



Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften  
Fakultät Elektrotechnik  
Prof. Dr.-Ing. K. H. Kraft

Unterlagen zur Lehrveranstaltung

## **EMV-Praktikum**

Inhalt

Teil 1: Übersichten, Formelsammlung und graphische Darstellungen

Teil 2: Übungsaufgaben

WS 2018

10.09.2018

# Übersicht zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)

## Elektromagnetische Beeinflussung

- Ursache und Ausbreitung von Störungen, Kopplungsmechanismen
- kontinuierliche Störsignale (u.a. Computer, Motoren)
- transiente Störsignale (u.a. Schaltvorgänge, elektrostatische Entladungen)
- Unterscheidung in leitungs- und feldgebundene Störungen

## Maßnahmen gegen den Einfluss von Störungen

- Leitungsanordnung (Hin- und Rückleiter, Energie- und Datenleitungen)
- Masseführung (Unterscheidung PE/Signalmasse, Masseschleifen)
- Schirmung
- Einsatz von Filtern (Netz- und Datenleitungsfilter → Signalintegrität !)

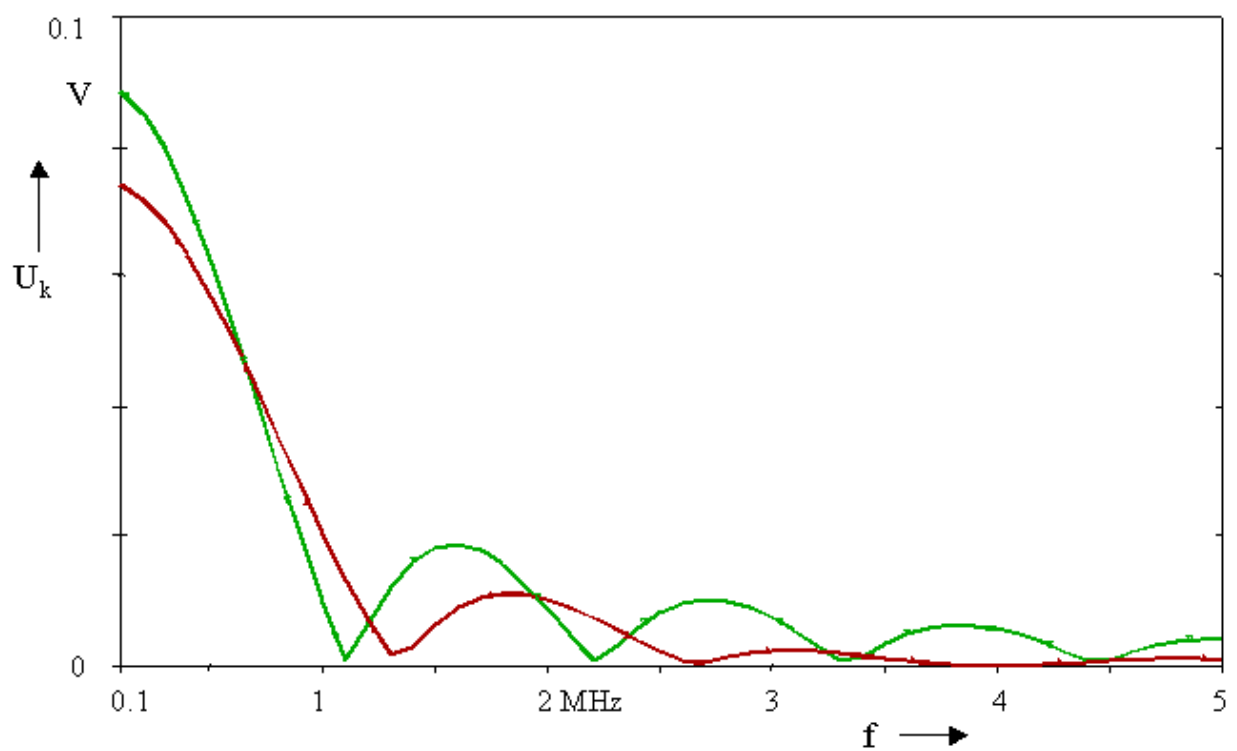
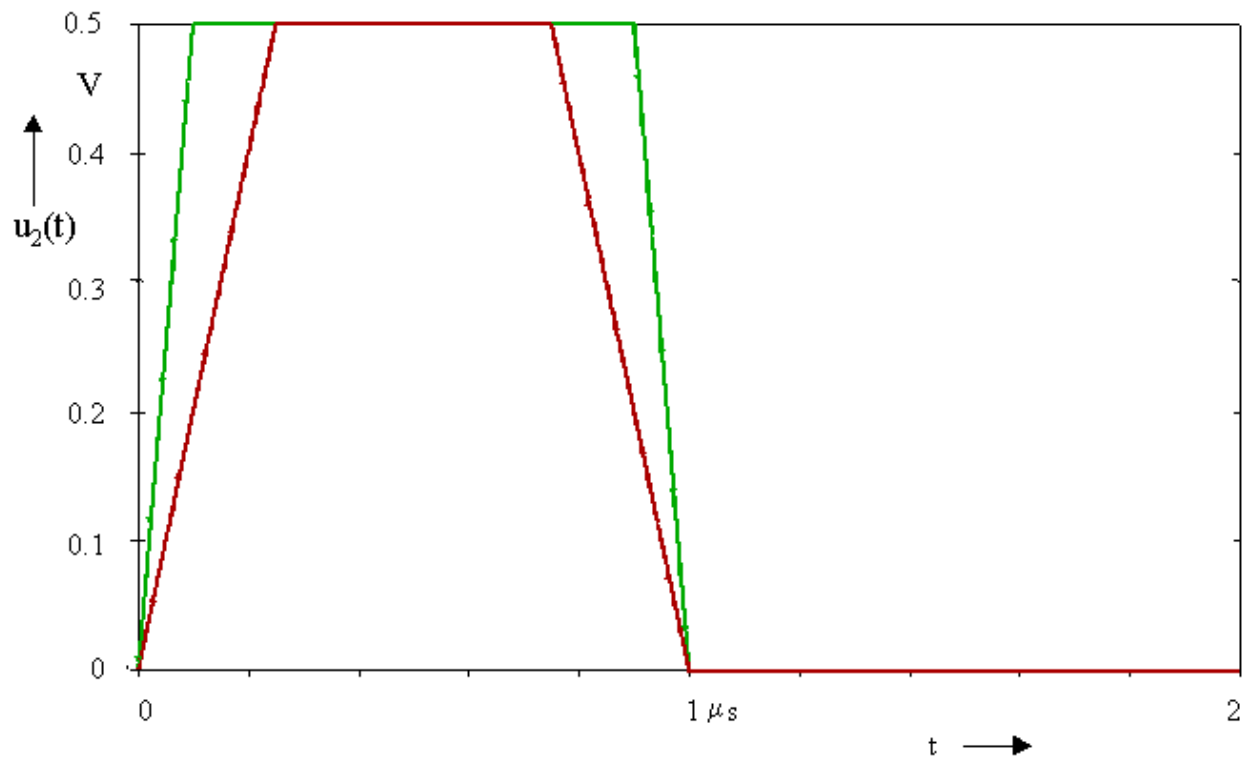
## Geräteprüfungen

### 1) Messung der Störfestigkeit

- Netzüberschwingungen
- Spannungsunterbrechung
- transiente Störgrößen („Burst“)
- ESD (elektrostatische Entladung)
- niederfrequente Magnetfelder
- elektromagnetische Felder

### 2) Messung der Störemissionen

- Leitungsgebundene Störungen ( $f \leq 30$  MHz)
- Feldgebundene Störungen ( $f \geq 30$  MHz)



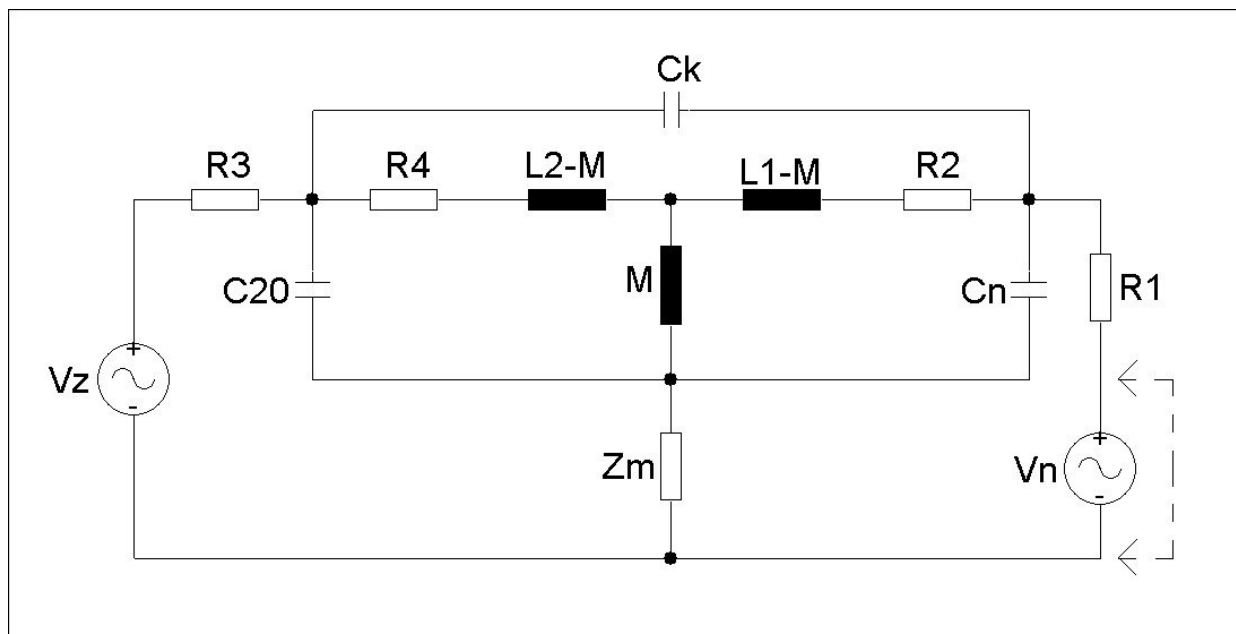
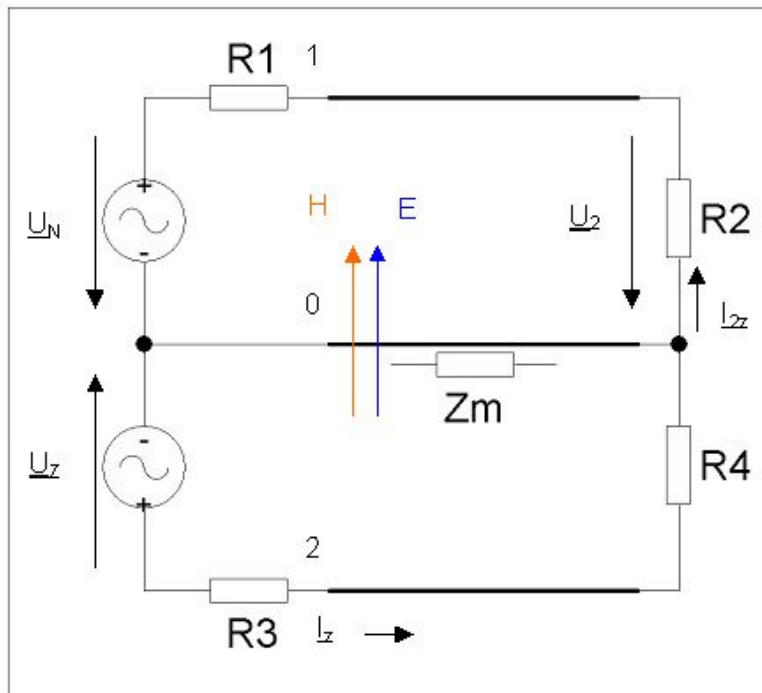
### Amplitudenspektrum eines einzelnen Trapezimpulses

