

**Übungsunterlagen zur Vorlesung**

# **ELEKTROENERGIESYSTEME**

**Sommersemester 2014**

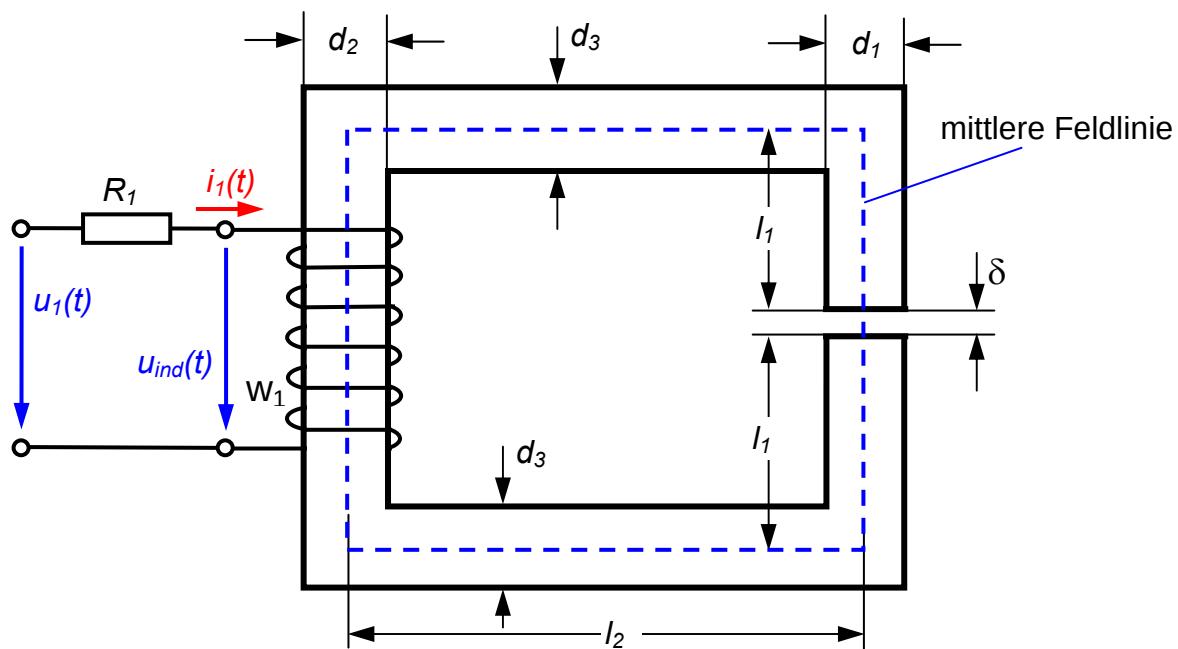
### 1. Aufgabe: Magnetischer Kreis mit Luftspalt

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.

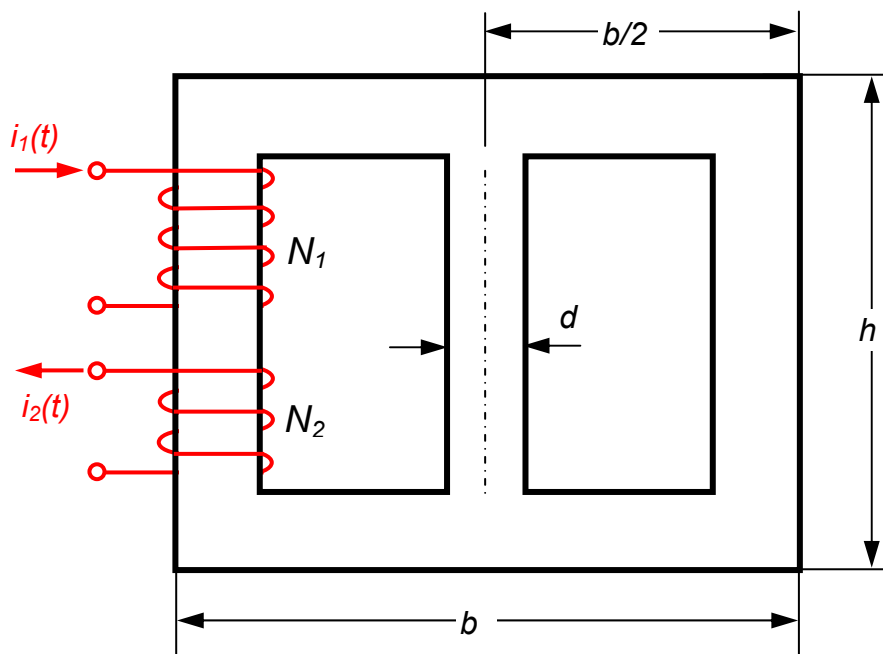


**Bild 1.1:** Magnetischer Kreis mit unterschiedlichen Geometrieparametern

- 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 ( $\mu_r$ ). 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.

