

Übungsunterlagen zur Vorlesung

ELEKTROENERGIESYSTEME TEIL 1

Sommersemester 2015

1. Aufgabe: Magnetischer Kreis mit Luftspalt

Gegeben sei der in **Bild 1.1** dargestellte magnetische Kreis. Im Luftspalt soll eine Induktion B_L von 0,2 T erreicht werden. Die Stromdichte in der Kupferwicklung soll höchstens $j_{Cu} = 3 \text{ A/mm}^2$ betragen. Der Drahtdurchmesser beträgt $d = 1 \text{ mm}$.

Die Anordnung hat die folgenden Abmessungen: $l_1 = 2 \text{ cm}$, $l_2 = 6 \text{ cm}$, $\delta = 0,2 \text{ cm}$, $d_1 = 1 \text{ cm}$, $d_2 = 2 \text{ cm}$, $d_3 = 1 \text{ cm}$, Breite der Anordnung $b = 2 \text{ cm}$.

Die relative Permeabilität des Eisens kann zu $\mu_r = 2000$ angesetzt werden.

Streuung, Verzerrung der Feldlinien in den Kanten und die Aufweitung des Felds im Luftspalt können vernachlässigt werden.

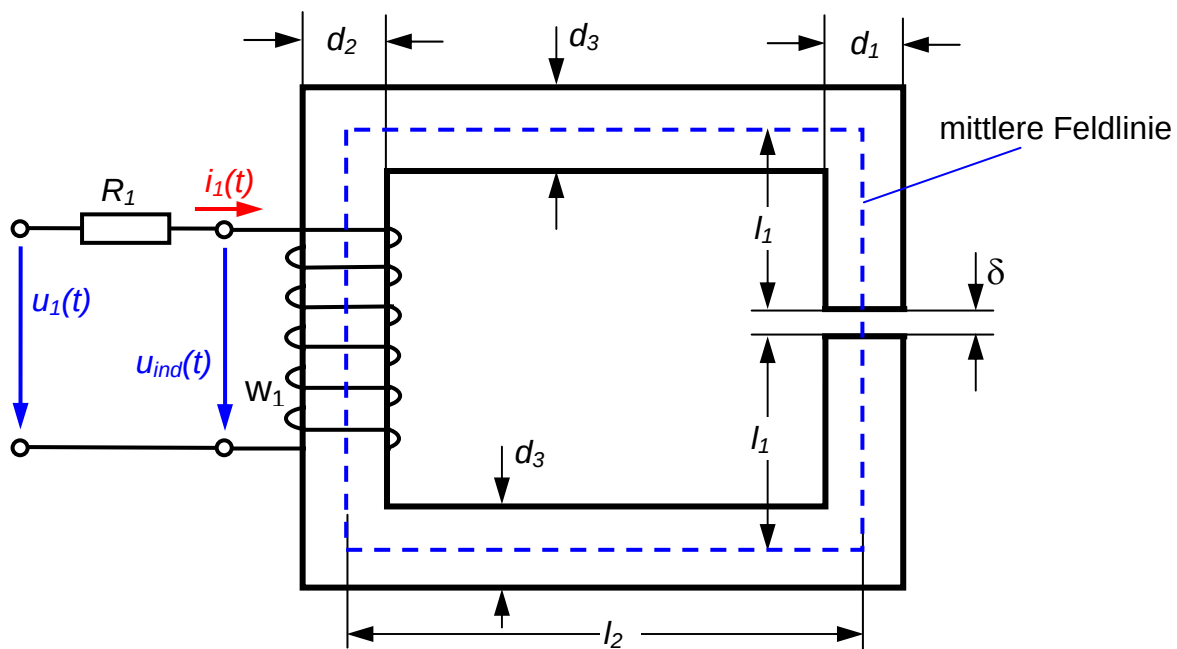


Bild 1.1: Magnetischer Kreis mit unterschiedlichen Geometrieparametern

- Berechnen Sie die einzelnen magnetischen Widerstände der verschiedenen Abschnitte des magnetischen Kreises.
- Berechnen Sie die erforderliche Windungszahl N um bei maximaler Stromdichte in der Kupferwicklung eine Induktion im Luftspalt von mindestens $B_L = 0,2 \text{ T}$ zu erreichen.
- Bestimmen Sie den (analytischen) Zusammenhang zwischen der Induktion B_L , der Stromdichte j_{Cu} in der Wicklung, dem Leiterquerschnitt A_{Cu} , der Windungszahl N und den Geometrieparametern.

