

Leitungen für analoge und digitale Signale

hohe Frequenzen, bis zu $\nu \approx 1$ GHz

$1 / \text{Taktfrequenz} \leq \text{Signallaufzeit}$

$\text{Signallaufzeit} > \text{Schaltflanken}$

hohe **Bandbreite** notwendig, speziell für steile Flanken;  \leftrightarrow Fourier-Analyse

$$y(x) = A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1)x, \quad k = \frac{\text{Leitungsbandbreite}}{\text{Signalfrequenz}}$$

Verformung der Signale durch Übertragung !

Über- und Unter-Schwinger $\geq 9\%$ (Gibbsches - Phänomen)

Kapazität, Induktivität und Ohmscher Widerstand (Leitwert)

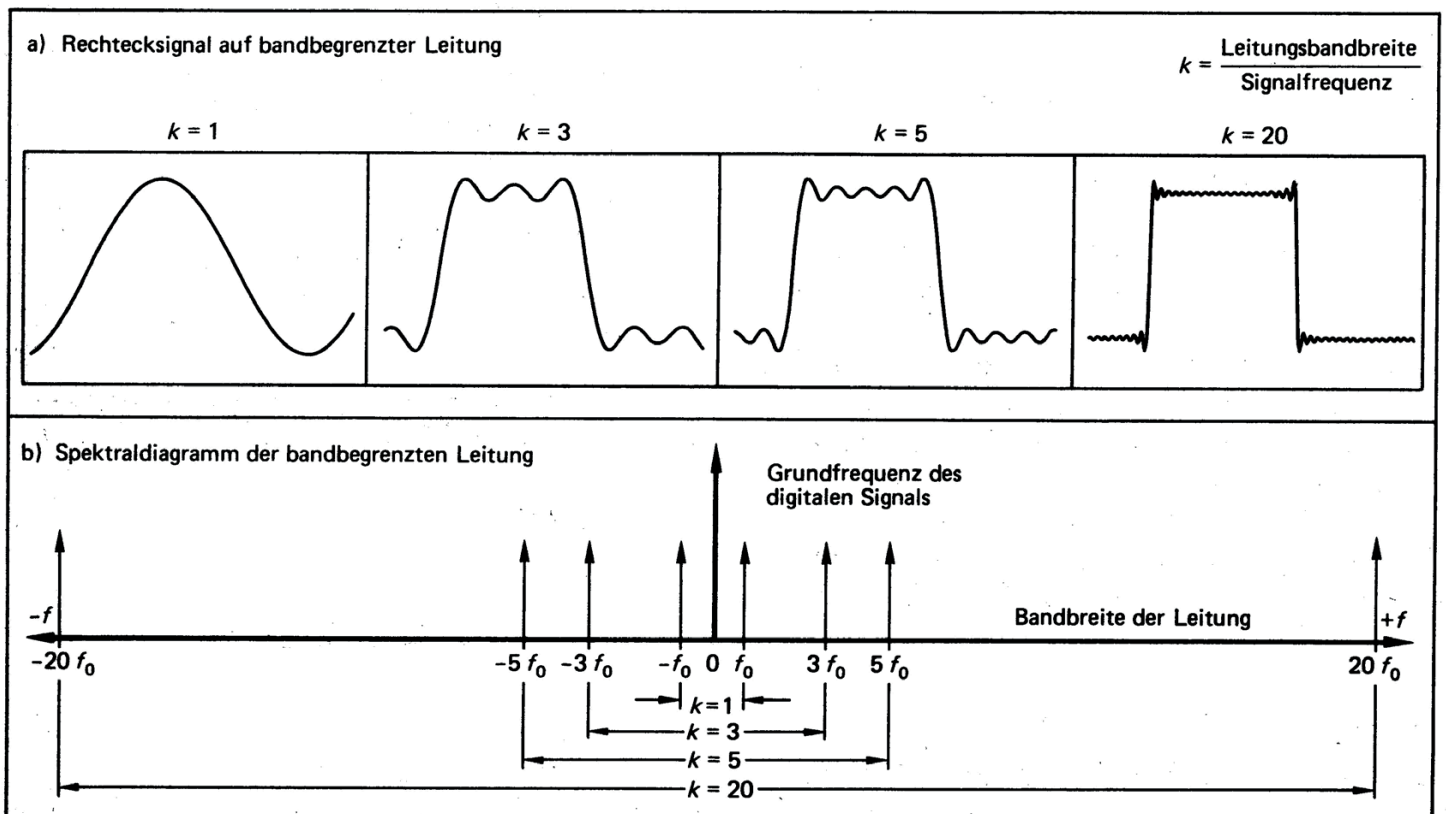


Bild 13-10. Überschwinger durch Bandbegrenzung.

