\Omega]$$

Koaxialleitung : (Koaxkabel)

Der Wellenwiderstand "Z" eines Koaxialkabels ist vom Verhältnis "D" (elektrisch wirksamer Ø der Abschirmung) zu "d" (Ø des Innenleiters) und vom Verkürzungsfaktor "VF" des Dielektrikums abhängig. "log" ist hier der 10-er-Logarithmus (lg).

$$VF = 1 / \sqrt{\epsilon_r}$$



$$Z = 276 \cdot VF \cdot \log \left[\frac{2a}{d} \right] \quad [\Omega]$$

Paralleldrahtleitung :

Der Wellenwiderstand "Z" einer Paralleldrahtleitung ist vom Verhältnis "a" (Abstand der Leitermitten) zu "d" (Ø der beiden Leiter) und vom Verkürzungsfaktor "VF" des Dielektrikums abhängig. "log" ist auch hier der 10-er-Logarithmus (lg).

In der **Formelsammlung der BNetzA** (Technik Klasse A) wird in beiden Formeln statt des 10-er-Logarithmus der Logarithmus zur Basis e (abgekürzt ln) verwendet und statt VF steht $1/\sqrt{\epsilon_r}$ (vgl. Seite 4 unten)

Sowohl die Impedanz des Verbrauchers (Antenne), als auch die des Senders muß mit der des Kabels übereinstimmen. Würde ein 50Ω-Sender über ein 50Ω-Kabel an eine Antenne mit einer Impedanz von 240Ω angeschlossen, wird ein großer Teil der HF-Energie am Schnittpunkt Kabel/Antenne reflektiert (also nicht ausgestrahlt) und zum Sender zurückgeleitet (→ Fehlanpassung).

Gleiches gilt für Stecker, Buchsen, Antennenschalter, etc...

Kabeldämpfung "a_K" in [dB]

Wird eine EM-Welle in einem HF-Kabel geleitet, wird sie durch Verluste im Kupfer und im Dielektrikum mehr und mehr gedämpft. Die Dämpfung ist der zweite wichtige Kennwert eines HF-Kabels.

Die Kabeldämpfung ist abhängig von der Dicke des Kabels und vom Dielektrikum.

- Größerer Durchmesser des Kabels → geringere Dämpfung
- Größerer Luftanteil im Dielektrikum → geringere Dämpfung

Bei den meisten üblichen Koaxialkabeln besteht das Dielektrikum aus PE-Vollmaterial.

PE hat zwar eine höhere Dämpfung, das Kabel ist dann aber mechanisch sehr stabil.

Viele Koaxialkabel-Typen sind bei gleicher Größe auch mit einem Dielektrikum aus PE-Schaum oder einer Mischung aus PE und Luftzellen erhältlich. Diese Kabel besitzen zwar eine geringere Dämpfung (bis zu 50%) verglichen mit einem Kabel mit Voll-PE, haben jedoch neben dem etwas höheren Preis noch eine deutlich geringere mechanische Stabilität.