2. Aufgabe: Magnetischer Kreis mit Verzweigung und Luftspalt

Gegeben sei der in **Bild 2.1** dargestellte magnetische Kreis. Gegeben sind die geometrischen Verhältnisse (h , d , b), die Windungszahlen (N_1 und N_2) und die Ströme (i_1 und i_2) sowie die relative Permeabilität des Eisens (μ_r). Der Querschnitt des Kernmaterials ist quadratisch, d. h. das Maß d gilt auch für die Breite der Anordnung in die Zeichenebene hinein. Streuung, Verzerrung der Feldlinien in den Kanten und die Aufweitung des Felds im Luftspalt können vernachlässigt werden.

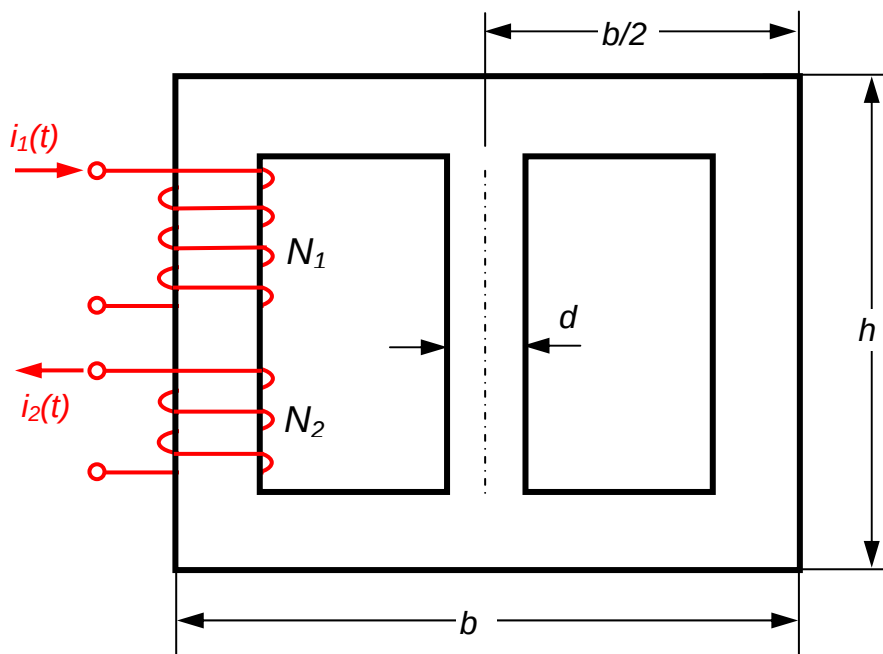


Bild 2.1: Magnetischer Kreis mit Verzweigungen

- Erstellen Sie ein magnetisches Ersatzschaltbild für den magnetischen Kreis und geben Sie die Elemente des magnetischen Kreises an.
- Berechnen Sie die magnetischen Flüsse in den einzelnen Schenkeln sowie die dort herrschenden magnetischen Induktionen.

Nun wird in den dritten Schenkel ein Luftspalt δ eingefügt (**Bild 2.2**).

- Bestimmen Sie nun die magnetischen Flüsse in den einzelnen Schenkeln. Wie verändert sich qualitativ die Verteilung der magnetischen Flüsse in den Schenkeln, wenn man ein hohes μ_r wählt und zusätzlich den Luftspalt vergrößert.