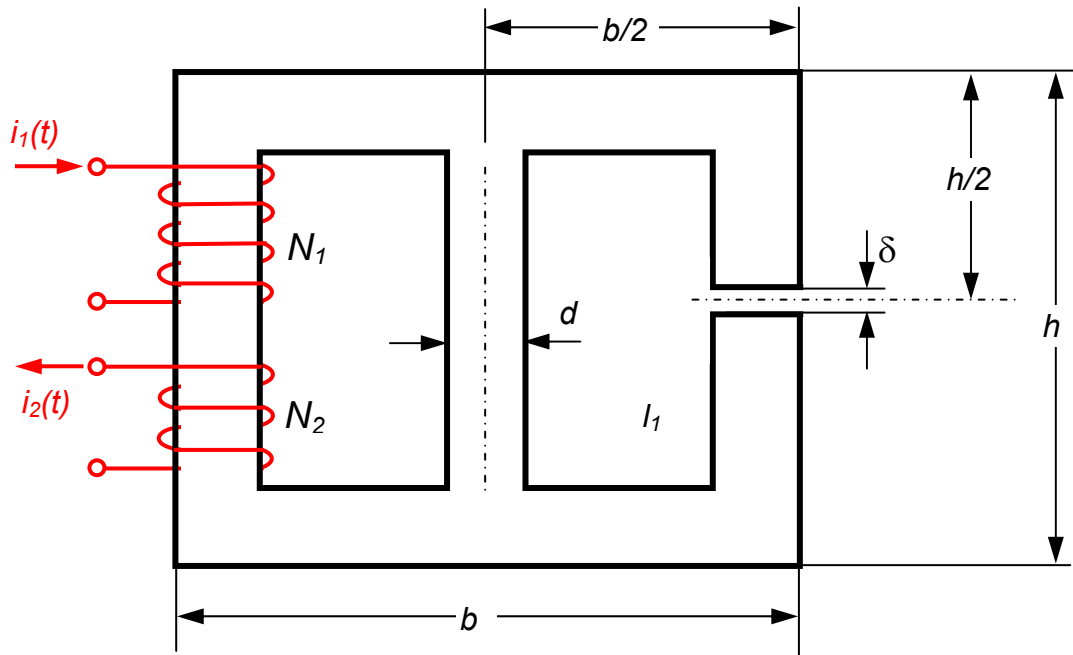


**Bild 2.1:** Magnetischer Kreis mit Verzweigungen

- 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  $\delta$  eingefügt (**Bild 2.2**).

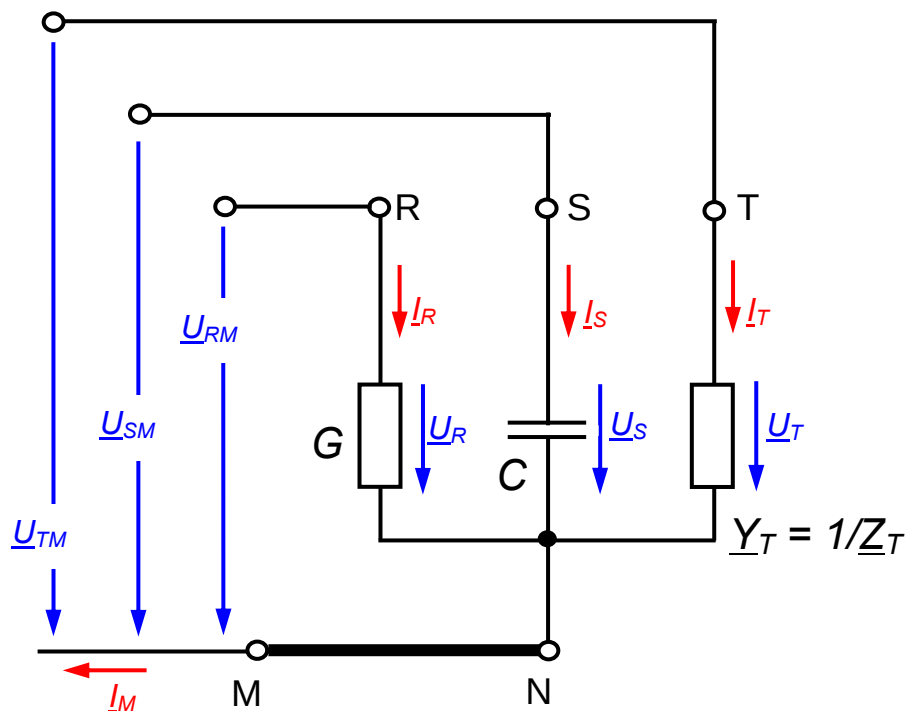
- Bestimmen Sie nun die magnetischen Flüsse in den einzelnen Schenkeln. Wie verändert sich qualitativ die Verteilung der magnetischen Flüsse in den Schenkeln, wenn man ein hohes  $\mu_r$  wählt und zusätzlich den Luftspalt vergrößert.



**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  $\underline{I}_M$  fließt. Er überlegt, ob es nicht möglich wäre, diesen Strom  $\underline{I}_M$  durch eine geeignete Impedanz  $\underline{Z}_T$  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!

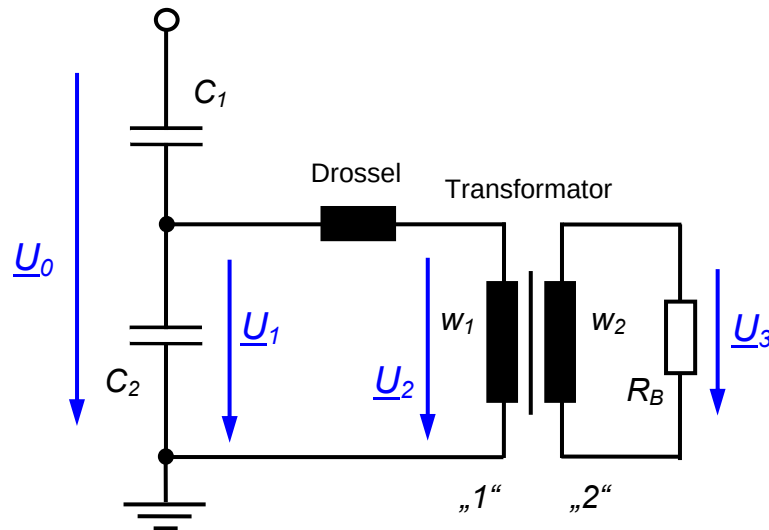


**Bild 3.1:** Unsymmetrischer Verbraucher am Drehstromnetz

- Berechnen Sie den Strom  $\underline{I}_M$  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  $\underline{Y}_T$ , damit der Strom  $\underline{I}_M$  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  $\underline{U}_{MN}$  unter Bedingung, dass der Strom bei geschlossener Verbindung  $\underline{I}_M = 0$  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.

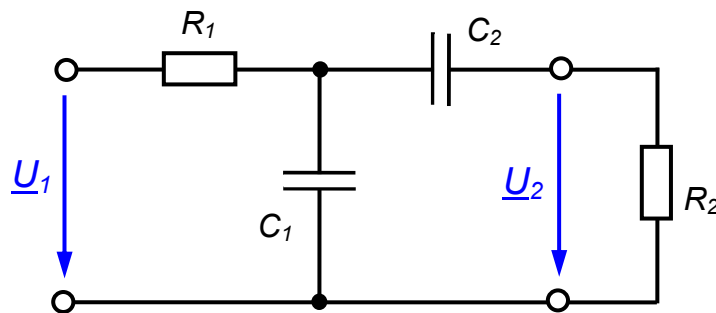


**Bild 4.1:** Schaltung eines kapazitiven Spannungswandlers, belastet mit einer Bürde  $R_B$

- 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  $w_1/w_2 = \dot{u}$  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  $\underline{F}_1(\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_0}$  und  $\underline{F}_2(\omega) = \frac{\underline{U}_3}{\underline{U}_0}$ .
- Wie muss die Drossel  $L_D$  gewählt (abgeglichen) werden, damit die Übertragungsfunktion  $\underline{F}_1(\omega)$  rein reell wird? Bestimmen Sie  $\underline{F}_1(\omega)$  und  $\underline{F}_2(\omega)$  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  $\underline{F}_1(\omega)$  und  $\underline{F}_2(\omega)$  für diesen Fall unter der Voraussetzung, dass  $\underline{F}_1(\omega)$  und  $\underline{F}_2(\omega)$  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  $\omega$ , d. h. die Eigenschaften der Übertragungsfunktion  $\underline{F}(\omega) = \underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)$ .