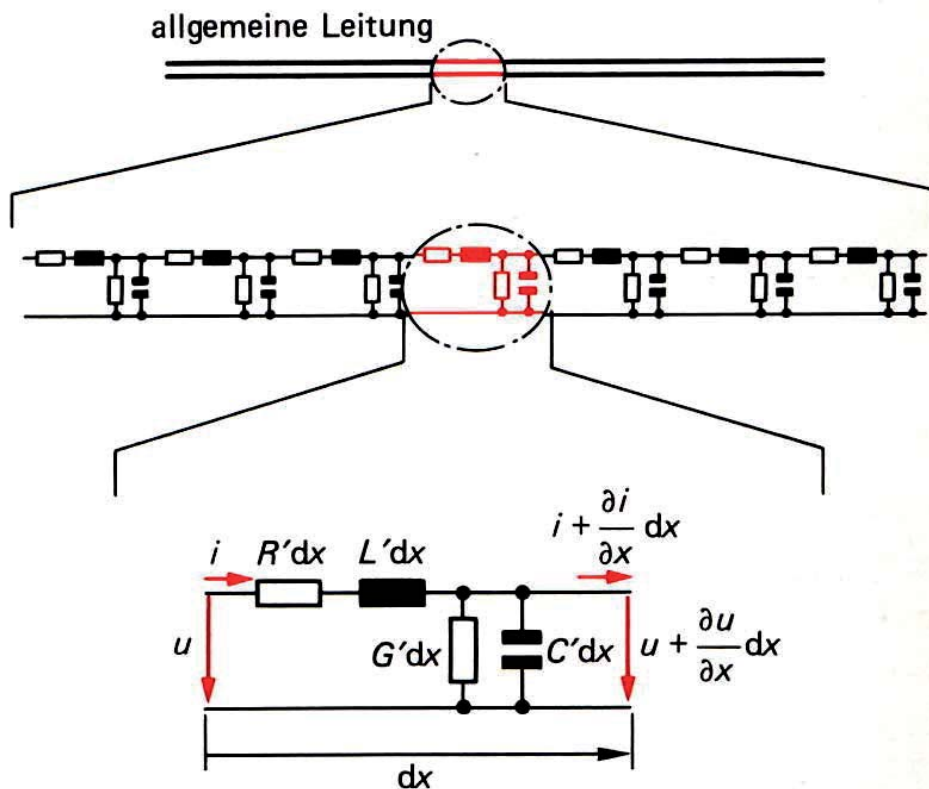
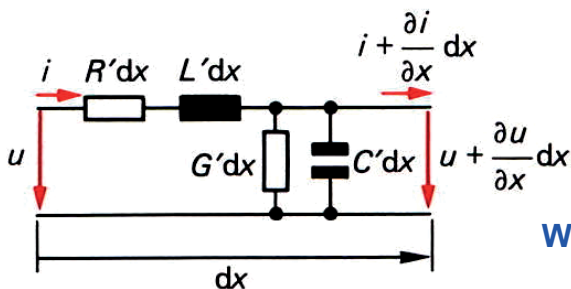


Bild 13-11. Leitungselement einer homogenen Leitung.

Telegrafengleichung / RG 58/U – Koaxialkabel

Kapazitätsbelag	$\frac{\Delta C}{\Delta x} = C' = 1,017 \times 10^{-10} \frac{F}{m}$	Induktionsbelag	$\frac{\Delta L}{\Delta x} = L' = 2,543 \times 10^{-7} \frac{H}{m}$
Widerstandsbelag	$\frac{\Delta R}{\Delta x} = R' = 1,2915 \frac{\Omega}{m}$	Ableitungsbelag	$\frac{\Delta G}{\Delta x} = G' \left[\frac{1}{\Omega m} = \frac{S}{m} \right]$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -(R' + j\omega L') I \approx -L' \frac{\partial I}{\partial t} \quad \frac{\partial I}{\partial x} = -(G' + j\omega C') U \approx -C' \frac{\partial U}{\partial t} \quad (\text{verlustfreie Leitung})$$



