Überblick

- Grundlagen: Spannung, Strom, Widerstand, IV-Kennlinien
- Elektronische Messgeräte im Elektronikpraktikum
- Passive Filter
- Signaltransport im Kabel
- Transistor
- Operationsverstärker
- Sensorik
- PID-Regler
- Lock-In-Verstärker
- Phase-Locked Loop
- Digitalelektronik
- Digital-Analog- / Analog-Digital-Wandlung
- Mikrocontroller
- Labview und Virtual Instruments
- Physik in der Elektronik: Ausblick zur Festkörperphysik

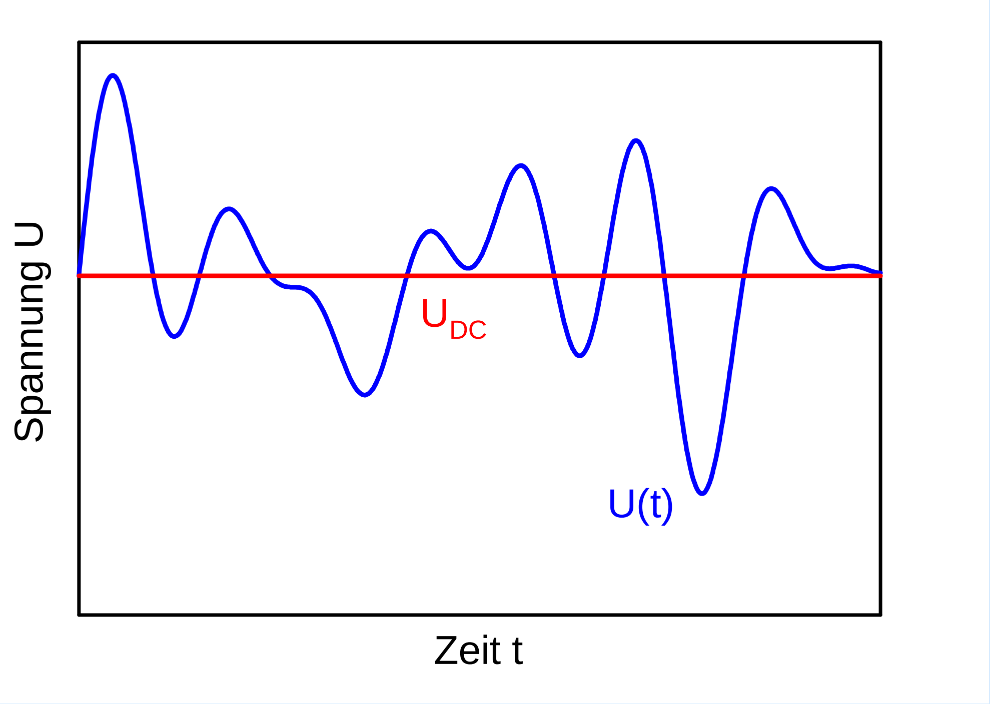
Wechselspannungen und -ströme

Allgemeine zeitveränderliche Signale (z. B. Spannungen):

$$U(t) = U_{DC} + U_{AC}(t)$$

Gleichspannungs-
anteil

Wechselspannungs-
anteil



dabei gilt:

$$\langle U \rangle = U_{DC}$$

und

$$\langle U_{AC} \rangle = 0$$

Wechselspannungen und -ströme

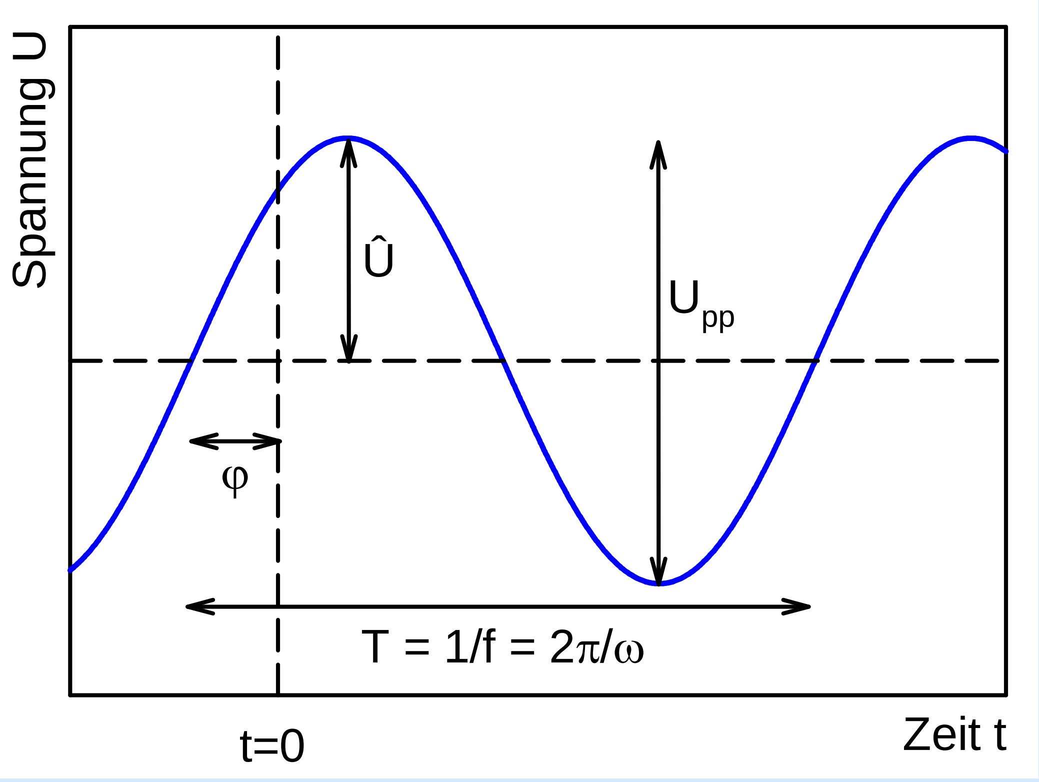
Spezialfall: Sinusschwingung

$$U(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Amplitude: $\hat{U}$
oft auch: $U_{pp} = 2\hat{U}$

Frequenz: $f = \omega / 2\pi$
oder Periode: $T = 1 / f$

Phase: φ



Wechselspannungen und -ströme

Effektivwert = Gleichspannung, die im Mittel gleiche Leistung ergibt
(auch RMS = root mean square)