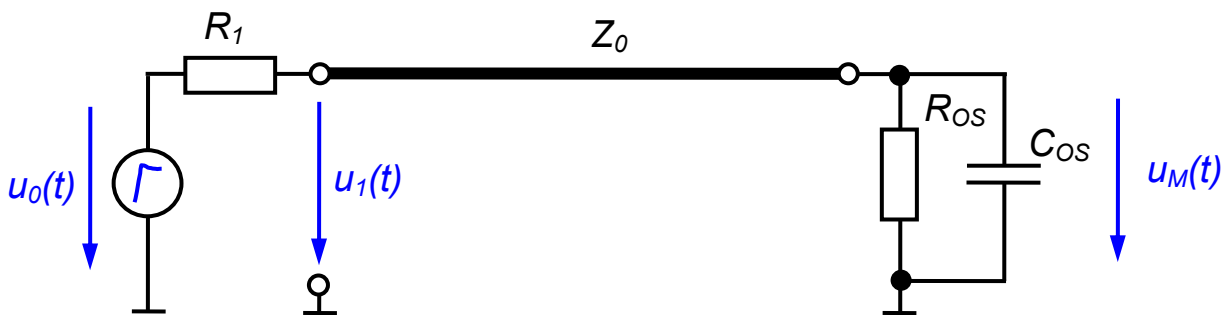
**Bild 5.1:** Schaltung eines passiven Bandpasses

- Berechnen Sie  $\underline{F}(\omega) = \underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)$ .
- Berechnen Sie  $|\underline{F}(\omega)| = |\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)|$  und  $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\}$ .
- Bestimmen Sie die Kreisfrequenz  $\omega_0$ , bei der  $|\underline{F}(\omega)|$  ein Maximum annimmt. Wie groß ist dieser Maximalwert? Welche Werte nimmt  $|\underline{F}(\omega)|$  bei  $\omega = 0$  und  $\omega \rightarrow \infty$  an?
- Skizzieren Sie die Funktion  $|\underline{F}(\omega)|$  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  $\omega$  und geben Sie die Werte von  $\varphi$  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:

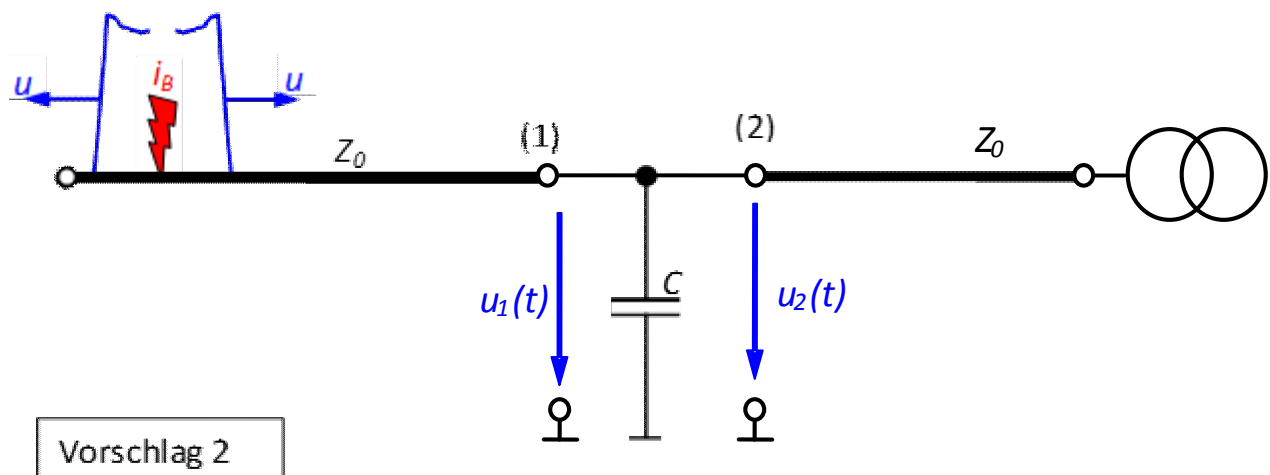
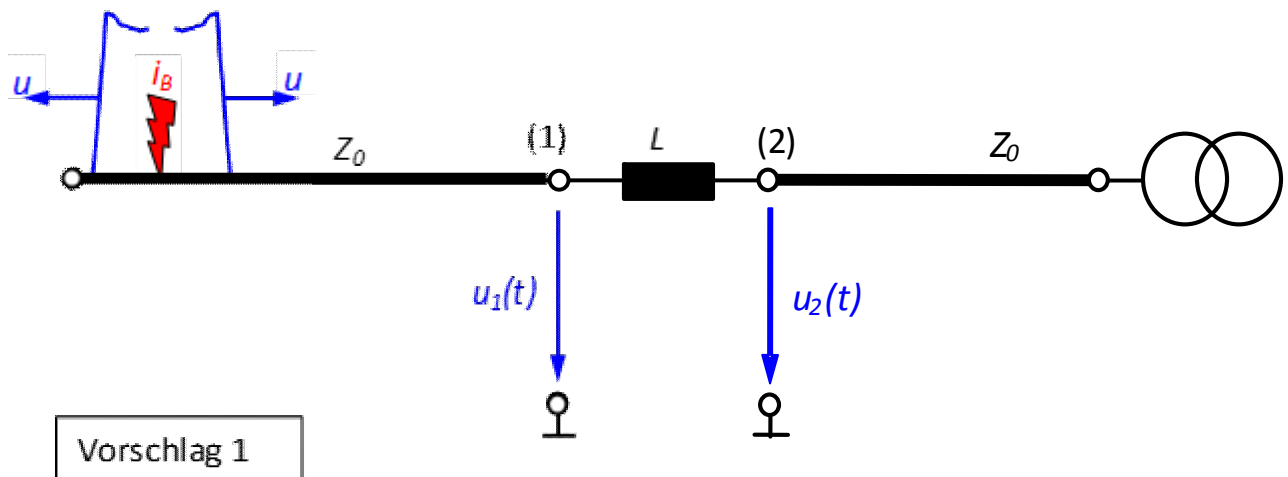
$$\text{vorlaufende Welle} + \text{rücklaufende Welle} = U_M(p)$$

