

Grundlagen der Elektrotechnik

Eine Einführung in die Gleich- und Wechselstromtechnik

Lösungen der Übungsaufgaben aus Kapitel 5

Reinhard Scholz

23. März 2019

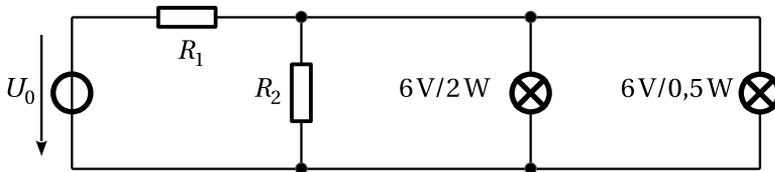
Die Lösung der Übungsaufgaben erfolgt zunächst analytisch in allgemeiner Form. Anschließend wird die numerische Lösung angegeben, die mit einem Taschenrechner oder mit Octave nachvollzogen werden kann. In den beiliegenden Octave-Skripten ist es aus syntaktischen Gründen nicht möglich, alle im Text benutzten Variablennamen zu verwenden. Die Anpassung wurde jedoch so vorgenommen, dass eine Zuordnung leicht möglich ist.

Teilweise weicht die Vorgehensweise bei der Berechnung mit Octave deutlich von der analytischen Methode ab. Dies ist beispielsweise bei der Lösung von quadratischen Gleichungen der Fall. Hier wird nicht die quadratische Ergänzung verwendet, sondern die Koeffizienten des zugehörigen Polynoms werden als Vektor dargestellt, der einem Algorithmus zur Nullstellensuche übergeben wird.

Die in diesem Dokument eingebundenen Diagramme wurden einer Nachbearbeitung unterzogen, so dass deren Erscheinungsbild von der Bildschirmausgabe abweicht.

Übung 5.1 Belasteter Spannungsteiler

Zwei parallel geschaltete 6-V-Kontrolllampen unterschiedlicher Leistung werden von einer 12-V-Gleichspannungsquelle über einen Spannungsteiler gespeist.



Die Widerstände R_1 und R_2 des Spannungsteilers sind so zu dimensionieren, dass die Spannung an den Lampen im störungsfreien Betrieb 6 V beträgt und beim Ausfall einer Lampe auf maximal 8 V ansteigt.

- Der Ausfall welcher der beiden Lampen führt zum kritischeren Betriebszustand? (Was ist der kritischere Betriebszustand?)
- Berechnen Sie die Widerstände R_1 und R_2 unter den oben angegebenen Rahmenbedingungen.
- Wie groß wird die Spannung an den Lampen im etwas weniger kritischen Betriebszustand, also wenn die andere Lampe ausfällt?
- Wie groß ist die Spannung an den Lampen, wenn beide ausfallen?
- In welchem Verhältnis steht die in den Lampen umgesetzte Leistung zur Leistung, die in den Widerständen umgesetzt wird?

Lösung der Übungsaufgabe 5.1 (Seite 165)

a) Ausfall einer Lampe (kritischer Fall)

Beim Ausfall einer der beiden Lampen steigt die Spannung am Widerstand R_2 des Spannungsteilers an, so dass die intakte Lampe stärker belastet wird. Der Ausfall der 2 W-Lampe führt dabei zu einem stärkeren Spannungsanstieg als der Ausfall der 0,5 W-Lampe, da der Widerstand der 2 W-Lampe geringer ist, als der Widerstand der 0,5 W-Lampe.

b) Dimensionierung des Spannungsteilers

$$\text{Widerstand der 2 W-Lampe: } R_{L1} = \frac{U^2}{P_{L1}} = \frac{(6 \text{ V})^2}{2 \text{ W}} = 18 \Omega$$

$$\text{Widerstand der 0,5 W-Lampe: } R_{L2} = \frac{U^2}{P_{L2}} = \frac{(6 \text{ V})^2}{0,5 \text{ W}} = 72 \Omega$$

$$\text{Parallelschaltung beider Lampen: } R_L = \frac{R_{L1} R_{L2}}{R_{L1} + R_{L2}} = 14,4 \Omega$$

Normalbetrieb (beide Lampen intakt)

$$\frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + (R_2 \parallel R_L)} = \frac{6 \text{ V}}{12 \text{ V}} = \frac{1}{2} \Rightarrow R_1 = R_2 \parallel R_L = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} \quad (5.1)$$

2 W-Lampe ausgefallen und 0,5 W-Lampe intakt

$$\frac{R_2 \parallel R_{L2}}{R_1 + (R_2 \parallel R_{L2})} = \frac{8 \text{ V}}{12 \text{ V}} = \frac{2}{3} \Rightarrow 2 R_1 = R_2 \parallel R_{L2} = \frac{R_2 R_{L2}}{R_2 + R_{L2}} \quad (5.2)$$

Zusammenfassen der Gleichungen (5.1) und (5.2)

$$\begin{aligned} 2 \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} &= \frac{R_2 R_{L2}}{R_2 + R_{L2}} \\ 2 R_2 R_L (R_2 + R_{L2}) &= R_2 R_{L2} (R_2 + R_L) \\ 2 R_L R_2^2 + 2 R_L R_{L2} R_2 &= R_{L2} R_2^2 + R_L R_{L2} R_2 \\ (R_{L2} - 2 R_L) R_2^2 &= R_L R_{L2} R_2 \\ R_2 &= \frac{R_L R_{L2}}{R_{L2} - 2 R_L} = \frac{14,4 \Omega \cdot 72 \Omega}{72 \Omega - 28,8 \Omega} = 24 \Omega \\ R_1 &= \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{24 \Omega \cdot 14,4 \Omega}{24 \Omega + 14,4 \Omega} = 9 \Omega \end{aligned}$$

c) Ausfall der 0,5 W-Lampe

$$U' = U_0 \frac{R_2 \parallel R_{L1}}{R_1 + (R_2 \parallel R_{L1})} = U_0 \frac{R_2 R_{L1} / (R_2 + R_{L1})}{R_1 + R_2 R_{L1} / (R_2 + R_{L1})} = 12 \text{ V} \cdot \frac{10,3 \Omega}{9 \Omega + 10,3 \Omega} = 6,4 \text{ V}$$

d) Ausfall beider Lampen

$$U'' = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12 \text{ V} \cdot \frac{24 \Omega}{9 \Omega + 24 \Omega} = 8,7 \text{ V}$$

e) Leistungsaufnahme

Lampen: $P_L = P_{L1} + P_{L2} = 2 \text{ W} + 0,5 \text{ W} = 2,5 \text{ W}$

Widerstand R_1 : $P_1 = \frac{(U_0 - U)^2}{R_1} = \frac{36 \text{ V}^2}{9 \Omega} = 4 \text{ W}$

Widerstand R_2 : $P_2 = \frac{U^2}{R_2} = \frac{36 \text{ V}^2}{24 \Omega} = 1,5 \text{ W}$

Leistungsverhältnis: $\frac{P_L}{P_1 + P_2} = \frac{2,5 \text{ W}}{5,5 \text{ W}} = 0,45$

$$\frac{P_L}{P_L + P_1 + P_2} = \frac{2,5 \text{ W}}{8 \text{ W}} = 0,31$$

Nur 31 % der gesamten Leistung wird in den Lampen umgesetzt.

Octave-Datei: loesung_05_01.m

```
% Lösung der Übungsaufgabe 5.1

% Vorgaben (Aufgabenstellung)
U0 = 12;    % V
U  = 6;     % V
Umax = 8;   % V
PL1 = 2;    % W
PL2 = 0.5;  % W
disp("Vorgaben");
disp([" U0 = ",num2str(U0)," V (Spannungsquelle)"]);
disp([" U  = ",num2str(U)," V (Nennspannung der Lampen)"]);
disp([" Umax = ",num2str(Umax)," V (Maximalspannung an den Lampen)"]);
disp([" PL1 = ",num2str(PL1)," W (Leistung der ersten Lampe)"]);
disp([" PL2 = ",num2str(PL2)," W (Leistung der zweiten Lampe)"]);
disp(" ");

% Berechnung der Widerstände
RL1 = (U^2)/PL1; % Widerstand der ersten Lampe
RL2 = (U^2)/PL2; % Widerstand der zweiten Lampe
RL  = RL1*RL2/(RL1+RL2); % Widerstand der parallel geschalteten Lampen
R2  = RL*RL2/(RL2-2*RL);
R1  = R2*RL/(R2+RL);
disp("Widerstände");
disp([" R1 = ",num2str(R1)," Ohm"]);
disp([" R2 = ",num2str(R2)," Ohm"]);
disp(" ");

% Ausfall der 0,5-W-Lampe
U1 = U0*R2*RL1/(R1*(R2+RL1)+R2*RL1);
disp("Ausfall der 0,5-W-Lampe");
disp([" U1 = ",num2str(U1)," V"]);
disp(" ");

% Ausfall beider Lampen
U2 = U0*R2/(R1+R2);
disp("Ausfall beider Lampen");
disp([" U2 = ",num2str(U2)," V"]);
disp(" ");
```

Octave-Datei: loesung_05_01.m (Fortsetzung)

```
% Leistungsaufnahme
PL = PL1+PL2;
P1 = ((U0-U)^2)/R1;
P2 = (U^2)/R2;
v1 = PL/(P1+P2);
v2 = PL/(PL+P1+P2);
disp("Leistungsaufnahme");
disp([" PL = ",num2str(PL)," W (Lampen)"]);
disp([" P1 = ",num2str(P1)," W (Widerstand R1)"]);
disp([" P2 = ",num2str(P2)," W (Widerstand R2)"]);
disp([" v1 = ",num2str(v1),...
      " (Leistungsverhältnis Lampen/Widerstände)"]);
disp([" v2 = ",num2str(v2),...
      " (Leistungsverhältnis Lampen/Gesamtleistung)"]);
disp(" ");
```

Übung 5.2 Leistung und Energie

Eine Gleichspannung von 230 V soll dauerhaft überwacht werden. Dazu steht neben einer Lampe (230 V/15 W) auch eine kleine Kontrollleuchte (6 V/0,5 W) zur Verfügung. Nun sollen die Leistungsaufnahme der Überwachungsschaltung sowie der Jahresenergieverbrauch ermittelt werden.

- a) Berechnen Sie den Jahresenergieverbrauch, wenn die 230-V-Lampe eingesetzt wird.
- b) Zum Betrieb der Kontrollleuchte muss ein Vorwiderstand in Reihe geschaltet werden. Dimensionieren Sie diesen Widerstand (Widerstandswert und Leistung). Wie groß sind der Wirkungsgrad und der Jahresenergieverbrauch dieser Schaltung?
- c) Als Alternative soll eine Leuchtdiode verwendet werden, an der bei einem Strom von 10 mA eine Spannung von 2,6 V abfällt. Dimensionieren Sie auch hier den erforderlichen Vorwiderstand und ermitteln Sie Wirkungsgrad und Jahresenergieverbrauch.