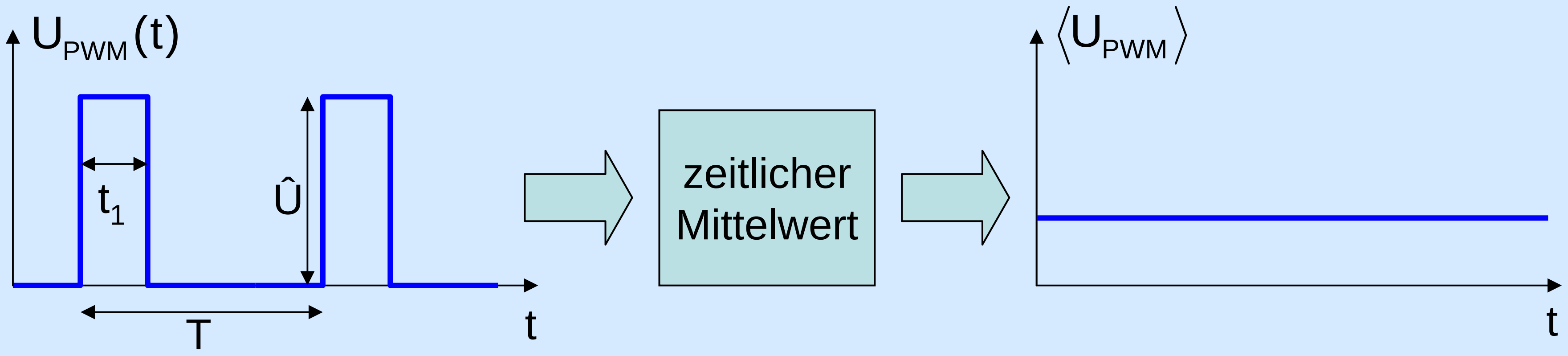
$$U_{eff} = U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U^2(t)\,dt} \overset{\text{sinus}}{=} \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{U}$$

Betragsmittelwert, Gleichrichtwert, average rectified value

$$U_{bmw} = U_{arv} = \frac{1}{T}\int_0^T |U(t)|\,dt \overset{\text{sinus}}{=} \frac{2}{\pi}\hat{U}$$

Wechselspannungen und -ströme

Anwendung des Gleichrichtwertes: PWM (Pulsweitenmodulation)



$$\langle U_{PWM} \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T \left| U_{PWM}(t) \right| dt = \frac{t_1}{T}\hat{U}$$

Anwendungen: Digital-Analog-Umsetzer
Dimmer
Motorsteuerung
Frequenzumrichter

Wechselspannungen und -ströme

Darstellung periodischer Signale als Fourier-Reihe:

$$U(t) = U_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} s_n \sin(n\omega_0 t) + c_n \cos(n\omega_0 t)$$

Grundfrequenz: ω_0

Amplitude der Oberwelle $n\omega_0$: $\sqrt{s_n^{\ 2} + c_n^{\ 2}}$

Phase der Oberwelle $n\omega_0$: $\arctan \frac{s_n}{c_n}$

Wechselspannungen und -ströme

Komplexe Fourier-Reihe:

$$U(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{in\omega_0 t}$$

mit komplexen Koeffizienten: a_n

Darstellung der (Co)Sinusschwingung mit Phase: $U(t) = \hat{U} e^{i(\omega t + \varphi)}$

bzw: $I(t) = \hat{I} e^{i(\omega t + \gamma)}$

Die physikalische Messgröße ist der Realteil von U(t) bzw. I(t).

Komplexer Widerstand

Wiederholung: für eine reelle Spannung U und einen reellen Strom I gilt:

$$R = \frac{U}{I}$$

Erweiterung für komplexe Darstellung mit $U(t) = \hat{U}e^{i\omega t},\ I(t) = \hat{I}e^{i(\omega t+\varphi)}$

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}}e^{-i\varphi} = R + iX$$

Z: **Impedanz (komplex)**
R: **Widerstand (Realteil)**
X: **Reaktanz (Imaginärteil)**

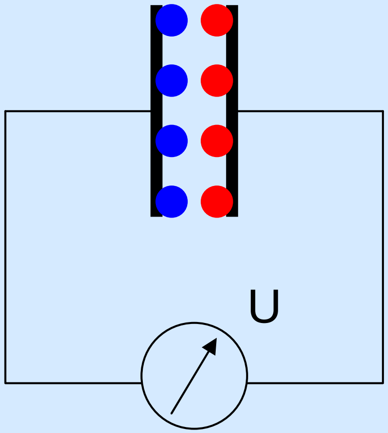
Für die (komplexe) Impedanz gelten die gleichen Regeln wie für den (reellen) Widerstand, d.h. Ohm'sches Gesetz, Reihenschaltung, Parallelschaltung, Thévenin-Theorem, Norton-Theorem...

Komplexer Widerstand

Bauelemente mit komplexer Impedanz: Kondensator

z.B. Plattenkondensator

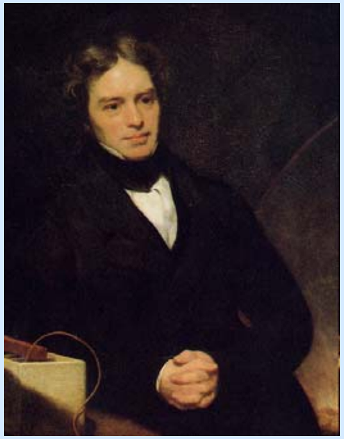
neg. und pos. Ladungen Q



Kapazität des Kondensators:

C = Q / U

[C] = 1 C/V = 1 F (Farad)

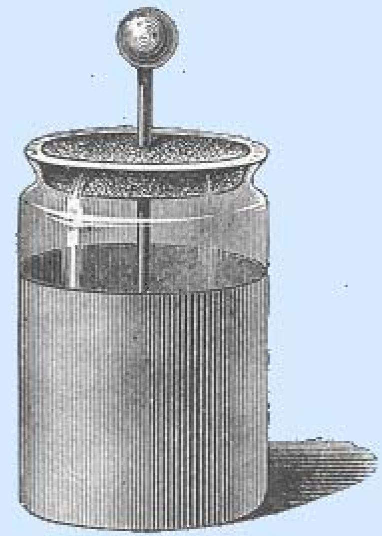


Michael Faraday
1791 - 1867

Komplexer Widerstand

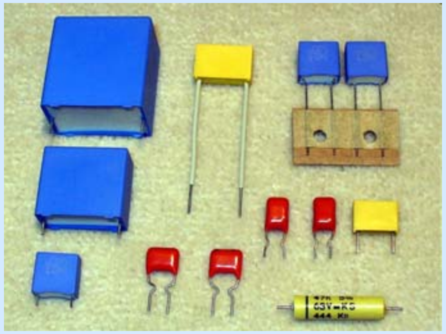
Bauelemente mit komplexer Impedanz: Kondensator