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

- Im Fall eines Blitzeinschlages soll ein Spitzenwert des Blitzstromes  $i_B$  von 10 kA und eine Impedanz der Freileitung von  $350 \, \Omega$  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:

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

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

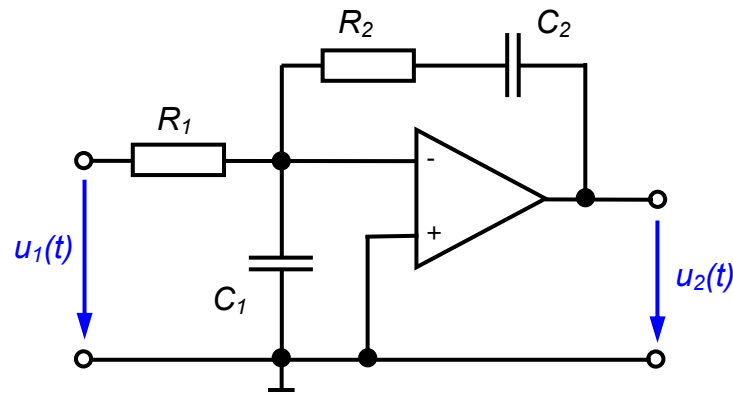
$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \mathcal{L}\left\{\frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \frac{1}{p \cdot (p + \alpha)}$$

$p$  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: Operationsverstärker mit RC-Netzwerk

Die in **Bild 8.1** dargestellte Schaltung enthält einen Operationsverstärker mit einer sehr großen, aber endlichen Verstärkung  $v$ . Berechnen Sie das Übertragungsverhalten der Schaltung.



**Bild 8.1:** Operationsverstärker mit RC-Netzwerk

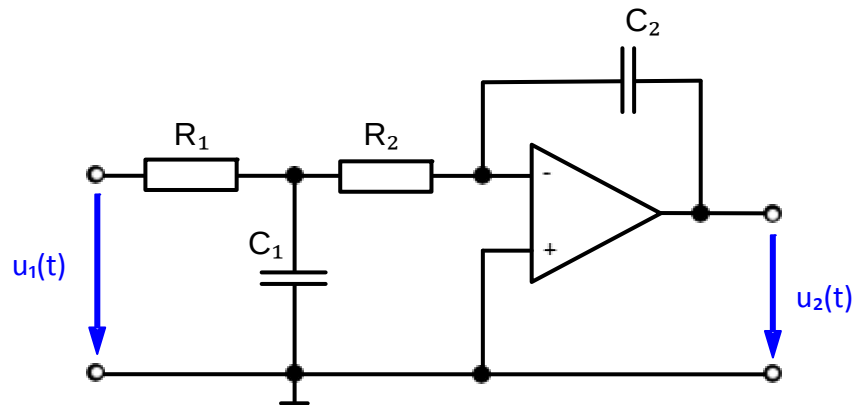
- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der obigen Schaltung. Der Operationsverstärker soll die endliche Verstärkung  $v$  aufweisen.
- Berechnen Sie das Übertragungsverhalten  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$  mit Hilfe der Maschenstromanalyse.
- Berechnen Sie das Übertragungsverhalten  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$  mit Hilfe der Knotenpotentialanalyse und bringen Sie das Ergebnis auf die Form des unter b) gefundenen Ausdrucks für  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$ .

Führen Sie nun den Übergang  $p = j\omega$  durch.

- Berechnen Sie  $|\underline{F}(\omega)| = |\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)|$ . Welche Werte nimmt  $|\underline{F}(\omega)|$  bei  $\omega = 0$  und  $\omega \rightarrow \infty$  an?
- Berechnen Sie  $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\}$  und die Grenzwerte von  $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\}$  bei  $\omega = 0$  und  $\omega \rightarrow \infty$ .

### 9. Aufgabe: Operationsverstärkerschaltung mit Integralanteil

Die in **Bild 9.1** dargestellte Schaltung enthält einen Operationsverstärker mit einer sehr großen, aber endlichen Verstärkung  $v$ . Berechnen Sie das Übertragungsverhalten der Schaltung.



**Bild 9.1:** Operationsverstärkerschaltung mit Integralanteil

- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der obigen Schaltung. Der Operationsverstärker soll die endliche Verstärkung  $v$  aufweisen.
- Berechnen Sie das Übertragungsverhalten  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$  mit Hilfe der Maschenstromanalyse.
- Berechnen Sie das Übertragungsverhalten  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$  mit Hilfe der Knotenpotentialanalyse und bringen Sie das Ergebnis auf die Form des unter b) gefundenen Ausdrucks für  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$ .
- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$  für  $v \rightarrow \infty$ .
- Berechnen Sie die Sprungantwort der Schaltung, d. h. die Ausgangsspannung  $u_2(t)$  für eine sprungförmige Eingangsspannung  $u_1(t) = U_0 \cdot \sigma(t)$  für  $v \rightarrow \infty$ .
- Berechnen Sie die Impulsantwort der Schaltung, d. h. die Ausgangsspannung  $u_2(t)$  für eine impulsförmige Eingangsspannung  $u_1(t) = U_0 \cdot \delta(t)$  für  $v \rightarrow \infty$ .
- Zeigen Sie, dass sich die Impulsantwort durch die zeitliche Ableitung der Sprungantwort ergibt.