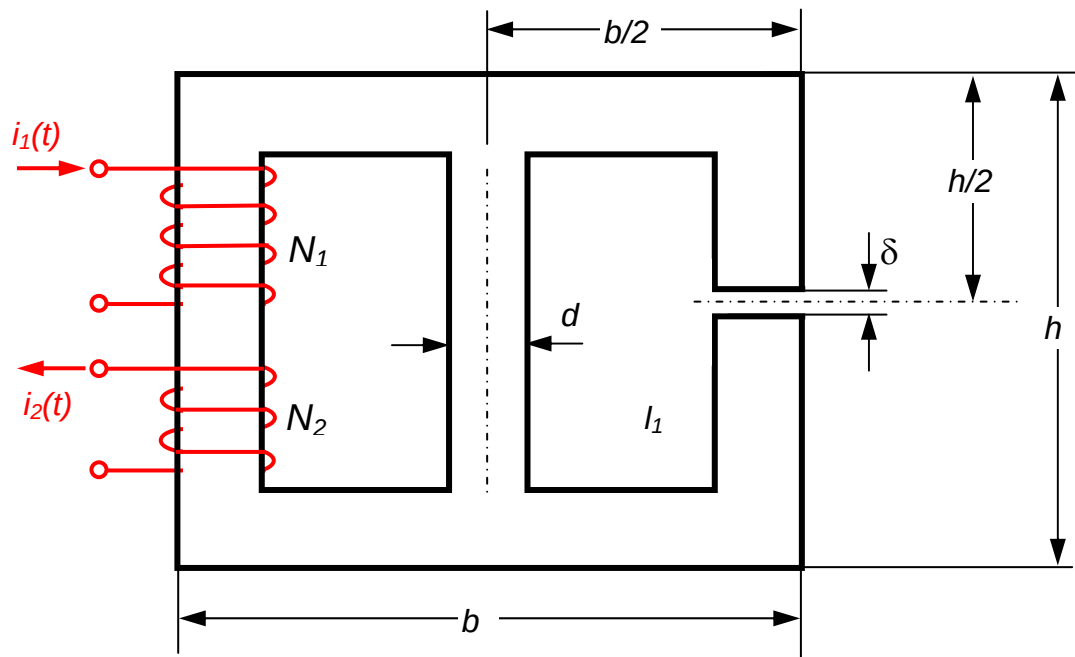


Bild 2.2: Magnetischer Kreis mit Verzweigungen und Luftspalt

3. Aufgabe: Unsymmetrische Last am Drehstromnetz

Ein Ingenieur betreibt am Drehstromnetz an einer Phase eine ohmsche Last (G) und an der zweiten Phase eine kapazitive Last (C) (**Bild 3.1**). Er weiß, dass bei unsymmetrischer Belastung des Drehstromnetzes üblicherweise über den Sternpunkt N ein Strom I_M fließt. Er überlegt, ob es nicht möglich wäre, diesen Strom I_M durch eine geeignete Impedanz Z_T in der dritten Phase zum Verschwinden zu bringen. Da sich der Ingenieur noch nie so intensiv mit solchen Dingen beschäftigt hat, fragt er Sie um Rat. Helfen Sie dem Ingenieur bei seiner Arbeit!