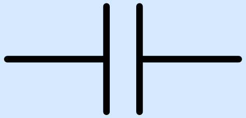
Leidener Flasche (Pieter van Musschenbroek,
Ewald J. G. von Kleist)

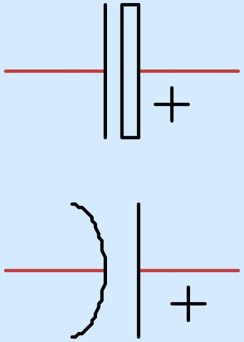


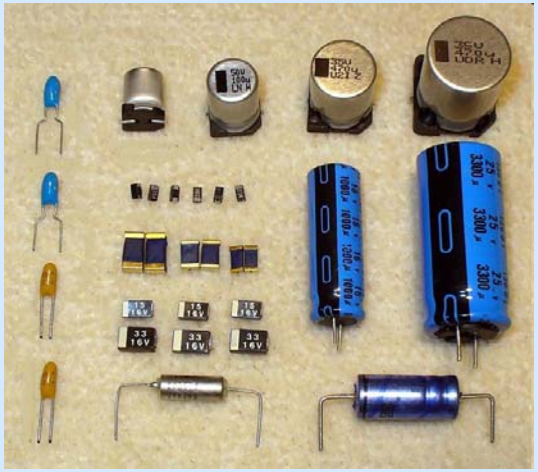
Handelsübliche Kondensatoren

Folienkondensatoren (z.B. Polystyrol = MKS)









Komplexer Widerstand

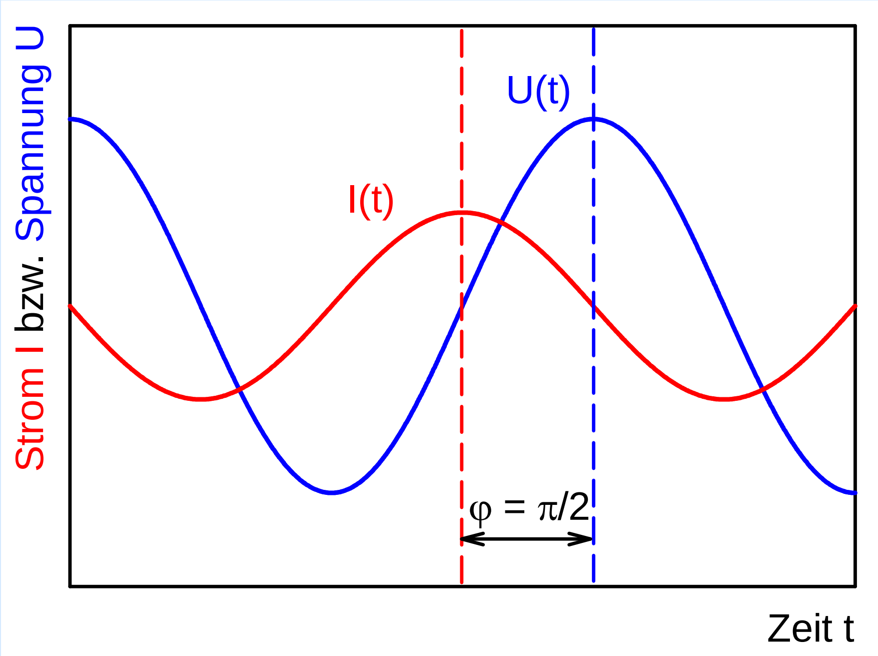
Bauelemente mit komplexer Impedanz: Kondensator

Was ist am Kondensator jetzt komplex?

$$I = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = C\dot{U}$$

$$U(t) = \hat{U}e^{i\omega t} \quad \Rightarrow \quad \dot{U} = i\omega\hat{U}e^{i\omega t}$$

$$I(t) = i\omega C \cdot \hat{U}e^{i\omega t} = i\omega C \cdot U(t)$$



$$Z_C = X_C = \frac{U}{I} = \frac{1}{i\omega C}$$

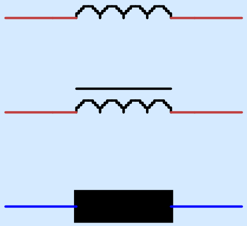
oder: $I(t) = \hat{U}\omega C e^{i\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}$

d.h. der Strom eilt der Spannung um 90° voraus

Komplexer Widerstand

Bauelemente mit komplexer Impedanz: Induktivität, Drossel, Spule

$$U = L\frac{dI}{dt} = L\dot{I}$$

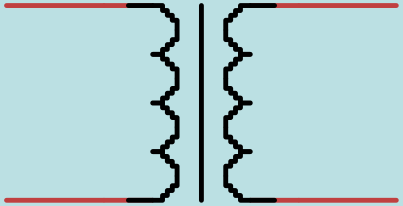


Induktivität: L

[L] = 1 H (Henry)

Joseph Henry
1797 - 1878

Spezialfall: Transformator



Komplexer Widerstand

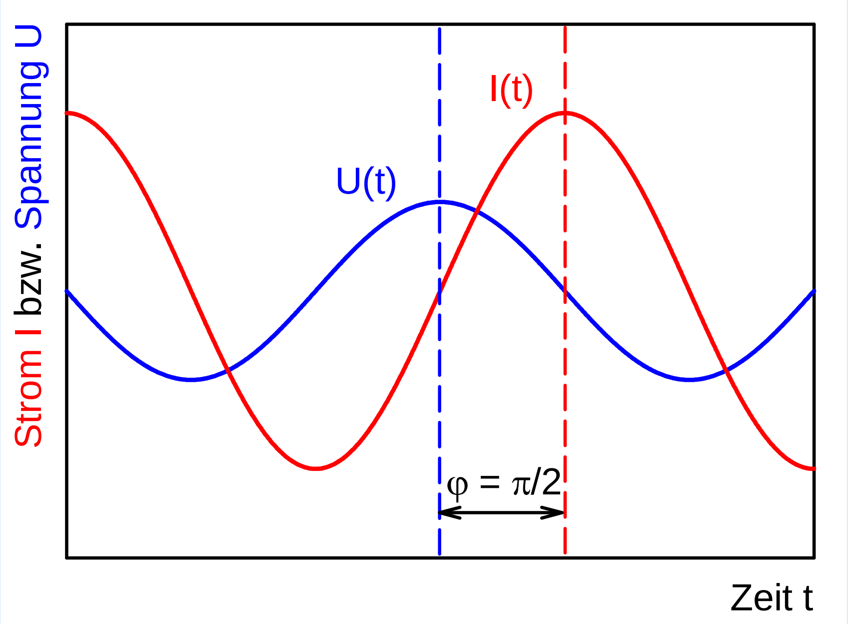
Bauelemente mit komplexer Impedanz: Induktivität, Drossel, Spule