Datenblatt verschiedener Koaxialkabel

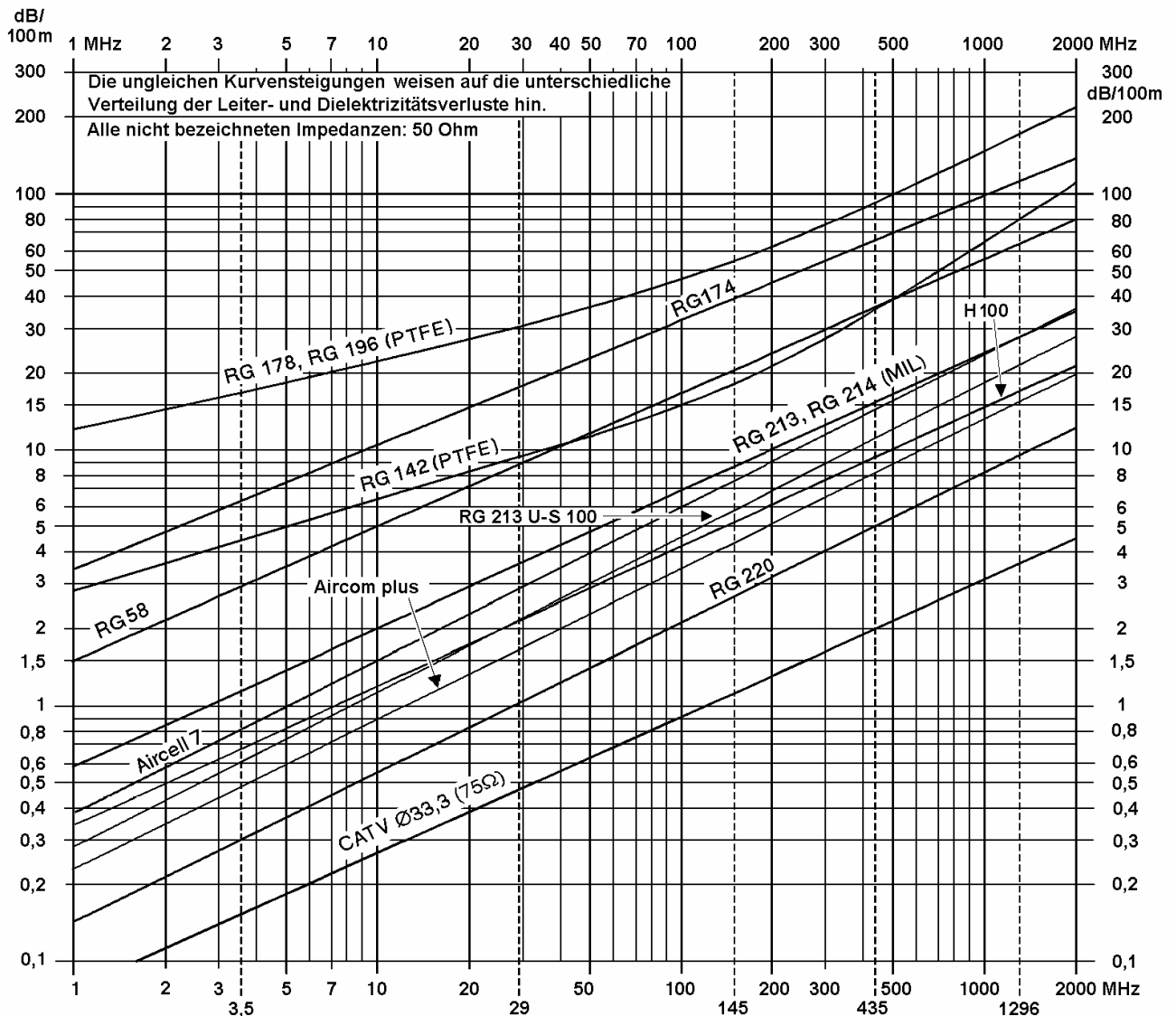
Koaxialkabel, US-Standardtypen												
Typ	Wellenwiderstand in Ω	Innenleiter mm	Außen- durchmesser Ø in mm	Isolierung*	Verkür- zungsfaktor	Kapazität in pF/m	Dämpfung in dB/100 m bei					
							10 MHz	30 MHz	100 MHz	200 MHz	500 MHz	
RG 6 A/U	75 ± 3	1 × 0,73	0,73	8,4	PE	0,66	68	2,9	4,9	9,8	14,8	23,0
RG 11 A/U	75 ± 3	7 × 0,4	1,2	10,3	PE	0,66	68	2,2	4,0	7,5	11,0	19,0
RG 12 A/U	75 ± 3	7 × 0,4	1,2	12,5	PE	0,66	68	2,2	4,0	7,5	11,0	19,0
RG 22 B/U	95 ± 5	7 × 0,4	1,2	10,7	PE	0,66	52	3,5	6,0	12,0	16,5	28,0
RG 34 B/U	75 ± 3	7 × 0,64	1,9	16,0	PE	0,66	68	1,5	2,7	5,2	7,8	13,5
RG 58 C/U	50 ± 2	19 × 0,18	0,9	4,95	PE	0,66	102	5,0	9,0	17,0	24,0	39,0
RG 59 B/U	75 ± 3	1 × 0,6	0,6	6,15	PE	0,66	68	3,6	6,0	11,5	16,5	27,0
RG 62 A/U	93 ± 5	1 × 0,65	0,65	6,15	PE hohl	0,85	42	3,0	5,0	9,0	13,0	22,0
RG 63 B/U	125 ± 6	1 × 0,67	0,67	10,3	PE hohl	0,85	32	2,0	3,6	6,2	9,2	14,2
RG 71 B/U	93 ± 5	1 × 0,65	0,65	6,2	PE hohl	0,85	42	3,0	5,0	9,0	13,0	22,0
RG 142 B/U	50 ± 2	1 × 0,95	0,95	4,95	PTFE	0,7	95	7,0	9,0	14,0	20,0	35,0
RG 164 /U	75 ± 3	1 × 2,7	2,7	22,1	PE	0,66	68	0,8	1,5	3,0	4,6	8,2
RG 174 A/U	50 ± 2	7 × 0,16	0,5	2,5	PE	0,66	101	12,0	16,0	29,0	45,0	70,0