Lösung der Übungsaufgabe 5.2 (Seite 165)

Bei der Berechnung des Jahresenergieverbrauchs beziehen wir uns hier auf 365 Tage. (Für die Berücksichtigung von Schaltjahren kann auch eine mittlere Jahresdauer von 365,25 Tagen angenommen werden.)

a) Lampe 230 V/15 W

$$W = P \cdot T = 15 \text{ W} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} = 131,4 \text{ kWh}$$

b) Kontrollleuchte 6 V/0,5 W

$$U = 230 \text{ V}$$

$$U_L = 6 \text{ V}$$

$$P_L = 0,5 \text{ W}$$

$$R_V = \frac{U - U_L}{I} = \frac{U - U_L}{P_L / U_L} = \frac{230 \text{ V} - 6 \text{ V}}{0,5 \text{ W} / 6 \text{ V}} = 2688 \Omega$$

$$\text{mit } I = P_L / U_L = 0,5 \text{ W} / 6 \text{ V} = 83,33 \text{ mA}$$

$$P_V = (U - U_L) \cdot I = (U - U_L) \cdot \frac{P_L}{U_L} = (230 \text{ V} - 6 \text{ V}) \cdot \frac{0,5 \text{ W}}{6 \text{ V}} = 18,67 \text{ W}$$

$$P_1 = U \cdot I = U \cdot \frac{P_L}{U_L} = 230 \text{ V} \cdot \frac{0,5 \text{ W}}{6 \text{ V}} = 19,17 \text{ W}$$

$$W_1 = P_1 \cdot T = 19,17 \text{ W} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} = 167,9 \text{ kWh}$$

c) Leuchtdiode 2,6 V/10 mA

$$U = 230 \text{ V}$$

$$U_D = 2,6 \text{ V}$$

$$I_D = 10 \text{ mA}$$

$$R_s = \frac{U - U_D}{I_D} = \frac{230 \text{ V} - 2,6 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 22740 \Omega$$

$$P_s = (U - U_D) \cdot I_D = (230 \text{ V} - 2,6 \text{ V}) \cdot 10 \text{ mA} = 2,274 \text{ W}$$

$$P_2 = U \cdot I_D = 230 \text{ V} \cdot 10 \text{ mA} = 2,3 \text{ W}$$

$$W_2 = P_2 \cdot T = 2,3 \text{ W} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} = 20,148 \text{ kWh}$$

Octave-Datei: loesung_05_02.m

```

% Lösung der Übungsaufgabe 5.2

% Vorgaben (Aufgabenstellung)
U   = 230;    % V (Lampe)
P   = 15;    % W (Lampe)
UL  = 6;     % V (Kontrolllampe)
PL  = 0.5;   % W (Kontrolllampe)
UD  = 2.6;   % V (Leuchtdiode)
ID  = 10e-3; % A (Diodenstrom)
disp("Vorgaben");
disp([" U   = ",num2str(U)," V (Lampe)"]);
disp([" P   = ",num2str(P)," W (Lampe)"]);
disp([" UL  = ",num2str(UL)," V (Kontrolllampe)"]);
disp([" PL  = ",num2str(PL)," W (Kontrolllampe)"]);
disp([" UD  = ",num2str(UD)," V (LED-Spannung)"]);
disp([" ID  = ",num2str(ID*1e3)," mA (LED-Strom)"]);
disp(" ");

% Jahresdauer in Stunden
T = 365*24;

% Lampe
W = P*T;
disp("Lampe");
disp([" W = ",num2str(W*1e-3)," kWh"]);
disp(" ");

% Kontrolllampe
Rv = (U-UL)/(PL/UL);
Pv = (U-UL)*PL/UL;
P1 = U*PL/UL;
W1 = P1*T;
disp("Kontrolllampe");
disp([" Rv = ",num2str(Rv)," Ohm (Vorwiderstand)"]);
disp([" Pv = ",num2str(Pv)," W (Leistung am Vorwiderstand)"]);
disp([" P1 = ",num2str(P1)," W"]);
disp([" W1 = ",num2str(W1*1e-3)," kWh"]);
disp(" ");

```

Octave-Datei: loesung_05_02.m (Fortsetzung)

```
% Leuchtdiode (LED)
Rs = (U-UD)/ID;
Ps = (U-UD)*ID;
P2 = U*ID;
W2 = P2*T;
disp("Leuchtdiode (LED)");
disp([" Rs = ",num2str(Rs)," Ohm (Vorwiderstand)"]);
disp([" Ps = ",num2str(Ps)," W (Leistung am Vorwiderstand)"]);
disp([" P2 = ",num2str(P2)," W"]);
disp([" W2 = ",num2str(W2*1e-3)," kWh"]);
disp(" ");
```

Übung 5.3 Leistungs- und Spannungspegel

An einem rein ohmschen Widerstand mit dem Wert $R = 2,7 \text{ k}\Omega$ beträgt der gemessene Leistungspegel $L_p = 15 \text{ dBm}$.

- a) Welche Spannung fällt am Widerstand ab?
- b) Wie groß ist der Spannungspegel?
- c) Wie ändern sich Leistungs- und Spannungspegel, wenn die Spannung am Widerstand verdoppelt wird?

Lösung der Übungsaufgabe 5.3 (Seite 165)

a) Spannung am Widerstand

$$L_p = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right) \Rightarrow P = P_{\text{ref}} \cdot 10^{L_p/10}$$

$$U = \sqrt{P R} = \sqrt{P_{\text{ref}} \cdot 10^{L_p/10} \cdot R} = \sqrt{1 \text{ mW} \cdot 10^{15/10} \cdot 2,7 \text{ k}\Omega} = 9,24 \text{ V}$$

b) Spannungspegel

$$L_u = 20 \cdot \lg\left(\frac{U}{U_{\text{ref}}}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{9,24 \text{ V}}{1 \mu\text{V}}\right) = 139,3 \text{ dB}\mu$$

c) Spannungsverdoppelung

$$U' = 2U$$

$$P' = \frac{U'^2}{R} = \frac{4U^2}{R} = 4P$$

$$L'_p = 10 \cdot \lg\left(\frac{P'}{P_{\text{ref}}}\right) = 10 \cdot \lg\left(4 \frac{P}{P_{\text{ref}}}\right) = 10 \cdot \lg(4) + 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right) = L_p + 6 \text{ dB} = 21 \text{ dBm}$$

$$L'_u = 20 \cdot \lg\left(\frac{U'}{U_{\text{ref}}}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{2U}{U_{\text{ref}}}\right) = 20 \cdot \lg(2) + 20 \cdot \lg\left(\frac{U}{U_{\text{ref}}}\right) = L_u + 6 \text{ dB} = 145,3 \text{ dB}\mu$$

Bei einer Verdoppelung der Spannung steigen sowohl der Leistungspegel als auch der Spannungspegel um 6 dB.

Octave-Datei: loesung_05_03.m

```
% Lösung der Übungsaufgabe 5.3

% Vorgaben (Aufgabenstellung)
R = 2700; % Ohm
Lp = 15; % dBm
Pref = 1e-3; % W
Uref = 1e-6; % V
disp("Vorgaben");
disp([" R = ", num2str(R), " Ohm"]);
disp([" Lp = ", num2str(Lp), " dBm"]);
disp([" Pref = ", num2str(Pref*1e3), " mW"]);
disp([" Uref = ", num2str(Uref*1e6), " uV"]);
disp(" ");

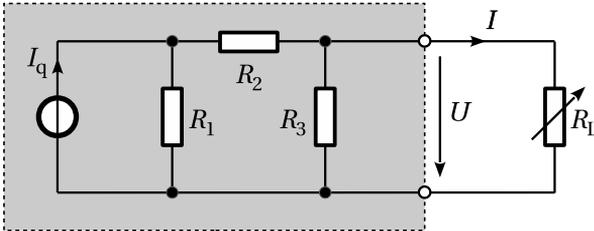
% Spannung am Widerstand
P = Pref*10^(Lp/10);
U = sqrt(P*R);
disp("Spannung am Widerstand");
disp([" U = ", num2str(U), " V"]);
disp(" ");

% Spannungspegel
Lu = 20*log10(U/Uref);
disp("Spannungspegel");
disp([" Lu = ", num2str(Lu), " dBu"]);
disp(" ");

% Spannungsverdoppelung
U1 = 2*U;
P1 = (U1^2)/R;
Lp1 = 10*log10(P1/Pref);
Lu1 = 20*log10(U1/Uref);
disp("Spannungsverdoppelung");
disp([" Lp1 = ", num2str(Lp1), " dBm"]);
disp([" Lu1 = ", num2str(Lu1), " dBu"]);
disp(" ");
```

Übung 5.4 Ersatzspannungsquelle

An das im Bild grau unterlegte Netzwerk mit der Gleichstromquelle $I_q = 120 \text{ mA}$ und den Widerständen $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ sowie $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$ ist ein Potenziometer $0 \leq R_L \leq \infty$ angeschlossen. An den Klemmen stellen sich die Spannung U und der Strom I ein.



- Ermitteln Sie die Leerlaufspannung $U_L = U|_{R_L=\infty}$ an den Klemmen und den Kurzschlussstrom $I_K = I|_{R_L=0}$.
- Das grau unterlegte Netzwerk soll nun durch eine Ersatzspannungsquelle mit der Quellspannung U_0 und dem Innenwiderstand R_0 ersetzt werden. Bestimmen Sie U_0 und R_0 . Skizzieren Sie die vollständige Schaltung mit Spannungsquelle, Innenwiderstand und Lastwiderstand. Tragen Sie auch die Zählpfeile für die Spannung U und den Strom I ein.
- Stellen Sie die Verläufe der Spannung U , des Stromes I und der Leistung $P = U \cdot I$ in Abhängigkeit vom Widerstand R_L im Bereich $0 \leq R_L \leq 5 R_0$ in jeweils einem Diagramm dar.
- Wie groß ist die maximal von der Quelle abgebbare Leistung P_{\max} ?
- Berechnen Sie die im Widerstand R_L umgesetzte Leistung P für die Fälle $R_L = R_0/2$, $R_L = R_0$ und $R_L = 2 R_0$.
- Die im Lastwiderstand umgesetzte Leistung wird maximal für $R_L = R_0$. Wie groß ist in diesem Fall die Spannung U ?