Anstiegs- und Fallzeit  $T_r=100$  ns bzw.  $T_f=250$  ns

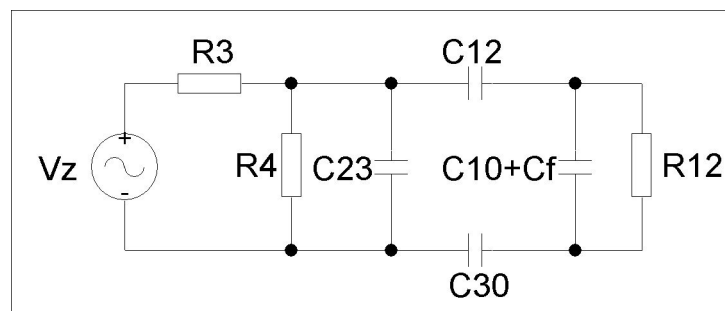
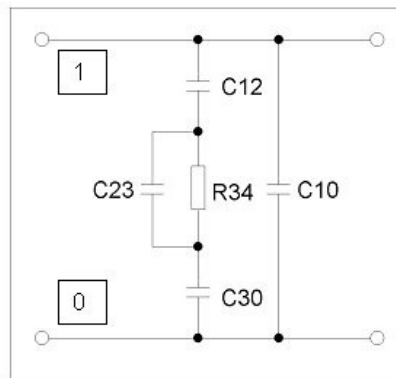
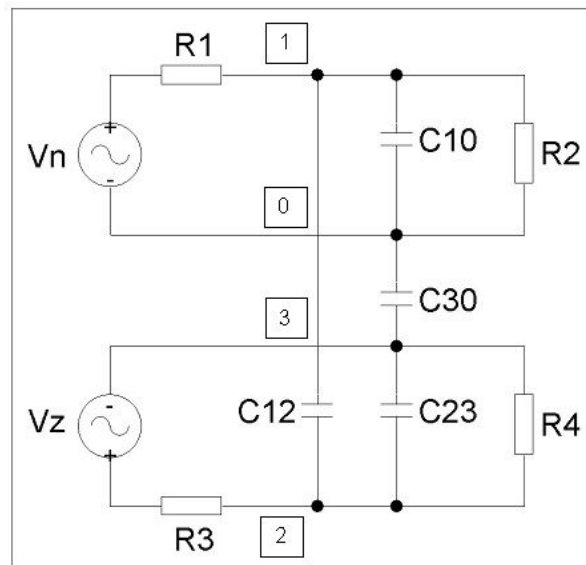
# Allgemeines Beeinflussungsmodell

Zwei Stromkreise mit kapazitiver und induktiver Kopplung sowie mit Impedanzkopplung

Nutzsignalquelle  $\underline{U}_N$  und Störsignalquelle  $\underline{U}_Z$



## Kapazitive Kopplung zweier Stromkreise



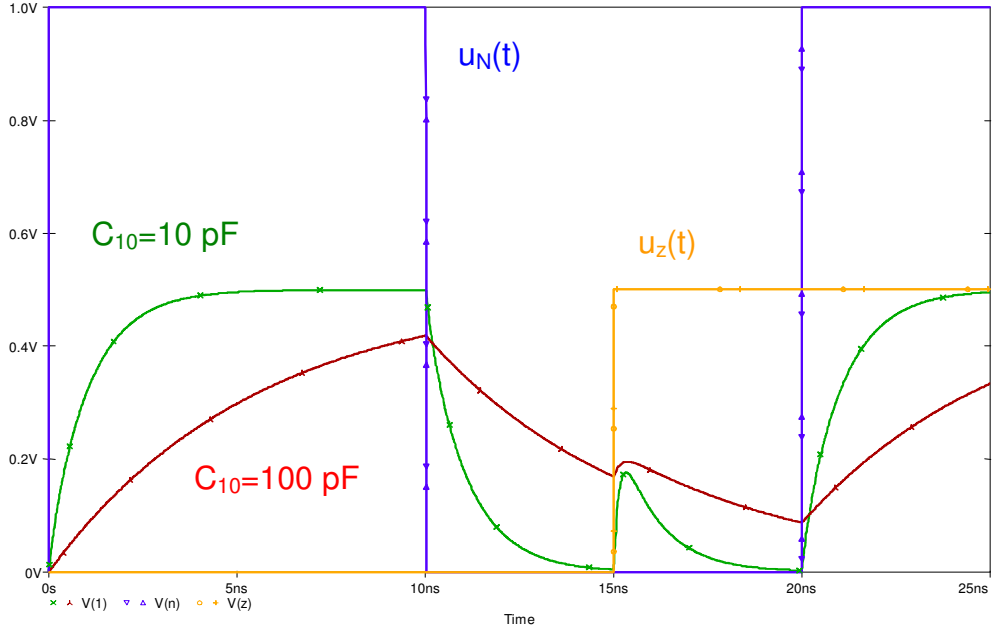
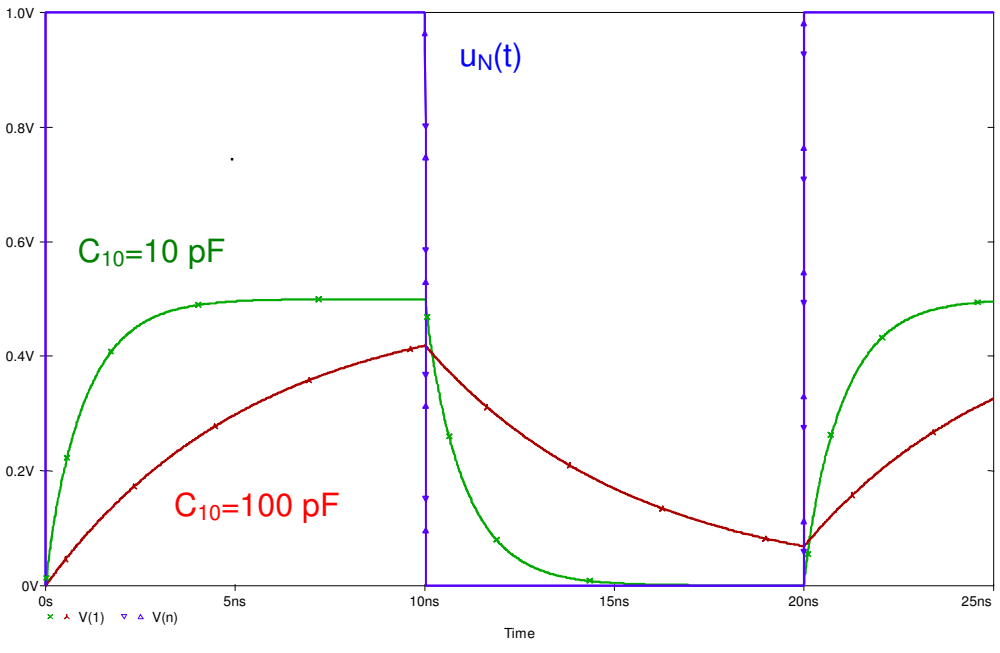
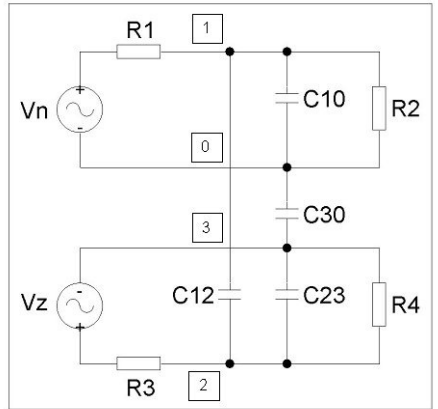
$$\text{Stör-ÜF: } F_z(p) = \frac{U_{2z}(p)}{U_z(p)} = \frac{pR_{12}C_k}{p^2R_{12}R_3[C_kC_N + (C_N + C_k)C_{20}] + p[R_3(C_k + C_{20}) + R_{12}(C_N + C_k)] + 1}$$

bei gemeinsamer Masse mit  $C_k=C_{12}$ ,  $C_{30}=0$ ,  $C_N=C_{10}+C_F$ ,  $C_{23}=C_{20}$ ,  $R_{12}=R_1||R_2$ ,  $R_4=\infty$ .

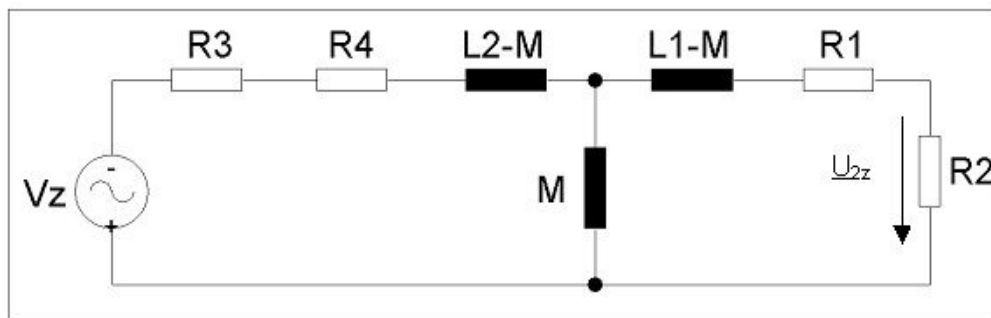
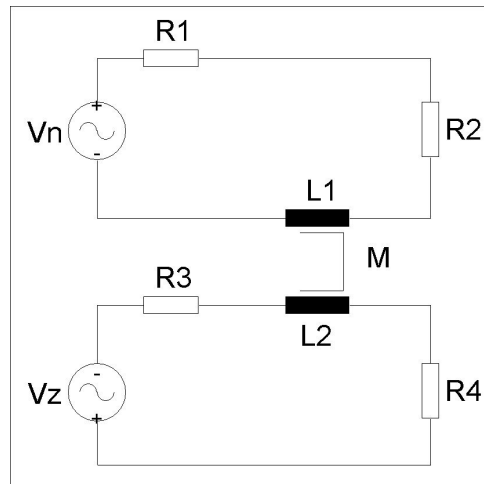
$$\text{Nutz-ÜF: } F_N(p) = \frac{U_{2N}(p)}{U_N(p)} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1 + pR_3(C_k + C_{20})}{p[R_{12}(C_k + C_N) + \frac{R_1R_3 + R_2R_3}{R_1 + R_2}(C_{20} + C_k)] + 1}$$

## Beispiel zur kapazitiven Kopplung

$R_1=R_2=100\ \Omega$   
 $R_3=10\ \Omega, R_4=1\ \text{M}\Omega$   
 $C_{30}=0$   
 $C_{20}=C_{12}=10\ \text{pF}$

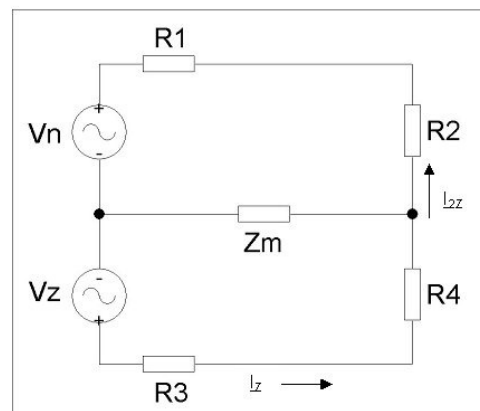


## Induktive Kopplung zweier Stromkreise



$$\text{Stör-ÜF: } F_z(p) = \frac{U_{2z}(p)}{U_z(p)} = \frac{pM \cdot \frac{R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}}{p^2 \cdot \frac{L_1 L_2 - M^2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} + p \cdot \left( \frac{L_1}{R_1 + R_2} + \frac{L_2}{R_3 + R_4} \right) + 1}$$

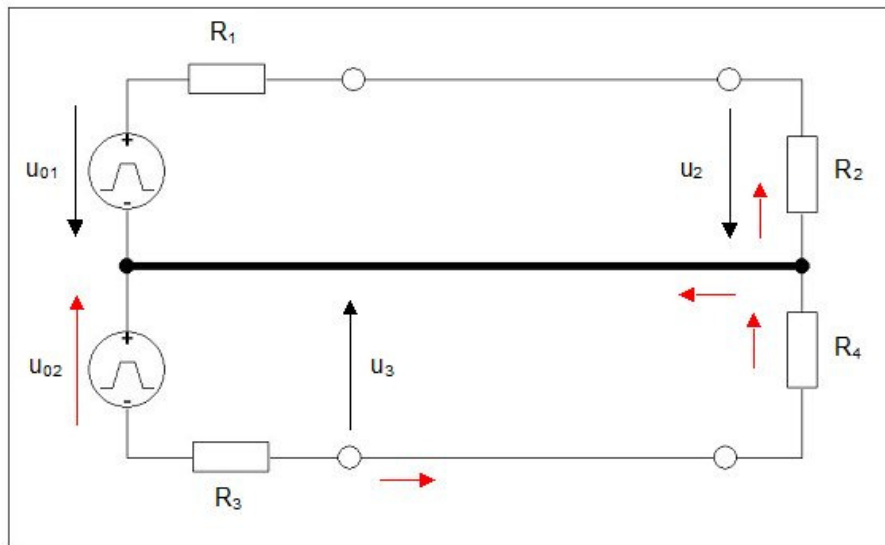
## Impedanzkopplung



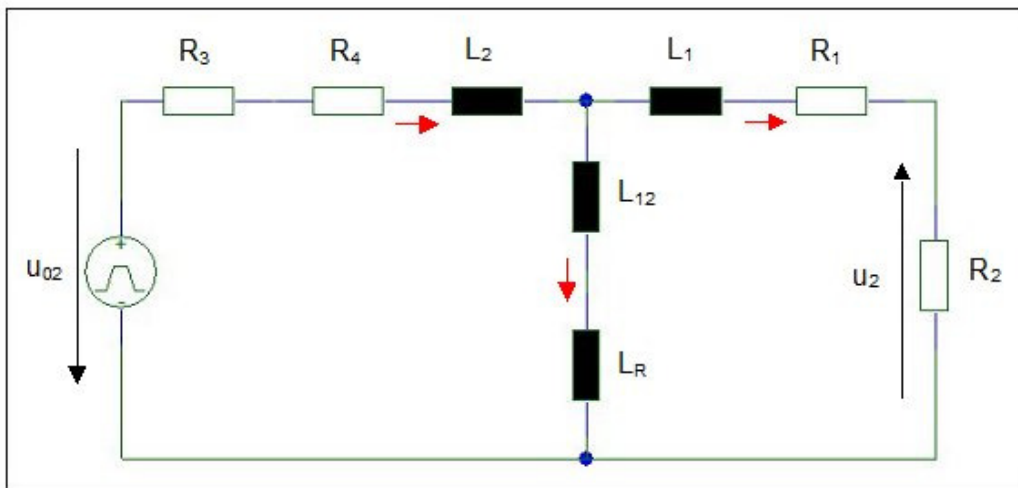
$$\text{Stör-ÜF: } F_z(p) = \frac{U_{2z}(p)}{U_z(p)} = - \frac{Z_M(p) \cdot \frac{R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}}{Z_M(p) \cdot \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} + 1}$$