$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -L' \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} = L' C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad | \text{ analog}$$

Wellengleichung $\rightarrow v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} = 1,966 \times 10^8 \frac{m}{s} = 0,65 c$

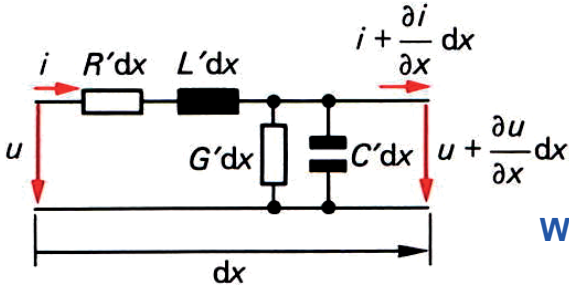
allgemein: $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = R' G' U + (R' C' + L' G') \frac{\partial U}{\partial t} + (L' C') \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$

Telegrafengleichung / RG 58/U – Koaxialkabel

Kapazitätsbelag $\frac{\Delta C}{\Delta x} = C' = 1,017 \times 10^{-10} \frac{F}{m}$ Induktionsbelag $\frac{\Delta L}{\Delta x} = L' = 2,543 \times 10^{-7} \frac{H}{m}$

Widerstandsbelag $\frac{\Delta R}{\Delta x} = R' = 1,2915 \frac{\Omega}{m}$ Ableitungsbelag $\frac{\Delta G}{\Delta x} = G' \left[\frac{1}{\Omega m} = \frac{S}{m} \right]$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -(R' + j\omega L') I \approx -L' \frac{\partial I}{\partial t} \quad \frac{\partial I}{\partial x} = -(G' + j\omega C') U \approx -C' \frac{\partial U}{\partial t} \quad (\text{verlustfreie Leitung})$$



$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -L' \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} = L' C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad | \text{ analog}$$

Wellengleichung $\rightarrow v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = 1,966 \times 10^8 \frac{m}{s} = 0,65 c$

allgemein: $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = R' G' U + (R' C' + L' G') \frac{\partial U}{\partial t} + (L' C') \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$

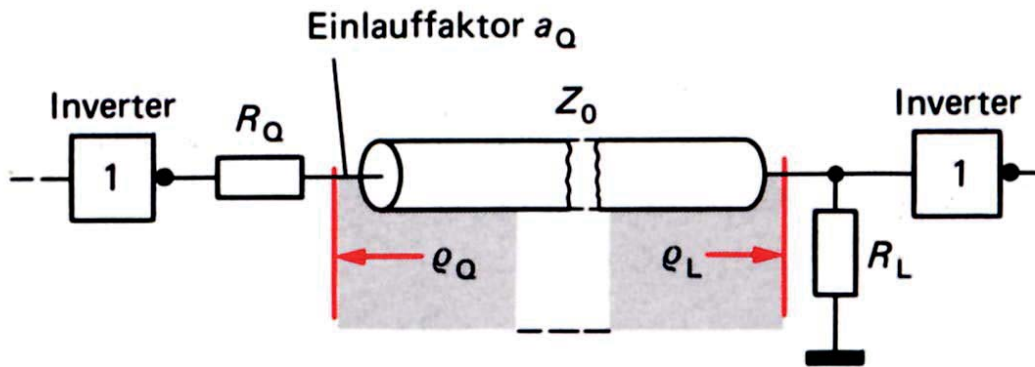
Wellenwiderstand: $Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}} = 50 \Omega \quad (\text{für RG58/U})$

Datenblatt des Koaxialkabels RG 58 CU	
Aufbau	CU SN = Kupfer verzinkt
Innenleiter	19 x 0,19 mm CU SN
Isolation	2,95 mm PE ± 0,1
Außenleiter	Cu-Geflecht verzinkt
Mantel	4,95 mm PVC-schwarz ± 0,2
Bruchlast	139 N
Biegeradius min.	25 mm
Kupferzahl	20 kg/km
Temperaturbereich	-20°C bis +80°C
Elektrische Daten	
Impedanz	50 Ohm ± 3
Kapazität	103 pF/m
Verkürzungsfaktor	0,66
Schleifenwiderstand	53 Ohm/km

Dämpfung bei 20°C Maßeinheit: dB/100 m	
10 MHz	4,7
20 MHz	6,6
50 MHz	10,7
100 MHz	15,3
200 MHz	22,8
500 MHz	37,0
800 MHz	48,8
1000 MHz	55,5



<http://www.kabel-kusch.de/Koaxkabel/RG58-59-62/rg-58-cu.htm>



Für die Anpassung gilt $R_Q = Z_0 = R_L$

Bild 13-13. Leitungsanpassung.