Lösung der Übungsaufgabe 5.4 (Seite 166)

a) Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom

$$U_L = U|_{R_L=\infty} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} I_q = \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} \cdot 120 \text{ mA} = \frac{2}{4} \cdot 120 \text{ V} = 60 \text{ V}$$

$$I_K = I|_{R_L=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_q = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} \cdot 120 \text{ mA} = \frac{1}{2} \cdot 120 \text{ V} = 60 \text{ mA}$$

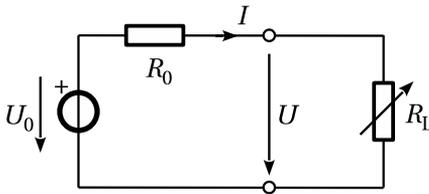
b) Ersatzspannungsquelle

$$U_0 = U_L = 60 \text{ V}$$

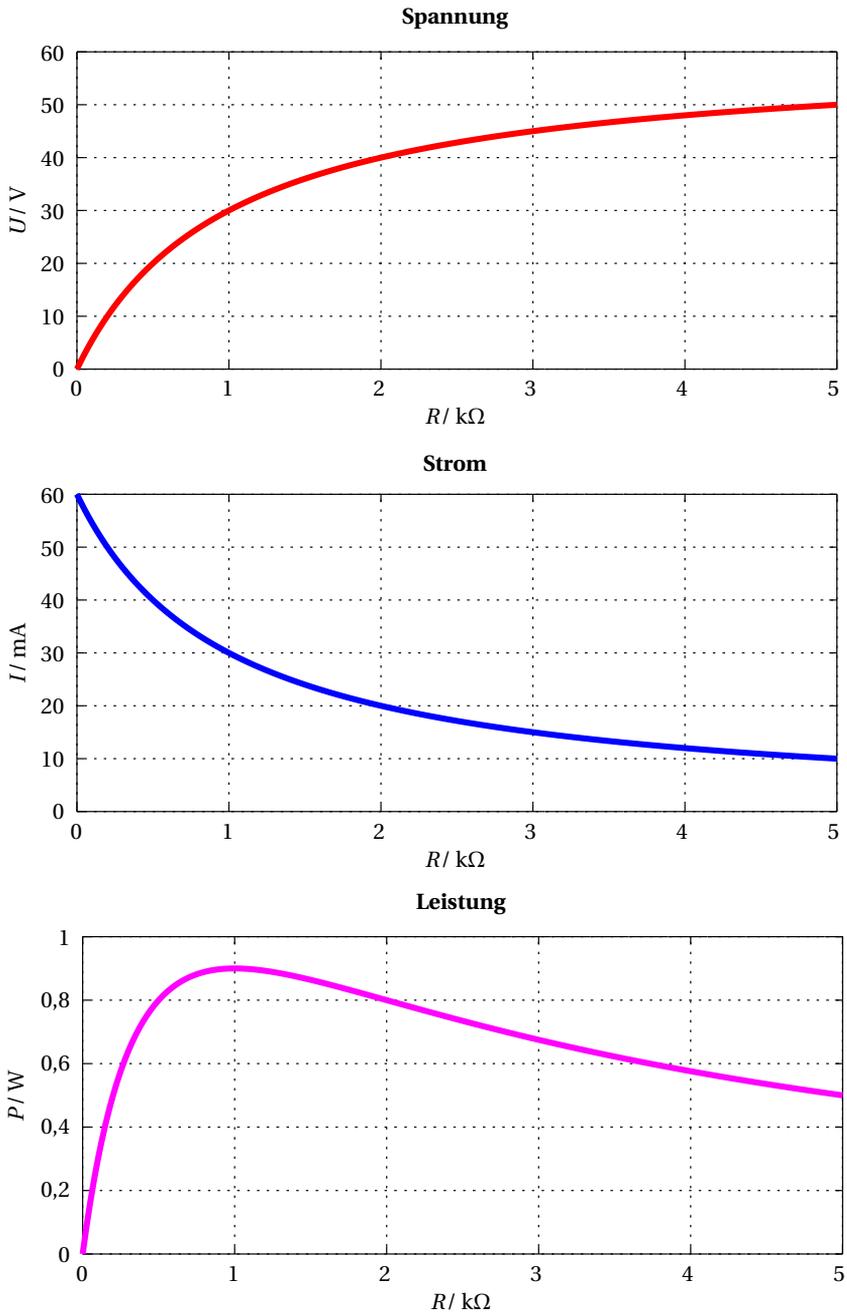
$$R_0 = \frac{U_L}{I_K} = \frac{60 \text{ V}}{60 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega$$

Eine alternative Berechnung des Innenwiderstands besteht im Ausschalten der Stromquelle und Messung des Widerstands in die offenen Klemmen der Schaltung.

$$R_0 = \frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega) \cdot 2 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ k}\Omega$$



c) Spannung, Strom und Leistung bei variablem Lastwiderstand



d) Maximal abgebbare Leistung

$$P_{\max} = \frac{U_0^2}{4 R_0} = \frac{(60 \text{ V})^2}{4 \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 900 \text{ mW}$$

e) Leistung im Widerstand R_L

$$P = U \cdot I = \frac{R_L}{R_0 + R_L} U_0 \cdot \frac{U_0}{R_0 + R_L} = \frac{R_L U_0^2}{(R_0 + R_L)^2}$$

$$P \Big|_{R_L=R_0/2} = \frac{R_0/2}{(R_0 + R_0/2)^2} U_0^2 = \frac{1}{2 \cdot (3/2)^2} \frac{U_0^2}{R_0} = \frac{2}{9} \frac{U_0^2}{R_0} = 800 \text{ mW}$$

$$P \Big|_{R_L=R_0} = \frac{R_0}{(R_0 + R_0)^2} U_0^2 = \frac{1}{4} \frac{U_0^2}{R_0} = 900 \text{ mW}$$

$$P \Big|_{R_L=2R_0} = \frac{2 R_0}{(R_0 + 2 R_0)^2} U_0^2 = \frac{2}{3^2} \frac{U_0^2}{R_0} = \frac{2}{9} \frac{U_0^2}{R_0} = 800 \text{ mW}$$

f) Spannung bei Leistungsanpassung

$$U \Big|_{R_L=R_0} = \frac{R_L}{R_0 + R_L} U_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_0} U_0 = \frac{U_0}{2} = 30 \text{ V}$$

Bei Leistungsanpassung ($R_L = R_0$) liegt die halbe Quellspannung an den Klemmen der realen Spannungsquelle an.

Octave-Datei: loesung_05_04.m

```
% Lösung der Übungsaufgabe 5.4

% Vorgaben (Aufgabenstellung)
R1 = 1e3; % Ohm
R2 = 1e3; % Ohm
R3 = 2e3; % Ohm
Iq = 0.12; % A
disp("Vorgaben");
disp([" R1 = ",num2str(R1)," Ohm"]);
disp([" R2 = ",num2str(R2)," Ohm"]);
disp([" R3 = ",num2str(R3)," Ohm"]);
disp([" Iq = ",num2str(Iq*1e3)," mA"]);
disp(" ");

% Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom
UL = Iq*R1*R3/(R1+R2+R3);
IK = Iq*R1/(R1+R2);
disp("Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom");
disp([" UL = ",num2str(UL)," V"]);
disp([" IK = ",num2str(IK*1e3)," mA"]);
disp(" ");

% Quellspannung und Innenwiderstand
U0 = UL;
R0 = UL/IK;
disp("Quellspannung und Innenwiderstand");
disp([" U0 = ",num2str(U0)," V"]);
disp([" R0 = ",num2str(R0)," Ohm"]);
disp(" ");

% Maximal abgebbare Leistung
Pmax = (U0^2)/(4*R0);
disp("Maximal abgebbare Leistung");
disp([" Pmax = ",num2str(Pmax*1e3)," mW"]);
disp(" ");

% Leistung im Lastwiderstand
RL = [R0/2,R0,2*R0];
P = RL*(U0)^2./((R0+RL).^2);
disp("Leistung im Lastwiderstand");
disp([" RL = ",num2str(RL)," Ohm"]);
disp([" P = ",num2str(P*1e3)," mW"]);
disp(" ");
```

Octave-Datei: loesung_05_04.m (Fortsetzung)

```

% Spannung bei Leistungsanpassung
U = U0/2;
disp("Spannung bei Leistungsanpassung");
disp([" U      = ", num2str(U), " V"]);
disp(" ");

% Grenzen des Darstellungsbereichs
Rmin = 0;
Rmax = 5*R0;
Umin = 0;
Umax = U0;
Imin = 0;
Imax = U0/R0;
Pmin = 0;
Pmax = ceil(Pmax);

% Festlegung der Stützstellen
N = 200;
n = 0:(N-1);
R = n*(Rmax-Rmin)/(N-1)+Rmin;

% Spannung Strom und Leistung bei Variation des Lastwiderstands R
U = U0*R./(R+R0);
I = U0./(R+R0);
P = R*(U0)^2./((R0+R).^2);

% Darstellung der Spannung
hFig1 = figure("Name","Spannung");
hPlot1 = plot(R*1e-3,U,"r"); % R in k Ohm
axis([Rmin*1e-3,Rmax*1e-3,Umin,Umax]);
grid on;
title("\bf Spannung","FontSize",14);
xlabel("R / k\Omega ","FontSize",12);
ylabel("U / V","FontSize",12);

% Darstellung des Stroms
hFig2 = figure("Name","Strom");
hPlot2 = plot(R*1e-3,I*1e3,"b"); % R in KOhm, I in mA
axis([Rmin*1e-3,Rmax*1e-3,Imin*1e3,Imax*1e3]);
grid on;
title("\bf Strom","FontSize",14);
xlabel("R / k\Omega ","FontSize",12);
ylabel("I / mA","FontSize",12);

```

Octave-Datei: loesung_05_04.m (Fortsetzung)

```
% Darstellung der Leistung
hFig3 = figure("Name","Leistung");
hPlot3 = plot(R*1e-3,P,"m"); % R in KOhm, P in W
axis([Rmin*1e-3,Rmax*1e-3,0,1]);
grid on;
title("\bf Leistung","FontSize",14);
xlabel("R / k\Omega ","FontSize",12);
ylabel("P / W","FontSize",12);
```

Übung 5.5 Leistung im Wechselstromkreis

Eine Reihenschaltung aus zwei Impedanzen $\underline{Z}_1 = 100 \Omega \cdot e^{j30^\circ}$ und $\underline{Z}_2 = 200 \Omega \cdot e^{-j45^\circ}$ ist an eine Spannungsquelle angeschlossen. Die Spannung ist durch $u_0(t) = \hat{u}_0 \cos(2\pi f t)$ mit $\hat{u}_0 = 12 \text{ V}$ und $f = 1 \text{ kHz}$ gegeben.

- Die Impedanzen \underline{Z}_1 und \underline{Z}_2 sind als RL - bzw. als RC -Reihenschaltungen realisiert. Skizzieren Sie die Schaltungen und geben Sie die Bauteilwerte an.
- Berechnen Sie die Spannung $u(t)$, den Strom $i(t)$ sowie die Augenblicksleistung $p(t)$ und stellen Sie diese in drei Diagrammen für $0 \leq t \leq 1/f$ dar.
- Bestimmen Sie die von \underline{Z}_2 aufgenommene Wirk-, Blind- und Scheinleistung.
- Nun betrage $\underline{Z}_2 = 100 \Omega \cdot e^{j\varphi}$, wobei φ zwischen -90° und 90° variiert wird. Tragen Sie in einem Diagramm die Wirk-, Blind- und Scheinleistung über dem Winkel φ auf.
- Jetzt wird $R_2 = \text{Re } \underline{Z}_2$ zwischen 0Ω und 500Ω variiert. Der Blindwiderstand sei konstant und betrage $X_2 = \text{Im } \underline{Z}_2 = -50 \Omega$. Stellen Sie die Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Abhängigkeit vom Wirkwiderstand R_2 in einem Diagramm dar.