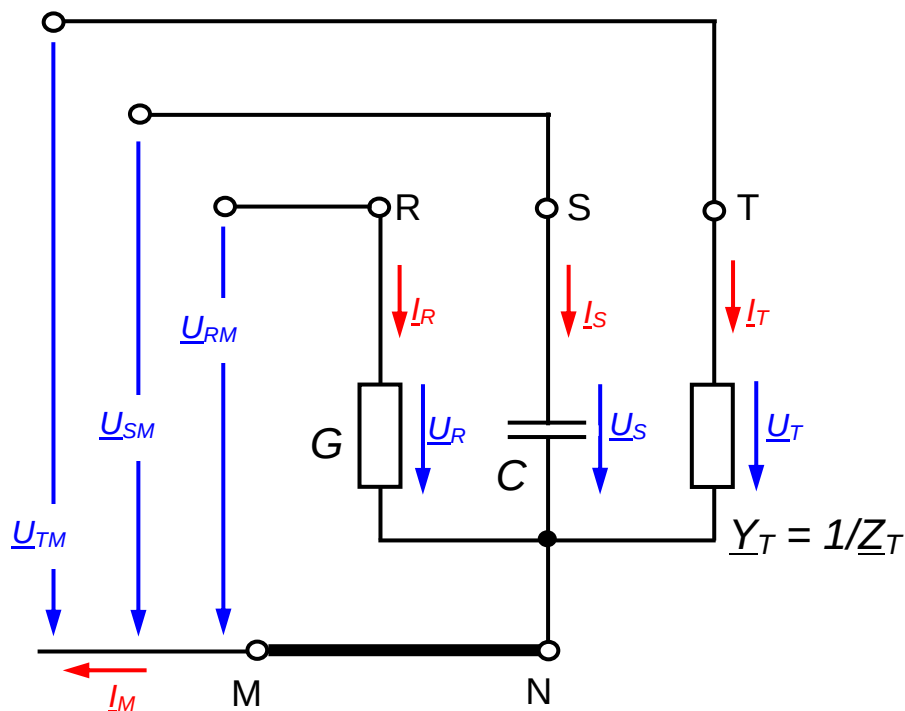


Bild 3.1: Unsymmetrischer Verbraucher am Drehstromnetz

- Berechnen Sie den Strom I_M für die in **Bild 3.1** gegebene Last bei Anschluss an ein symmetrisches Drehspannungssystem. Formeln aus dem Skript brauchen nicht erneut abgeleitet zu werden.
- Berechnen Sie den erforderlichen Leitwert Y_T , damit der Strom I_M zu Null wird.
- Überlegen Sie sich eine einfache Schaltung, mit der Sie diesen Leitwert realisieren können und geben Sie die notwendigen Bauelemente an.
- Nun wird die Verbindung zwischen M und N geöffnet. Bestimmen Sie die Spannung U_{MN} unter Bedingung, dass der Strom bei geschlossener Verbindung $I_M = 0$ war.

4. Aufgabe: Kapazitiver Spannungswandler

Kapazitive Spannungswandler dienen der Messung hoher Spannungen in Energieversorgungsnetzen und stellen eine Kombination aus kapazitiver Spannungsteilung und transformatorischer Spannungswandlung dar (**Bild 4.1**). Sie sind kostengünstiger als reine induktive Spannungswandler.

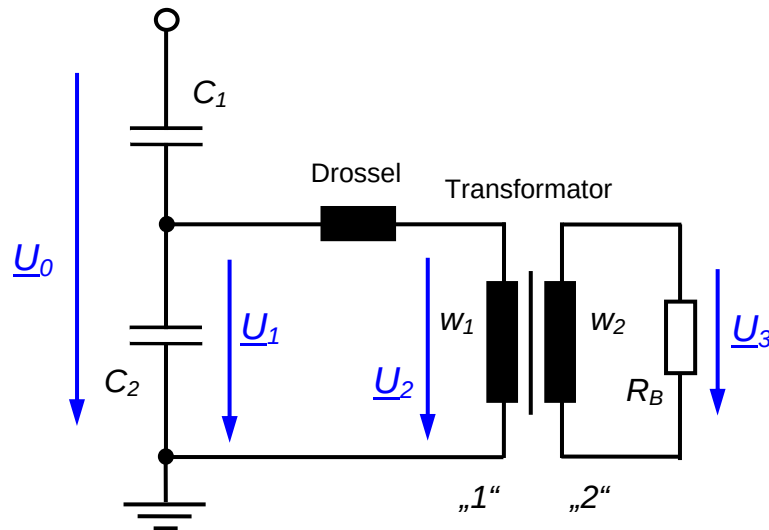


Bild 4.1: Schaltung eines kapazitiven Spannungswandlers, belastet mit einer Bürde R_B