# Impedanzkopplung mit Leitungsinduktivitäten

## Gemeinsamer Masseleiter zweier Stromkreise



ESB mit Induktivitäten und Störstrom ( $u_{02}(t)=u_z(t)$  als Störquelle)



$$F_z(p) = \frac{U_{2z}(p)}{U_z(p)} = -\frac{b_1 \cdot p}{a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + 1}, \text{ BP2/DT2-Verhalten}$$

$$b_1 = (L_R + L_{12}) \cdot \frac{R_2}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

$$a_2 = \frac{(L_1 - L_{12} + L_2 - L_{12}) \cdot (L_R + L_{12}) + (L_1 - L_{12}) \cdot (L_2 - L_{12})}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

$$a_1 = \frac{L_1 + L_R}{R_1 + R_2} + \frac{L_2 + L_R}{R_3 + R_4}$$



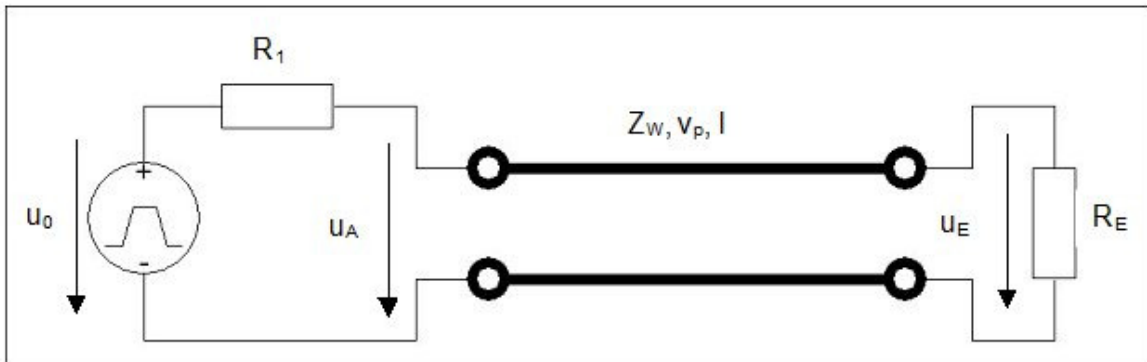
# Wellenausbreitung auf einer Leitung

## Leitungsparameter

Leitungsbeläge  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$ ,  $C'$ , Wellenwiderstand  $Z_W = \sqrt{\frac{R' + j \cdot \omega \cdot L'}{G' + j \cdot \omega \cdot C'}}$  (Frequenzbereich)

ohne Verluste  $Z_W = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$  (reell), Phasengeschwindigkeit  $v_p = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}}$ , Laufzeit  $T_v = \frac{l}{v_p}$

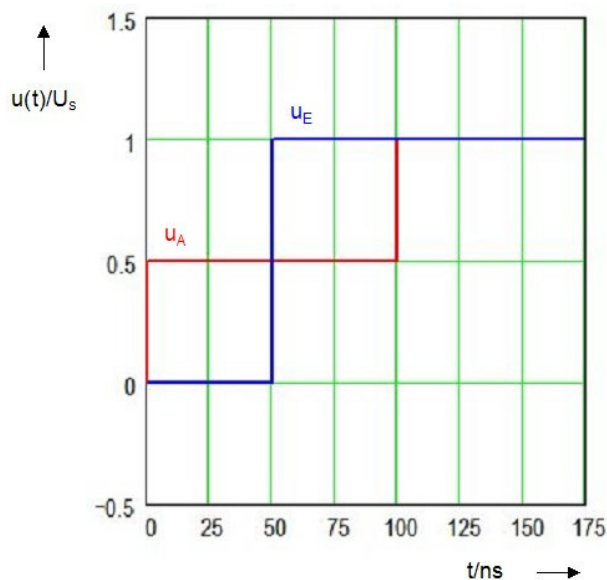
## Einfache Leitungsschaltung mit Quelle und Abschlusswiderstand



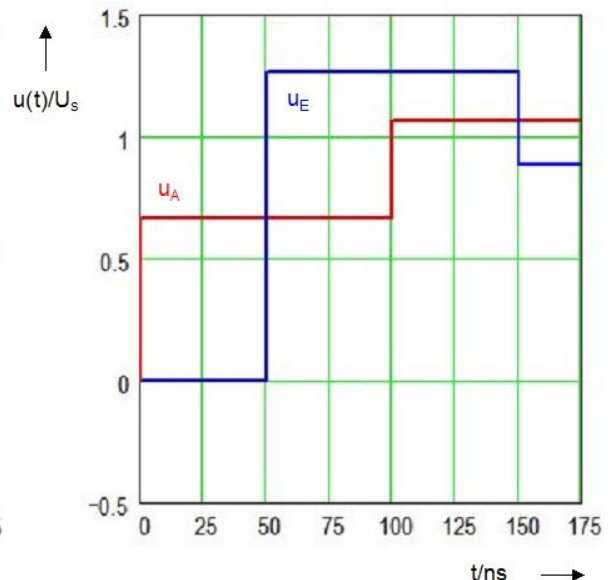
## Sprungantworten bei verschiedenen Leitungsabschlüssen

$l = 10 \text{ m}$ ,  $v_p = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $T_v = l/v_p = 50 \text{ ns}$

Reflexionsfaktoren  $r_1 = (R_1 - Z_W)/(R_1 + Z_W)$ ,  $r_E = (R_E - Z_W)/(R_E + Z_W)$

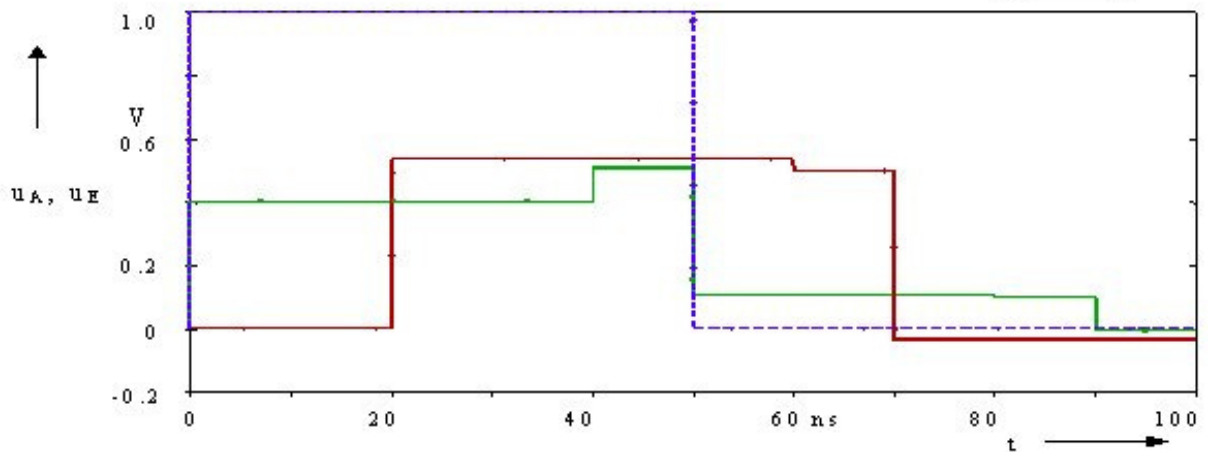
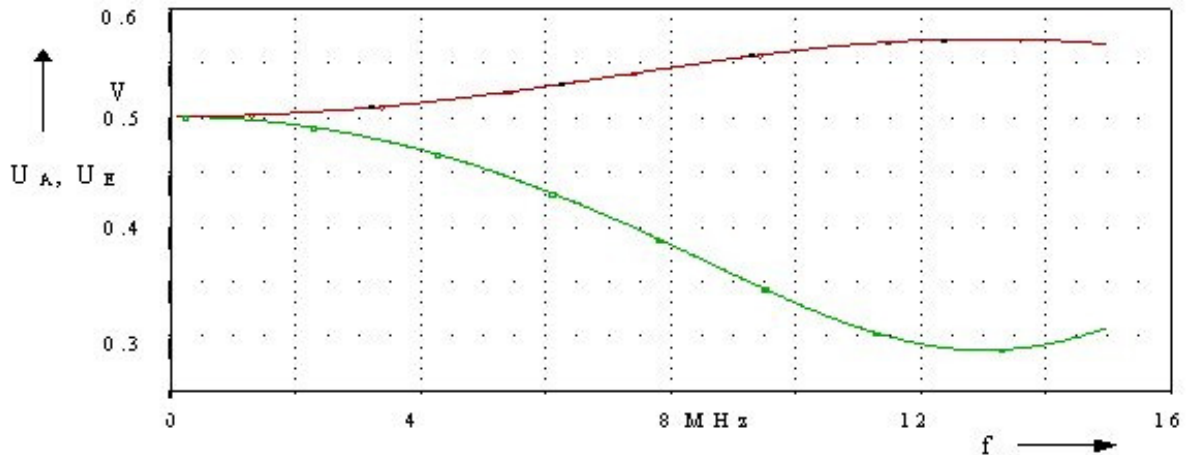
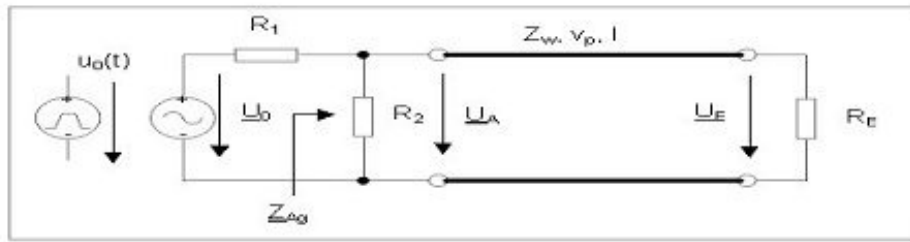


$r_1 = 0$  (Anpassung),  $r_E = 1$  (Leerlauf)



$r_1 = -1/3$ ,  $r_E = 0.9$  (beidseitige Fehlanpassung)

# Frequenz- und Zeitverhalten einer Leitungsschaltung

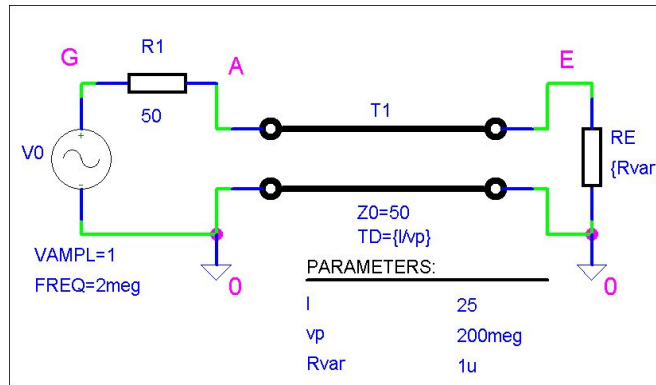


Beträge der Spannungen  $U_A$  und  $U_E$  am Leitungsanfang und –ende im Frequenzbereich

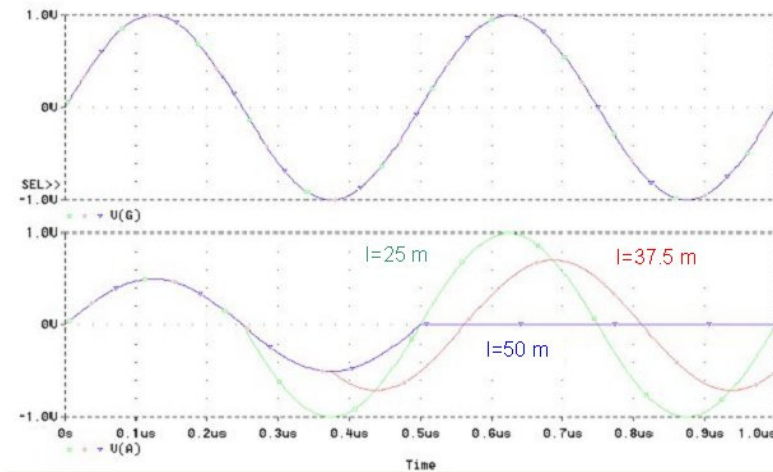
Leerlaufspannung  $u_0(t)$  des Generators (Rechteckimpuls der Dauer  $T_1=50$  ns))

Spannungen  $u_A(t)$  und  $u_E(t)$  im Zeitbereich bei Impulsanregung (Mehrfachreflexionen)

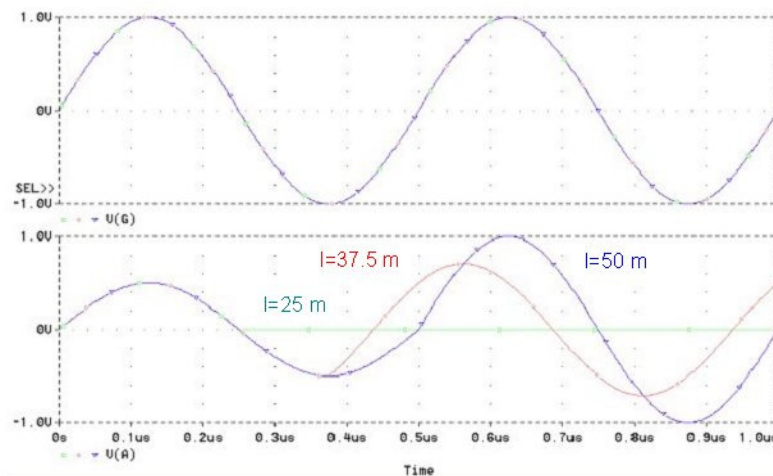
## Signalausbreitung auf einer Leitung



SPICE-Schematics zu einer Leitungsschaltung mit sinusförmiger Anregung ( $f=2$  MHz), Transientenanalyse (Einschwingvorgang), Wellenwiderstand  $Z_w=50 \Omega$ , Phasengeschwindigkeit  $v_p=2 \cdot 10^8$  m/s, Laufzeit  $T_d=l/v_p$ , Leitungslänge  $l=25$  m;  $37.5$  m;  $50$  m. 1. Resonanzfrequenz  $f_0=v_p/(4 \cdot l)$ . Abschlusswiderstand am Leitungsende:  $R_E=0; \infty$ .



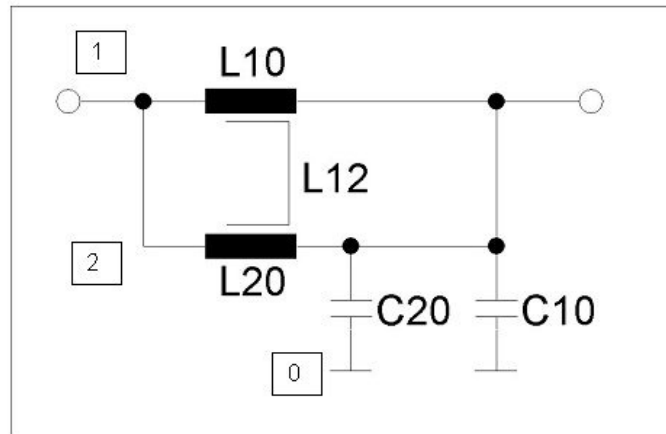
Spannung  $u_{AK}(t)$  bei Kurzschluss am Leitungsende.



Spannung  $u_{AL}(t)$  bei Leerlauf am Leitungsende.

## Gleich- und Gegentaktwelle

### Gleichtaktbetrieb (common mode)



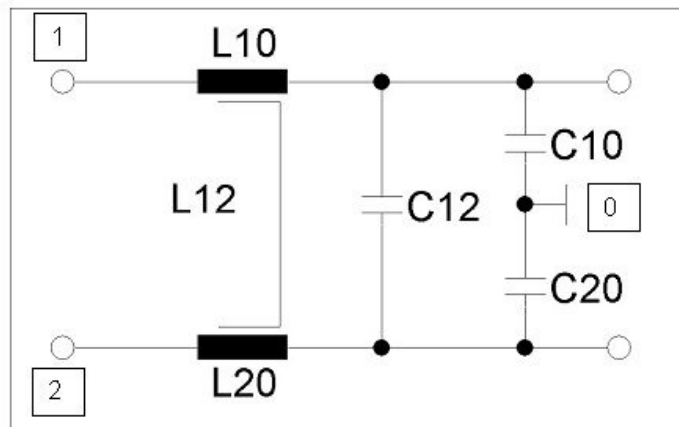
$$L_c' = \frac{L_1' \cdot L_2' - L_{12}^2}{L_1' + L_2' - 2 \cdot L_{12}'}, \quad C_c' = C_{10}' + C_{20}', \quad Z_c = \sqrt{\frac{L_c'}{C_c'}} = Z_{c1} \parallel Z_{c2}$$

$$Z_{c1} = Z_{w1} \frac{\sqrt{1 - k_1 \cdot k_2}}{1 - k_2}, \quad Z_{c2} = Z_{w2} \frac{\sqrt{1 - k_1 \cdot k_2}}{1 - k_1} \quad \text{mit} \quad Z_{w1} = \sqrt{\frac{L_1'}{C_{10}' + C_{12}'}}, \quad Z_{w2} = \sqrt{\frac{L_2'}{C_{20}' + C_{12}'}}$$

(Wellenwiderstände der Einzelleitungen)

Kopplungsfaktoren  $k_1 = L_{12}' / L_1' = C_{12}' / (C_{12}' + C_{20}')$ ,  $k_2 = L_{12}' / L_2' = C_{12}' / (C_{12}' + C_{10}')$ ,

### Gegentaktbetrieb (differential mode)

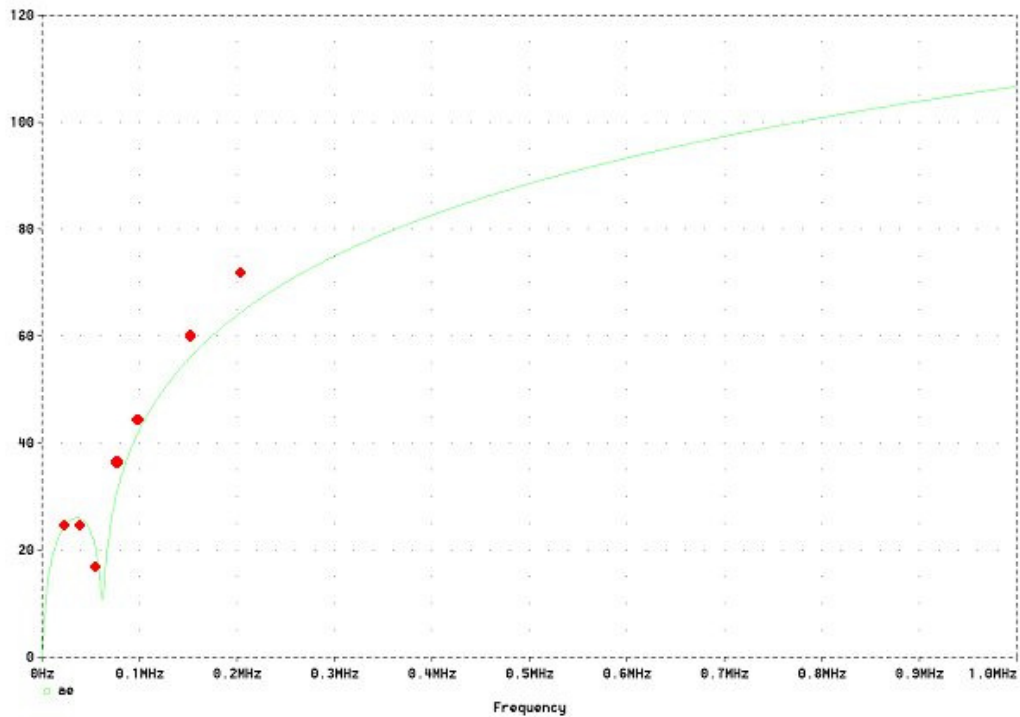
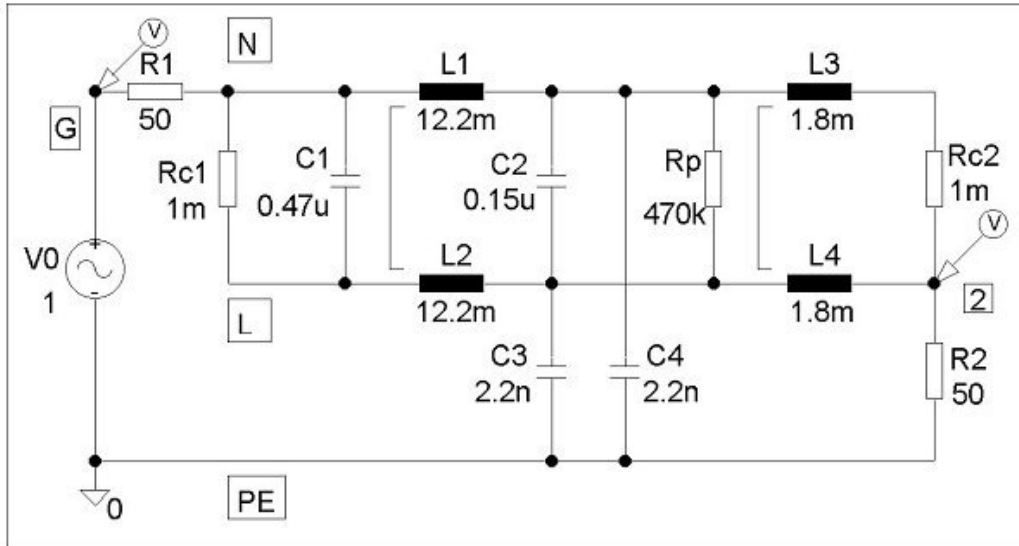


$$L_d' = L_1' + L_2' - 2 \cdot L_{12}', \quad C_d' = C_{12}' + \frac{C_{10}' \cdot C_{20}'}{C_{10}' + C_{20}'}, \quad Z_{d12} = \sqrt{\frac{L_d'}{C_d'}} = Z_{d1} + Z_{d2}$$

$$Z_{d12} = \sqrt{Z_{w1} \cdot Z_{w2}} \cdot \frac{k_1 + k_2 - 2k_1k_2}{\sqrt{k_1k_2(1 - k_1k_2)}}$$

## Netzfilter FN 670-3/06 (Schaffner)

Simulation der asymmetrischen Einfügungsdämpfung (common mode)



Ersatzschaltung, Simulation und Messung der Einfügungsdämpfung eines realen Netzfilters im Gleichtaktbetrieb.

## Ausgewählte Antennen- und Übertragungskenngrößen

Freier Wellenwiderstand  $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \cdot \pi \ \Omega$

Strahlungsdichte eines vertikalen Dipols mit der Gesamtlänge  $h=2 \cdot l$  und dem Speisestrom  $I_0$ , in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  und vom Polarwinkel  $\vartheta$ :

$$S(\vartheta) = \frac{Z_0 \cdot I_0^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2} \left| \frac{\cos(2\pi \frac{l}{\lambda} \cos \vartheta) - \cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}{\sin \vartheta \cdot \sin(2\pi \frac{l}{\lambda})} \right|^2$$

Zum Vergleich beim horizontalen Dipol (Azimutwinkel  $\varphi$ ):  $\cos \vartheta \rightarrow \cos \varphi \cdot \sin \vartheta$

Richtfaktor  $D(\vartheta, \varphi) = \frac{S(\vartheta, \varphi)}{S_K}$  mit  $S_K = \frac{P_K}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$  und  $P_K$  als Leistung eines

Kugelstrahlers (isotrope Antenne, als Referenz)

Wirkungsgrad  $\eta$ , Gewinnfaktor  $G = \eta \cdot D$  bzw.  $G^* = 10 \cdot \log(G)$  dB

Wirkfläche  $A_w = \frac{D \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi}$ , Flächenausnutzung  $q = \frac{A_w}{A}$ , geometrische Fläche  $A$

Strahlungsdichte am Empfangsort  $S = \frac{P_s \cdot G_s}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{E^2}{Z_0}$ , Sendeleistung  $P_s$

Elektrische Feldstärke  $E = \sqrt{Z_0 \cdot S}$

Empfangsleistung  $P_{eopt} = S \cdot A_{we}$  (bei  $\eta_e=1$ )

Übertragungsfaktor (mit Zusatzdämpfung (Regen, Reserve)  $a_R$  in dB)

$$\frac{P_e}{P_s} = G_s \cdot G_e \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot r}\right)^2 \cdot 10^{-a_R/10}$$

Antennenfaktor bei der Feldstärkemessung  $k = \frac{E}{U_e} = \sqrt{\frac{Z_0 \cdot 4 \cdot \pi}{R_e \cdot G_e \cdot \lambda^2}}$

Umrechnungen:  $E^* = 20 \cdot \log \frac{E}{E_0} \text{ dB}(\mu V/m)$  mit  $E_0=1 \ \mu V/m$

$$P^* = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} \text{ dB(W)}, P_0=1 \text{ W bzw. } P^* = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} \text{ dBm mit } P_0=1 \text{ mW}$$

$$k^* = 20 \cdot \log \frac{k}{k_0} \text{ dB(1/m)} \text{ mit } k_0=1 \text{ m}^{-1}$$

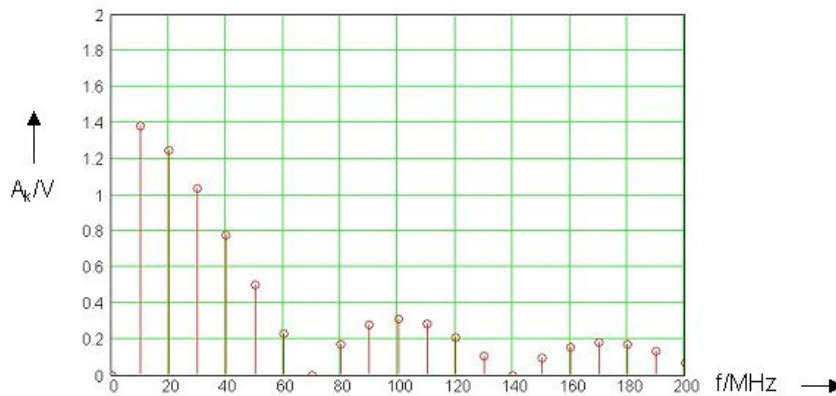
## Vorlesungsbegleitende Übungsaufgaben

Ü1)

Skizzieren Sie das Amplitudenspektrum für ein periodisches Rechtecksignal mit der Periode  $T_0=1 \mu\text{s}$ ,  $T_1/T_0=1/3$  und mit der Impulshöhe  $U_s=1 \text{ V}$  sowie dem kleinsten Wert  $u_{\min}=0$ . Bei welcher Frequenz wird eine Grenze  $A_g^*=100 \text{ dB}(\mu\text{V})$  letztmalig überschritten ?

Ü2)

Gegeben ist das Amplitudenspektrum einer rechteckförmigen periodischen Störspannung  $u_z(t)$  mit  $T_1/T_0 < 0.5$  und  $A_1=1.381 \text{ V}$  bei  $f=10 \text{ MHz}$ . Ermitteln Sie alle relevanten Parameter von  $u_z(t)$ .

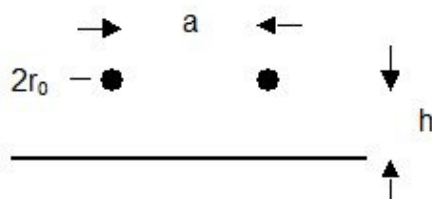


Ü3)

Welche maximale Spannung erhält man bei Impedanzkopplung mit  $L_M=0.92 \mu\text{H}$  und  $R_1=R_2=R_3=R_4=R=50 \Omega$ , wenn ein Störspannungssprung  $u_2(t)=U_{sz} \cdot s(t)$  vorliegt ?

Ü4)

Bestimmen Sie die Parameter  $k_0=k_1=k_2$ ,  $Z_w=Z_{w1}=Z_{w2}$ ,  $Z_{c1}=Z_{c2}=2 \cdot Z_c$ ,  $Z_{d1}=Z_{d2}=Z_{d12}/2$  für die gegebene symmetrische Leitungskonfiguration mit  $a=2 \text{ cm}$ ,  $d=2 \cdot r_0=2 \text{ mm}$ ,  $h=1 \text{ cm}$  über der Massefläche und den Leitungsbelägen  $L_{10}'=L_{20}'=L'=380 \text{ nH/m}$ ,  $L_{12}'=25 \text{ nH/m}$ ,  $C_{10}'=C_{20}'=C_0'=28 \text{ pF/m}$ ,  $C_{12}'=2 \text{ pF/m}$ .



Ü5)

Die Störemissionen eines elektrischen Gerätes werden durch folgende Parameter beschrieben:  $f=200$  MHz,  $r=3$  m,  $G_e=0.5$ ,  $R_e=50 \Omega$ ,  $U_e^*=50$  dB( $\mu$ V).

- a) Welche Empfangsleistung  $P_e$  in W bzw.  $P_e^*$  in dBm liegt vor ?
- b) Wie groß ist die Sendeleistung  $P_s$ , wenn  $G_s \approx 1$  angenommen wird ?
- c) Welche elektrische Feldstärke  $E$  in mV/m bzw.  $E^*$  in dB( $\mu$ V/m) ergibt sich hier am Empfangsort ?
- d) Welcher Antennenfaktor  $k$  in 1/m bzw.  $k^*$  in dB(1/m) ist einzusetzen ( $f=200$  MHz) ?

Ü6)

Bestimmen und skizzieren Sie den Amplitudengang für einen passiven Tiefpass 2.Ordnung mit  $L=11.3 \mu$ H,  $C=4.5$  nF.

- a)  $R_1=50 \Omega$ ,  $R_2=\infty$ ; b)  $R_1=R_2=R=5 \Omega$ .

Ü7)

Zeichnen Sie die Ersatzschaltungen für das Netzfilter FN 670-3/06 (aus der Vorlesung) im Gleich- und Gegentaktfall. Annahme:  $k_1=k_2=k=0.95$ .



## Aufgaben der Klausur vom SS 2012

### Aufgabe 1

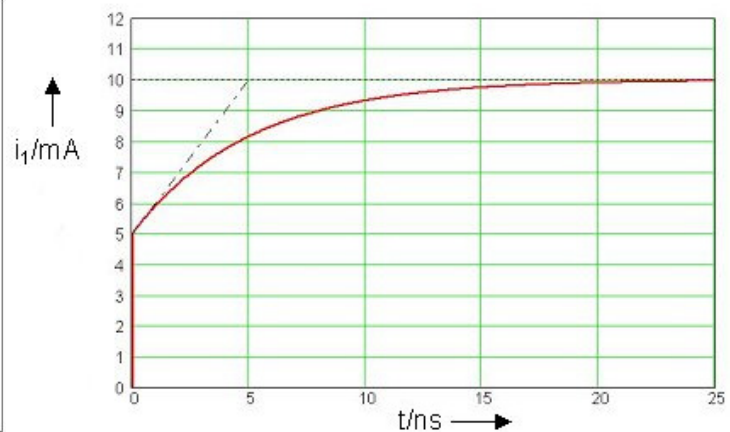
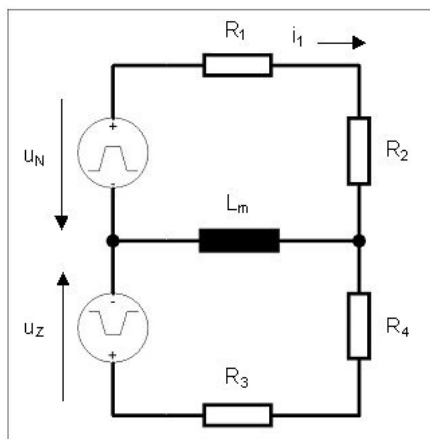
Die in eine TEM-Zelle mit  $R_1=R_2=Z_w=50 \Omega$ ,  $h=0.3 \text{ m}$  eingespeiste Leistung wird über einen Richtkoppler mit der Koppeldämpfung  $a_K=40 \text{ dB}$  angezeigt. Welcher Wert  $P_{\text{Anz}}^*$  in dBm ist erforderlich, damit die erzeugte elektrische Feldstärke  $E=40 \text{ V/m}$  beträgt ?

### Aufgabe 2

Das Problem der Impedanzkopplung zweier Stromkreise sei durch die gegebene Schaltung mit  $R_1=R_2=R=50 \Omega$ ,  $R_4=0$  beschrieben. Bei Sprunganregung über  $u_N(t)=U_{sN} \cdot s(t)$ ,  $U_{sN}=1 \text{ V}$ ,  $u_Z=0$  ergibt sich der dargestellte Verlauf für den Strom  $i_1(t)$ ,  $i_1(0)=5 \text{ mA}$ .

a) Berechnen Sie die Sprungantwort  $i_1(t)$  mit  $u_N(t)=U_{sN} \cdot s(t)$ .

b) Gesucht sind die Elemente  $L_m$  und  $R_3$ .

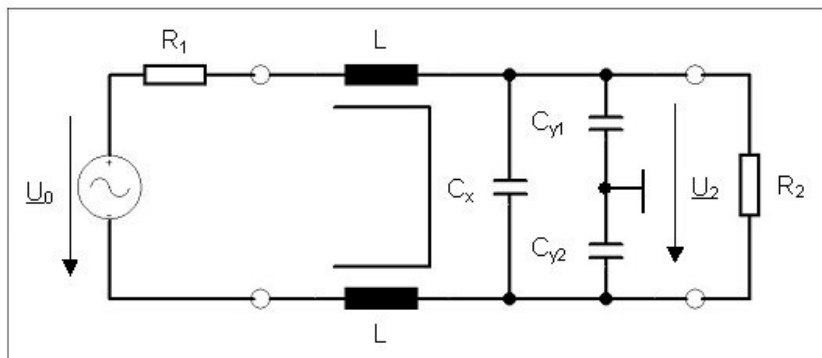


### Aufgabe 3

Die Eigenschaften zweier gekoppelter Leitungen mit symmetrischer querhomogener Anordnung seien durch  $L'=1.25 \mu\text{H/m}$ ,  $L_{12}'=0.50 \mu\text{H/m}$ ,  $C_0'=6.35 \text{ pF/m}$ ,  $C_{12}'=4.23 \text{ pF/m}$  und  $l=3 \text{ m}$ ,  $\alpha \ll 1$  beschrieben. Berechnen Sie die Leitungsbeläge  $L_d'$  und  $C_d'$  für den Gegentaktfall. Bestimmen und skizzieren Sie den zugehörigen Kurzschluss-Eingangswiderstand  $|Z_{\text{AKd}}(f)|$  im Bereich  $0 \leq f \leq 60 \text{ MHz}$  unter Angabe markanter Werte.

### Aufgabe 4

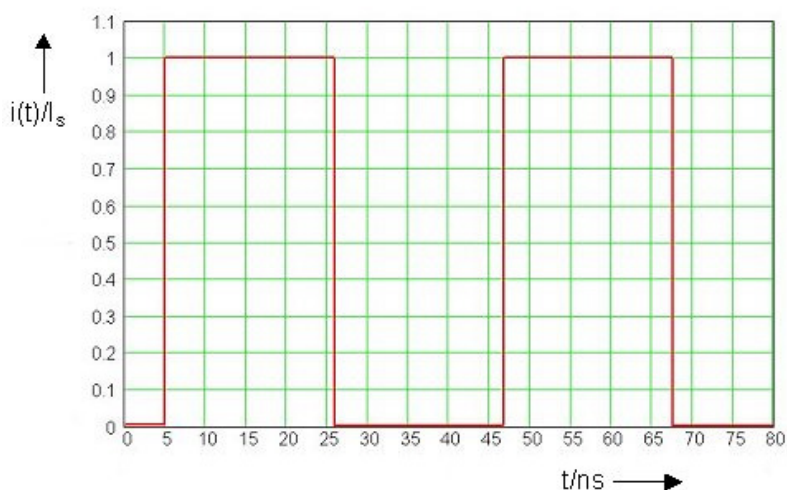
Für das gegebene Netzfilter mit  $R_1=R_2=R=50\ \Omega$ ,  $L=1\ \text{mH}$ ,  $k=0.98$ ,  $C_x=39\ \text{nF}$ ,  $C_{y1}=C_{y2}=1\ \text{nF}$  soll die Betriebsdämpfung  $a_B(f)$  für den Gegentaktfall im Bereich  $0 \leq f \leq 1\ \text{MHz}$  berechnet und skizziert werden (unter Angabe von mindestens 5 Wertepaaren).



### Aufgabe 5

Die Abstrahlung einer Leiterschleife, die von einem rechteckförmigem Gleichtakt-Störstrom mit der Periode  $T_0=125/3\ \text{ns}$  und der Impulsdauer  $T_1=T_0/2$  durchflossen wird, kann im Bereich  $20\ \text{MHz} \leq f \leq 100\ \text{MHz}$  näherungsweise durch den Ausdruck  $E(f)=E_0 \cdot (I(f)/I_s) \cdot (f/f_0)^2$  mit  $E_0=30\ \mu\text{V/m}$ ,  $I_s=1\ \text{mA}$ ,  $f_0=24\ \text{MHz}$  beschrieben werden. Dabei wird auf einen Messabstand von  $r=10\ \text{m}$  Bezug genommen, der zulässige Grenzwert der Feldstärke beträgt  $E_g^*=30\ \text{dB}(\mu\text{V/m})$ .

- Geben Sie die diskreten Frequenzen  $f_k$  an, bei denen der Grenzwert überschritten wird, zusammen mit den zugehörigen Feldstärken  $E_k^*$  ( $k=1, 2, \dots$ ).
- Bestimmen Sie die Empfangsspannungen  $U_{ek}$  für einen Messempfänger mit  $R_e=50\ \Omega$ . Der Gewinnfaktor der Messantenne sei  $G_e=0.75$  im genannten Frequenzbereich.



## Lösungen SS 2012

### Aufgabe 1

$P_{anz}^* = -5.4 \text{ dBm}$ .

### Aufgabe 2

a)  $i_1(t) = i_1(0) \cdot [(1 + R_3 / (R_1 + R_2)) (1 - \exp(-t/\tau)) + \exp(-t/\tau)]$ ,  $i_1(0) = U_{sN} / (R_1 + R_2 + R_3)$ ;

b)  $L_m = 250 \text{ nH}$ ,  $R_3 = 100 \text{ } \Omega$ .

### Aufgabe 3

$L'_d = 1.5 \text{ } \mu\text{H/m}$ ,  $C'_d = 7.41 \text{ pF/m}$ ,  $Z_{AKd}(f) = 450 \cdot \tan(\pi/2 \cdot f/f_{0d}) \text{ } \Omega$ ,  $f_{0d} = 25 \text{ MHz}$ .

### Aufgabe 4

$a_B = 10 \cdot \log[(1 - (f/f_{0d})^2)^2 + (2 \cdot D_d \cdot f/f_{0d})^2] \text{ dB}$ ,  $f_{0d} = 179.1 \text{ kHz}$ ,  $D_d = 0.781$ .

### Aufgabe 5

a)  $f_3 = 72 \text{ MHz}$ ,  $E_3^* = 35.2 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$ ;

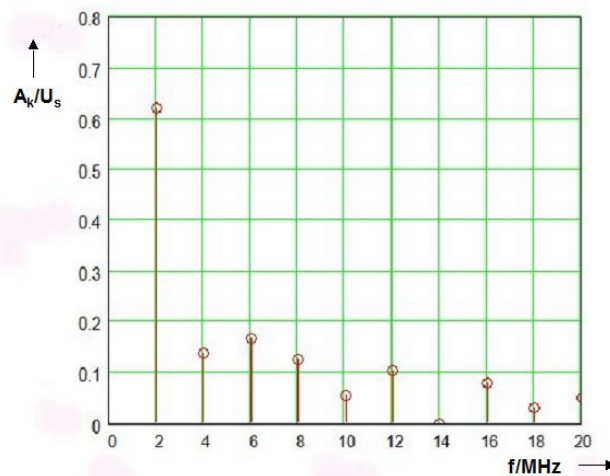
b)  $U_{e3} = 21.2 \text{ } \mu\text{V}$ .

## Aufgaben der Klausur vom WS 2015

### Aufgabe 1

Gegeben ist das auf  $U_s=1$  V normierte Amplitudenspektrum eines periodischen Rechtecksignals, speziell mit  $A_1/U_s=0.621$  bei  $f_0=2$  MHz.

- Bestimmen Sie das vorliegende Tastverhältnis  $T_1/T_0 < 0.5$  ( $m/n$ ,  $m, n < 10$  ganzzahlig).
- Die Grenzwerte von bestimmten leitungsgebundenen Störspannungen betragen:  
 $U_{g1}^* = 46$  dB( $\mu$ V) für  $1 \text{ MHz} \leq f < 5 \text{ MHz}$  und  $U_{g2}^* = 50$  dB( $\mu$ V) für  $5 \text{ MHz} \leq f < 30 \text{ MHz}$ .  
Wie hoch darf die Amplitude  $U_s$  des Störsignals  $u(t)$  sein, damit die Grenzwerte im gesamten Bereich eingehalten werden ?



### Aufgabe 2

Das Spice-Modell T2COUPLED möge die folgenden Angaben enthalten:

LEN=1, L=382n, C=29n, LM=27n, CM=2.2p.

- Wie groß sind der Gleichtakt-Wellenwiderstand  $Z_c$  und die Phasengeschwindigkeit  $v_c$  ?
- Geben Sie einen Ausdruck für den theoretischen Leerlauf-Eingangswiderstand  $Z_{ALC}$  an und skizzieren Sie seinen Betrag  $Z_{ALC}(f)$  unter Angabe von 4 Wertepaaren im Bereich  $0 \leq f \leq 150$  MHz.

### Aufgabe 3

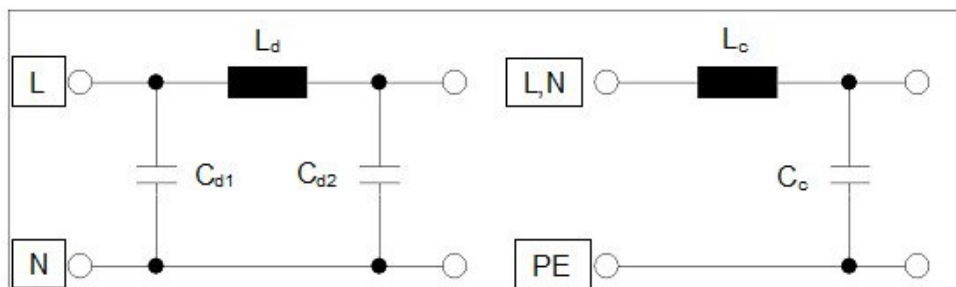
Zur Untersuchung von feldgebundenen Störemissionen werden zunächst die Eigenschaften der Empfangsantenne als Messwertempfänger ermittelt und anschließend Feldstärkemessungen durchgeführt.

- a) Eine Übertragungsstrecke besteht aus einem Generator mit der Leerlaufspannung  $U_0=0.2\text{ V}$  und dem Innenwiderstand  $R_1=50\ \Omega$ , zwei gleichen Antennen im Abstand  $r=3\text{ m}$  und einem Messempfänger mit Eingangswiderstand  $R_e=50\ \Omega$ . Bei den Frequenzen  $f_1=175\text{ MHz}$ ,  $f_2=200\text{ MHz}$ ,  $f_3=225\text{ MHz}$  werden am Empfänger die Spannungen  $U_{e1}^*=71.2\text{ dB}(\mu\text{V})$ ,  $U_{e2}^*=71.3\text{ dB}(\mu\text{V})$ ,  $U_{e3}^*=70.8\text{ dB}(\mu\text{V})$  gemessen. Bestimmen Sie jeweils den Gewinn- und Antennenfaktor (incl. Fehlanpassung und Leitungsdämpfung).
- b) Bei der Bestimmung der Störemissionen eines elektrischen Geräts werden bei  $r=3\text{ m}$  und mit dem Messwertempfänger nach a) bei denselben Frequenzen die Spannungen  $U_{e1}^*=21.2\text{ dB}(\mu\text{V})$ ,  $U_{e2}^*=25.4\text{ dB}(\mu\text{V})$ ,  $U_{e3}^*=18.6\text{ dB}(\mu\text{V})$  gemessen. Geben Sie die zugehörigen Feldstärkewerte an.
- c) Für die Fälle, bei denen der zulässige Grenzwert von  $40\text{ dB}(\mu\text{V}/\text{m})$  überschritten wird, ist die äquivalente Sendeleistung des Störers (mit der Annahme  $G_s=1$ ) zu berechnen.

#### Aufgabe 4

Gegeben sind die Ersatzschaltungen eines Netzfilters für Gegen- und Gleichtaktfall mit den Werten  $C_{d1}=100\text{ nF}$ ,  $C_{d2}=101\text{ nF}$ ,  $L_d=4\ \mu\text{H}$ ,  $L_c\approx 1\text{ mH}$ ,  $C_c=4\text{ nF}$ . Der Kopplungsfaktor der verwendeten Entstördrossel beträgt  $k=0.998$ .

- a) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild des Netzfilters mit Angabe aller Bauelementewerte. Die paarweise auftretenden Kapazitäten sind jeweils gleich.
- b) Zum Test des Filters im Gleichtaktfall wird eine Quelle mit  $\underline{U}_0$ ,  $R_1=50\ \Omega$  angeschlossen. Zeigen Sie, dass das Filter bei sehr hochohmiger Last nur begrenzt wirksam ist. Empfehlung: Skizzieren Sie dazu den prinzipiellen Verlauf des Amplitudengangs  $F(f)$ . Welcher Frequenzbereich ist problematisch ?



## Lösungen WS 2015

### Aufgabe 1

- a)  $T_1/T_0=3/7$ ;  
b)  $U_s \leq 321.3 \mu\text{V}$ .

### Aufgabe 2

- a)  $Z_c \approx 60 \Omega$ ,  $v_c = 2.9 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;  
b)  $Z_{ALC} = Z_c / [j \tan(\pi/2 \cdot f/f_{0c})]$ ,  $f_{0c} = 72.5 \text{ MHz}$ ,  $Z_{ALC}(f_{0c}) = 0$ ,  $Z_{ALC}(2 \cdot f_{0c}) = \infty$ ,  $Z_{ALC}(f_{0c}/2, 3/2 \cdot f_{0c}) = Z_c = 60 \Omega$ .

### Aufgabe 3

- a)  $G = (0.798, 0.923, 0.981)$ ,  $k = (6.36 \text{ 1/m}, 6.76 \text{ 1/m}, 7.37 \text{ 1/m})$ ;  
b)  $E^* = [37.3 \text{ dB}(\mu\text{V/m}), 42.0 \text{ dB}(\mu\text{V/m}), 36.0 \text{ dB}(\mu\text{V/m})]$ ,  $E_2^* > E_g^*$ ;  
c)  $P_{s2} = 4.76 \text{ nW}$ .

### Aufgabe 4

- a)  $C_x = C_{d1} = 100 \text{ nF}$ ,  $C_y = C_c/2 = 2 \text{ nF}$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ ;  
b)  $F(p) = 1/[p^2 \cdot L \cdot C + p \cdot R_1 \cdot C + 1]$ ,  $F(\omega) = 1/[(1 - (\omega/\omega_0)^2) + (\omega/\omega_0 \cdot (\omega_0 R_1 \cdot C))^2]$ ,  $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$ ,  
 $\omega_0 R_1 \cdot C = 0.1$ ,  $f_0 = 79.6 \text{ kHz}$ ,  $F(0) = 1$ ,  $F(\infty) = 0$ ,  $F(f_0) = 10$  !!,  $F \geq 1$  für  $0 \leq f \leq 1.41 \cdot f_0$  !!

## Aufgaben der Klausur vom WS 2016

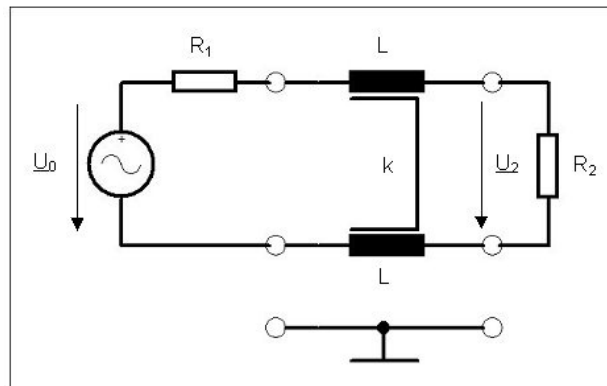
### Aufgabe 1

Ein Messobjekt zur Untersuchung von feldgebundenen Störemissionen kann durch eine Ersatzquelle mit der Leerlaufspannung  $\underline{U}_0$  und dem Innenwiderstand  $R_1$  sowie mit dem frequenzabhängigen Gewinnfaktor  $G_s$  beschrieben werden. Der Messabstand beträgt hier  $r=10$  m, die dabei zulässige elektrische Feldstärke  $E_g^*=30$  dB( $\mu$ V/m).

- Geben Sie einen Ausdruck  $U_0=f(E_g, r, G_s)$  an, der die Bedingung berücksichtigt, dass  $E_g^*$  gerade eingehalten wird.
- Wie groß ist dann  $U_0$  bei den Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$ , wenn  $G_{s1}=0.5$  bei  $f_1=30$  MHz und  $G_{s2}=1.2$  bei  $f_2=230$  MHz gilt ?
- Welche Empfangsspannung  $U_e$  in  $\mu$ V erhält man an einem Messempfänger ( $R_e=50 \Omega$ ) bei  $f_1$  und  $f_2$ , wenn gerade die o.a. Feldstärke vorliegt ? Der Antennenfaktor der Messantenne beträgt  $k_1^*=10$  dB(1/m) bei  $f_1$  und  $k_2^*=15$  dB(1/m) bei  $f_2$ .

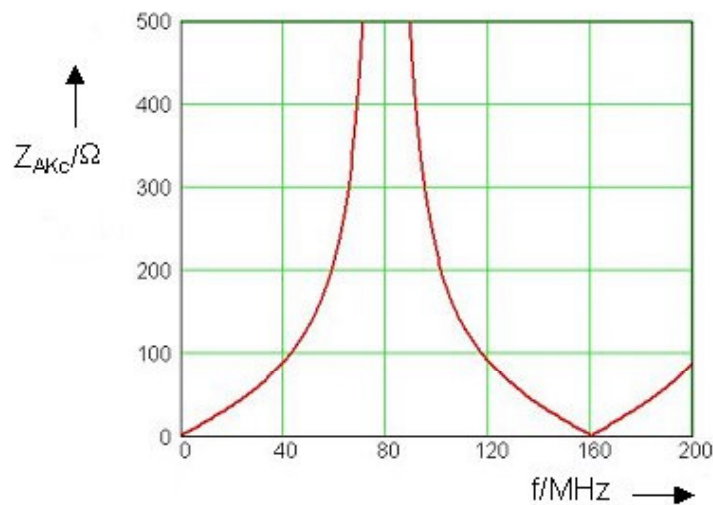
### Aufgabe 2

Das gegebene einfache Netzfilter mit  $L=1$  mH,  $k=0.995$  soll im Gegentaktfall bei  $\underline{U}_0=1$  V,  $R_1=50 \Omega$  getestet werden, und zwar für a)  $R_2=50 \Omega$ , b)  $R_2=1$  k $\Omega$ . Berechnen Sie für beide Fälle die Betriebsdämpfung  $a_B=10 \cdot \log(P_{1max}/P_2)$  dB, jeweils bei  $f=0$  und  $f=10$  MHz.



### Aufgabe 3

Gegeben ist der theoretische Eingangswiderstand  $Z_{AKC}$  von zwei gekoppelten Leitungen im Gleichtaktfall (common mode) bei einer Leitungslänge von  $l=87.5$  cm. Die hier betrachtete (zweite) Resonanzstelle liegt bei  $f_1=160$  MHz (siehe die Darstellung von  $|Z_{AKC}|=f(f)$  bzw. die Tabelle mit leicht gerundeten Werten). Weiterhin ist aus der querhomogenen geometrischen Anordnung das Verhältnis der Kapazitätsbeläge  $C_{12}'/C_0'=1/3$  bekannt. Bestimmen Sie den Gleichtakt-Wellenwiderstand  $Z_c$ , die Phasengeschwindigkeit  $v_c$  und den Gegentakt-Wellenwiderstand  $Z_d$ .



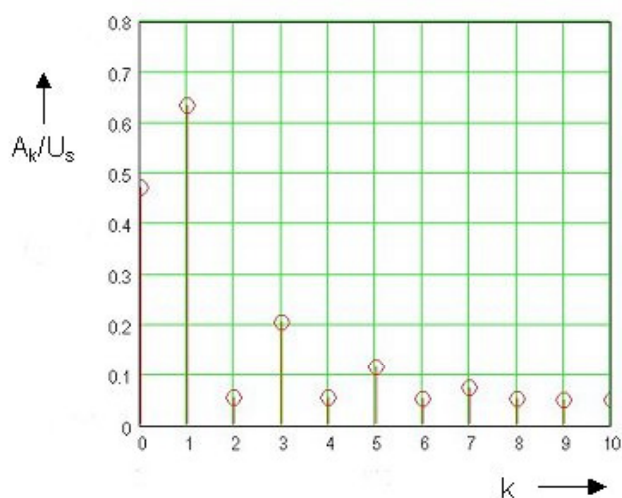
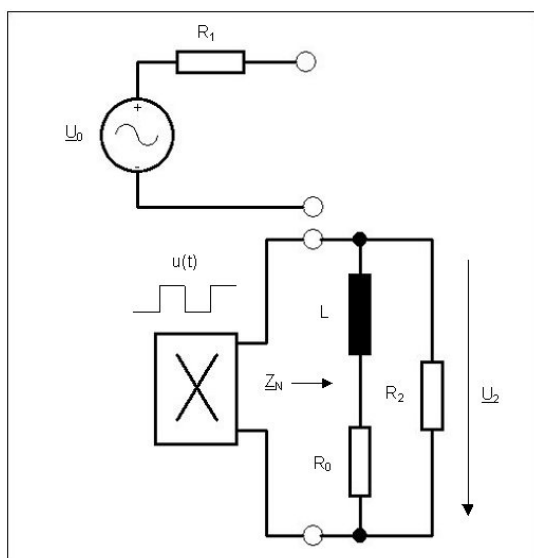
| f/MHz | $Z_{AKC}/\Omega$ |
|-------|------------------|
| 90    | -j452            |
| 100   | -j217            |
| 110   | -j135            |
| 120   | -j90             |
| 130   | -j60             |
| 140   | -j37             |
| 150   | -j18             |
| 160   | 0                |
| 170   | +j18             |



### Aufgabe 4

Gegeben sind das normierte Amplitudenspektrum eines periodischen leitungsgebundenen Störsignals (Spitzenwert  $U_s$ ) und das vereinfachte Ersatzschaltbild einer Leitungsnachbildung ( $L=50 \mu\text{H}$ ,  $R_0=5 \Omega$ ) mit angeschlossenem Messempfänger ( $R_2=50 \Omega$ ). Das Messobjekt kann durch eine Ersatzquelle ( $\underline{U}_0$ ,  $R_1=50 \Omega$ ) nachgebildet werden.

- Durch welches periodisches rechteckförmiges, möglichst einfaches Signal kann das dargestellte Spektrum mit  $f=150 \text{ kHz}$  entsprechend  $k=1$  angenähert werden? Geben Sie dazu ein geeignetes Tastverhältnis  $T_1/T_0$  an (vom Typ  $m/n$ ,  $m, n$  ganzzahlig) und zeichnen Sie das Signal  $u(t)/U_s$ .
- Berechnen und skizzieren Sie den Betrag  $|\underline{Z}_N|$  des Eingangswiderstands der Netznachbildung (incl.  $R_2$ ) unter Angabe der Werte bei  $f=0$ ,  $f=150 \text{ kHz}$  und  $f \rightarrow \infty$ .
- Wie groß ist die Amplitude  $U_0$  einer sinusförmigen Wechselspannung mit  $f=150 \text{ kHz}$ , wenn am Empfänger  $U_2^* = 56 \text{ dB}(\mu\text{V})$  vorliegt? Berechnen Sie dazu das Spannungsverhältnis  $|\underline{U}_2/\underline{U}_0|$  über die dargestellte Ersatzschaltung.
- Bestimmen Sie die Amplitude  $U_s$  des Rechtecksignals  $u(t)$  nach a) mit  $f=150 \text{ kHz}$ ,  $k=1$ .



## Lösungen WS 2016

### Aufgabe 1

- a)  $U_0=2 \cdot E \cdot r \cdot (5/(3 \cdot G_s))^{1/2}$ ;  
b)  $U_0=1.154 \text{ mV}$  bei  $f_1$ ,  $U_0=0.745 \text{ mV}$  bei  $f_2$ ;  
c)  $U_e=10 \text{ } \mu\text{V}$  bei  $f_1$ ,  $U_e=5.6 \text{ } \mu\text{V}$  bei  $f_2$ .

### Aufgabe 2

- a)  $a_B=0$  für  $f=0$ ,  $a_B=16.1 \text{ dB}$  für  $f=10 \text{ MHz}$  mit  $R_2=50 \text{ } \Omega$ ;  
b)  $a_B=7.41$  für  $f=0$ ,  $a_B=8.75 \text{ dB}$  für  $f=10 \text{ MHz}$  mit  $R_2=1 \text{ k}\Omega$ .

### Aufgabe 3

$v_c=2.8 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $Z_c=90 \text{ } \Omega$ ,  $Z_d=216 \text{ } \Omega$ .

### Aufgabe 4

- a)  $T_1/T_0=1/2$  als Näherung,  $T_0=6.66 \text{ } \mu\text{s}$ ;  
b)  $Z_N=R_2 \cdot \{[(R_0/(R_0+R_2))^2 + (\omega \cdot \tau)^2]/[1 + (\omega \cdot \tau)^2]\}^{1/2}$  mit  $\omega \cdot \tau=0.858$ ,  
 $Z_N=4.5 \text{ } \Omega$  bei  $f=0$ ,  $Z_N=32.7 \text{ } \Omega$  bei  $f=150 \text{ kHz}$ ,  $Z_N=50 \text{ } \Omega$  bei  $f=\infty$ ;  
c)  $U_2(p)/U_0(p)=Z_N(p)/(R_1+Z_N(p))$ ,  $U_2/U_0=0.425$ ,  $U_0=1.485 \text{ mV}$ ;  
d)  $U_1=2/\pi \cdot U_s=U_0$ ,  $U_s=2.33 \text{ mV}$ .

## Aufgaben der Klausur vom WS 2017

### Aufgabe 1

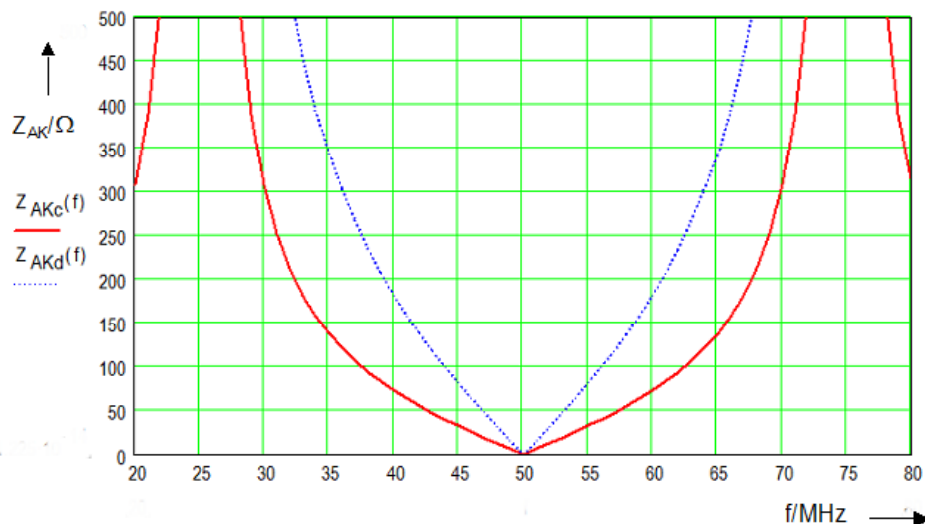
Ein periodisches rechteckförmiges Störsignal mit der Amplitude  $U_s$ , der Periode  $T_0=100$  ns und der Impulsdauer  $T_1=43.75$  ns ist zu untersuchen. Für den Gleichanteil gilt  $A_0 \approx 0$ , es sei quasi der Leerlaufwert maßgeblich. Als Grenzwerte für leitungsgebundene Störungen sind  $A_{g1}^* = 56$  dB( $\mu$ V) für  $0.5 \leq f/\text{MHz} < 5$  und  $A_{g2}^* = 60$  dB( $\mu$ V) für  $5 \leq f/\text{MHz} < 30$  MHz vorgegeben.

- Geben Sie das Amplitudenspektrum  $A(f)$  mit den relevanten Parameterwerten an.
- Bestimmen Sie den zulässigen Wert für  $U_s$ , damit die Grenzwerte eingehalten werden.
- Werden sie auch noch mit  $U_s$  nach b) und  $T_0=500$  ns,  $T_1=218.75$  ns eingehalten ?

### Aufgabe 2

Von zwei gekoppelten Leitungen mit der Länge  $l=2.5$  m sind die Beträge der Kurzschluss-Eingangswiderstände  $Z_{AKc}(f)$  und  $Z_{AKd}(f)$  im Gleich- und Gegentaktfall grafisch gegeben.

- Bestimmen Sie die Phasengeschwindigkeiten  $v_c$  und  $v_d$  und die Wellenwiderstände  $Z_c$  und  $Z_d$ , markieren Sie die gewählten abgeschätzten Werte in der gegebenen Grafik.
- Welche Leitungsbeläge erhält man damit ?
- Geben Sie die Parameter  $k$  für den Kopplungsfaktor und  $Z_w$  für den Wellenwiderstand der Einzelleitung an und zeigen Sie, dass  $k_L = k_C = k$  gilt.



### Aufgabe 3

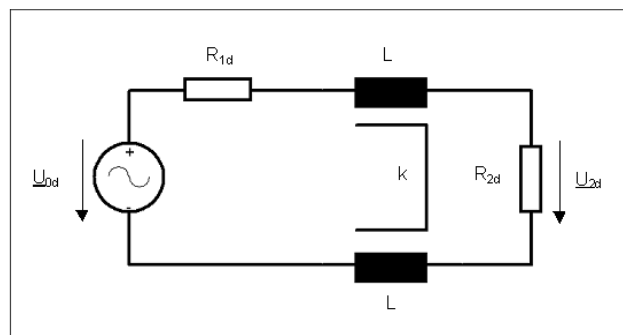
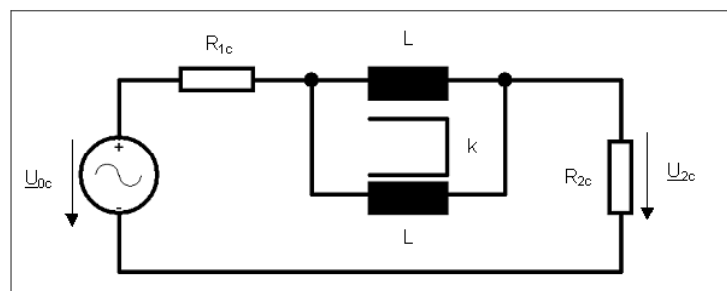
Im Hinblick auf die Untersuchung von feldgebundenen Störungen wird eine Übertragungsstrecke mit zwei gleichen Antennen im Abstand von  $r=3$  m aufgebaut. Innenwiderstand der Quelle  $R_1=50 \Omega$ , Eingangswiderstand des Empfängers  $R_e=50 \Omega$ .