Lösung der Übungsaufgabe 5.5 (Seite 166)

a) Schaltungen und Bauteilwerte

$$\underline{Z}_1 = 100 \Omega \cdot e^{j30^\circ} = (86,6 + j 50,0) \Omega = R_1 + j X_1$$

$$R_1 = 86,6 \Omega$$

$$X_1 = 50,0 \Omega$$

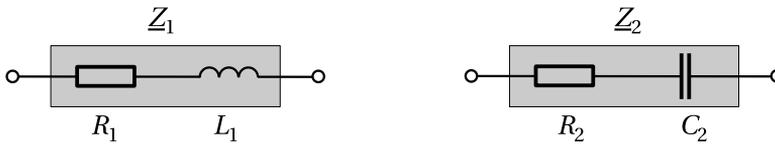
$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} = 7,96 \text{ mH}$$

$$\underline{Z}_2 = 200 \Omega \cdot e^{-j45^\circ} = (141,4 - j 141,4) \Omega = R_2 + j X_2$$

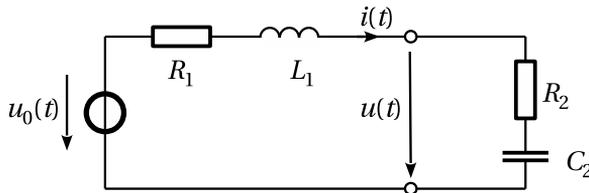
$$R_2 = 141,4 \Omega$$

$$X_2 = -141,4 \Omega$$

$$C_2 = \frac{-1}{2\pi f X_2} = 1,125 \mu\text{F}$$



b) Spannung, Strom und Augenblicksleistung



Berechnung der komplexen Amplituden

$$u_0(t) = \hat{u}_0 \cos(2\pi f t) = \text{Re} \left\{ \hat{U}_0 e^{j2\pi f t} \right\}$$

$$\hat{U}_0 = \hat{u}_0 = 12 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ}$$

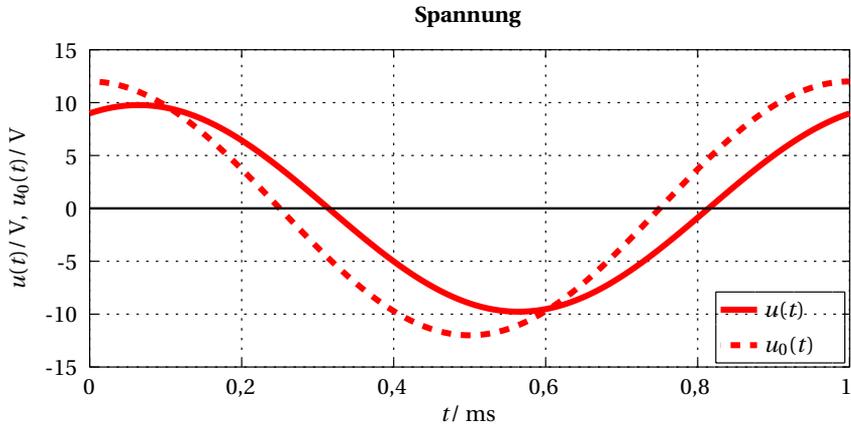
$$\hat{U} = \hat{U}_0 \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = |\hat{U}| e^{j\varphi_u} = 9,8 \text{ V} \cdot e^{-j23,2^\circ}$$

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = |\hat{I}| e^{j\varphi_i} = 48,8 \text{ mA} \cdot e^{j21,8^\circ}$$

Spannung an \underline{Z}_2 und Quellspannung

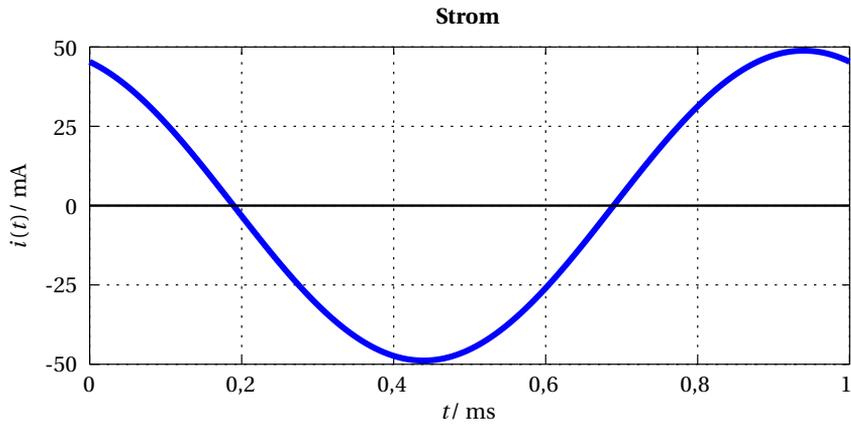
$$u_0(t) = \hat{u}_0 \cos(2\pi f t) = 12 \text{ V} \cdot \cos(2\pi f t)$$

$$u(t) = \operatorname{Re} \left\{ \underline{\hat{U}} e^{j2\pi f t} \right\} = 9,8 \text{ V} \cdot \cos(2\pi f t - 23,2^\circ)$$



Strom durch \underline{Z}_2

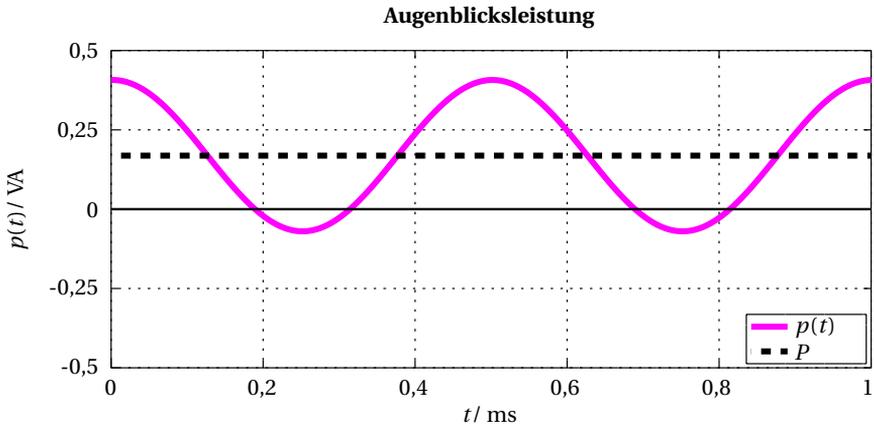
$$i(t) = \operatorname{Re} \left\{ \underline{\hat{I}} e^{j2\pi f t} \right\} = 48,8 \text{ mA} \cdot \cos(2\pi f t + 21,8^\circ)$$



Augenblicksleistung

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t) \cdot i(t) = \operatorname{Re} \left\{ \hat{U} e^{j2\pi f t} \right\} \cdot \operatorname{Re} \left\{ \hat{I} e^{j2\pi f t} \right\} \\
 &= \frac{\hat{U} e^{j2\pi f t} + \hat{U}^* e^{-j2\pi f t}}{2} \cdot \frac{\hat{I} e^{j2\pi f t} + \hat{I}^* e^{-j2\pi f t}}{2} \\
 &= \frac{1}{4} \left(\hat{U} \hat{I} e^{j4\pi f t} + \hat{U}^* \hat{I}^* e^{-j4\pi f t} \right) + \frac{1}{4} \left(\hat{U} \hat{I}^* + \hat{U}^* \hat{I} \right) \\
 p(t) &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{\hat{U} \hat{I}}{2} e^{j4\pi f t} \right\} + \operatorname{Re} \left\{ \frac{\hat{U} \hat{I}^*}{2} \right\}
 \end{aligned}$$

$$p(t) = \frac{|\hat{U} \hat{I}|}{2} \cdot \cos(4\pi f t + \varphi_u + \varphi_i) + \frac{|\hat{U} \hat{I}^*|}{2} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i)$$



c) Bestimmung von Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Unter Verwendung der Effektivwerte

$$\underline{U} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = 6,9 \text{ V} \cdot e^{-j23,2^\circ}$$

und

$$\underline{I} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = 34,5 \text{ mA} \cdot e^{j21,8^\circ}$$

ergeben sich die aufgeführten Leistungen.

Komplexe Scheinleistung $\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + j Q = 0,1687 \text{ W} - j 0,1687 \text{ var}$

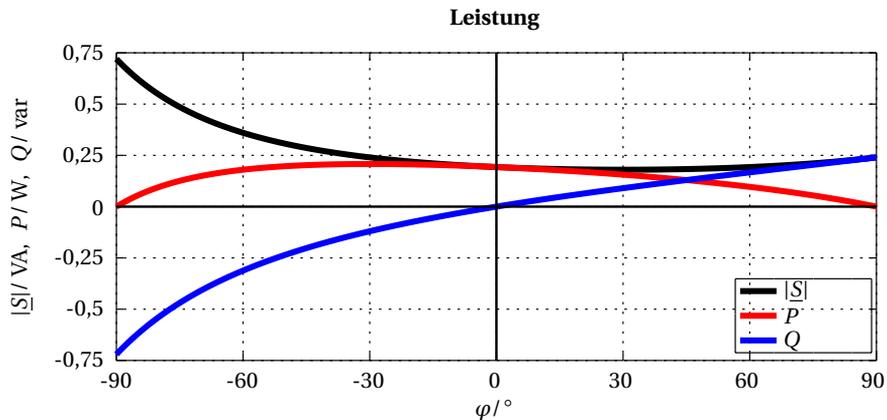
Scheinleistung $|\underline{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}| = 0,2386 \text{ VA}$

Wirkleistung $P = \operatorname{Re} \underline{S} = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}| \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) = 0,1687 \text{ W}$

Blindleistung $Q = \operatorname{Im} \underline{S} = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}| \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i) = -0,1687 \text{ var}$

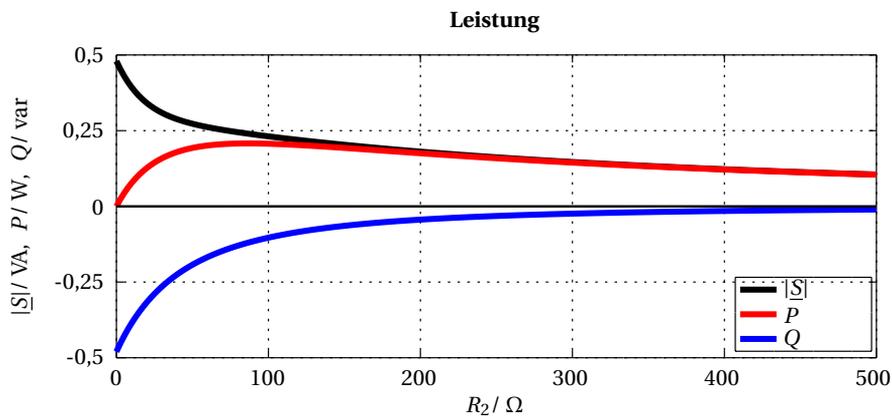
d) Variation der Phase von Z_2

$$\underline{Z}_1 = 100 \Omega \cdot e^{j30^\circ}, \quad \underline{Z}_2 = 100 \Omega \cdot e^{j\varphi} \text{ mit } -90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$



e) Variation des Wirkwiderstandes von Z_2

$$\underline{Z}_1 = 100 \Omega \cdot e^{j30^\circ}, \quad \underline{Z}_2 = R_2 + j X_2 \text{ mit } X_2 = -50 \Omega \text{ und } 0 \leq R_2 \leq 500 \Omega$$