Was ist an der Induktivität jetzt komplex?

$$U = L\frac{dI}{dt} = L\dot{I}$$

$$I(t) = \hat{I}e^{i\omega t} \quad \Rightarrow \quad \dot{I} = i\omega\hat{I}e^{i\omega t}$$

$$U(t) = i\omega L \cdot \hat{I}e^{i\omega t} = i\omega L \cdot I(t)$$

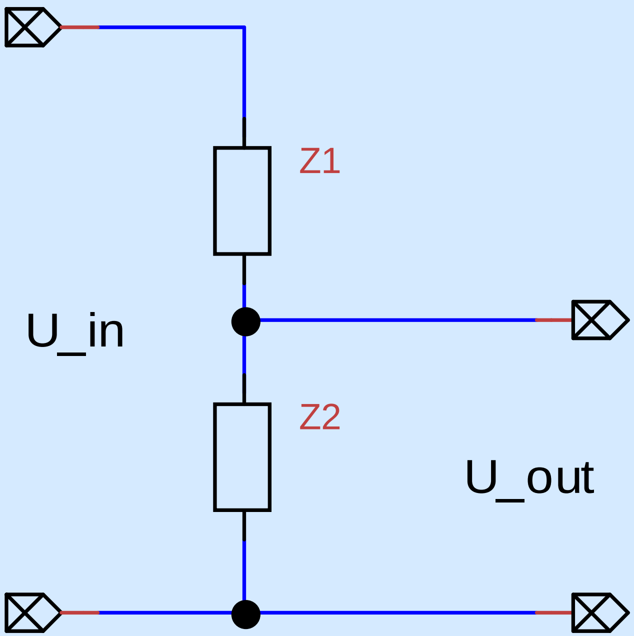


$$\boxed{Z_L = X_L = \frac{U}{I} = i\omega L}$$

oder: $U(t) = \hat{I}\omega L e^{i\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}$

d.h. der Strom hinkt der Spannung um 90° hinterher

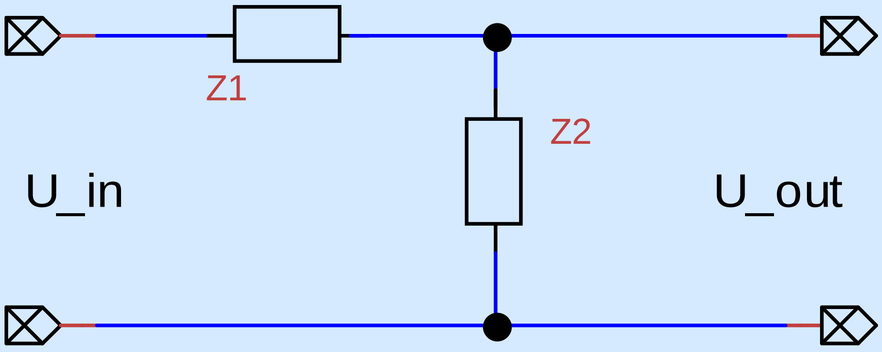
Spannungsteiler: jetzt komplex



$$U_{out} = \underbrace{\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}}_{=Z} U_{in}$$

$Z = U_{out} / U_{in}$ ist i. Allg. komplex (Betrag und Phase) und frequenzabhängig!

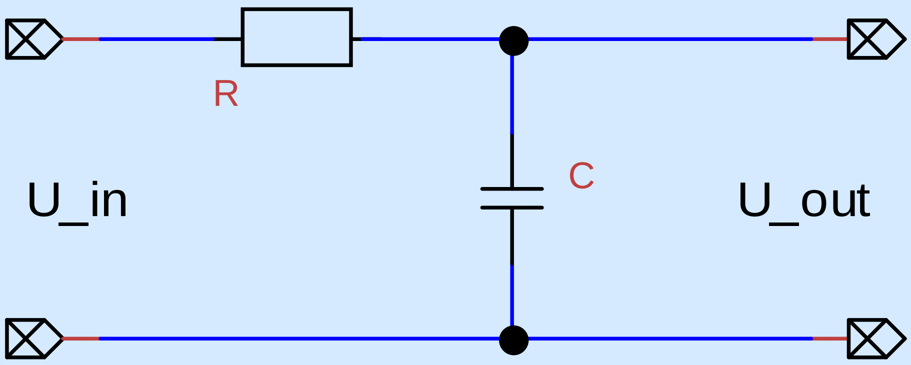
Spannungsteiler: jetzt komplex



$$U_{out} = \frac{Z_2}{\underbrace{Z_1 + Z_2}_{=Z}} U_{in}$$

$Z = U_{out} / U_{in}$ ist i. Allg. komplex (Betrag und Phase) und frequenzabhängig!

Tiefpass-Filter (1. Ordnung)



$$Z = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{X_C}{R + X_C} = \frac{1/i\omega C}{R + 1/i\omega C} = \frac{1}{1 + i\omega RC} = \frac{1 - i\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}$$