RG 178 B/U	50 ± 2	7 × 0,1	0,3	1,85	PTFE	0,7	95	22,0	27,0	43,0	62,0	102,0
RG 179 B/U	75 ± 3	7 × 0,1	0,3	2,55	PTFE	0,7	64	14,0	18,0	29,0	41,0	70,0
RG 180 B/U	95 ± 5	7 × 0,1	0,3	3,7	PTFE	0,7	49	11,0	14,0	23,0	33,0	58,0
RG 187 A/U	75 ± 3	7 × 0,1	0,3	2,7	PTFE	0,7	64	14,0	18,0	29,0	41,0	70,0
RG 188 A/U	50 ± 2	7 × 0,17	0,51	2,7	PTFE	-	95	12,0	17,0	28,0	40,0	68,0
RG 195 A/U	95 ± 5	7 × 0,1	0,3	3,8	PTFE	0,7	49	11,0	14,0	23,0	33,0	58,0
RG 196 A/U	50 ± 2	7 × 0,1	0,3	1,9	PTFE	0,7	93	22,0	27,0	43,0	62,0	102,0
RG 213 /U	50 ± 2	7 × 0,76	2,3	10,3	PE	0,66	101	2,0	3,7	7,0	10,2	17,0
RG 214 /U	50 ± 2	7 × 0,76	2,3	10,8	PE	0,66	101	2,0	3,7	7,0	10,2	17,0
RG 215 /U	50 ± 2	7 × 0,76	2,3	12,5	PE	0,66	101	2,0	3,7	7,0	10,2	17,0
RG 216 /U	75 ± 3	7 × 0,4	1,2	10,8	PE	0,66	68	2,2	4,0	7,5	11,0	19,0
RG 217 /U	50 ± 2	1 × 2,7	2,7	13,8	PE	0,66	101	1,4	2,4	4,5	7,1	12,3
RG 218 /U	50 ± 2	1 × 5,0	5,0	22,1	PE	0,66	101	0,8	1,5	2,9	4,5	8,1
RG 219 /U	50 ± 2	1 × 5,0	5,0	24,3	PE	0,66	101	0,8	1,5	2,9	4,5	8,1
RG 220 /U	50 ± 2	1 × 6,6	6,6	28,4	PE	0,66	101	0,6	1,1	2,3	3,8	7,0
RG 223 /U	50 ± 2	1 × 0,9	0,9	5,3	PE	0,66	101	4,0	7,0	13,0	20,0	34,0
RG 316 /U	50 ± 2	7 × 0,17	0,51	2,5	PTFE	-	95	12,8	17,0	28,0	40,0	68,0