Benutzen Sie zur Berechnung der Zeitfunktion die folgenden Korrespondenzen zwischen dem Zeitbereich und den Laplacetransformierten:

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

$$\mathcal{L}\{\delta(t)\} = 1$$

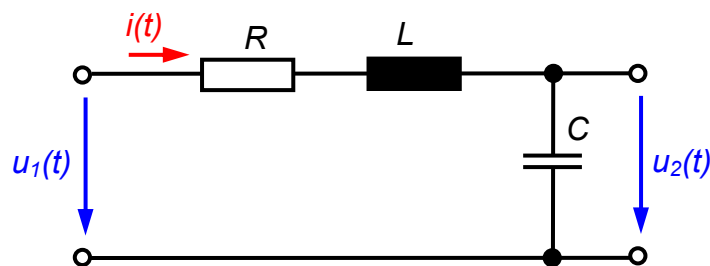
$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot [e^{-\alpha \cdot t} + \alpha \cdot t - 1]\right\} = \frac{1}{p^2 \cdot (p + \alpha)}$$

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

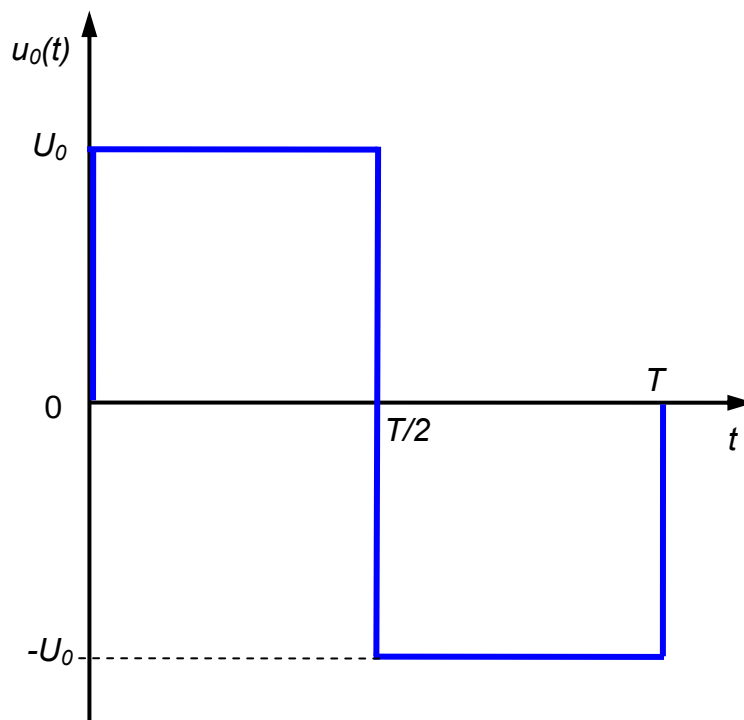
$p$  ist die Variable im Bildbereich, auch als „komplexe Frequenz“ bezeichnet.

### 10. Aufgabe: Schaltung zur Erzeugung einer hohen Sinusspannung

Es ist bekannt, dass durch einen LC-Reihenschwingkreis im Resonanzfall eine hohe Spannung erzeugt werden kann. Diesen Effekt kann man sich auch zunutze machen, beispielsweise um eine hohe Prüfspannung mit einer bestimmten Frequenz zu erzeugen. In der Praxis muss ein ohmscher Widerstand berücksichtigt werden, der die Verluste im Kreis berücksichtigt (**Bild 10.1**). Der LC-Schwingkreis wird mit einem Wechselrichter angeregt. Dieser erzeugt eine Spannung, wie sie in dargestellt ist. Die RLC-Schaltung wird mit dieser Spannung angeregt. Bestimmen Sie die Spannung an der Kapazität, die als Plattenkondensator zur Spannungsprüfung von Isolierstoffen ausgebildet sein kann.



**Bild 10.1:** LC-Schwingkreis mit Verlusten, repräsentiert durch den Widerstand  $R$ , zur Erzeugung hoher sinusförmiger Spannungen



**Bild 10.2:** Periode des sich mit der Periodendauer  $T$  wiederholenden Zeitsignals

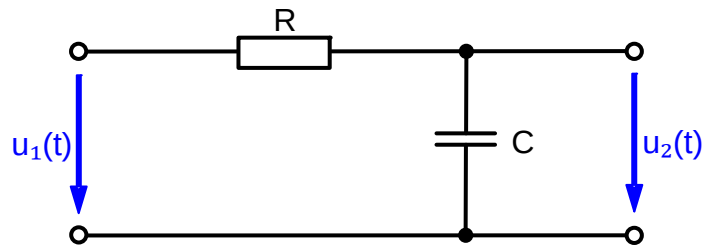
- Berechnen Sie die Laplace-Transformierte  $U_0(p)$  des oben dargestellten Signals  $u_0(t)$ . Dieses Zeitsignal soll sich nun mit der Periode  $T$  wiederholen. Bestimmen Sie die Laplace-Transformierte des periodischen Zeitsignals  $U_1(p)$ .
- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$  für anfänglich leere Energiespeicher.
- Berechnen Sie die Laplace-Transformierte  $U_2(p)$  der Ausgangsspannung und bezeichnen Sie den primitiven Teil der Funktion mit  $U_{20}(p)$ .
- Bestimmen Sie die Zeitfunktion  $u_{20}(t)$  des primitiven Teils der Ausgangsspannung. Geben Sie die Funktion  $u_2(t)$  an.

Benutzen Sie zur Berechnung der Zeitfunktion die folgenden Korrespondenzen zwischen dem Zeitbereich und den Laplacetransformierten:

$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \cdot \left[1 - e^{-\beta \cdot t} \cdot \left(\cos(\alpha t) + \frac{\beta}{\alpha} \cdot \sin(\alpha t)\right)\right]\right\} = \frac{1}{p \cdot (p^2 + p \cdot 2\beta + \alpha^2 + \beta^2)}$$

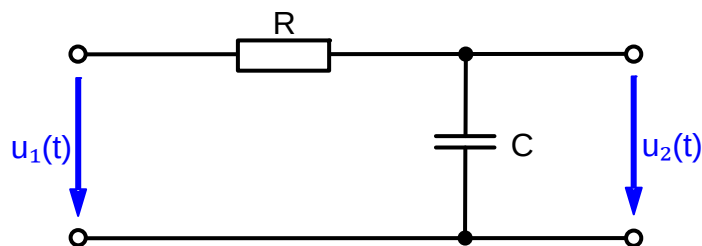
$p$  ist die Variable im Bildbereich, auch als „komplexe Frequenz“ bezeichnet.