Octave-Datei: loesung_05_05.m

```

% Lösung der Übungsaufgabe 5.5
% Vorgaben (Aufgabenstellung)
Z1 = 100*exp(j*pi*30/180); % Ohm, Grad
Z2 = 200*exp(-j*pi*45/180); % Ohm, Grad
U0 = 12; % Volt
f = 1e3; % Hertz
disp("Vorgaben");
disp([" |Z1| = ",num2str(abs(Z1))," Ohm"]);
disp([" arg(Z1) = ",num2str(angle(Z1)*180/pi)," °"]);
disp([" |Z2| = ",num2str(abs(Z2))," Ohm"]);
disp([" arg(Z2) = ",num2str(angle(Z2)*180/pi)," °"]);
disp([" U0 = ",num2str(U0)," V"]);
disp([" f = ",num2str(f*1e-3)," kHz"]);
disp(" ");

% Realisierung von Z1
R1 = real(Z1);
L1 = imag(Z1)/(2*pi*f);
disp("Realisierung von Z1");
disp([" R1 = ",num2str(R1)," Ohm"]);
disp([" L1 = ",num2str(L1*1e3)," mH"]);
disp(" ");

% Realisierung von Z2
R2 = real(Z2);
C2 = -1/(2*pi*f*imag(Z2));
disp("Realisierung von Z2");
disp([" R2 = ",num2str(R2)," Ohm"]);
disp([" C2 = ",num2str(C2*1e6)," uF"]);
disp(" ");

% Spannung über Z2 (komplexe Amplitude)
U = U0*Z2/(Z1+Z2);
us = abs(U); % Spitzenwert der Spannung
phiu = angle(U); % Phase der Spannung (im Bogenmaß)
disp("Spannung über Z2");
disp([" us = ",num2str(us)," V (Spitzenwert)"]);
disp([" phiu = ",num2str(phiu*180/pi)," ° (Phase)"]);
disp(" ");

```

Octave-Datei: loesung_05_05.m (Fortsetzung)

```

% Strom durch Z2 (komplexe Amplitude)
I = U0/(Z1+Z2);
is = abs(I);      % Spitzenwert des Stromes
phii = angle(I); % Phase des Stromes (im Bogenmaß)
disp("Strom durch Z2");
disp([" is      = ",num2str(is*1e3)," mA (Spitzenwert)"]);
disp([" phii    = ",num2str(phii*180/pi)," ° (Phase)"]);
disp(" ");

% Wirk-, Blind- und Scheinleistung
S = U*conj(I)/2;
P = real(S);
Q = imag(S);
disp("Wirk-, Blind- und Scheinleistung");
disp([" |S|     = ",num2str(abs(S))," VA"]);
disp([" P      = ",num2str(P)," W"]);
disp([" Q      = ",num2str(Q)," var"]);
disp(" ");

% Darstellungen im Zeitbereich
tmin = 0;
tmax = 1/f;
Umin = -15; % V
Umax = 15;  % V
Imin = -50e-3; % A
Imax = 50e-3; % A
Pmin = -0.5; % VA
Pmax = 0.5;  % VA

% Festlegung der Stützstellen
N = 200;
n = 0:(N-1);
t = n*(tmax-tmin)/(N-1)+tmin;

% Spannung, Strom und Augenblicksleistung
u0 = abs(U0)*cos(2*pi*f*t+angle(U0));
u = us*cos(2*pi*f*t+phiu);
i = is*cos(2*pi*f*t+phii);
p = u.*i;

```

Octave-Datei: loesung_05_05.m (Fortsetzung)

```

% Darstellung der Spannung
hFig1 = figure("Name", "Spannung");
hPlot1 = plot(t*1e3,u,"r-",t*1e3,u0,"r--"); % t in ms
axis([tmin*1e3,tmax*1e3,Umin,Umax]);
grid on;
legend(hPlot1,"u(t)","u_0(t)","location","southeast");
title("\b Spannung","FontSize",14);
xlabel("t / ms ","FontSize",12);
ylabel("u(t) / V, u_0(t) / V","FontSize",12);

% Darstellung des Stromes
hFig2 = figure("Name", "Strom");
hPlot2 = plot(t*1e3,i*1e3,"b-"); % t in ms, i in mA
axis([tmin*1e3,tmax*1e3,Imin*1e3,Imax*1e3]);
grid on;
title("\b Strom","FontSize",14);
xlabel("t / ms ","FontSize",12);
ylabel("i(t) / mA","FontSize",12);

% Darstellung der Augenblicksleistung
hFig3 = figure("Name", "Augenblicksleistung");
hPlot3 = plot(t*1e3,p,"m-",[tmin,tmax]*1e3,[P,P],"k--"); % t in ms
axis([tmin*1e3,tmax*1e3,Pmin,Pmax]);
grid on;
legend(hPlot3,"p(t)","P","location","southeast");
title("\b Aagenblicksleistung","FontSize",14);
xlabel("t / ms ","FontSize",12);
ylabel("p(t) / VA","FontSize",12);

% Variation der Phase von Z2
phimin = -90*pi/180;
phimax = 90*pi/180;
Smin = -0.75; % VA
Smax = 0.75; % VA
phi = n*(phimax-phimin)/(N-1)+phimin;
Z2 = 100*exp(j*phi); % Ohm
U = U0*Z2./(Z1+Z2);
I = U0./(Z1+Z2);
S = U.*conj(I)/2;
P = real(S);
Q = imag(S);

```

Octave-Datei: loesung_05_05.m (Fortsetzung)

```
% Darstellung der Leistung
hFig4 = figure("Name","Leistung");
hPlot4 = plot(phi*180/pi,abs(S),"k",phi*180/pi,P,"r",phi*180/pi,Q,"b");
axis([phimin*180/pi,phimax*180/pi,Smin,Smax]);
grid on;
legend(hPlot4,"|S|","P","Q","location","southeast");
title("\bf Leistung","FontSize",14);
xlabel("\phi / °","FontSize",12);
ylabel("|S| / VA, P / W, Q / var","FontSize",12);

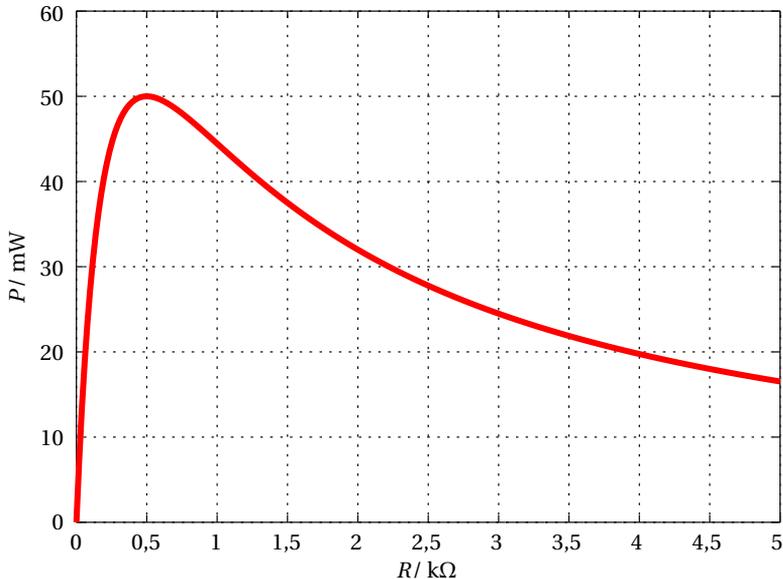
% Variation des Wirkwiderstands von Z2
Rmin = 0;
Rmax = 500; % Ohm
R = n*(Rmax-Rmin)/(N-1)+Rmin;
Z2 = R-j*50; % Ohm
U = U0*Z2./(Z1+Z2);
I = U0./(Z1+Z2);
S = U.*conj(I)/2;
P = real(S);
Q = imag(S);

% Darstellung der Leistung
hFig5 = figure("Name","Leistung");
hPlot5 = plot(R,abs(S),"k",R,P,"r",R,Q,"b");
axis([Rmin,Rmax,Pmin,Pmax]);
grid on;
legend(hPlot5,"|S|","P","Q","location","southeast");
title("\bf Leistung","FontSize",14);
xlabel("R_2 / \Omega","FontSize",12);
ylabel("|S| / VA, P / W, Q / var","FontSize",12);
```

Übung 5.6 Leistung am Lastwiderstand

Im Diagramm ist die von einer realen Gleichspannungsquelle an einen Lastwiderstand abgegebene Leistung grafisch über dem Lastwiderstand R_L dargestellt. Der Lastwiderstand wird dabei im Bereich $0 \leq R_L \leq 5 \text{ k}\Omega$ variiert.

Im Lastwiderstand umgesetzte Leistung



- Entnehmen Sie dem Diagramm die maximal von der Quelle abgebbare Leistung P_{\max} sowie den Innenwiderstand R_0 und bestimmen Sie daraus die Leerlaufspannung U_L sowie den Kurzschlussstrom I_K .
- Skizzieren Sie die Schaltung mit Spannungsquelle, Innenwiderstand und Lastwiderstand. Tragen Sie auch die Zählpfeile für die Spannung U und den Strom I ein.
- Stellen Sie in einem Diagramm den Verlauf der Spannung U in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L im Bereich $0 \leq R_L \leq 5 \text{ k}\Omega$ dar.
- Stellen Sie in einem Diagramm den Verlauf des Stromes I in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L im Bereich $0 \leq R_L \leq 5 \text{ k}\Omega$ dar.

Lösung der Übungsaufgabe 5.6 (Seite 167)

- a) Leistung, Innenwiderstand, Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom

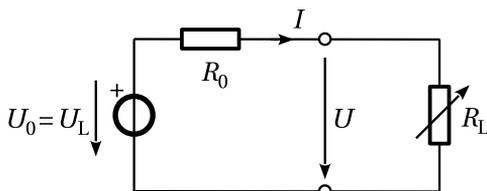
$$P_{\max} = 50 \text{ mW} \quad (\text{aus Diagramm})$$

$$R_0 = 500 \, \Omega \quad (\text{aus Diagramm})$$

$$U_L = \sqrt{4 R_0 \cdot P_{\max}} = \sqrt{4 \cdot 500 \, \Omega \cdot 50 \text{ mW}} = 10 \text{ V}$$

$$I_K = \frac{U_L}{R_0} = \frac{10 \text{ V}}{500 \, \Omega} = 20 \text{ mA}$$

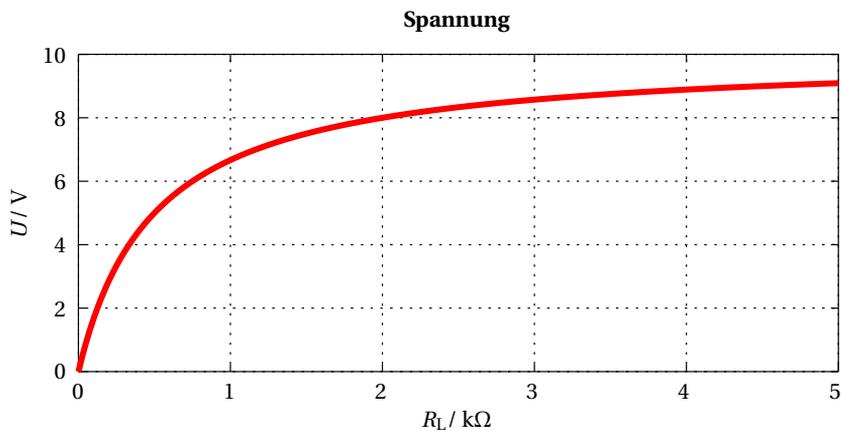
- b) Schaltskizze der Spannungsquelle mit Lastwiderstand



Die Quellspannung einer realen Spannungsquelle entspricht der Leerlaufspannung, da im Leerlauf ($R_L = \infty$) kein Strom durch den Innenwiderstand R_0 fließt.