- Bei  $f=1$  GHz wird am Sender die maximal verfügbare Wirkleistung von  $P_s^*=10$  dBm eingestellt, am Empfänger liegt der Messwert  $U_e^*=77$  dB( $\mu$ V) vor. Bestimmen Sie die Spannungen  $U_0$  sendeseitig und  $U_e$  in mV empfangsseitig sowie den vorliegenden Gewinnfaktor  $G$  und den Antennenfaktor  $k$ .
- Welche elektrische Feldstärke in  $\mu$ V/m bzw. in dB( $\mu$ V/m) liegt am Empfangsort vor ?
- Welche Leistung  $P_s$  und Leerlaufspannung  $U_0$  sind am Sender einzustellen, wenn am Empfangsort eine Feldstärke von  $E^*=60$  dB( $\mu$ V/m) bei  $f=1$  GHz vorliegen soll ?

### Aufgabe 4

Eine Entstördrossel mit den Daten  $L=1$  mH,  $k=0.8$  wird entsprechend den gegebenen Filterschaltungen im Gleich- und Gegentaktfall eingesetzt.

- Geben Sie für den Gleichtaktfall mit  $R_c=R_{1c}=R_{2c}=1$  k $\Omega$  die Übertragungsfunktion  $F_c(p)=U_{2c}(p)/U_{0c}(p)$  an und bestimmen Sie die Frequenz  $f_g$ , bei der  $U_{2c}=U_{0c}/(2\sqrt{2})$  gilt.
- Berechnen Sie die Sprungantwort im Gegentaktfall mit  $R_d=R_{1d}=R_{2d}=50 \Omega$ ,  $u_{0d}(t)=U_s \cdot s(t)$ ,  $U_s=1$  V und geben Sie den Spannungswert  $u_{2d}(t=T_x)$ ,  $T_x=10 \mu$ s an. Gilt für diesen Wert  $u_{2d}(t=T_x) > 0.9 \cdot u_{2d}(\infty)$  ? (z.B. hinsichtlich einer Signalübertragung mit rechteckförmigen Signalen mit einer Impulsbreite von  $T_x$ ).



## Lösungen WS 2017

### Aufgabe 1

- a)  $A_k = 2 \cdot U_s \cdot |\sin(k \cdot \pi \cdot 7/16)| / (k \cdot \pi)$  mit  $T_1/T_0 = 7/16$ ;  
b)  $U_s = 1.6 \text{ mV}$ ;  
c)  $f_0 = 2 \text{ MHz}$ , Bereich 1,  $A_1 = 1 \text{ mV}$  → Grenzwertüberschreitung.

### Aufgabe 2

- a)  $v_p = v_c = v_d = 2.5 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $Z_c = 100 \Omega$ ,  $Z_d = 250 \Omega$ ;  
b)  $L' = 650 \text{ nH/m}$ ,  $L_{12}' = 150 \text{ nH/m}$ ,  $C_0' = 20 \text{ pF/m}$ ,  $C_{12}' = 6 \text{ pF/m}$ ;  
c)  $Z_w = 158.1 \Omega$ ,  $k_L = L_{12}'/L' = k_C = C_{12}'/(C_{12}' + C_0') = 0.231$ .

### Aufgabe 3

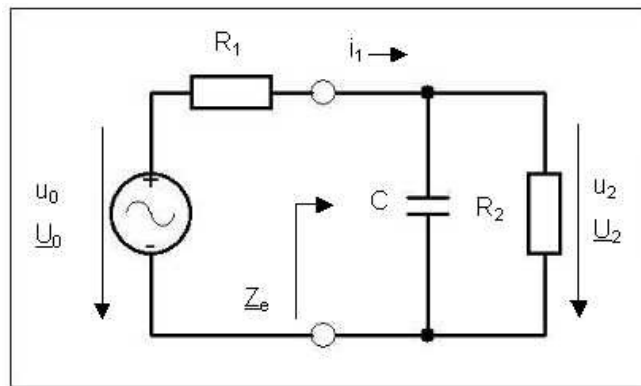
- a)  $U_0 = \sqrt{2} \text{ V}$ ,  $U_e = 7.08 \text{ mV}$ ,  $G = 1.26$ ,  $k = 28.9 \text{ 1/m}$ ;  
b)  $E = 204.7 \cdot 10^3 \mu\text{V/m}$ ,  $E^* = 106.2 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$ ;  
c)  $P_s = 0.24 \mu\text{W}$ ,  $U_0 = 6.9 \text{ mV}$ .

### Aufgabe 4

- a)  $F_c(p) = 0.5 / (1 + p \cdot \tau_c)$ ,  $\tau_c = 0.45 \mu\text{s}$ ,  $f_g = 353.7 \text{ kHz}$ ;  
b)  $u_{2d}(t) = U_s / 2 \cdot (1 - \exp(-t/\tau_d))$ ,  $\tau_d = 4 \mu\text{s}$ ,  $u_{2d}(T_x) = 0.459 \text{ V} > 0.9 \cdot u_{2d}(\infty) = 0.45 \text{ V}$ .

## Anhang: Zusammenstellung einiger grundlegender Rechenregeln

Schaltungsanalyse anhand eines einfachen Beispiels im Zeit- und Frequenzbereich



**Gleichstromverhalten:**  $U_2/U_0 = R_2/(R_1 + R_2)$ , Spannungsteiler mit dem Strom  $I = U_0/(R_1 + R_2)$ .

**Zeitverhalten:** Spannungsumlauf und Stromteiler

$$u_0(t) = R_1 \cdot i_1 + u_2 \text{ und } i_1(t) = C \cdot \frac{du_2}{dt} + \frac{u_2}{R_2}, \quad \dot{u}_2 = \frac{du_2}{dt}$$

$$u_0(t) = R_1 \cdot \left( C \cdot \dot{u}_2 + \frac{u_2}{R_2} \right) + u_2 = \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \cdot u_2 + R_1 \cdot C \cdot \dot{u}_2$$

$$\text{DGL für die Ausgangsspannung } u_2 + \tau \cdot \dot{u}_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_0(t),$$

mit der Zeitkonstanten  $\tau = R_1 \parallel R_2 \cdot C = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \cdot C$ . Sprungantwort mit  $u_0(t) = U_s \cdot s(t)$ , normierte Sprungfunktion  $s(t) = 0$  für  $t < 0$ ,  $s(t) = 1$  für  $t \geq 0$ , C vollständig entladen.

Lösung der DGL

$$u_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_s \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

**Bildbereich:** Komplexe Frequenz  $p = \sigma + j\omega$ , Übertragungsfunktion  $F(p) = U_2(p)/U_0(p)$ .

$R_2 \parallel (1/pC) = R_2 / (1 + p \cdot R_2 \cdot C)$ , Spannungsteiler  $U_2(p)/U_0(p) = R_2 \parallel (1/pC) / [R_1 + R_2 \parallel (1/pC)]$ .

$$F(p) = \frac{R_2 / (1 + p \cdot R_2 \cdot C)}{R_1 + R_2 / (1 + p \cdot R_2 \cdot C)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C} \text{ mit } \tau = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C$$

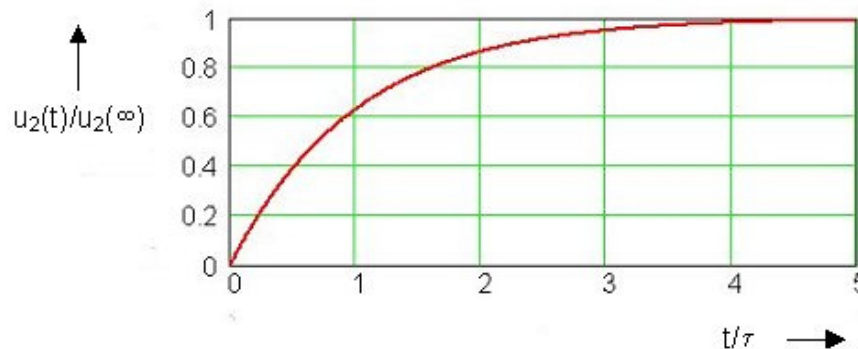
Sprungantwort mit LAPLACE-Transformation:

$$U_2(p) = U_0(p) \cdot F(p), \quad U_0(p) = \frac{U_s}{p} \text{ (Sprung im Bildbereich),}$$

$$U_2(p) = U_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{p \cdot (1 + p \cdot \tau)} \rightarrow u_2(t) = U_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \text{ (s.o.)},$$

(Rücktransformation in den Zeitbereich).

Normierte Sprungantwort der gegebenen Schaltung mit  $u_2(\infty) = R_2 / (R_1 + R_2) \cdot U_s$ :



**Frequenzbereich:**  $p = j\omega$ , Frequenzgang  $\underline{E}(j\omega) = \underline{U}_2 / \underline{U}_0$ , komplexe Größen, gültig für sinusförmige Signale im eingeschwungenen Zustand.

$\underline{E}(j\omega) = F(\omega) \cdot \exp(j\varphi(\omega))$ , Amplitudengang  $F(\omega) = |\underline{E}(j\omega)|$ , Phasengang  $\varphi(\omega)$ .

$$\underline{E}(j\omega) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{(1 + j\omega \cdot \tau)},$$

$$F(\omega) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot \tau)^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctan(\omega \cdot \tau)$$

Eingangswiderstand (ohne  $R_1$ !)  $\underline{Z}_e(j\omega) = R_2 \parallel (1 / j\omega \cdot C) = \frac{R_2}{1 + j\omega \cdot R_2 \cdot C}$

Reflexionsfaktor  $\underline{S}_{11} = \frac{\underline{Z}_e - R_1}{\underline{Z}_e + R_1}$ , Wirkleistungsverhältnis  $|\underline{S}_{21}|^2 = \frac{P_2}{P_{1\max}}$ ,

$$S_{11}^2 + S_{21}^2 = 1, \quad P_2 = U_2^2 / R_2, \quad P_{1\max} = U_0^2 / (4 \cdot R_1)$$

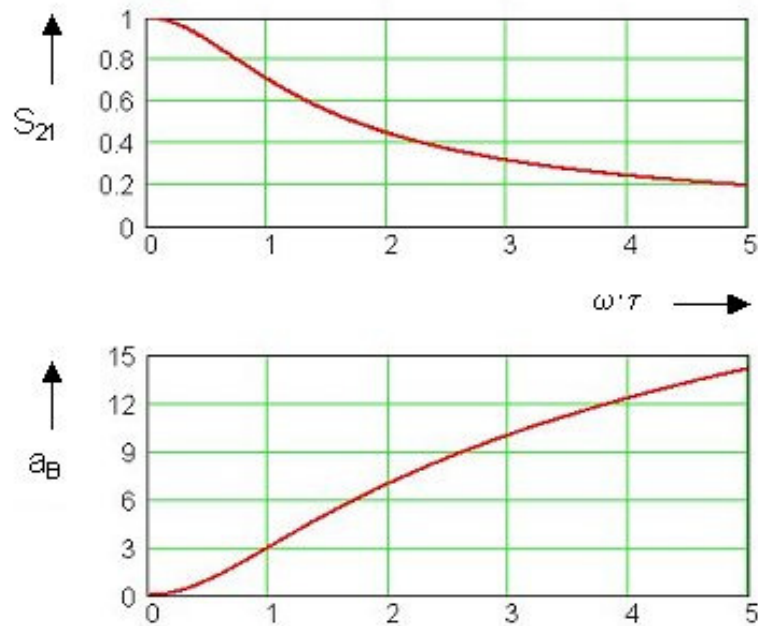
Betriebsübertragungsfaktor  $S_{21}(p) = 2 \cdot \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \cdot F(p)$

Betriebsdämpfung  $a_B = 10 \cdot \log \frac{1}{S_{21}^2} \text{ dB}$

Mit  $R_2 = R_1$  für die gegebene Schaltung:  $S_{21}(p) = 2 \cdot F(p) = \frac{1}{1 + p \cdot \tau}$ ,

$$a_B = 20 \cdot \log \sqrt{1 + (\omega \cdot \tau)^2} \text{ dB}$$

Grafische Darstellung von  $S_{21}(\omega\tau) = |\underline{S}_{21}(j\omega\tau)|$  und von  $a_B(S_{21}(\omega\tau))$  mit der normierten Frequenz  $\omega\tau$ :



Spezielle Werte:  $S_{21}(\omega\tau=1) = 1/\sqrt{2}$  und  $a_B(\omega\tau=1) = 3 \text{ dB}$ .

Grenzfrequenz  $f_g = 1/\tau$ .