Reflexionen

Falls Abschlußwiderstand $R_L \neq Z_0$ ergeben sich Reflexionen!

Berechnung des Reflexionskoeffizienten ρ_L :

U_1 Eingangsspannung I_1 Eingangsstrom
 U_r reflektierte Spannung I_r reflektierter Strom

es gilt: $U_1 + U_r = (I_1 + I_r) R_L = \left[\frac{U_1}{Z_0} - \frac{U_r}{Z_0} \right] R_L$

$\rightarrow Z_0 U_1 + Z_0 U_r = U_1 R_L - U_r R_L$ und $U_r = U_1 \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}$

$\rho_L = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}$ Reflexionskoeffizient, $\rho_Q = \frac{R_Q - Z_0}{R_Q + Z_0}$ analog

Anpassung: am Ausgang (der Leitung) durch Parallelwiderstand R_L
 am Eingang durch Serienwiderstand R_Q

Für $R_Q = Z_0$ nur halbe Spannung auf Leitung !

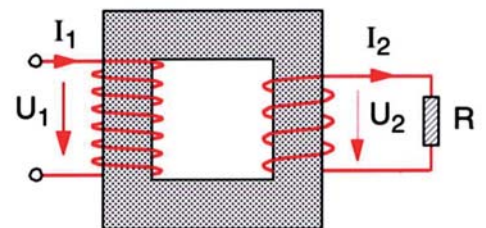
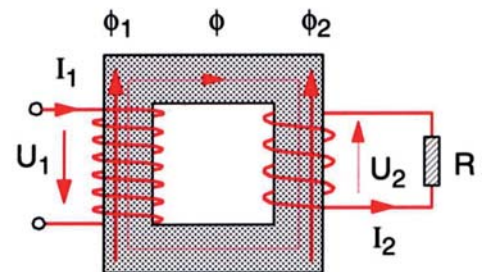
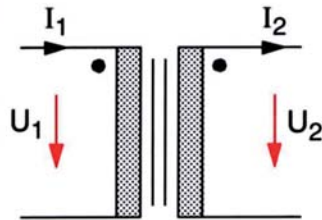
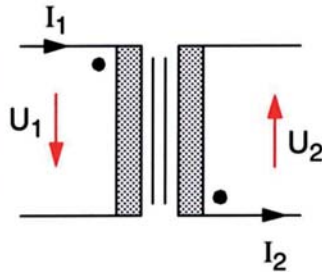
Bei abgeschlossener Leitung kann auf R_Q verzichtet werden.

	Schaltung	Bemerkung	ρ_L	mechanische Welle
offene Leitung		$R_L = \infty$	1	
kurzgeschlossene Leitung		$R_L = 0$	-1	
falsch abgeschlossene Leitung		$R_L > Z_0$	< 1	
richtig abgeschlossene Leitung		$R_L = Z_0$	0	

Quellenanpassung durch Transformator

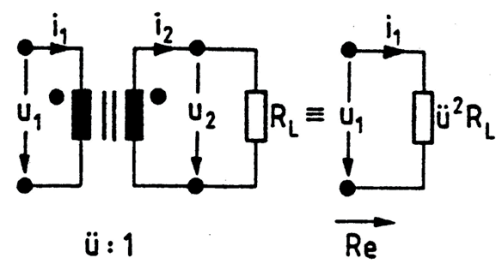
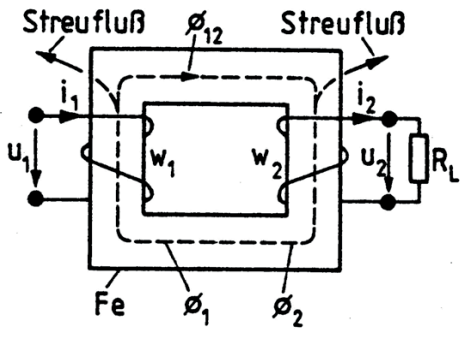
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1 \frac{d\Phi_1}{dt}}{N_2 \frac{d\Phi_2}{dt}} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