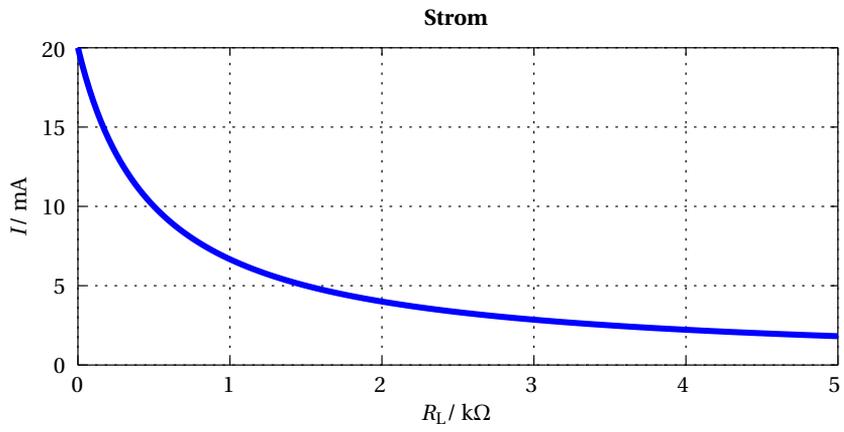
- c) Darstellung der Spannung U in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L

$$U = \frac{R_L}{R_0 + R_L} U_0 \quad \text{mit } U_0 = U_L$$



d) Darstellung des Stromes I in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L

$$I = \frac{U_0}{R_0 + R_L} \quad \text{mit } U_0 = U_L$$



Octave-Datei: loesung_05_06.m

```

% Lösung der Übungsaufgabe 5.6
% Vorgaben (Aufgabenstellung)
Pmax = 50e-3; % W (aus Diagramm)
R0 = 500; % Ohm (aus Diagramm)
Rmin = 0; % Variationsbereich
Rmax = 5e3; % des Lastwiderstands
disp("Vorgaben");
disp([" Pmax = ",num2str(Pmax*1e3)," mW (aus Diagramm)"]);
disp([" R0 = ",num2str(R0)," Ohm (aus Diagramm)"]);
disp([" ",num2str(Rmin)," Ohm < RL < ",num2str(Rmax)," Ohm"]);
disp(" ");

% Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom
UL = sqrt(4*R0*Pmax);
IK = UL/R0;
disp("Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom");
disp([" UL = ",num2str(UL)," V"]);
disp([" IK = ",num2str(IK*1e3)," mA"]);
disp(" ");

% Darstellung von Spannung und Strom bei Variation des Lastwiderstandes
N = 200;
n = 0:(N-1);
RL = n*(Rmax-Rmin)/(N-1)+Rmin;
U = UL*RL./(R0+RL);
I = UL./(R0+RL);

% Darstellung der Spannung
hFig1 = figure("Name","Spannung");
hPlot1 = plot(RL*1e-3,U,"r-"); % RL in kOhm
grid on;
title("\bf Spannung","FontSize",14);
xlabel("R_L / k\Omega ","FontSize",12);
ylabel("U / V","FontSize",12);

% Darstellung des Stromes
hFig2 = figure("Name","Strom");
hPlot2 = plot(RL*1e-3,I*1e3,"b-"); % RL in kOhm, I in mA
grid on;
title("\bf Strom","FontSize",14);
xlabel("R_L / k\Omega ","FontSize",12);
ylabel("I / mA","FontSize",12);

```

Übung 5.7 Belastete Wechselspannungsquelle

Eine reale Wechselspannungsquelle mit einer sinusförmigen Quellspannung der Frequenz $f = 800 \text{ Hz}$ wird zunächst unbelastet betrieben. Dabei stellt sich an den Klemmen die komplexe Spannungsamplitude $\underline{U} = 10 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ}$ ein.

Anschließend wird die Quelle mit der Impedanz $\underline{Z} = 600 \Omega \cdot e^{-j60^\circ}$ belastet. Nun fließt der Strom $\underline{I} = 11,785 \text{ mA} \cdot e^{j15^\circ}$ durch die Impedanz \underline{Z} .

- Berechnen Sie die Innenimpedanz \underline{Z}_0 der realen Quelle.
- Geben Sie eine mögliche Realisierung der Impedanz \underline{Z} an (Schaltskizze) und berechnen Sie die Nennwerte der verwendeten Bauelemente.
- Bestimmen Sie die Wirkleistung P , die Blindleistung Q sowie die Scheinleistung S , die in der Impedanz \underline{Z} umgesetzt werden.
- Wie groß ist die von der Quelle maximal abgebbare Wirkleistung P_{\max} ?

Lösung der Übungsaufgabe 5.7 (Seite 167)

a) Innenimpedanz

$$\underline{U}_0 = \underline{U}\Big|_{I=0} = 10 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ} \quad (\text{Leerlaufspannung})$$

$$\underline{Z}_0 + \underline{Z} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}} \quad (\text{Belastung mit } \underline{Z})$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}} - \underline{Z} = \frac{10 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ}}{11,785 \text{ mA} \cdot e^{j15^\circ}} - 600 \Omega \cdot e^{-j60^\circ}$$

$$\underline{Z}_0 = 848,54 \Omega \cdot e^{-j15^\circ} - 600 \Omega \cdot e^{-j60^\circ}$$

$$\underline{Z}_0 = (819,62 + j219,62) \Omega - (300 - j519,62) \Omega$$

$$\underline{Z}_0 = (519,62 + j300,00) \Omega = 600,0 \Omega \cdot e^{j30^\circ}$$

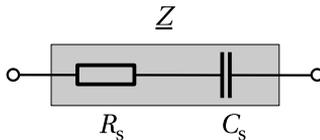
b) Mögliche Realisierungen der Impedanz \underline{Z}

$$f = 800 \text{ Hz}$$

$$\underline{Z} = 600 \Omega \cdot e^{-j60^\circ} = (300 - j519,62) \Omega$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = 1,667 \text{ mS} \cdot e^{j60^\circ} = (0,833 + j1,443) \text{ mS}$$

i) Reihenschaltung aus Widerstand R_s und Kapazität C_s

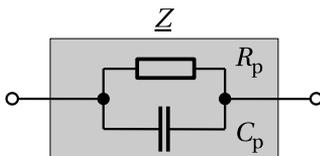


$$\underline{Z} = R_s + j \frac{-1}{2\pi f C_s}$$

$$R_s = \text{Re}\{\underline{Z}\} = 300 \Omega$$

$$C_s = \frac{-1}{2\pi f \text{Im}\{\underline{Z}\}} = \frac{-1}{2\pi \cdot 800 \text{ Hz} \cdot (-519,62 \Omega)} = 382,9 \text{ nF}$$

ii) Parallelschaltung aus Widerstand R_p und Kapazität C_p



$$\underline{Y} = \frac{1}{R_p} + j2\pi f C_p$$

$$R_p = \frac{1}{\text{Re}\{\underline{Y}\}} = \frac{1}{0,833 \text{ mS}} = 1200 \Omega$$

$$C_p = \frac{\text{Im}\{\underline{Y}\}}{2\pi f} = \frac{1,443 \text{ mS}}{2\pi \cdot 800 \text{ Hz}} = 287,2 \text{ nF}$$

c) Wirk-, Blind- und Scheinleistung

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = \underline{Z} \cdot \underline{I} \cdot \underline{I}^* = \underline{Z} \cdot |\underline{I}|^2$$

$$\underline{S} = 600 \, \Omega \cdot e^{-j60^\circ} \cdot (11,785 \, \text{mA})^2 = 0,083332 \, \text{VA} \cdot e^{-j60^\circ}$$

$$\underline{S} = P + jQ = 0,041626 \, \text{W} - j0,072167 \, \text{var}$$

Wirkleistung: $P = 41,626 \, \text{mW}$

Blindleistung: $Q = -0,072167 \, \text{var}$

Scheinleistung: $S = 0,083332 \, \text{VA}$

d) Maximal abgebbare Wirkleistung

$$P_{\max} = \frac{|\underline{U}_0|^2}{4 \cdot \operatorname{Re}\{\underline{Z}_0\}} = \frac{(10 \, \text{V})^2}{4 \cdot 519,62 \, \Omega} = 48,112 \, \text{mW}$$

Octave-Datei: loesung_05_07.m

```
% Lösung der Übungsaufgabe 5.7

% Vorgaben (Aufgabenstellung)
f = 800; % Hz
U0 = 10; % V
Z = 600*exp(-j*60*pi/180); % Ohm
I = 11.785e-3*exp(j*15*pi/180); % A
disp("Vorgaben");
disp([" f = ",num2str(f)," Hz"]);
disp([" |U0| = ",num2str(abs(U0))," V"]);
disp([" arg(U0) = ",num2str(angle(U0)*180/pi)," °"]);
disp([" |Z| = ",num2str(abs(Z))," Ohm"]);
disp([" arg(Z) = ",num2str(angle(Z)*180/pi)," °"]);
disp([" |I| = ",num2str(abs(I)*1e3)," mA"]);
disp([" arg(I) = ",num2str(angle(I)*180/pi)," °"]);
disp(" ");

% Innenimpedanz
Z0 = U0/I-Z;
disp("Innenimpedanz");
disp([" |Z0| = ",num2str(abs(Z0))," Ohm"]);
disp([" arg(Z0) = ",num2str(angle(Z0)*180/pi)," °"]);
disp([" Re{Z0} = ",num2str(real(Z0))," Ohm"]);
disp([" Im{Z0} = ",num2str(imag(Z0))," Ohm"]);
disp(" ");

% Realisierung von Z als Reihenschaltung aus Rs und Cs
Rs = real(Z);
Cs = -1/(2*pi*f*imag(Z));
disp("Realisierung von Z als Reihenschaltung");
disp([" Rs = ",num2str(Rs)," Ohm"]);
disp([" Cs = ",num2str(Cs*1e9)," nF"]);
disp(" ");

% Realisierung von Z als Parallelschaltung aus Rp und Cp
Y = 1/Z;
Rp = 1/real(Y);
Cp = imag(Y)/(2*pi*f);
disp("Realisierung von Z als Parallelschaltung");
disp([" Rp = ",num2str(Rp)," Ohm"]);
disp([" Cp = ",num2str(Cp*1e9)," nF"]);
disp(" ");
```

Octave-Datei: loesung_05_07.m (Fortsetzung)

```
% Wirk-, Blind- und Scheinleistung
S = Z*I*I';
P = real(S);
Q = imag(S);
disp("Wirk-, Blind- und Scheinleistung");
disp([" P      = ",num2str(P*1e3)," mW"]);
disp([" Q      = ",num2str(Q)," var"]);
disp([" |S|    = ",num2str(abs(S))," VA"]);
disp(" ");

% Maximal abgebbare Wirkleistung
Pmax = U0*U0'/(4*real(Z0));
disp("Maximal abgebbare Wirkleistung");
disp([" Pmax   = ",num2str(Pmax*1e3)," mW"]);
disp(" ");
```

Übung 5.8 Leistungsumsetzung in einer Impedanz

In einer Impedanz mit dem Wert $\underline{Z} = 100 \Omega \cdot e^{-j60^\circ}$ wird die Wirkleistung $P = 4 \text{ W}$ umgesetzt. Die Impedanz ist realisiert durch eine Parallelschaltung eines Widerstandes R und einer Kapazität C . Die Spannung an der Impedanz ist durch $u(t) = \hat{u} \cos(2\pi f_0 t)$ gegeben, wobei die Frequenz $f_0 = 50 \text{ Hz}$ beträgt.