- Der Transformator kann als idealer Transformator betrachtet werden. Berechnen Sie mit diesem Ansatz die Spannung $\underline{U}_2$ als Funktion der Spannung $\underline{U}_3$ und der Windungszahlen $w_1/w_2 = \ddot{u}$ sowie die auf die Primärseite (Index „1“) des Transformators transformierte Impedanz $\underline{Z} = R_B'$.
- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der Anordnung gemäß **Bild 4.1** mit der auf der Primärseite des Transformators wirksamen Impedanz $\underline{Z} = R_B'$. Berücksichtigen Sie, dass die Drossel durch ihren Wicklungswiderstand R_D und ihre Induktivität L_D wirkt.
- Berechnen Sie die Übertragungsfunktionen $\underline{E}_1(\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_0}$ und $\underline{E}_2(\omega) = \frac{\underline{U}_3}{\underline{U}_0}$.
- Wie muss die Drossel L_D gewählt (abgeglichen) werden, damit die Übertragungsfunktion $\underline{E}_1(\omega)$ rein reell wird? Bestimmen Sie $\underline{E}_1(\omega)$ und $\underline{E}_2(\omega)$ für diesen Fall.
- Üblicherweise ist der Wicklungswiderstand R_D der Drossel gegenüber dem auf der Primärseite des Transformators (Index „1“) wirksamen ohmschen Widerstand (Impedanz $\underline{Z}$) vernachlässigbar. Bestimmen Sie $\underline{E}_1(\omega)$ und $\underline{E}_2(\omega)$ für diesen Fall unter der Voraussetzung, dass $\underline{E}_1(\omega)$ und $\underline{E}_2(\omega)$ rein reell werden, d. h. dass die unter (d.) gefundene Abgleichbedingung für L_D erfüllt ist.

5. Aufgabe: Bandpass

Am Eingang des in **Bild 5.1** dargestellten Vierpols wirkt die eingeprägte Spannung $\underline{U}_1$, als Folge tritt am Lastwiderstand R_2 die Spannung $\underline{U}_2$ auf. Untersuchen Sie schrittweise das Übertragungsverhalten in Abhängigkeit der Kreisfrequenz ω , d. h. die Eigenschaften der Übertragungsfunktion $\underline{E}(\omega) = \underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)$.

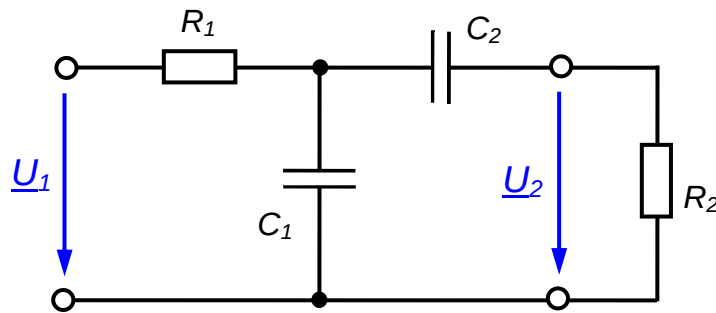


Bild 5.1: Schaltung eines passiven Bandpasses

- Berechnen Sie $\underline{E}(\omega) = \underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)$.
- Berechnen Sie $|\underline{E}(\omega)| = |\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)|$ und $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\}$.
- Bestimmen Sie die Kreisfrequenz ω_0 , bei der $|\underline{E}(\omega)|$ ein Maximum annimmt. Wie groß ist dieser Maximalwert? Welche Werte nimmt $|\underline{E}(\omega)|$ bei $\omega = 0$ und $\omega \rightarrow \infty$ an?
- Skizzieren Sie die Funktion $|\underline{E}(\omega)|$ mit Hilfe der Ergebnisse aus c).
- Begründen Sie mit physikalischen Überlegungen anhand des Schaltbildes, warum sehr niedrige und sehr hohe Frequenzen nicht übertragen werden.
- Skizzieren Sie $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\}$ als Funktion von ω und geben Sie die Werte von φ bei $\omega = 0$ und $\omega \rightarrow \infty$ an. Bei welcher Kreisfrequenz wird $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\} = 0$?

6. Aufgabe: Wanderwellen auf einer Messleitung

Der Spannungsimpuls eines Impulsgenerators soll über eine Koaxialleitung an ein Speicheroszilloskop übertragen werden (**Bild 6.1**). Die Koaxialleitung hat einen Wellenwiderstand von $Z_0 = 50 \, \Omega$. Die Eingangsimpedanz des Speicheroszilloskops beträgt $C_{OS} = 30 \, \text{pF}$ parallel zu $R_{OS} = 1 \, \text{M}\Omega$. Sie sollen die Anordnung so dimensionieren, dass der Spannungsimpuls möglichst verzerrungsfrei gemessen werden kann. Gehen Sie davon aus, dass der Spannungsimpuls des Impulsgenerators mit guter Näherung durch eine Sprungfunktion beschrieben werden kann:

$$u_0(t) = U_0 \cdot \sigma(t) \quad .$$

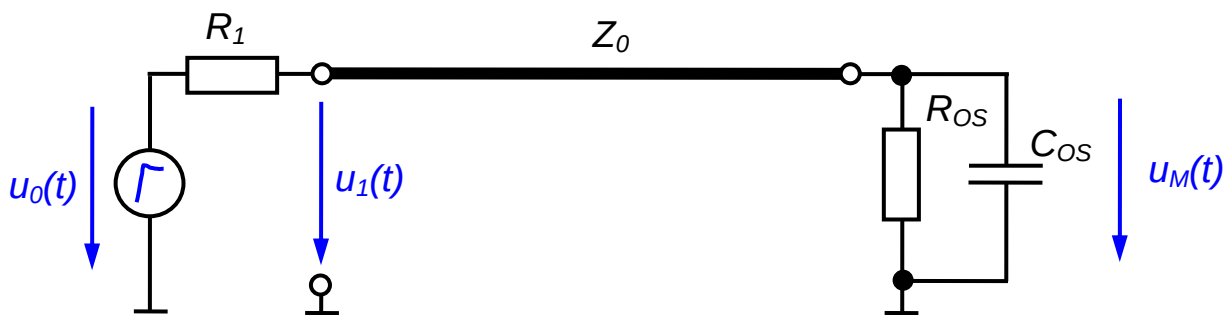


Bild 6.1: Anordnung zur Messung der Ausgangsspannung eines Impulsgenerators

- Wie muss der Widerstand R_1 gewählt werden, damit die vom Speicheroszilloskop zurücklaufende Wanderwelle an R_1 vollständig absorbiert wird.
- Geben Sie die Zeitfunktion der Spannungswelle $u_1(t)$ an, die in die Leitung einläuft.
- Bestimmen Sie die Zeitfunktion der Spannung $u_M(t)$, die am Speicheroszilloskop gemessen werden kann.

Benutzen Sie hierzu die folgenden Korrespondenzen zwischen dem Zeitbereich und den Laplacetransformierten.

$$\mathcal{L}\{\sigma(t)\} = \frac{1}{p}$$

$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \mathcal{L}\left\{\frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \frac{1}{p \cdot (p + \alpha)}$$

p ist die Variable im Bildbereich, auch als „komplexe Frequenz“ bezeichnet.

- d. Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion $F(p) = U_M(p)/U_0(p)$ des Systems. Darin sind $U_0(p)$ und $U_M(p)$ die Laplacetransformierten der Spannungen $u_0(t)$ am Ausgang des Impulsgenerators und $u_M(t)$ am Signaleingang des Speicheroszilloskops. Offensichtlich ist $Z_0 \ll R_{OS}$. Wie vereinfacht sich dadurch die Übertragungsfunktion?
- e. Welche Zeitkonstante kommt durch den Messkreis, bestehend aus Leitung und Eingangsimpedanz des Speicheroszilloskops zustande? In welche Richtung muss man C_{OS} optimieren, wenn die Spannung des Impulsgenerators möglichst unverfälscht gemessen werden soll? Es gelte weiterhin $Z_0 \ll R_{OS}$.
- f. Berechnen Sie die Laplacetransformierte der von Speicheroszilloskop zurücklaufenden Welle für die Vereinfachung $Z_0 \ll R_{OS}$.

Hinweis: Berücksichtigen Sie, dass am Speicheroszilloskop gilt:

$$\text{vorlaufende Welle} + \text{rücklaufende Welle} = U_M(p)$$

und

$$\text{vorlaufende Welle} = U_1(p)$$

7. Aufgabe: Schutz eines Transformators vor steilflankigen Wanderwellen

Zwei Ingenieure möchten den Transformator am Ende einer Freileitung (Stichleitung) vor Überspannungen mit hoher Steilheit (dU/dt) schützen. Einer der Ingenieure kommt auf die Idee, eine Drossel in Serie zwischen die beiden Freileitungsabschnitte zu schalten. Beurteilen Sie die Wirksamkeit der Maßnahme und berechnen Sie dazu die Spannung $u_2(t)$, die in die zweite Leitung einläuft und auf den Transformator am Ende der Leitung trifft.