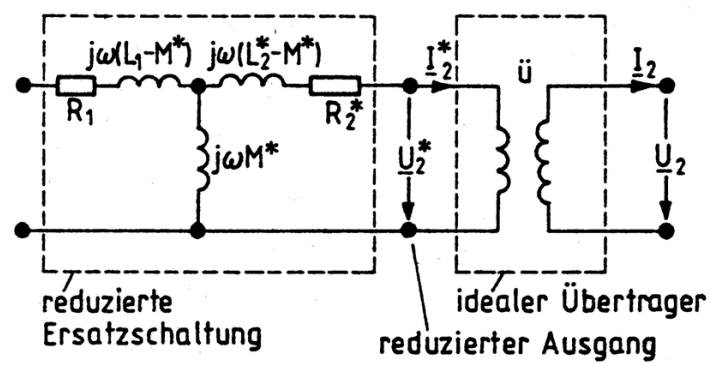
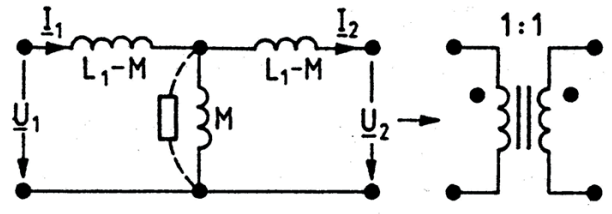
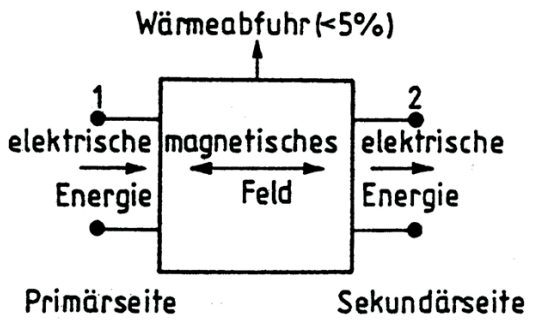


$$R_e = \frac{U_1}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L$$

"Widerstandstransformation"

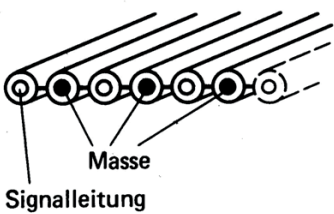
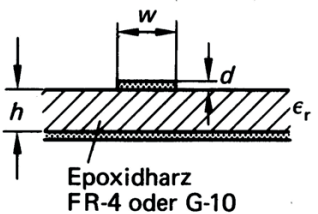
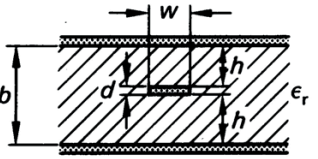


Transformator
Grundschaltung
und Energie-
umwandlung



Ersatzschaltungen

Leitung	Geometrie	Wellenwiderstand Z	Bemerkungen
frei verdrahtete Leitung über einer Massefläche („wire over ground“)		$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{4h}{d} \right)$	gilt für $h \gg d$
Koaxial-Kabel		$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} \right)$	Der Wellenwiderstand koaxialer Kabel wird meist von den Herstellern bereits festgelegt.
verdrillte Leitung (Twisted Pair-Leitung)		$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{2D}{d} \right)$	Neben den geometrischen Bedingungen hängt Z auch von der Anzahl Schleifen pro cm ab.

<p>Flachbandkabel</p>	 <p>Masse Signalleitung</p>		<p>Wechseln sich Masse- und Signalleitungen ab, so existiert ein bestimmter Wellenwiderstand. Dieser ist von der Geometrie und dem Material abhängig.</p>
<p>Streifenleiter (Microstrip-Leitung)</p>	 <p>Epoxidharz FR-4 oder G-10</p>	$Z = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left(\frac{5,98 h}{0,8 w + d} \right)$	<p>Am meisten verwendete Technik. Gilt auch für Mehrlagen-Leiterplatten (Multi-Layer).</p>
<p>zweiseitig geschirmter Streifenleiter (Strip-Leitung oder Triplate-Streifenleiter)</p>		$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{4 b}{0,67 w \pi \left(0,8 + \frac{d}{w} \right)} \right)$	<p>Wird nur in besonderen Fällen verwendet, wie beispielsweise in der HF-Technik.</p>