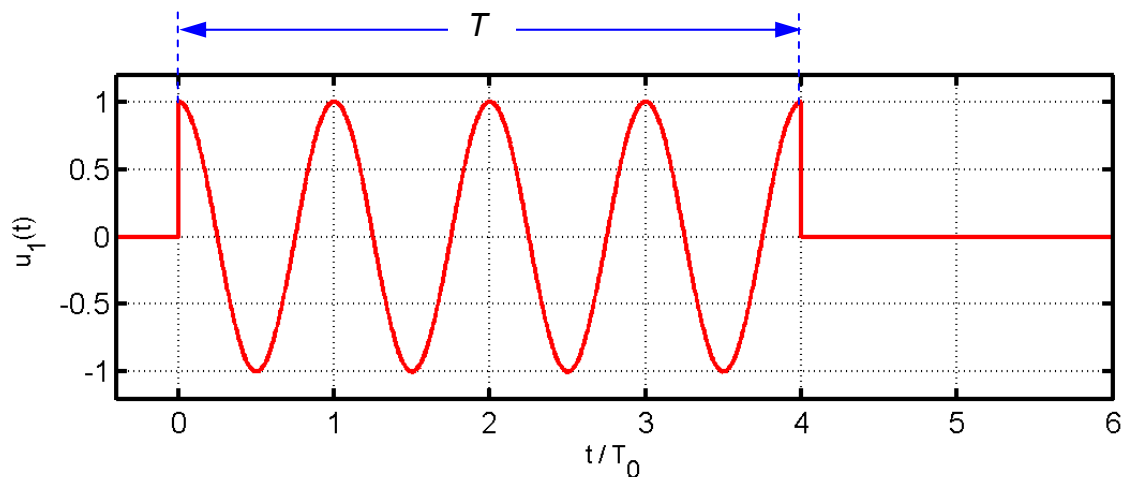
**11. Aufgabe: RC-Schaltung, angeregt durch ein Schwingungspaket**

Am Eingang der RC-Schaltung gemäß

**Bild 11.1** wird die in **Bild 11.2** dargestellte Spannung  $u_1(t)$ . Die Spannung  $u_1(t)$  ist offensichtlich nicht periodisch. Die Zeitfunktion ist eine Kosinusfunktion mit der Periodendauer  $T_0$ , die zum Zeitpunkt  $t = 0$  beginnt und zum Zeitpunkt  $t = T = n T_0$  mit  $n \in \mathbb{N}$  endet



**Bild 11.1:** RC-Schaltung, angeregt durch die Spannung  $u_1(t)$



**Bild 11.2:** Zeitlicher Verlauf der anregenden Spannung mit  $T = 4 \cdot T_0$

- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion  $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$  der RC-Schaltung für anfänglich leere Energiespeicher.
- Bestimmen Sie die Laplace-Transformierte  $U_1(p)$  der Spannung  $u_1(t)$ .
- Berechnen Sie die Laplace-Transformierte  $U_2(p)$  der Ausgangsspannung  $u_2(t)$ .

- d. Bestimmen Sie die Zeitfunktion der Ausgangsspannung  $u_2(t)$  durch Anwendung der Partialbruchzerlegung bei der Rücktransformation. Benutzen Sie zur Berechnung der Zeitfunktion die folgenden Korrespondenzen:

$$\mathcal{L}\{\sigma(t) \cdot \cos(\omega_0 t)\} = \frac{p}{p^2 + \omega_0^2} \quad \text{und} \quad \mathcal{L}\{\sigma(t) \cdot \sin(\omega_0 t)\} = \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}.$$

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

**12. Aufgabe: Turbogenerator am Netz, verschiedene Betriebszustände**

Ein Turbogenerator mit den Daten:

$$S_N = 150 \text{ MVA} \quad U_N = 10,5 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad X_d = 1,18 \, \Omega$$

wird an einem symmetrischen Drehstromnetz mit fester Spannung und fester Frequenz  $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$  bei  $\cos(\varphi_N) = 0,8$  (induktiv) betrieben. Der ohmsche Widerstand der Statorwicklung sei vernachlässigbar, die Maschine sei verlustfrei.

- Berechnen Sie für den Nennbetrieb die Polradspannung nach Betrag und Phase und zeichnen Sie ein maßstäbliches Zeigerdiagramm. Legen Sie dazu die Klemmenspannung  $\underline{U}_1$  in die reelle Achse.
- Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistung, welche die Maschine im Nennbetrieb an den Klemmen abgibt.
- Ausgehend vom Nennbetrieb wird die Dampfzufuhr der Turbine so gedrosselt, dass sie nur noch 75 % ihres ursprünglichen Drehmomentes abgibt. Berechnen Sie nun die von der Maschine abgegebene komplexe Scheinleistung.
- Nun wird – ausgehend vom Nennbetrieb – der Erregerstrom so verkleinert, dass die Polradspannung nur noch 75 % ihres ursprünglichen Wertes beträgt. Um welchen Prozentsatz muss der Erregerstrom verringert werden? Berechnen Sie nun die von der Maschine abgegebene komplexe Scheinleistung. Überlegen Sie zunächst, welche Größen sich ändern und welche ausgehend vom Nennbetrieb unverändert bleiben, wenn nur der Erregerstrom des Generators verändert wird.

**13. Aufgabe: Turbogenerator am Netz, Nennbetrieb und Phasenschieberbetrieb**

Ein Turbogenerator mit den Daten:

$$S_N = 125 \text{ MVA} \quad U_N = 10,5 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad X_d = 1,59 \, \Omega$$

wird an einem symmetrischen Drehstromnetz mit fester Spannung und fester Frequenz  $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$  bei  $\cos(\varphi_N) = 0,8$  (induktiv) betrieben. Der ohmsche Widerstand der Statorwicklung sei vernachlässigbar, die Maschine sei verlustfrei.

- Berechnen Sie die Polradspannung nach Betrag und Phase und zeichnen Sie ein maßstäbliches Zeigerdiagramm. Legen Sie dazu die Klemmenspannung  $\underline{U}_1$  in die reelle Achse.
- Ausgehend vom Nennbetriebspunkt wird die Polradspannung verringert. Bei welcher Polradspannung gibt der Generator nur Wirkleistung ab und wie groß ist dann der Statorstrom?
- Ausgehend vom Betriebspunkt aus b. wird die Polradspannung weiter gesenkt. Bei welcher Polradspannung wird die Stabilitätsgrenze erreicht und wie groß ist dann der Statorstrom?
- Wie groß ist die größte induktive Blindleistung, welche die Maschine im Phasenschieberbetrieb abgeben kann? Der Erregerstrom soll dabei derselbe sein, wie im Nennbetrieb.
- Wie groß ist die größte kapazitive Blindleistung, welche die Maschine im Phasenschieberbetrieb abgeben kann?