- Ermitteln Sie die Nennwerte des Widerstandes R und der Kapazität C .
- Berechnen Sie den Spitzenwert \hat{u} der Spannung $u(t)$ an der Impedanz sowie den Strom $i_R(t)$, der durch den reellen Widerstand R fließt.
- Wie groß ist die in der Impedanz \underline{Z} umgesetzte komplexe Leistung \underline{S} ? Geben Sie auch die Blind- und die Scheinleistung an.
- Bestimmen Sie den durch die Impedanz \underline{Z} fließenden Strom $i(t)$.

Lösung der Übungsaufgabe 5.8 (Seite 168)

a) Wirkwiderstand und Kapazität

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R} + j2\pi f_0 C = \frac{1}{100 \Omega \cdot e^{-j60^\circ}} = 10 \text{ mS} \cdot e^{j60^\circ}$$

$$\underline{Y} = 10 \text{ mS} \cdot \cos(60^\circ) + j10 \text{ mS} \cdot \sin(60^\circ) = 5 \text{ mS} + j8,66 \text{ mS}$$

$$R = \frac{1}{\operatorname{Re}\{\underline{Y}\}} = \frac{1}{5 \text{ mS}} = 200 \Omega$$

$$C = \frac{\operatorname{Im}\{\underline{Y}\}}{2\pi f_0} = \frac{8,66 \text{ mS}}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 27,566 \mu\text{F}$$

b) Spitzenwert \hat{u} der Spannung $u(t)$ und Strom $i_R(t)$ durch R

$$\underline{S} = P + jQ = \frac{|\underline{U}|^2}{\underline{Z}^*} = |\underline{U}|^2 \underline{Y}^* \quad \text{mit} \quad \underline{U} = |\underline{U}| e^{j\varphi_u} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_u}, \varphi_u = 0$$

$$P = \operatorname{Re}\{\underline{S}\} = |\underline{U}|^2 \operatorname{Re}\{\underline{Y}^*\} = \frac{|\underline{U}|^2}{R} = \frac{\hat{u}^2}{2R}$$

$$\hat{u} = \sqrt{2PR} = \sqrt{2 \cdot 4 \text{ W} \cdot 200 \Omega} = 40 \text{ V}$$

$$i_R(t) = \hat{i}_R \cos(2\pi f_0 t) = \frac{u(t)}{R} \quad \text{gilt nur an ohmschen Widerständen!}$$

$$\hat{i}_R = \frac{\hat{u}}{R} = \frac{40 \text{ V}}{200 \Omega} = 200 \text{ mA}$$

An ohmschen Widerständen sind Spannung und Strom in Phase, daher gilt hier auch $\hat{u} = R \hat{i}_R$. Bei allgemeinen Impedanzen muss allerdings immer mit komplexen Amplituden gerechnet werden.

c) Komplexe Leistung, Blind- und Scheinleistung

$$\underline{S} = \frac{|\underline{U}|^2}{\underline{Z}^*} = \frac{\hat{u}^2}{2\underline{Z}^*} = \frac{(40 \text{ V})^2}{2 \cdot 100 \Omega \cdot e^{+j60^\circ}} = \frac{1600 \text{ V}^2}{200 \Omega} \cdot e^{-j60^\circ} = 4 \text{ W} - j6,928 \text{ var}$$

$$S = |\underline{S}| = \frac{|\underline{U}|^2}{|\underline{Z}^*|} = \frac{\hat{u}^2}{2|\underline{Z}^*|} = \frac{(40 \text{ V})^2}{2 \cdot 100 \Omega} = 8 \text{ VA}$$

$$Q = \operatorname{Im}\{\underline{S}\} = -6,928 \text{ var}$$

d) Strom $i(t)$ durch die Impedanz

$$\underline{\hat{U}} = \sqrt{2} \underline{U} = \hat{u} e^{j\varphi_u} \quad \text{mit} \quad \hat{u} = 40 \text{ V} \text{ und } \varphi_u = 0^\circ$$

$$\underline{\hat{I}} = \frac{\underline{\hat{U}}}{\underline{Z}} = \frac{\hat{u} e^{j\varphi_u}}{\underline{Z}} = \frac{40 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ}}{100 \Omega \cdot e^{-j60^\circ}} = 400 \text{ mA} \cdot e^{j60^\circ}$$

$$i(t) = \hat{i} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_i) = 400 \text{ mA} \cdot \cos(2\pi f_0 t + 60^\circ)$$

Octave-Datei: loesung_05_08.m

```

% Lösung der Übungsaufgabe 5.8

% Vorgaben (Aufgabenstellung)
Z = 100*exp(-j*60*pi/180);      % Ohm
P = 4;                          % W
f0 = 50;                        % Hz
phiu = 0;                       % °
disp("Vorgaben");
disp([" |Z|      = ",num2str(abs(Z))," Ohm"]);
disp([" arg(Z)  = ",num2str(angle(Z)*180/pi)," °"]);
disp([" P       = ",num2str(P)," W"]);
disp([" f0      = ",num2str(f0)," Hz"]);
disp([" phiu    = ",num2str(phiu)," °"]);
disp(" ");

% Realisierung von Z als Parallelschaltung aus R und C
Y = 1/Z;
R = 1/real(Y);
C = imag(Y)/(2*pi*f0);
disp("Realisierung von Z als Parallelschaltung");
disp([" R       = ",num2str(R)," Ohm"]);
disp([" C       = ",num2str(C*1e6)," uF"]);
disp(" ");

% Spannung am Widerstand R und Strom durch Widerstand R
us = sqrt(2*P*R);
iRs = us/R;
phiRi = phiu;
disp("Spannung am Widerstand R und Strom durch Widerstand R");
disp([" us      = ",num2str(us)," V"]);
disp([" iRs     = ",num2str(iRs*1e3)," mA"]);
disp([" phiRi   = ",num2str(phiRi)," °"]);
disp(" ");

% Blind- und Scheinleistung
S = (us^2)/(2*Z');
Q = imag(S);
disp("Blind- und Scheinleistung");
disp([" Q       = ",num2str(Q)," var"]);
disp([" |S|     = ",num2str(abs(S))," VA"]);
disp(" ");

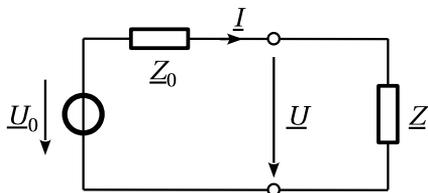
```

Octave-Datei: loesung_05_08.m (Fortsetzung)

```
% Strom durch die Impedanz (Amplitude und Phase)
I = us*exp(j*phiu*pi/180)/Z;
is = abs(I);
phii = angle(I)*180/pi;
disp("Strom durch die Impedanz (Amplitude und Phase)");
disp([" is      = ",num2str(is*1e3)," mA"]);
disp([" phii   = ",num2str(phii),"°"]);
disp(" ");
```

Übung 5.9 Belastete Wechselspannungsquelle

Die Impedanz mit dem Wert $\underline{Z} = 1 \text{ k}\Omega \cdot e^{j30^\circ}$ wird an eine Wechselspannungsquelle mit der Quellspannung $\underline{U}_0 = 10 \text{ V}$ und der Innenimpedanz $\underline{Z}_0 = 600 \Omega$ angeschlossen.



- Berechnen Sie die Spannung \underline{U} sowie den Strom \underline{I} .
- Welche Schein-, Wirk- und Blindleistung nimmt \underline{Z} auf?
- Wie muss \underline{Z}_0 gewählt werden, damit die in \underline{Z} umgesetzte Wirkleistung maximal wird? Geben Sie eine mögliche Realisierung für \underline{Z}_0 an (Schaltskizze).

Lösung der Übungsaufgabe 5.9 (Seite 168)

a) Spannung und Strom

$$\underline{Z} = 1 \text{ k}\Omega \cdot e^{j30^\circ} = (866 + j500) \Omega$$

$$\underline{U} = \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}} \underline{U}_0 = \frac{(866 + j500) \Omega}{600 \Omega + (866 + j500) \Omega} \cdot 10 \text{ V} = (6,33 + j1,25) \text{ V} = 6,456 \text{ V} \cdot e^{j11,2^\circ}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}} = \frac{10 \text{ V}}{600 \Omega + (866 + j500) \Omega} = (6,11 - j2,08) \text{ mA} = 6,456 \text{ mA} \cdot e^{-j18,8^\circ}$$

b) Schein-, Wirk- und Blindleistung

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = |\underline{U}_0|^2 \frac{\underline{Z}}{|\underline{Z}_0 + \underline{Z}|^2} = P + jQ$$

$$S = |\underline{S}| = |\underline{U} \underline{I}^*| = |\underline{U}_0|^2 \frac{|\underline{Z}|}{|\underline{Z}_0 + \underline{Z}|^2} = 41,7 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

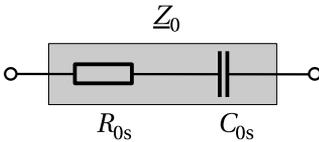
$$P = \text{Re}\{\underline{U} \underline{I}^*\} = |\underline{U}_0|^2 \frac{\text{Re}\{\underline{Z}\}}{|\underline{Z}_0 + \underline{Z}|^2} = 36,1 \text{ mW}$$

$$Q = \text{Im}\{\underline{U} \underline{I}^*\} = |\underline{U}_0|^2 \frac{\text{Im}\{\underline{Z}\}}{|\underline{Z}_0 + \underline{Z}|^2} = 20,8 \cdot 10^{-3} \text{ var}$$

c) Wirkleistungsanpassung: $\underline{Z}_0 = \underline{Z}^* = 1 \text{ k}\Omega \cdot e^{-j30^\circ}$

Mögliche Realisierungen von \underline{Z}_0 mit zwei Bauelementen

i) Reihenschaltung von Widerstand und Kapazität

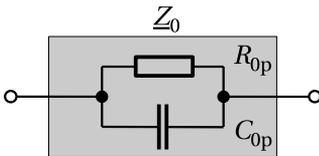


$$\underline{Z}_0 = R_{0s} + j \frac{-1}{2\pi f C_{0s}}$$

$$R_{0s} = \text{Re}\{\underline{Z}_0\}$$

$$C_{0s} = \frac{-1}{2\pi f \text{Im}\{\underline{Z}_0\}}$$

ii) Parallelschaltung von Widerstand und Kapazität



$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{\underline{Z}_0} = \frac{1}{R_{0p}} + j2\pi f C_{0p}$$

$$R_{0p} = \frac{1}{\text{Re}\{\underline{Y}_0\}}$$

$$C_{0p} = \frac{\text{Im}\{\underline{Y}_0\}}{2\pi f}$$

Anmerkung: Die numerische Berechnung der Kapazitäten ist hier nicht möglich, da keine Frequenz angegeben ist.