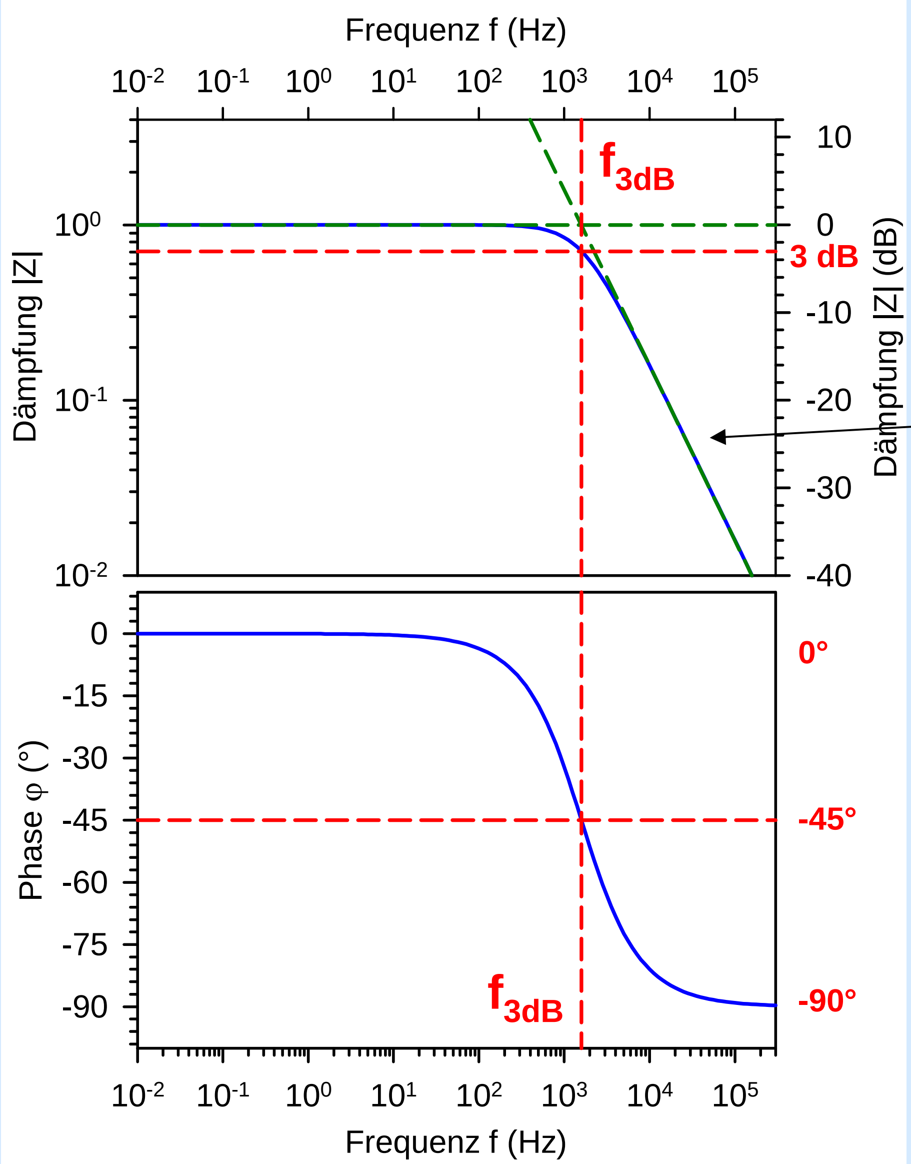
Amplitude (Dämpfung): $$|Z| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

Phase: $$\tan\varphi = -\omega RC$$

Tiefpass-Filter (1. Ordnung)

$$\left|Z\right| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

$$\tan\varphi = -\omega RC$$



$$\left|Z\right| \approx \frac{1}{\omega RC}$$

~ 1 Dekade/Dekade

~ 20 dB/Dekade

~ 6 dB/Oktave

$$\omega_{3dB} = 2\pi f_{3dB} = \frac{1}{RC}$$

Logarithmisches Pegelmaß (deziBel)

Verhältnis von Amplituden häufig sinnvoll in logarithmischem Maßstab:

$V^* = \log_{10}(P_2/P_1)$ (P_1 und P_2 sind zwei Leistungswerte)
$[V^*] = 1$ B (Bel)

1 B spielt nahezu keine Rolle; stattdessen wird dB (deziBel) häufig verwendet (10 dB = 1 B):

$V = 10 \log_{10}(P_2/P_1)$
$[V] = 1$ dB (deziBel)

Merke: dB ist immer bezogen auf das Verhältnis von Leistungswerten!

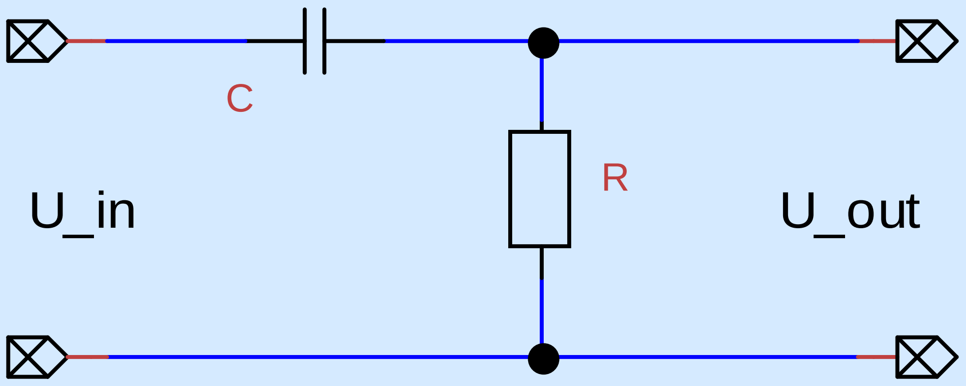
da $P \sim U^2$ folgt für Spannungsverhältnisse: $V = 10 \log_{10}(U_2^2/U_1^2) = 20 \log_{10}(U_2/U_1)$
analog für Stromverhältnisse

Logarithmisches Pegelmaß (deziBel)

Besondere (merkenswerte) Werte:

Verhältnis bezogen auf	Leistungen	Spannungen bzw. Ströme
0.1	-10 dB	-20 dB
0.5	≈ -3 dB	≈ -6 dB
2	≈ 3 dB	≈ 6 dB
10	10 dB	20 dB

Hochpass-Filter (1. Ordnung)



$$Z = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R}{R + X_C} = \frac{R}{R + 1/i\omega C} = \frac{i\omega RC}{1 + i\omega RC} = \frac{\omega RC(\omega RC + i)}{1 + (\omega RC)^2}$$