* PE ≙ Polyäthylen
PE hohl ≙ Polyäthylen-Luftraumisolierung
PTFE ≙ Polytetrafluoräthylen (Teflon)

Koaxialkabel, Neue Typen

	Aircell 7	Aircom Plus	H 100	H 155	H 500	H 2000 Flex
Impedanz 50 Ω						
Verkürzungsfaktor	0,83	0,80	0,84	0,67	0,81	0,83
Kapazität in pF/m	74	84	80	100	82	80
Dielektrikum	PE-Schaum	Luftzellen	PE-Schaum	PE-Schaum	PE-Schaum	PE-Schaum
Innenleiter	Litze	Draht	Draht	Litze	Draht	Draht
	19 × 0,28			19 × 0,37		
Innenleiter- Ø in mm	1,85	2,7	2,5	1,0	2,4	2,6
Außenleiter (Folie + Geflecht)						
Mantel (UV-beständiges schwarzes PVC)						
Mantel - Ø in mm	7,3	10,8	9,8	6,0	9,9	10,3
Biegeradius min. in mm	25	55	150	35	75	50
Gewicht in kg je 100 m	7,2	15	15,2	5,5	15,3	14
Dämpfung in dB je 100 m						
7 MHz	0,9	0,7	1,1	1,6	1,1	1,0
28 MHz	3,4	1,6	2,4	4,7	2,7	2,0
144 MHz	7,9	4,5	5,2	9,3	5,6	4,8
430 MHz	14,2	8,2	9,1	18,4	10,8	8,5
1240 MHz	26,1	15,2	16,2	32,0	18,1	15,7
Belastbarkeit in Watt						
7 MHz	3000	6000	5500	950	5000	7600
28 MHz	2400	5000	4900	740	4500	3800
144 MHz	770	1200	1100	420	1050	1600
430 MHz	550	890	830	260	820	900
1240 MHz	170	240	220	110	210	500

Frequenzabhängigkeit der Kabelverluste (aus Fragenkatalog Technik Klasse E + A)



Formeln zur Impedanz von Kabeln aus dem Fragenkatalog Technik Klasse A

$$Z = \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d}$$

Koaxialkabel

Abkürzungen wie auf Seite 2

$$Z = \frac{120\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{2 \cdot a}{d}$$

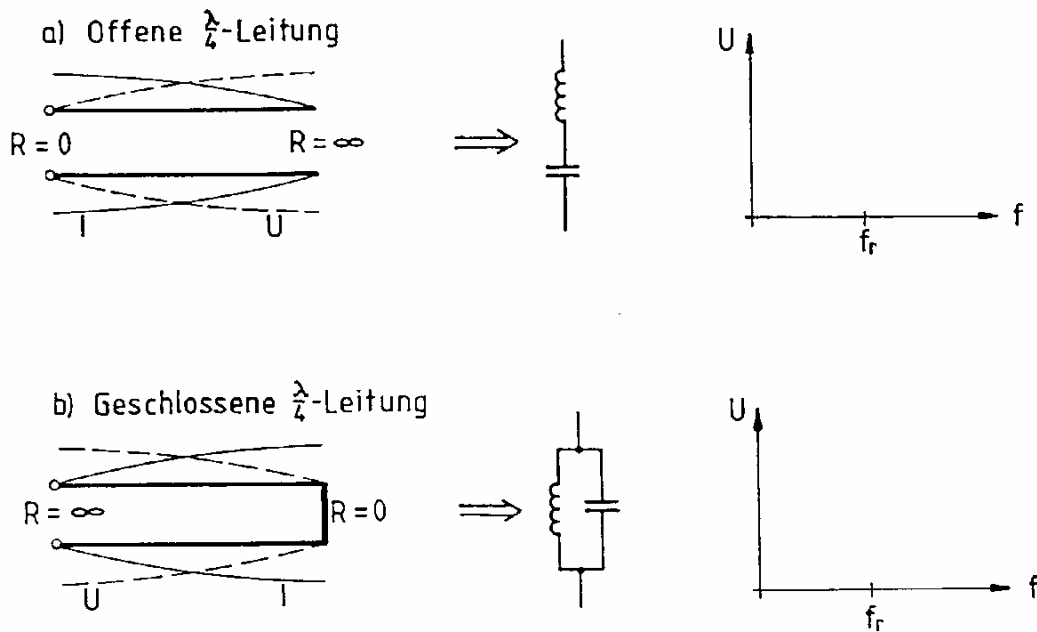
Paralleldrahtleitung
(symmetrische Zweidrahtleitung)