**14. Aufgabe: Betrieb eines Drehstromtransformators**

Ein Drehstromtransformator mit den folgenden Daten:

$$S_N = 2,5 \text{ MVA} \quad U_{1N} = 20 \text{ kV} \quad U_{2N} = 0,4 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad \text{Schaltgruppe Dyn5} \quad u_k = 6\%$$

Leerlaufverluste bei Nennspannung: 3,8 kW

Kurzschlussverluste bei Nennstrom: 26,5 kW

- Berechnen Sie die Nennströme auf der Ober- und Unterspannungsseite.
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Transformators bei Volllast und  $\cos \varphi = 0,8$  (induktiv).
- Bei welcher Belastung tritt bei  $\cos \varphi = 0,8$  (induktiv) der größte Wirkungsgrad auf und wie groß ist er?
- Geben Sie die Längsimpedanz des Transformators im einphasigen Ersatzschaltbild bezogen auf die 20-kV-Seite an.
- Bestimmen Sie die Längsimpedanz des Transformators im einphasigen Ersatzschaltbild bezogen auf die 400-V-Seite.

**15. Aufgabe: Netzbetrieb mit parallel geschalteten Transformatoren**

Ein dreiphasiger 50-Hz-Generator speist über die zwei parallel geschalteten Drehstromtransformatoren T1 und T2 eine Leitung und direkt angeschlossene Verbraucher. Am Ende der Leitung befindet sich ein Transformator, der die 220 kV auf 30 kV übersetzt.

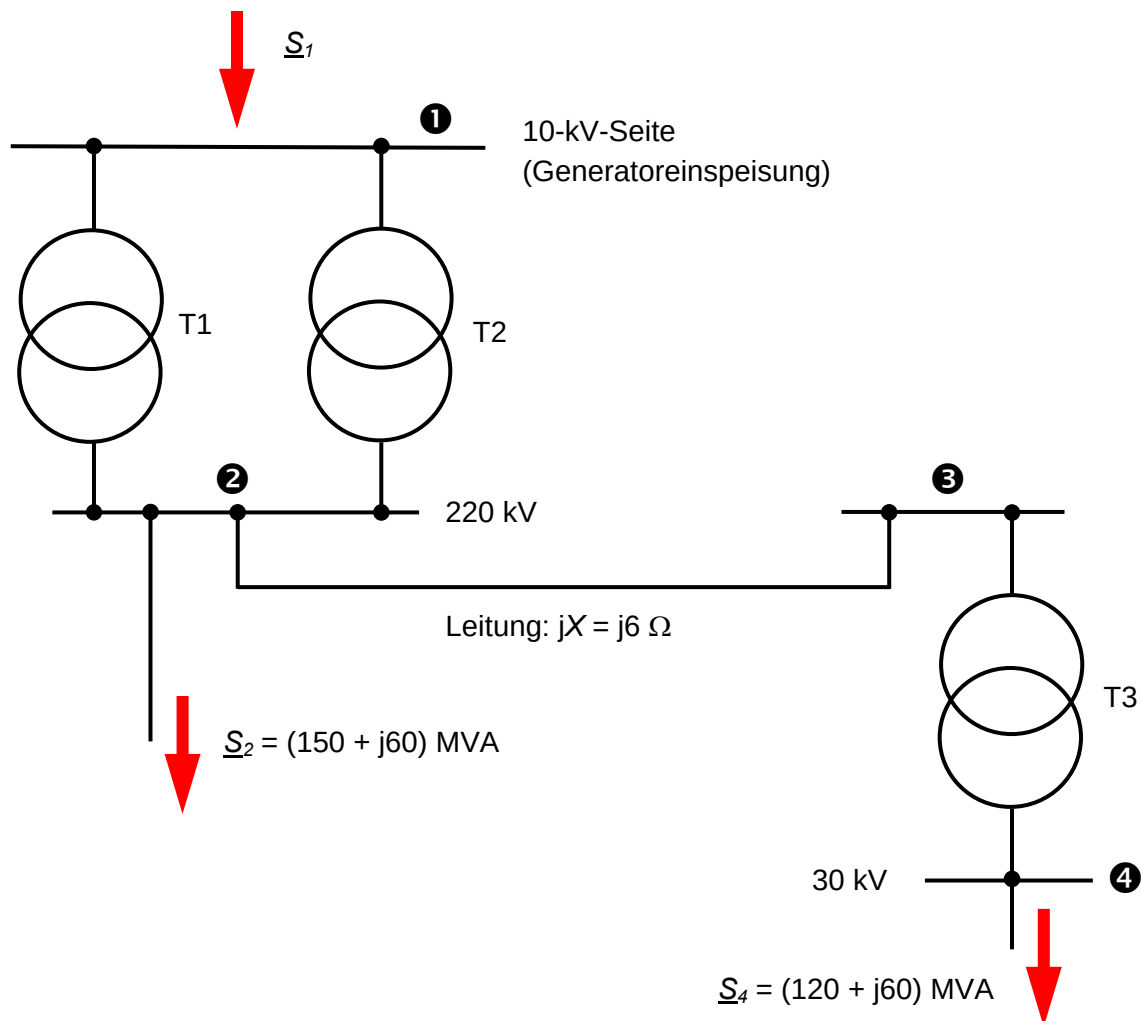
Die Transformatoren T1 und T2 haben folgende Daten:

$$S_N = 150 \text{ MVA} \quad U_{OS, N} = 220 \text{ kV} \quad U_{US, N} = 10 \text{ kV} \quad u_{k,x} = 10\% \quad u_{k,r} = 0$$

Der Transformator T3 hat folgende Daten:

$$S_N = 150 \text{ MVA} \quad U_{OS, N} = 220 \text{ kV} \quad U_{US, N} = 30 \text{ kV} \quad u_{k,x} = 10\% \quad u_{k,r} = 0$$

Die Transformatoren haben die Schaltgruppe YNy0.