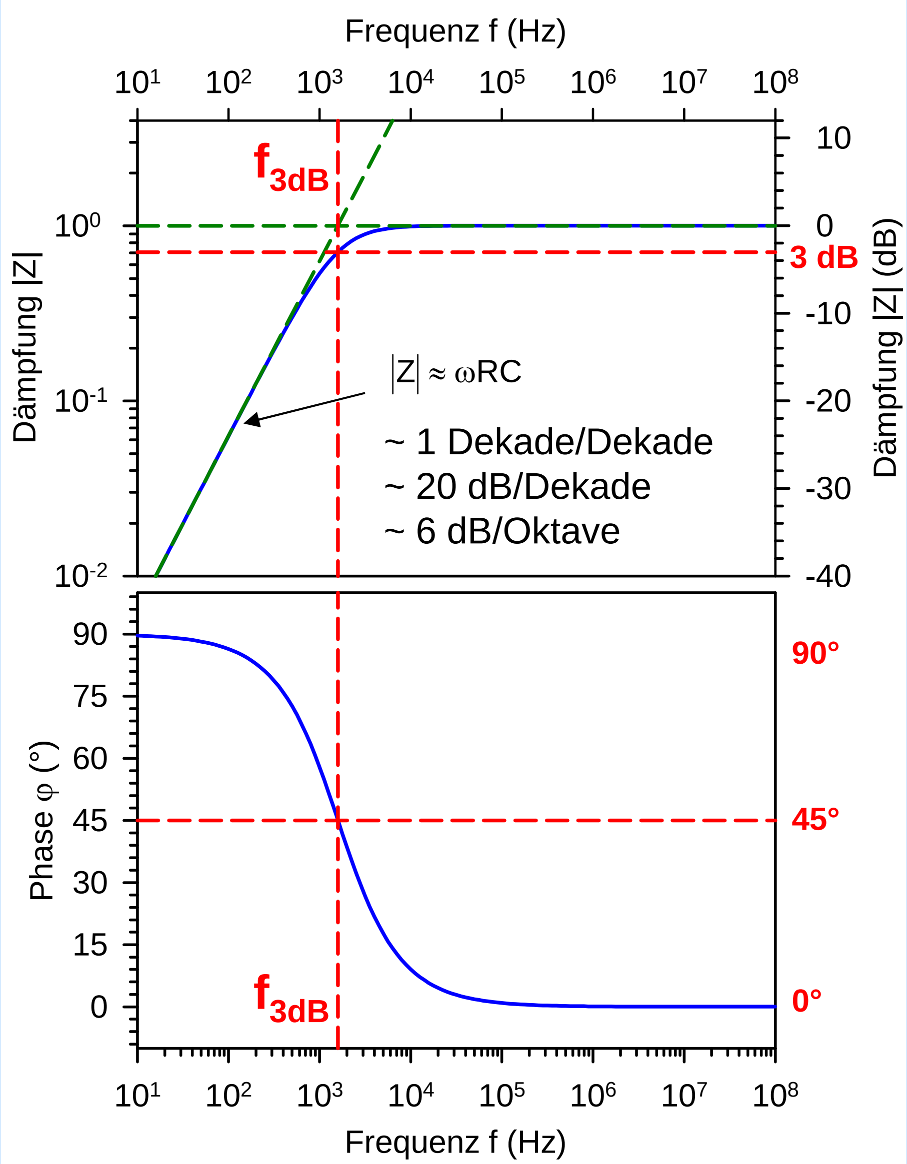
Amplitude (Dämpfung): $$|Z| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

Phase: $$\tan\varphi = \frac{1}{\omega RC}$$

Hochpass-Filter (1. Ordnung)