Abkürzungen wie auf Seite 2

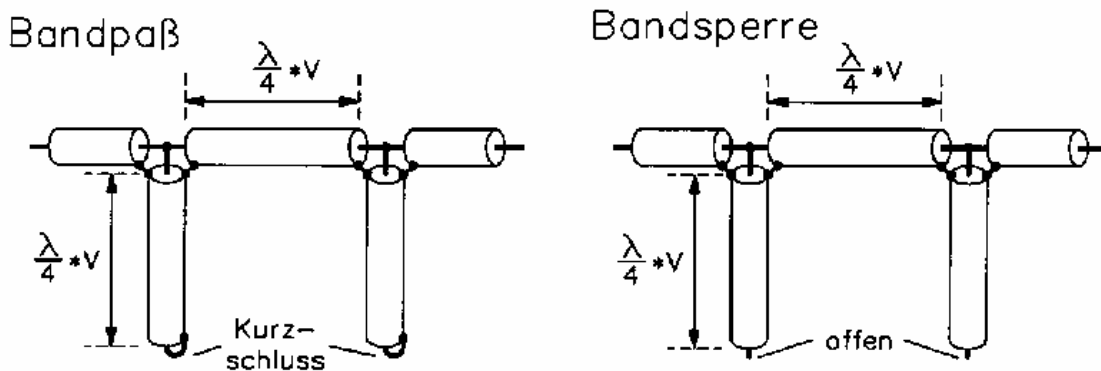
Lecherleitung

Wird eine $\lambda/4$ -lange Leitung (Koax- oder Bandleitung) am Ende kurzgeschlossen, wirkt diese am Eingang wie ein Leerlauf (also hochohmig), umgekehrt wirkt eine am Ende offene $\lambda/4$ -lange Leitung am Eingang wie ein Kurzschluß. Das Z_k spielt hier keine Rolle.

Eine $\lambda/4$ -lange Leitung transformiert einen Kurzschluß zu Leerlauf und umgekehrt und wird Lecherleitung genannt.



Da diese Transformationsbeziehungen nur für die Resonanzfrequenz (und eine gewisse Bandbreite um diese Frequenz herum) gilt, kann man Lecherleitungen als Bandpässe, bzw. Bandsperren verwenden.



Die Transformationseigenschaften von Leitungen wiederholen sich periodisch nach allen ungeraden Vielfachen ($3, 5, 7, \dots \cdot \lambda/4$). Gleiches gilt auch für die Betriebsfrequenz, da ein Kabel bei z.B. dreifacher Frequenz auch elektrisch dreimal so lang wirkt.

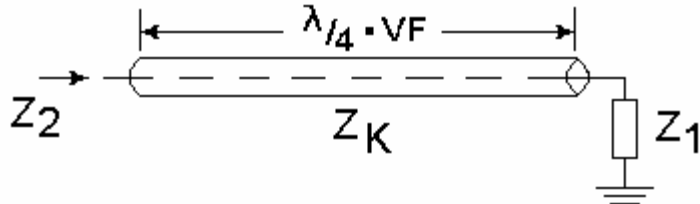
Beachte:

Nach Kabellängen gerader Vielfachen ($2, 4, 6, \dots \cdot \lambda/4$) heben sich die Transformationen wieder auf, d.h. nach $2 \cdot \lambda/4 (= \lambda/2)$ ist ein Kurzschluß wieder ein Kurzschluß und ein Leerlauf wieder ein Leerlauf, usw.... Ebenfalls gilt dies bei Frequenzverdopplung, -vierfachung....

Leitungstransformation

Kabel mit einer elektrischen Länge von $\lambda/4$ transformieren nicht nur Kurzschluß in Leerlauf und umgekehrt, sondern beliebige Impedanzen (Wellenwiderstände).

Wird eine bestimmte Impedanz Z_1 am Ende eines $\lambda/4$ -langes Kabels mit der Impedanz Z_K angeschlossen, so erhält man am Eingang dieses Kabels ein Z_2 von:



$$Z_2 = \frac{Z_K^2}{Z_1}$$

Ist die Impedanz des Kabels (Z_K) gleich der des Verbrauchers (Z_1), geschieht keine Transformation.