Octave-Datei: loesung_05_09.m

```
% Lösung der Übungsaufgabe 5.9

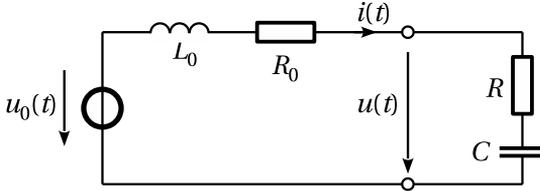
% Vorgaben (Aufgabenstellung)
U0 = 10*exp(j*0*pi/180);      % V
Z0 = 600*exp(j*0*pi/180);    % Ohm
Z  = 1e3*exp(j*30*pi/180);    % Ohm
disp("Vorgaben");
disp([" |U0| = ",num2str(abs(U0)), " V"]);
disp([" arg(U0) = ",num2str(angle(U0)*180/pi),"°"]);
disp([" |Z0| = ",num2str(abs(Z0)), " Ohm"]);
disp([" arg(Z0) = ",num2str(angle(Z0)*180/pi),"°"]);
disp([" |Z| = ",num2str(abs(Z)), " Ohm"]);
disp([" arg(Z) = ",num2str(angle(Z)*180/pi),"°"]);
disp(" ");

% Spannung und Strom (komplexe Amplituden)
U = U0*Z/(Z0+Z);
I = U0/(Z0+Z);
disp("Spannung und Strom");
disp([" |U| = ",num2str(abs(U)), " V"]);
disp([" arg(U) = ",num2str(angle(U)*180/pi),"°"]);
disp([" |I| = ",num2str(abs(I)*1e3)," mA"]);
disp([" arg(I) = ",num2str(angle(I)*180/pi),"°"]);
disp(" ");

% Schein-, Wirk- und Blindleistung
S = U*I';
P = real(S);
Q = imag(S);
disp("Schein-, Wirk- und Blindleistung");
disp([" |S| = ",num2str(abs(S)), " VA"]);
disp([" arg(S) = ",num2str(angle(S)*180/pi),"°"]);
disp([" P = ",num2str(P*1e3)," mW"]);
disp([" Q = ",num2str(Q)," var"]);
disp(" ");
```

Übung 5.10 Quelle mit induktiver Innenimpedanz

Eine Spannungsquelle mit induktiver Innenimpedanz wird mit einer kapazitiven Impedanz belastet. Der zeitliche Verlauf der Quellspannung ist durch $u_0(t) = \hat{u} \cos(2\pi f t)$ gegeben. Die Amplitude der Spannung beträgt $\hat{u} = 10 \text{ V}$, die Frequenz f ist variabel.



$$\begin{aligned} R_0 &= 1 \text{ k}\Omega \\ L_0 &= 470 \text{ mH} \\ R &= 1 \text{ k}\Omega \\ C &= 1 \text{ }\mu\text{F} \end{aligned}$$

- Berechnen Sie die im Widerstand R umgesetzte Wirkleistung P in Abhängigkeit von der Frequenz f und stellen Sie diese in einem Diagramm dar.
- Berechnen Sie die in der Kapazität C umgesetzte Blindleistung Q in Abhängigkeit von der Frequenz f und stellen Sie diese in einem Diagramm dar.
- Bei welcher Frequenz f_0 liegt Wirkleistungsanpassung vor?
- Berechnen Sie die Spannung $u(t)$ und den Strom $i(t)$ bei Wirkleistungsanpassung.

Lösung der Übungsaufgabe 5.10 (Seite 168)

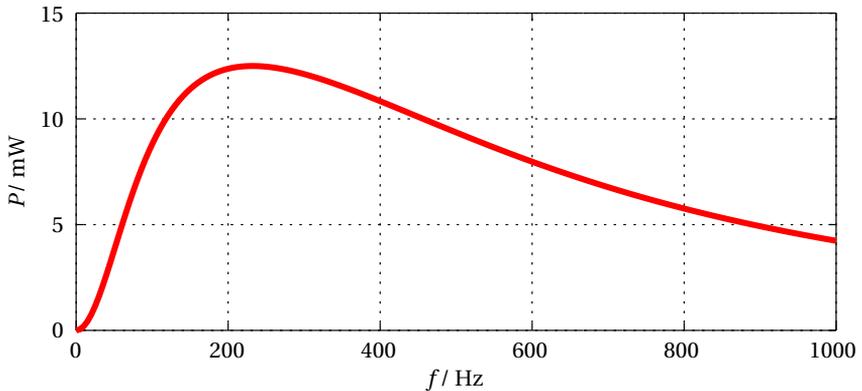
a) Wirkleistung im Widerstand R

$$\underline{\hat{U}}_0 = \hat{u} \cdot e^{j\varphi_0} = 10 \text{ V} \quad \text{mit } \hat{u} = 10 \text{ V und } \varphi_0 = 0^\circ$$

$$\underline{\hat{I}} = \frac{\underline{\hat{U}}_0}{R_0 + j2\pi f L_0 + R_0 + 1/(2\pi f C)} = \frac{\underline{\hat{U}}_0}{R_0 + R + j\left(2\pi f L_0 - 1/(2\pi f C)\right)}$$

$$P = \frac{R \hat{I} \hat{I}^*}{2} = \frac{R |\hat{I}|^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R |\hat{U}_0|^2}{(R_0 + R)^2 + \left(2\pi f L_0 - 1/(2\pi f C)\right)^2}$$

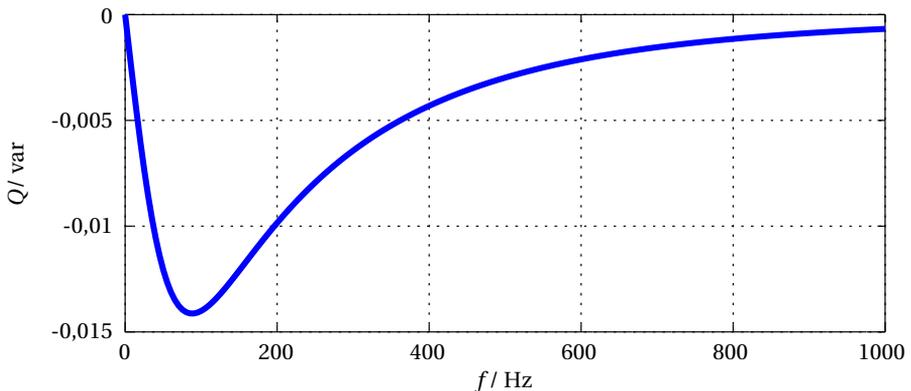
Wirkleistung



b) Blindleistung in der Kapazität C

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\hat{I} \hat{I}^*}{j2\pi f C} \right\} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\hat{I}|^2}{-2\pi f C} = \frac{-1}{4\pi f C} \cdot \frac{|\hat{U}_0|^2}{(R_0 + R)^2 + \left(2\pi f L_0 - 1/(2\pi f C)\right)^2}$$

Blindleistung



c) Wirkleistungsanpassung ($Z_0 = Z^*$)

Die Bedingung $R_0 = R$ ist hier erfüllt. Für die Blindanteile von Innen- und Lastimpedanz ist $X_0 = -X$ gefordert. Da die Innenimpedanz induktiv und die Lastimpedanz kapazitiv ist, gibt es eine Frequenz f_0 , bei der Wirkleistungsanpassung vorliegt.

$$2\pi f_0 L_0 = -\frac{-1}{2\pi f_0 C} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}} = 232,15 \text{ Hz}$$

d) Spannung $u(t)$ und Strom $i(t)$ bei Wirkleistungsanpassung

Da sich die beiden Blindwiderstände kompensieren, wird die Quellspannung bei Wirkleistungsanpassung durch den reellen Widerstand $R_0 + R$ belastet. Für den Strom ergibt sich somit

$$i(t) = \frac{u_0(t)}{R_0 + R} = \frac{\hat{u}_0}{R_0 + R} \cdot \cos(2\pi f_0 t) = 5 \text{ mA} \cdot \cos(2\pi f_0 t)$$

Der Strom $i(t)$ ist in Phase mit der Quellspannung $u_0(t)$.

Zur Berechnung der Spannung $u(t)$ müssen wir unbedingt mit komplexen Amplituden arbeiten.

$$\underline{\hat{I}} = \hat{i} \cdot e^{j\varphi_i} = \frac{\hat{u}_0}{R_0 + R} = 5 \text{ mA}$$

$$\underline{\hat{U}} = \left(R + \frac{1}{j2\pi f_0 C} \right) \underline{\hat{I}} = 6,062 \text{ V} \cdot e^{-j34,4^\circ}$$

$$u(t) = 6,062 \text{ V} \cdot \cos(2\pi f_0 t - 34,4^\circ)$$

Octave-Datei: loesung_05_10.m

```

% Lösung der Übungsaufgabe 5.10

% Vorgaben (Aufgabenstellung)
R0 = 1e3;      % Ohm
L0 = 470e-3;  % H
R = 1e3;      % Ohm
C = 1e-6;    % F
U0 = 10;     % V (komplexe Amplitude)
disp("Vorgaben");
disp([" R0      = ",num2str(R0)," Ohm"]);
disp([" L0      = ",num2str(L0*1e3)," mH"]);
disp([" R       = ",num2str(R)," Ohm"]);
disp([" C       = ",num2str(C*1e6)," uF"]);
disp(" ");

% Leistungsanpassung
f0 = 1/(2*pi*sqrt(L0*C));
disp("Leistungsanpassung");
disp([" f0      = ",num2str(f0)," Hz"]);
disp(" ");

% Spannung bei der Frequenz f0 (Leistungsanpassung)
U = U0*(R+1/(j*2*pi*f0*C))/(R0+j*2*pi*f0*L0+R+1/(j*2*pi*f0*C));
us = abs(U);
phiu = angle(U)*180/pi;
disp("Spannung u(t) = us*cos(2*pi*f0*t+phiu)");
disp([" us      = ",num2str(us)," V"]);
disp([" phiu    = ",num2str(phiu)," °"]);
disp(" ");

% Strom bei der Frequenz f0 (Leistungsanpassung)
I = U0/(R0+j*2*pi*f0*L0+R+1/(j*2*pi*f0*C));
is = abs(I);
phii = angle(I)*180/pi;
disp("Strom i(t) = is*cos(2*pi*f0*t+phii)");
disp([" is      = ",num2str(is*1e3)," mA"]);
disp([" phii    = ",num2str(phii)," °"]);
disp(" ");

```

Octave-Datei: loesung_05_10.m (Fortsetzung)

```

% Berechnung der frequenzabhängigen Leistungen
fmin = 0;      % Hz
fmax = 1e3;   % Hz
Pmax = 20e-3; % W

% Festlegung der Stützstellen
N = 200;
n = 0:(N-1);
f = n*(fmax-fmin)/(N-1)+fmin;

% Spannung, Strom und Scheinleistung
U = U0*(R+1./(j*2*pi*f*C))./(R0+j*2*pi*f*L0+R+1./(j*2*pi*f*C));
U(find(f==0)) = 0; % Korrektur bei Division durch Null
I = U0./(R0+j*2*pi*f*L0+R+1./(j*2*pi*f*C));
I(find(f==0)) = 0; % Korrektur bei Division durch Null
S = U.*conj(I)/2; % Scheinleistung in der kapazitiven Lastimpedanz

% Wirkleistung im Widerstand R
P = real(S); % Wirkleistung in der Lastimpedanz
hFig1 = figure("Name", "Wirkleistung");
hPlot1 = plot(f,P*1e3, "r"); % P in mW
axis([fmin,fmax,0,Pmax*1e3]);
grid on;
title("\bWirkleistung", "FontSize", 14);
xlabel("f / Hz", "FontSize", 12);
ylabel("P / mW", "FontSize", 12);

% Blindleistung in der Kapazität C
Q = imag(S); % Blindleistung in der Lastimpedanz
hFig2 = figure("Name", "Blindleistung");
hPlot2 = plot(f,Q, "b");
axis([fmin,fmax,-Pmax,0]);
grid on;
title("\bBlindleistung", "FontSize", 14);
xlabel("f / Hz", "FontSize", 12);
ylabel("Q / var", "FontSize", 12);

```