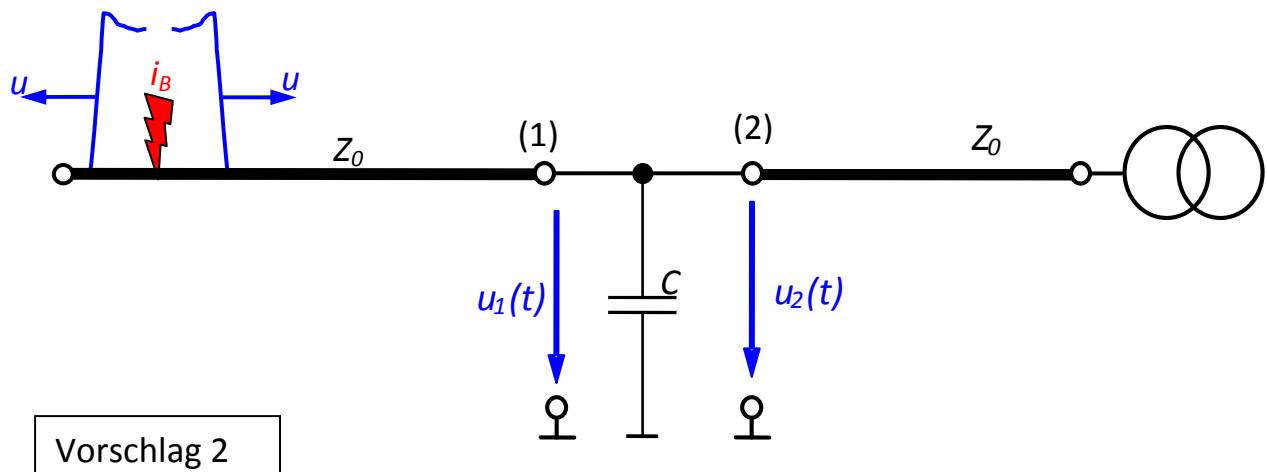
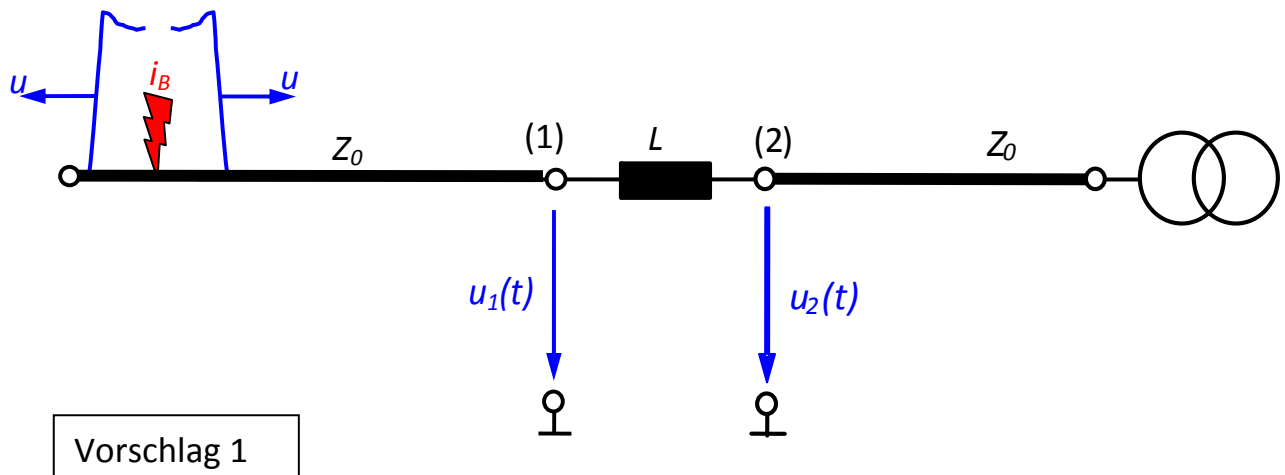


Bild 7.1: Vorschläge zum Schutz des Transformators gegen steile Blitzüberspannungen

- a. Im Fall eines Blitzeinschlages soll ein Spitzenwert des Blitzstromes i_B von 10 kA und eine Impedanz der Freileitung von 350Ω angenommen werden. Berechnen Sie die Amplitude U_0 der Spannungswelle u , die sich zu beiden Seiten der Freileitung ausbreitet.