**Bild 15.1:** Netzausschnitt, bestehend aus einer Einspeisung, parallel geschalteten Transformatoren, einer Leitung und einem weiteren Transformator

Die Spannung an der Unterspannungsseite des Transformators T3 soll genau 30 kV betragen. Wie groß muss dazu die Spannung an der Einspeisestelle (10-kV-Ebene) sein und welche Leistung muss der Generator einspeisen?

- a. Berechnen Sie zunächst die auf die 220-kV-Ebene bezogenen Längsimpedanzen der Transformatoren.
- b. Zeichnen Sie das auf die 220-kV-Ebene bezogene einphasige Ersatzschaltbild der Anordnung.
- c. Berechnen Sie den Strom am Knoten 4 und die Spannung auf der 220-kV-Seite am Knoten 3.
- d. Berechnen Sie den Strom  $I_2$  aufgrund der Last  $\underline{S}_2$  und schließlich die Spannung  $\underline{U}_1$  am Knoten 1 auf der 220-kV-Seite.
- e. Berechnen Sie die Leistung  $\underline{S}_1$ , die am Knoten 1 eingespeist werden muss. Prüfen Sie Ihr Ergebnis, indem Sie die Wirkleistungen der Lasten an Knoten 2 und Knoten 4 betrachten.

### 16. Aufgabe: Parallelschaltung von Transformatoren in einem Kraftwerk

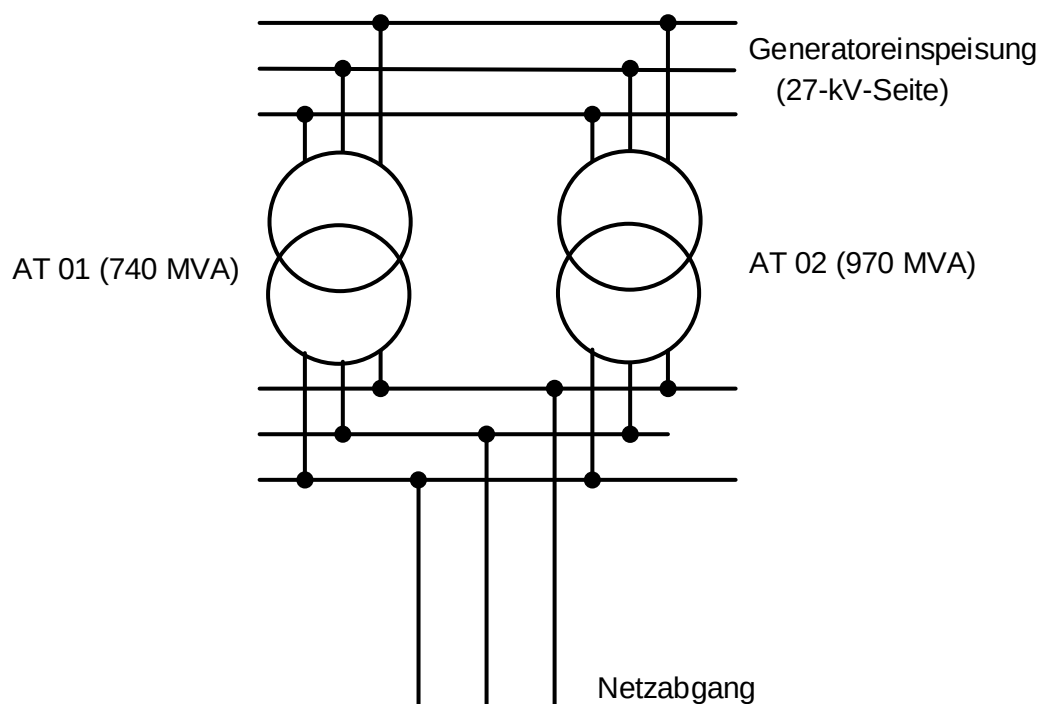
In einem Kraftwerk ist einer von zwei parallel geschalteten Maschinentransformatoren ausgefallen. Die Maschinentransformatoren haben folgende Daten:

$$S_{N1} = 740 \text{ MVA} \quad U_{OS1, N} = 430 \text{ kV} \quad U_{US1, N} = 27 \text{ kV} \quad u_{k1, x} = 15,5\% \quad u_{k1, r} = 0$$

Aus einem anderen Kraftwerk wird ein Reservetransformator mit den folgenden Daten beschafft und anstatt des defekten Transformators parallel zu dem verbliebenen Transformator mit den obigen Daten betrieben. Die Daten des Reservetransformators sind:

$$S_{N2} = 970 \text{ MVA} \quad U_{OS2, N} = 425 \text{ kV} \quad U_{US2, N} = 27 \text{ kV} \quad u_{k2, x} = 16,6\% \quad u_{k2, r} = 0$$

Beide Transformatoren haben die Schaltgruppe YNd5.



**Bild 16.1:** Schaltung der parallel betriebenen Maschinentransformatoren AT 01 und AT 02

- Berechnen Sie das Windungszahlverhältnis der beiden Transformatoren näherungsweise aus dem Verhältnis der Bemessungsspannungen.
- Berechnen Sie die Kurzschlussimpedanzen der beiden Transformatoren bezogen auf die jeweilige Oberspannungsseite.



- c. Zeichnen Sie ein einphasiges Ersatzschaltbild der parallel geschalteten Transformatoren, das auf die Oberspannungsseite bezogen ist. Die Anordnung sei noch nicht mit dem Netz verbunden.

Hinweis:

Berücksichtigen Sie dabei die komplexen Übersetzungen der beiden Transformatoren sowie die Tatsache, dass der Generator den beiden Transformatoren an der Unterspannungsseite dieselbe Spannung  $\underline{U}_G = U_G$  zur Verfügung stellt.

- d. Berechnen Sie den auf die Oberspannungsseite bezogenen Kreisstrom zwischen den beiden Transformatoren mit Hilfe des einphasigen Ersatzschaltbildes, falls der Generator eine (verkettete) Spannung von  $\underline{U}_G = U_G = 25,5 \text{ kV}$  liefert. Die Anordnung sei noch nicht mit dem Netz verbunden.
- e. In welchem Verhältnis steht der in d. berechnete Kreisstrom zum Leiterstrom des Transformators AT 01, wenn der Generator eine Spannung von  $\underline{U}_G = U_G = 25,5 \text{ kV}$  liefert und der Transformator seine Nennleistung zwischen Unter- und Oberspannungsseite überträgt. Halten Sie demnach den Kreisstrom für kritisch?