$$|Z| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

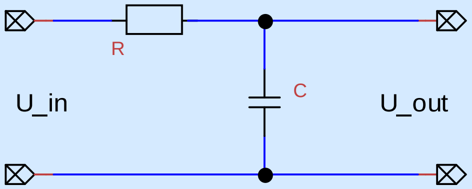
$$\tan\varphi = \frac{1}{\omega RC}$$

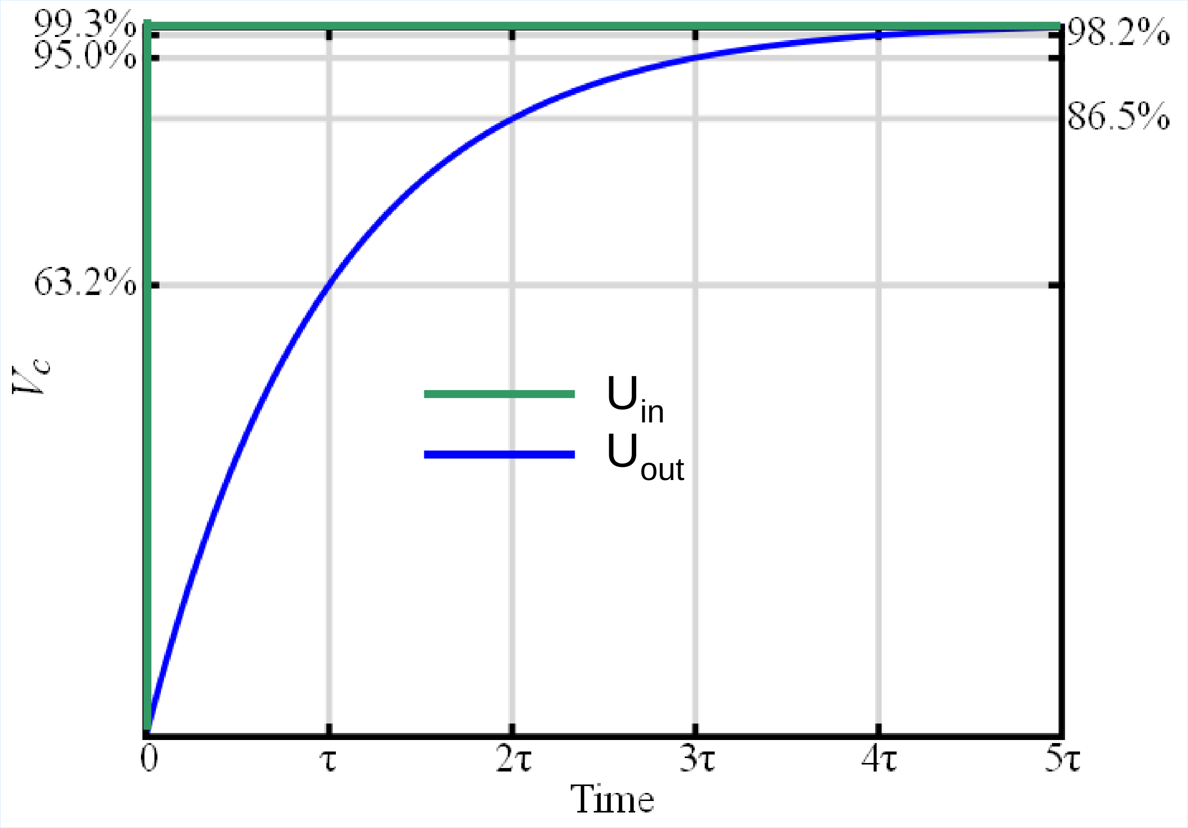


$$\omega_{3dB} = 2\pi f_{3dB} = \frac{1}{RC}$$

Tief-/Hochpass in der Zeitdomäne

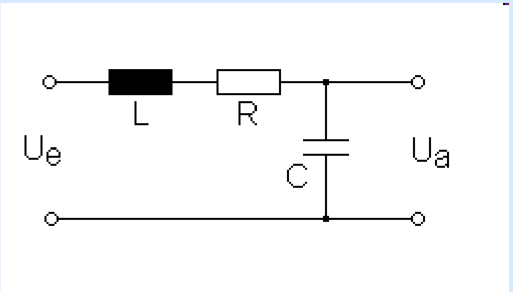
Sprungantwort eines Tiefpass-Filters:



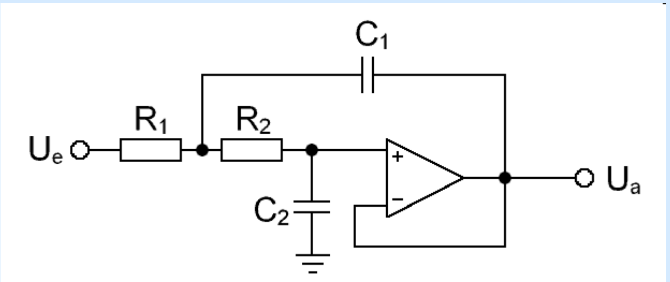


Filter höherer Ordnung

Tiefpass 2. Ordnung (passiv)
Dämpfung 12 dB/Oktave



Tiefpass 2. Ordnung (aktiv)
Dämpfung 12 dB/Oktave



Bandpass-Filter (passiv)

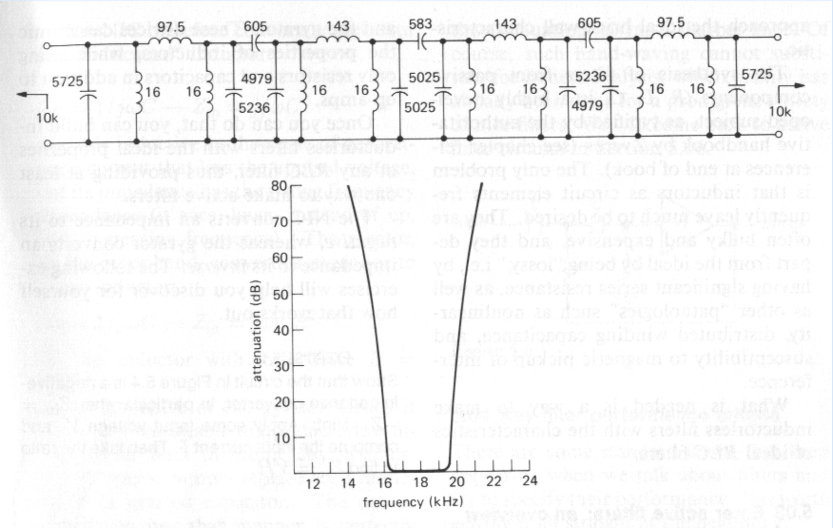
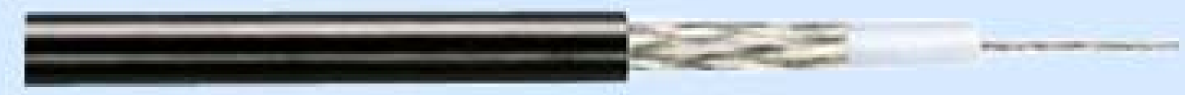


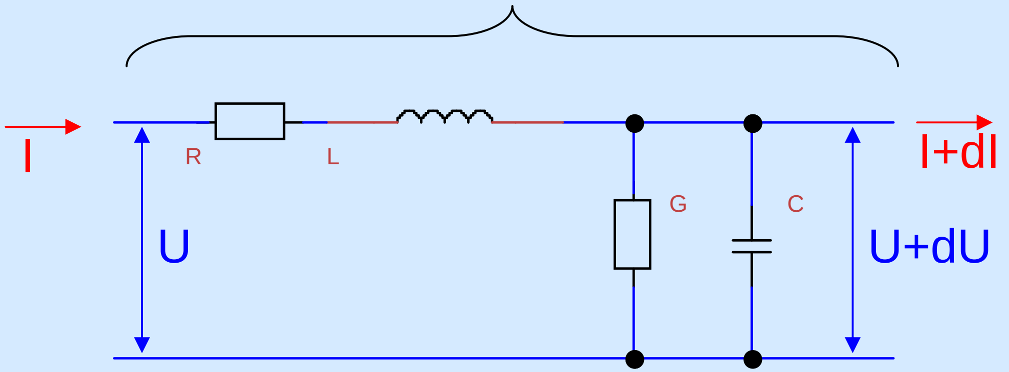
Figure 5.3. An unusually good passive bandpass filter implemented from inductors and capacitors (inductances in mH, capacitances in pF). Bottom: Measured response of the filter circuit. [Based on Figs. 11 and 12 from Orchard, H. J., and Sheahan, D. F., *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-5, No. 3 (1970).]

Überblick

- Grundlagen: Spannung, Strom, Widerstand, IV-Kennlinien
- Elektronische Messgeräte im Elektronikpraktikum
- Passive Filter
- Signaltransport im Kabel
- Transistor
- Operationsverstärker
- Sensorik
- PID-Regler
- Lock-In-Verstärker
- Phase-Locked Loop
- Digitalelektronik
- Digital-Analog- / Analog-Digital-Wandlung
- Mikrocontroller
- Labview und Virtual Instruments
- Physik in der Elektronik: Ausblick zur Festkörperphysik

Signaltransport im Kabel





$$dU = -\left(R' dx \cdot I + L' dx \cdot \frac{dI}{dt} \right)$$

$$dI = -\left(G' dx \cdot U + C' dx \cdot \frac{dU}{dt} \right)$$

Telegraphengleichungen:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\left(R' + L' \frac{\partial}{\partial t} \right) I$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -\left(G' + C' \frac{\partial}{\partial t} \right) U$$