Um (unerwünschte) Transformationen auf dem Speisekabel zu vermeiden, sollte man aus diesem Grund immer ein Speisekabel mit der gleichen Impedanz, wie sie die Antenne besitzt, verwenden.

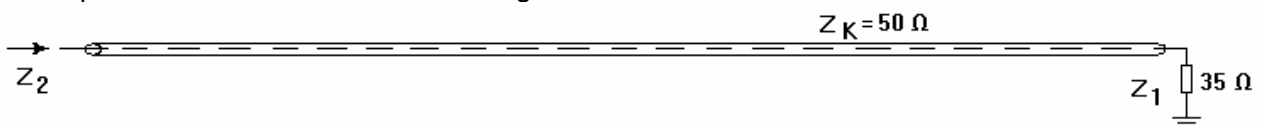
Hat man ein bestimmtes Z_1 (z.B. einer Antenne) gegeben, und will man dieses mit Hilfe eines $\lambda/4$ -Kabels auf ein Z_2 von 50Ω transformieren, verwendet man folgende Formel:

$$Z_K = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$$

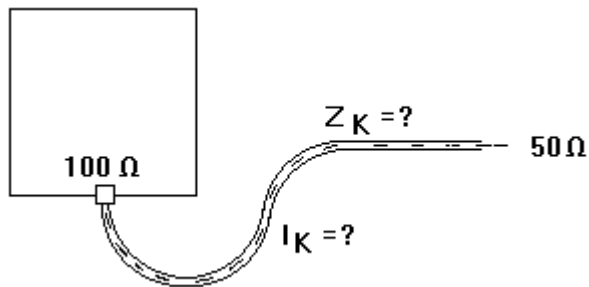
Beachte: Wie bei der Lecherleitung (Kurzschluß \leftrightarrow Leerlauf) wiederholen sich die Transformationseigenschaften periodisch nach allen ungeraden Vielfachen ($3, 5, 7, \dots \cdot \lambda/4$).
Genauso heben sich die Transformationen nach Längen gerader Vielfachen ($2, 4, 6, \dots \cdot \lambda/4$) wieder auf.

Beispiel:

Kabel "RG58"	$Z_K = 50 \Omega$	$VF = 0,66$
Abschlussimpedanz	$Z_1 = 35 \Omega$	Betriebsfrequenz $f = 145 \text{ MHz}$
Impedanz Z_2 bei verschiedenen Längen = ?		



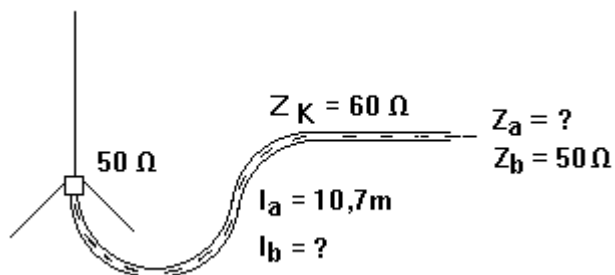
Übungsaufgaben zur Leitungstransformation



Aufgabe 1:

Eine Quad-Antenne für 21 MHz (? m-Band) hat eine Fußpunktimpedanz Z_1 von 100Ω . Diese soll mit Hilfe einer $\lambda/4$ -Leitungstransformation auf ein Z_2 von 50Ω transformiert werden. Es soll ein Kabel mit Voll-PE-Dielektrikum verwendet werden.

Berechne die mechanische Länge l_K und die Impedanz Z_K des Transformationskabels.



Aufgabe 2:

Eine Antenne für 14 MHz (? m-Band) hat eine Fußpunktimpedanz Z_1 von 50Ω . Diese Antenne wird - weil man kein 50Ω -Kabel zur Hand hat - über ein 60Ω -Kabel (Voll-PE) mit einer Länge von $10,7 \text{ m}$ angeschlossen.

- Berechne die Eingangs-Impedanz Z_a
- Berechne die nächstlängere Länge l_b , bei der der Eingang wieder 50Ω hat.

Übungsaufgaben zur Leitungstransformation (Lösungen)

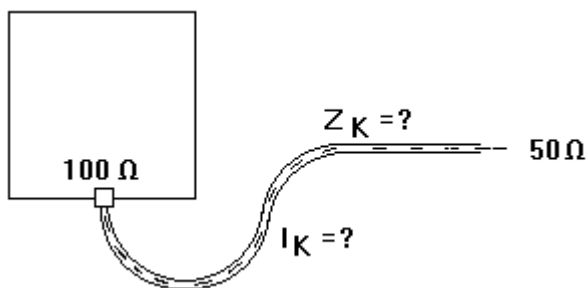
Beispiel von Seite 6

Gegeben sind $Z_1 = 35 \Omega$ und $Z_K = 50 \Omega$

$$\lambda_{\text{Kabel}} = \lambda_0 * VF = c / f * VF = 300 * 10^6 \text{ [m/s]} / (145 * 10^6 \text{ [1/s]}) * 0,66 = 1,36 \text{ m}$$

$Z_2 = Z_1$ bei $l = n * \lambda / 2$ mit $n = 1,2,3,\dots$ also $l = 0,68\text{m}, 1,36\text{m}, 2,04\text{m}$ usw.

$Z_2 = Z_K^2 / Z_1 = 2500 / 35 = 71,4 \Omega$ bei $l = \lambda / 4 + n * \lambda / 2$ also $l = 0,34\text{m}, 1,02\text{m}, 1,70\text{m}$ usw.



Aufgabe 1:

Eine Quad-Antenne für 21 MHz (? m-Band) hat eine Fußpunktimpedanz Z_1 von 100Ω . Diese soll mit Hilfe einer $\lambda/4$ -Leitungstransformation auf ein Z_2 von 50Ω transformiert werden. Es soll ein Kabel mit Voll-PE-Dielektrikum verwendet werden.

Berechne die mechanische Länge l_K und die Impedanz Z_K des Transformationskabels.

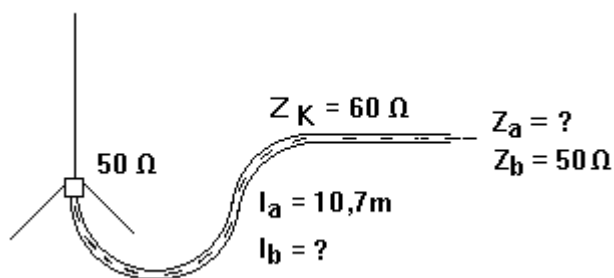
21 m ist das **15m-Band**

$$Z_K = \sqrt{Z_1 * Z_2} = \sqrt{50 * 100} = 70,7 \Omega$$

$$\lambda_0 = c / f = 300 * 10^6 \text{ [m/s]} / (21 * 10^6 \text{ [1/s]}) = 14,29 \text{ m}$$

$$VF = 0,66$$

$$l_K = VF * \lambda_0 / 4 = 0,66 * 14,29 \text{ [m]} / 4 = 2,36 \text{ m}$$



Aufgabe 2:

Eine Antenne für 14 MHz (? m-Band) hat eine Fußpunktimpedanz Z_1 von 50Ω . Diese Antenne wird - weil man kein 50Ω -Kabel zur Hand hat - über ein 60Ω -Kabel (Voll-PE) mit einer Länge von $10,7\text{m}$ angeschlossen.

- Berechne die Eingangs-Impedanz Z_a
- Berechne die nächstlängere Länge l_b , bei der der Eingang wieder 50Ω hat.

14 MHz ist der Anfang des **20m-Bandes**

$$\lambda_0 = c / f = 300 * 10^6 \text{ [m/s]} / (14 * 10^6 \text{ [1/s]}) = 21,43 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{Kabel}} = \lambda_0 * VF = 21,43 * 0,66 = 14,14 \text{ m}$$

$$l_a / \lambda_{\text{Kabel}} = 10,7 \text{ [m]} / 14,14 \text{ [m]} = 0,75 = 3/4$$

$$Z_a = Z_K^2 / Z_1 = 60^2 / 50 = 3600 / 50 = 72 \Omega$$

$$l_b = \lambda_{\text{Kabel}} / 4 * 4 = 14,14 \text{ m}$$