Die Spannungswelle kann mit guter Näherung durch eine Rechteckspannung

$$u_0(t) = U_0 \cdot \sigma(t)$$

dargestellt werden.

Verwenden Sie für die folgenden Teilaufgaben das Wellenersatzschaltbild und beachten Sie, dass eine in die zweite Leitung einlaufende Welle zunächst deren Wellenwiderstand „sieht“.

Benutzen Sie die folgenden Korrespondenzen zwischen dem Zeitbereich und den Laplacetransformierten:

$$\mathcal{L}\{\sigma(t)\} = \frac{1}{p}$$

$$\mathcal{L}\{\sigma(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t}\} = \frac{1}{(p + \alpha)}$$

$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \mathcal{L}\left\{\frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \frac{1}{p \cdot (p + \alpha)}$$

p ist die Variable im Bildbereich, auch als „komplexe Frequenz“ bezeichnet.

- b. Berechnen Sie für den Vorschlag 1 die in die zweite Leitung einlaufende Welle, d. h. die Spannung $u_2(t)$ am Punkt (2).
- c. Berechnen Sie für den Vorschlag 1 die Zeitfunktion der am Punkt (1) reflektierten und in die erste Leitung zurücklaufende Welle.
- d. Der andere Ingenieur schlägt vor, eine Kapazität C zwischen den beiden Leitungen gegen Erde zu schalten (Vorschlag 2). Berechnen Sie hierfür ebenfalls die Spannung $u_2(t)$.
- e. Unter welcher Bedingung sind die beiden Lösungen äquivalent? Welche der beiden Lösungen zum Schutz des Transformators halten Sie trotz der Äquivalenz für günstiger und warum?

8. Aufgabe: Übertragungsverhalten einer Kabeltrasse mit ohmscher Last

Gegeben sei eine Kabeltrasse mit einer rein ohmschen Last. Berechnen Sie das Übertragungsverhalten dieser Anordnung im Laplacebereich $F(p) = U_a(p)/U_e(p)$ mit Hilfe der Maschenstromanalyse. Die Energiespeicher seien zu Beginn der Betrachtung ungeladen. Nutzen Sie hierzu die in Bild 8.1 eingezeichneten Maschenströme I_1 und I_2 .

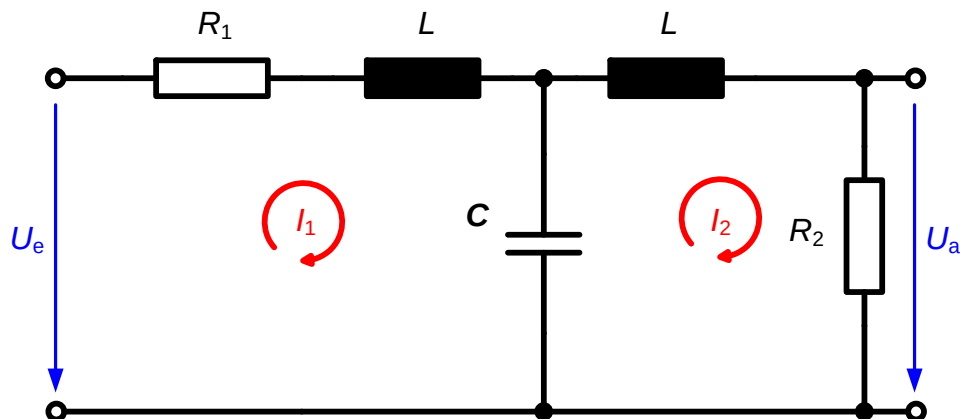


Bild 8.1: Kabeltrasse mit ohmscher Last

- Stellen Sie für die gegebene Anordnung das resultierende Gleichungssystem (bei Anwendung der Maschenstromanalyse) in Matrixform auf.
- Wie lässt sich nun aus den Maschenströmen das Übertragungsverhalten der Anordnung berechnen? Bringen Sie ihr Ergebnis auf die Form $F(p) = \frac{\chi}{p^3\psi + p^2\nu + p\zeta + \kappa}$.