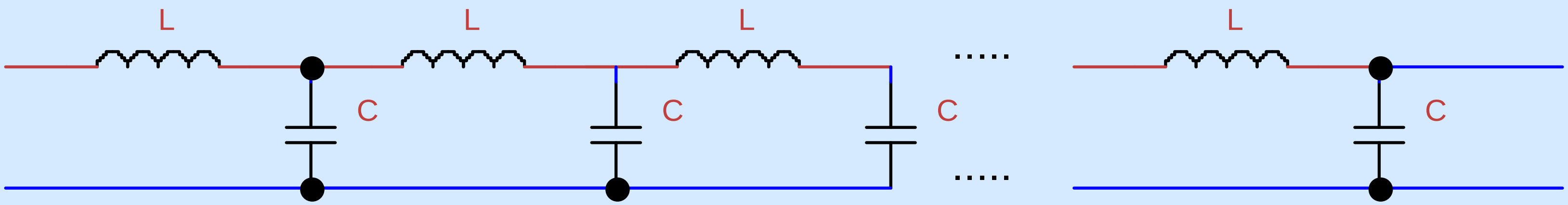
Ebene-Wellen-Ansatz:

$$U(t) = \hat{U} e^{i(\omega t - kx)}$$

$$I(t) = \hat{I} e^{i(\omega t - kx)}$$

Signaltransport im Kabel

Ersatzschaltbild für langes Kabel (ohne R und G):



Einsetzen

$$k\hat{U} = \omega L'\hat{I}$$

$$k\hat{I} = \omega C'\hat{U}$$

$$k = \pm\omega\sqrt{L'C'} \qquad (\lambda = 2\pi/|k|)$$

Wellenwiderstand des Kabels: $Z = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$

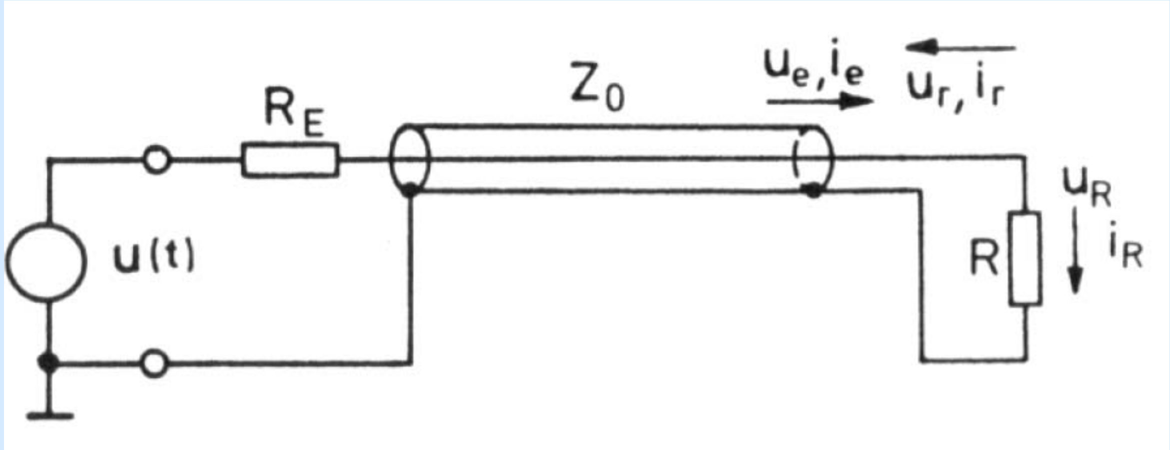
Ausbreitungsgeschwindigkeit: $c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$

Beispiel: RG58

Frequenz f	Wellenlänge λ
1 Hz	200000 km
1 kHz	200 km
1 MHz	200 m
1 GHz	20 cm
10 GHz	2 cm

Signaltransport im Kabel

Endliches Kabel mit Lastwiderstand:



Spannung und Strom am/durch den Lastwiderstand R:

$$U_R = U_e + U_r$$

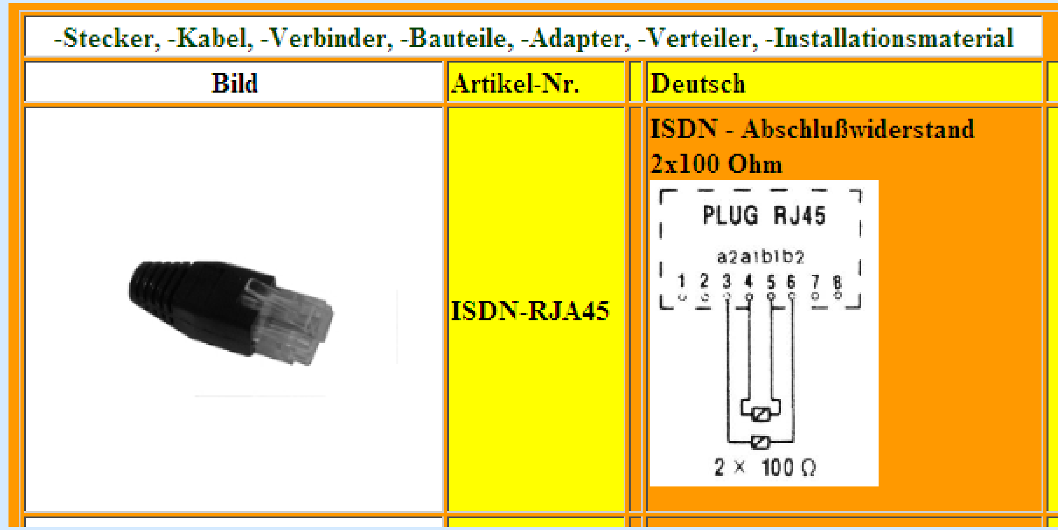
$$I_R = I_e - I_r$$

am Kabelende gilt: $Z = \frac{U_e}{I_e}$; $Z = \frac{U_r}{I_r}$; $R = \frac{U_R}{I_R}$

Reflexionsgrad: $p = \frac{U_r}{U_e} = \frac{R - Z}{R + Z}$

1. $R = 0 \Rightarrow p = -1$
2. $R = Z \Rightarrow p = 0$
3. $R = \infty \Rightarrow p = 1$

Signaltransport im Kabel



-Stecker, -Kabel, -Verbinder, -Bauteile, -Adapter, -Verteiler, -Installationsmaterial		
Bild	Artikel-Nr.	Deutsch
	ISDN-RJA45	ISDN - Abschlußwiderstand 2x100 Ohm

Signaltransport über Datenbus: