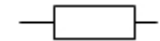


1 Grundlagen Elektrotechnik

1.1 Schaltelemente

Widerstand R



$$u(t) = R \cdot i(t)$$

$$i(t) = \frac{1}{R} \cdot u(t)$$

$$\underline{Z}_R = R$$

Kapazität C



$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tilde{t}) d\tilde{t}$$

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}$$

Spannung springt nicht

Induktivität L



$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(\tilde{t}) d\tilde{t}$$

$$\underline{Z}_L = j\omega L$$

Strom springt nicht

1.2 Schaltvorgänge

$$u(t) = U_E + (U_A - U_E) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad i(t) = I_E + (I_A - I_E) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau = CR = \frac{L}{R}$$

Betrachte: Zur Bestimmung von R alle Quellen ausschalten und Belastung aus der Sicht des Speicherelements betrachten.

2 Schwingkreise

2.1 Freie Schwingung

$$\omega_r \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]: \text{ Resonanzfrequenz} \quad \left| \quad \omega_0 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]: \text{ Eigenfrequenz} \right.$$

$$Q_P, Q_S: \text{ Güte} \quad \left| \quad \xi = \frac{1}{2Q}: \text{ Dämpfungsfaktor} \right.$$

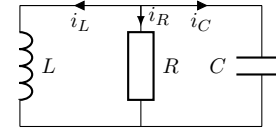
$$\alpha_{1,2}: \text{ Lösungen der Charakteristischen Gleichung}$$

2.1.1 Ermittlung der Konstanten

1. Ermittlung der Anfangsbedingungen bei $t = 0$. $u(t)$ durch den Ansatz, dass die Spannung an C und der Strom an L nicht springen kann.
2. $\dot{u}(0)$ bestimmen aus $i_L + i_R + i_C = 0$, wobei $i_C = C \cdot \dot{u}(0)$
3. Ermittlung der Konstanten $U_1, U_2, \beta_u, U_a, U_b, I_1, I_2, \beta_i, I_a, I_b$: Funktion $u(t)$, bzw. $i(t)$ bei $t = 0$ mit Anfangsbedingungen vergleichen. das selbe für $\dot{u}(t)$, bzw. $\dot{i}(t)$.

2.1.2 Formeln

Parallelschwingkreis



$$\ddot{u} + \frac{1}{RC} \dot{u} + \frac{1}{LC} u = 0$$

$$\ddot{u} + \frac{\omega_r}{Q_P} \dot{u} + \omega_r^2 u = 0$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Q_P = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Fall $Q < \frac{1}{2}$: Aperiodisch $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}$

$$u(t) = U_1 \cdot e^{\alpha_1 t} + U_2 \cdot e^{\alpha_2 t}$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q_P} \pm \sqrt{\frac{1}{4Q_P^2} - 1}$$

Fall $Q = \frac{1}{2}$: Kritisch, $\alpha_1 = \alpha_2$

$$u(t) = (U_1 + \beta_u) \cdot e^{\alpha t}$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q_P} = -\omega_r$$

Fall $Q > \frac{1}{2}$: Periodisch, $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{C}$

$$u(t) = e^{\frac{\omega_r}{2Q_P} t} (U_a \cos \omega_0 t + U_b \sin \omega_0 t)$$

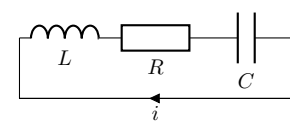
$$\dot{u}(t=0) = -\frac{\omega_r}{2Q_P} U_a + \omega_0 U_b$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q_P} \pm j\omega_0$$

$$\omega_0 = \omega_r \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_P^2}}$$

$$\omega_0 \approx \omega_r \text{ wenn } Q_P \gg \frac{1}{2}$$

Serienschwingkreis



$$\ddot{i} + \frac{R}{L} \dot{i} + \frac{1}{LC} i = 0$$

$$\ddot{i} + \frac{\omega_r}{Q_S} \dot{i} + \omega_r^2 i = 0$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Q_S = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Fall $Q < \frac{1}{2}$: Aperiodisch $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}$

$$i(t) = I_1 \cdot e^{\alpha_1 t} + I_2 \cdot e^{\alpha_2 t}$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q_S} \pm \sqrt{\frac{1}{4Q_S^2} - 1}$$

Fall $Q = \frac{1}{2}$: Kritisch, $\alpha_1 = \alpha_2$

$$i(t) = (I_1 + \beta_i) \cdot e^{\alpha t}$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q_S} = -\omega_r$$

Fall $Q > \frac{1}{2}$: Periodisch, $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{C}$

$$i(t) = e^{\frac{\omega_r}{2Q_S} t} (I_a \cos \omega_0 t + I_b \sin \omega_0 t)$$

$$\dot{i}(t=0) = -\frac{\omega_r}{2Q_S} I_a + \omega_0 I_b$$

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q_S} \pm j\omega_0$$

$$\omega_0 = \omega_r \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_S^2}}$$

$$\omega_0 \approx \omega_r \text{ wenn } Q_S \gg \frac{1}{2}$$

2.1.3 Kurvendiskussion

im Folgenden wird der Faktor $y(t) = e^{-\frac{\omega_r}{2Q} t}$ untersucht.

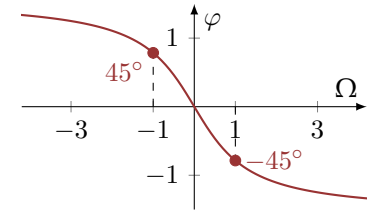
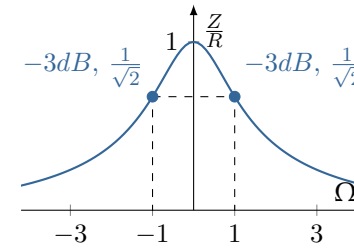
- $y(t = \frac{2Q}{\omega_r}) = e^{-1} \approx 0.368 = 36.8\%$
- nach Q Perioden: $t = Q \cdot T = \frac{2\pi Q}{\omega_r}, y(t = \frac{2\pi Q}{\omega_r}) = e^{-\pi} \approx 0.0432 = 4.32\%$

2.2 erzwungene Schwingung

$$\begin{array}{l|l} \omega_1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]: & \text{untere 3dB Grenze} \\ B \left[\frac{1}{\text{s}} \right]: & \text{Bandbreite} \\ \Omega: & \text{Normierte Frequenz} \end{array} \quad \begin{array}{l|l} \omega_2 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]: & \text{obere 3dB Grenze} \\ \nu: & \text{Verstimmung} \\ \frac{Z}{R} \hat{=} \frac{Y}{G}: & \text{Normierter Frequenzgang} \end{array}$$

2.2.1 Formeln

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} = \frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} & \Omega &= \nu \cdot Q = \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \cdot Q \\ B &= f_2 - f_1 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} = \frac{\omega_r}{2\pi Q} & \omega_{1,2} &= \omega_r \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{4Q^2} + 1} \mp \frac{1}{2Q} \right) \\ &\text{bei } \omega = \omega_1 \rightarrow \Omega = -1, & &\text{bei } \omega = \omega_2 \rightarrow \Omega = +1 \end{aligned}$$



3 Reaktanz-Eintore

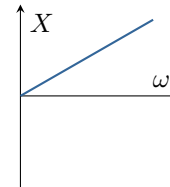
$$X = \text{Im}(\underline{Z}) \quad \text{Reaktanz} \quad \left| \quad B = \text{Im}(\underline{Y}) \quad \text{Suszeptanz} \right.$$

3.1 Grundelemente

Induktivität



$$X(\omega) = \omega L$$



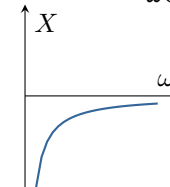
Nullstellen:
 $\omega = 0$

Polstellen:
 $\omega \rightarrow \infty$

Kapazität



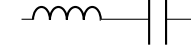
$$X(\omega) = -\frac{1}{\omega C}$$



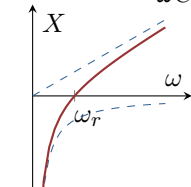
$\omega \rightarrow \infty$

$\omega = 0$

S-Schwingkreis



$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$



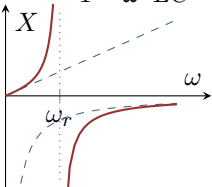
$\omega = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$\omega \rightarrow 0, \omega \rightarrow \infty$

P-Schwingkreis



$$X = \frac{\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$



$\omega = 0, \omega \rightarrow \infty$

$\omega = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

2.2.2 Normierter Frequenzgang

$$\frac{Z}{R} = \frac{1}{1 + j\Omega} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^2}} \angle -\arctan \Omega, \quad \Omega = \nu \cdot Q = Q \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)$$

3.2 Eigenschaften

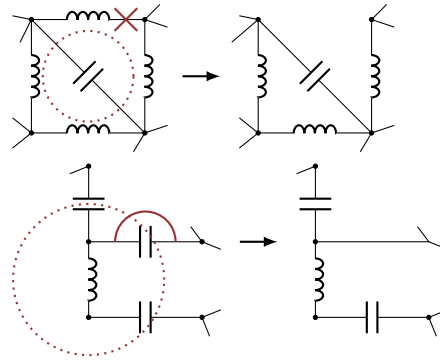
$$\underline{Z}(j\omega) = \frac{a_n(j\omega)^n + a_{n-2}(j\omega)^{n-2} + a_{n-4}(j\omega)^{n-4}}{b_m(j\omega)^m + b_{m-2}(j\omega)^{m-2} + b_{m-4}(j\omega)^{m-4}} = \frac{P_n(j\omega)}{Q_m(j\omega)}$$

- $|n - m| = 1$: Im Zähler und im Nenner kommen nie dieselben Potenzen vor.

- Den Polynomen $P_n(j\omega)$ und $Q_n(j\omega)$ fehlen keine Koeffizienten.
- Die Anzahl der Elemente entspricht der Anzahl endlicher Nullstellen und Polstellen.
- Die Ableitung der Funktion $\underline{Z}(j\omega)$ ist immer positiv, d.H \underline{Z} ist monoton Steigend.

3.3 Minimum-Reaktanz-Eintore MRET

Wenn ein **Kreis** aus lauter L oder C vorhanden ist, kann ein L (bzw. C) weggelassen (unterbrochen) werden. klemmen bleiben geöffnet!



Ein **Trennbündel**, wie auf der Grafik angezeigt, darf nur L oder C-Elemente schneiden. Sobald ein Trennbündel gefunden wurde, ein Element kurzgeschlossen werden. Die Klemmen müssen geschlossen werden!

3.4 Bestimmung des RET-Types

Typ	$X(\omega)$	$\omega = 0$	$\omega \rightarrow \infty$	L-Kr.	L-Tb.	C-Kr.	C-Tb.
L		○	×	✓	✓	—	—
C		×	○	—	—	✓	✓
S		×	×	—	✓	—	✓
P		○	○	✓	—	✓	—

3.5 RET-Synthese

3.5.1 Mittels Partialbruchzerlegung

1. Impedanz- oder Admittanzfunktion $\underline{F}(s) = \frac{2s^6 + 22s^4 + 58s^2 + 48}{3s^5 + 21s^3 + 30s}$
2. PBZ bilden & koeffizienten ermitteln $\underline{F}(s) = \frac{2s}{3} + \frac{A}{3s} + \frac{Bs}{s^2 + 1} + \frac{Cs}{s^2 + 5}$
mit $A = \frac{24}{5}$, $B = \frac{8}{9}$, $C = \frac{8}{45}$
3. Nach Netzwerkelementen umformen $\underline{F}(s) = \frac{2}{3}s + \frac{1}{\frac{15}{24}s} + \frac{1}{\frac{9}{8}s + \frac{1}{9}s} + \frac{1}{\frac{45}{8}s + \frac{1}{\frac{8}{255}s}}$

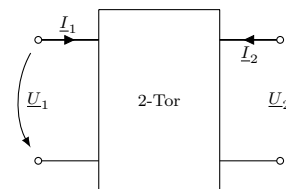
3.5.2 Mittels Kettenbruchzerlegung

1. Voraussetzung: Unecht gebrochen $\underline{F}(s) = \frac{2s^6 + 22s^4 + 58s^2 + 48}{3s^5 + 21s^3 + 30s}$
2. Polynomdivision ausführen $\underline{F}(s) = \frac{2}{3}s + \frac{8s^4 + 48s^2 + 48}{3s^5 + 21s^3 + 30s}$
3. mit Kehrwert des Rests bei 2. fortfahren $\underline{F}_1(s) = \frac{3s^5 + 21s^3 + 30s}{8s^4 + 48s^2 + 48}$
4. Abgespaltete Werte Seriell und Parallel (je nach Bedeutung von \underline{F}_n) sind die Elemente.

3.6 Äquivalenz

1. Gegebenes RET übersichtlich aufzeichnen
2. In das RET zusätzlich L- bzw. C-Elemente so einfügen, dass L- bzw. C-Kreise oder Trennbündel entstehen.
3. Durch Weglassen / Kurzschliessen von alten RET-Elementen das erweiterte RET auf ein MRET zurückführen.
4. Impedanzfunktion des alten RET und des MRET berechnen und die unbekannten Elemente durch Koeffizientenvergleich bestimmen.

4 Zweitore



- **Reziprok:** Speist man ein reziprokes Zweitor aus einer Quelle mit Innenwiderstand \underline{Z}_0 und belastet es am Ausgang mit der selben Impedanz \underline{Z}_0 , so ist es für die Kenngrößen gleichgültig, in welcher Richtung das Zweitor betrieben wird.
- **Richtsymmetrie:** Beide Tore können elektrisch beim Umtauschen nicht unterschieden werden.
- **Erdsymmetrie:** Werden die beiden Eingangsanschlüsse, so wie die Ausgangsanschlüsse, separat vertauscht, ist kein Unterschied von Aussen erkennbar.

4.1 Matrizen

Form	Vierpolgleichung	Berechnung
Impedanz	$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = [\underline{Z}] \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$	$[\underline{Z}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{I}_2=0} & \underline{Z}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2} \Big _{\underline{I}_1=0} \\ \underline{Z}_{21} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{I}_2=0} & \underline{Z}_{22} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \Big _{\underline{I}_1=0} \end{bmatrix}$
Admitanz	$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = [\underline{Y}] \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}$	$[\underline{Y}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1} \Big _{\underline{U}_2=0} & \underline{Y}_{12} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{U}_1=0} \\ \underline{Y}_{21} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_1} \Big _{\underline{U}_2=0} & \underline{Y}_{22} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{U}_1=0} \end{bmatrix}$
Ketten	$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = [\underline{A}] \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ -\underline{I}_2 \end{bmatrix}$	$[\underline{A}] = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_2=0} & \underline{A}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{-\underline{I}_2} \Big _{\underline{U}_2=0} \\ \underline{A}_{21} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_2=0} & \underline{A}_{22} = \frac{\underline{I}_1}{-\underline{I}_2} \Big _{\underline{U}_2=0} \end{bmatrix}$
Hybrid	$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = [\underline{H}] \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}$	$[\underline{H}] = \begin{bmatrix} \underline{H}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{U}_2=0} & \underline{H}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_1=0} \\ \underline{H}_{21} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} \Big _{\underline{U}_2=0} & \underline{H}_{22} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}_2} \Big _{\underline{I}_1=0} \end{bmatrix}$

Koeffizientenbeziehungen

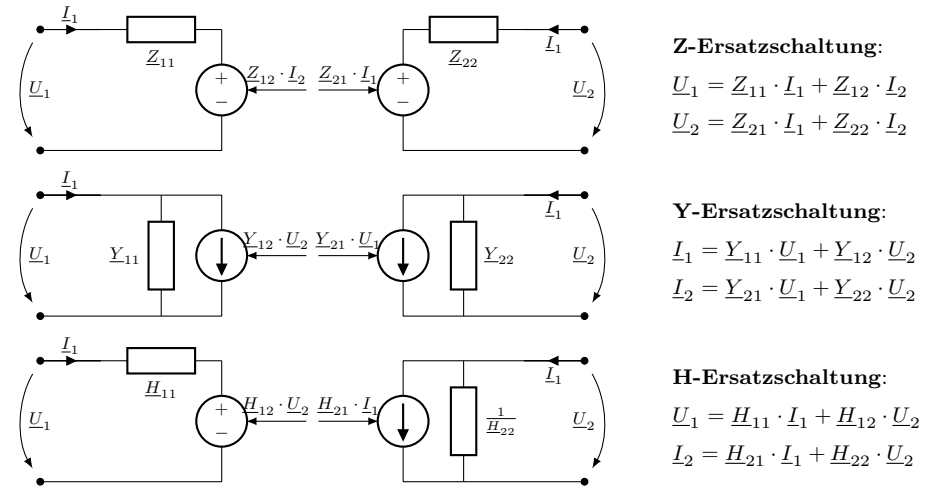
reziprok	$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}, \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}, \quad \det[\underline{A}] = 1, \quad \underline{H}_{12} = -\underline{H}_{21}$
symmetrisch	$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}, \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}, \quad \det[\underline{A}] = 1, \quad \underline{H}_{12} = -\underline{H}_{21}$ $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{22}, \quad \underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{22}, \quad \underline{A}_{11} = \underline{A}_{22}, \quad \det[\underline{H}] = 1$

4.2 Leerlauf und Kurzschluss am Zweitor

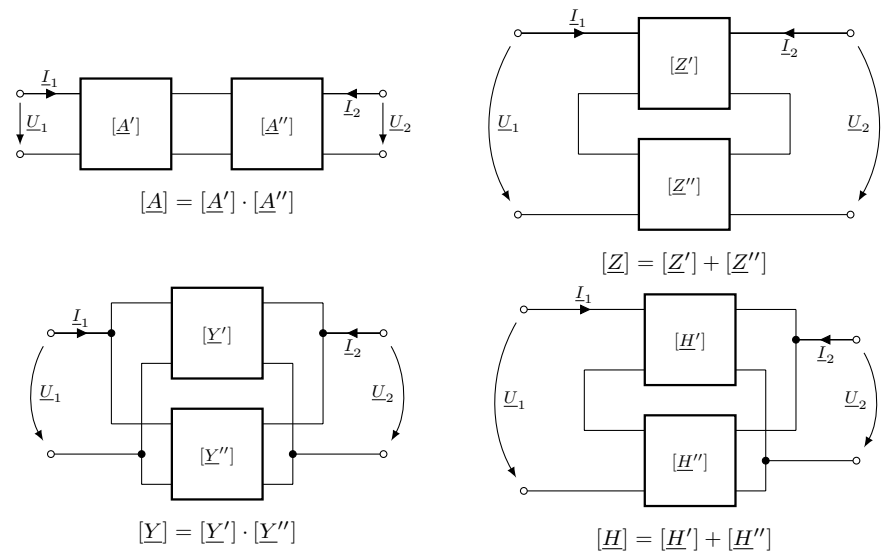
Bei einer Kurzschlussimpedanz $\underline{Z}_{1k}, \underline{Z}_{2k}$ wird die jeweils gegenüberliegende Seite kurzgeschlossen. Bei den Leerlaufimpedanzen $\underline{Z}_{1l}, \underline{Z}_{2l}$

	$[\underline{A}]$	$[\underline{Z}]$	$[\underline{Y}]$	$[\underline{H}]$
$\underline{Z}_{1k} =$	$\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11}}$	$\frac{\det[\underline{Z}]}{\underline{Z}_{22}}$	$\frac{1}{\underline{Y}_{11}}$	\underline{H}_{11}
$\underline{Z}_{2k} =$	$\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11}}$	$\frac{\det[\underline{Z}]}{\underline{Z}_{11}}$	$\frac{1}{\underline{Y}_{22}}$	$\frac{\underline{H}_{11}}{\det[\underline{H}]}$
$\underline{Z}_{1l} =$	$\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{21}}$	\underline{Z}_{11}	$\frac{\underline{Y}_{22}}{\det[\underline{Y}]}$	$\frac{1}{\underline{H}_{22}}$
$\underline{Z}_{2l} =$	$\frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{21}}$	\underline{Z}_{22}	$\frac{\underline{Y}_{11}}{\det[\underline{Y}]}$	$\frac{1}{\underline{H}_{22}}$

4.3 Ersatzschaltungen



4.4 Zusammenschaltung von Zweitoren



5 Netzwerke und Systeme

5.1 Duale Netzwerke

1. Zählrichtung Festlegen (z.B: im Uhrzeigersinn → Pfeile nach Innen).
2. In jede Netzwerkmache einen Knoten für das duale Netzwerk setzen
3. Alle Elemente durchschneiden und mit dualen Elementen den benachbarten Knoten verbinden
4. Zählrichtungen übertragen (wie zuvor Festgelegt)
5. Dualfaktoren wählen:

$$R' = \frac{D^2}{R}, \quad L' = D^2 C, \quad C' = \frac{L}{D^2}, \quad \underline{U}' = D \underline{I}, \quad \underline{I}' = \frac{\underline{U}}{D}$$

5.2 Netzwerkfunktionen

Polynom-Darstellung: $\underline{F}(s) = K \cdot \frac{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}{s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0} = K \frac{P_n(s)}{Q_m(s)}$

Produktform $\underline{F}(s) = k \cdot \frac{(s - n_1)(s - n_2) \dots (s - n_n)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_m)}$

Norm. Produktform Es kommen nur Faktoren (s) , $(1 + as)$ und $(1 + bs + cs^2)$ vor.
Alle Konstanten sind reell

Partialbruchform: $\underline{F}(s) = B_0 + B_1s + \frac{K_1}{s - p_1} + \frac{K_2}{s - p_2} + \dots + \frac{K_n}{s - p_n}$

5.3 Pol und Ortskurve des Parallelschwingkreis

$$\underline{Z}(s) = \frac{sL}{s^2LC + s\frac{L}{R} + 1} = \omega_r^2 \frac{sL}{s^2 + s\frac{\omega_r}{Q} + \omega_r^2}$$

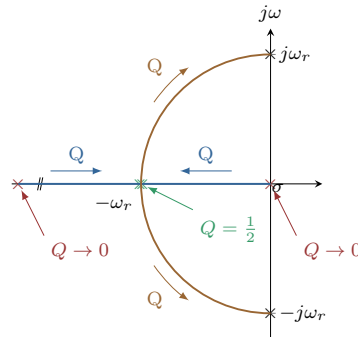
$$Q \ll \frac{1}{2} \quad s_{1,2} \approx 0, -\infty$$

$$Q < \frac{1}{2} \quad s_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q} \pm \omega_r \sqrt{\frac{1}{4Q^2} - 1}$$

$$Q = \frac{1}{2} \quad s_{1,2} = -\omega_r$$

$$Q > \frac{1}{2} \quad s_{1,2} = -\frac{\omega_r}{2Q} \pm j\omega_r \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

$$Q \gg \frac{1}{2} \quad s_{1,2} \approx \pm j\omega_r$$



5.4 Freie Schwingung - Allgemeine Lösung

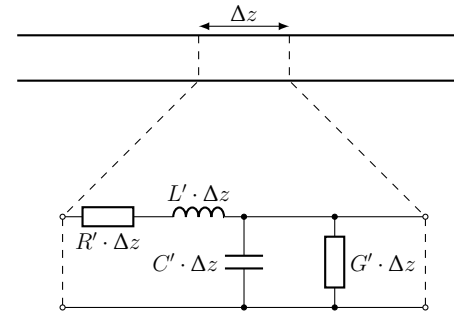
Von der Übertragungsfunktion $H(s)$ lässt die freie Schwingung beim Ausschalten berechnen, wobei s_n die Polstellen von $H(s)$ sind:

$$u(t) = C_1 \cdot e^{s_1 t} + C_2 \cdot e^{s_2 t} + C_3 \cdot e^{s_3 t} + \dots, \quad s_n = \sigma_n + j\omega_n$$

Fallunterscheidung: $\left\{ \begin{array}{ll} \text{reeller Pol} & \rightarrow C_i \cdot e^{\sigma_i t} \\ \text{doppelter reeller Pol} & \rightarrow C_{i1} \cdot e^{\sigma_i t} + C_{i2} \cdot t \cdot e^{\sigma_i t} \\ \text{komplex conj. Poolpaar} & \rightarrow \underline{C}_{i1} \cdot e^{(\sigma_{i1} + j\omega_{i1})t} + \underline{C}_{i2} \cdot e^{(\sigma_{i2} + j\omega_{i2})t} \\ & \underline{C}_{i1} \text{ und } \underline{C}_{i2} \text{ sind komplex conj.} \end{array} \right.$

6 Leitungstheorie

6.1 Modell einer Leitung



$$\begin{aligned} C' &= \frac{\Delta C}{\Delta z} && \text{Kapazitätsbelag} \\ L' &= \frac{\Delta L}{\Delta z} && \text{Induktivitätsbelag} \\ R' &= \frac{\Delta R}{\Delta z} && \text{Widerstandsbelag} \\ G' &= \frac{\Delta G}{\Delta z} && \text{Leitwertbelag} \end{aligned}$$

Bei einer verlustlosen Leitung ist $R' = 0$ und $G' = 0$.

$$\underline{Z}_W \quad \text{Wellenimpedanz} \quad \underline{Z}_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \stackrel{\text{verlustlos}}{=} \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

6.2 Wellengleichung

$$\frac{d^2 \underline{U}}{dz^2} = \gamma^2 \cdot \underline{U} \quad \frac{d^2 \underline{I}}{dz^2} = \gamma^2 \cdot \underline{I}$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

$$\Rightarrow \underline{U}(z) = \underline{U}_{v0} \cdot e^{-\gamma z} + \underline{U}_{r0} \cdot e^{\gamma z} \quad \underline{I}(z) = \underline{I}_{v0} \cdot e^{-\gamma z} - \underline{I}_{r0} \cdot e^{\gamma z}$$

$$u(t, z) = \underbrace{\hat{U}_{v0} \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{v0} - \beta z)}_{\text{In z-Richtung laufende gedämpfte Welle}} + \underbrace{\hat{U}_{r0} \cdot e^{\alpha z} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{v0} + \beta z)}_{\text{Gegen z-Richtung laufende gedämpfte Welle}}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c_0}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad v_{ph} = \frac{\omega}{\beta} = f \cdot \lambda \quad \underline{U}_{v2} = \underline{U}_{v1} \cdot e^{-j\beta l}$$

\underline{U}_v	Vorlaufende Welle (positive z-Richtung)	α	Dämpfungsbelag
\underline{U}_r	Rücklaufende Welle (negative z-Richtung)	$\beta \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$	Phasenbelag
v_{ph}	Geschwindigkeit der Welle	z	Distanz vom Anfang
c_0	Lichtgeschwindigkeit ($= 299.29 \cdot 10^6$)	ϵ_r	Relative Permittivität

