Schriftliche Prüfung im Fach

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

- Bitte beachten Sie die Hinweise auf der folgenden Seite
- Beginnen Sie mit den Aufgaben, die Ihnen am leichtesten fallen

Einzelresultate

Aufgabe	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
erreichbare Punkte	15	17	18	21	17
erzielte Punkte					

Gesamtbewertung

Punkte maximal:	Gesamtpunkte:	**Note:**
88		

Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

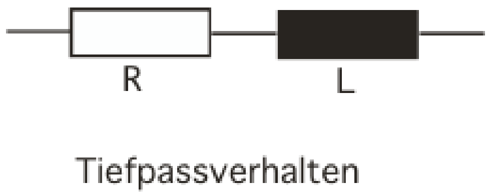
1. Die Prüfungsdauer beträgt 2 Stunden.
2. Zur Bearbeitung der Klausur sind **keine Hilfsmittel** zugelassen, ausser Schreibzeug, Zirkel, Lineal und ein **nicht-programmierbarer, komplexer** Taschenrechner.
3. Die Lösungen müssen auf den ausgegebenen Blättern in den dafür vorgesehenen **Lösungskästen** niedergeschrieben werden. Falls der Platz nicht ausreicht, muss auf dem Lösungsblatt ein Hinweis auf die Fortsetzung gegeben werden und von der Aufsicht ein gestempeltes Zusatzblatt angefordert werden. Alternativ darf auch die Rückseite der Lösungsblätter verwendet werden, wobei auch hier der zugehörige Aufgabenkontext eindeutig anzugeben ist. Bei zweifelhafter Zuordnung kann die Lösung nicht gewertet werden. Benutzen Sie **kein eigenes Papier**.
4. **Bei allen Aufgaben muss der Lösungsweg klar erkennbar und eindeutig dargestellt werden**. In einigen Aufgaben ist dies die wesentliche Prüfungsleistung. Lösungen ohne ausreichende Begründung werden nicht gewertet. Das Gleiche gilt für mehrdeutige Lösungen oder Formulierungen.
5. Diagramme werden nur gewertet, wenn der Datenteil mit Name und Aufgabennummer vollständig ausgefüllt ist. Bei Bedarf können von der Aufsicht zusätzliche Diagramme angefordert werden. **Ungültige Lösungen** müssen klar erkenntlich **durchgestrichen** werden. Liegt mehr als eine Lösung vor, erfolgt keine Wertung.
6. Verwenden Sie bei der Lösung der Aufgaben **weder rote Farbe noch Bleistift** und kennzeichnen Sie Ihre Ergebnisse deutlich. Lösungen in roter Farbe oder Bleistift können nicht gewertet werden. Zeichnungen in Diagrammen dürfen mit Bleistift gemacht werden.
7. Tragen Sie vor Beginn der Klausur Nachname, Vorname und Matrikelnummer auf dem Deckblatt ein und **beschriften Sie jedes Lösungsblatt** mit Ihrem Namen. **Alle** Blätter, auch die Zusatzblätter, müssen den Namen des Kandidaten tragen. Wer diese Regeln, die einer raschen Bearbeitung dienen, nicht einhält, kann nicht erwarten, dass er kurzfristig über das Ergebnis seiner Prüfung informiert wird. Die Lösungsblätter müssen **vollständig**, also zusammen mit allen zusätzlich ausgeteilten Blättern abgegeben werden. Heften Sie alle Blätter mit der beiliegenden Faltklammer zusammen.
8. Legen Sie Ihren Studentenausweis und den Zulassungsschein bereit.
9. Der Umfang der gesamten Klausur beträgt 31 Seiten und besteht aus 5 Aufgaben. **Prüfen Sie** diese direkt nach Erhalt **auf Vollständigkeit**.
10. Die Ergebnisse der Klausur werden nach der Korrektur am schwarzen Brett des Instituts (Foyer, Geb. 30.10) veröffentlicht. Der Zeitpunkt der Veröffentlichung wird im Internet bekannt gegeben.

Aufgabe 1

*(gesamt **15** Punkte)*

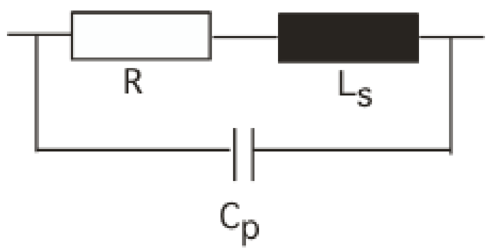
Allgemeines

a) Ein gewendelter Kohleschichtwiderstand mit $R = 150\ \Omega$ habe eine Eigeninduktivität von $L = 200\ \mathrm{nH}$. Zeichnen Sie die Ersatzschaltung des Widerstands und geben Sie die Frequenz an bei der das Blindelement betragsmässig gleich groß ist wie das Wirkelement. ***(2 P.)***



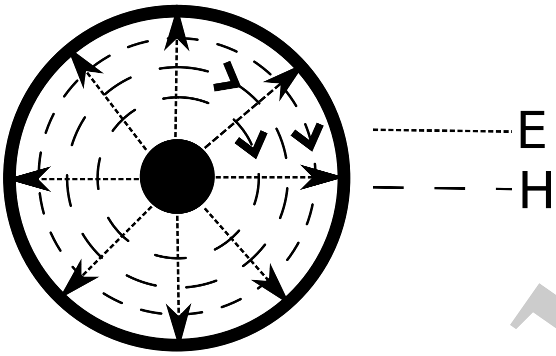
Bedingung: $\omega L = R$
$f = \frac{R}{2\pi L} = 119{,}37\ \mathrm{MHz}$

b) Mit einem zusätzlichen Blindelement soll der Blindanteil (aus a.) bei tiefen Frequenzen möglichst gut kompensiert werden. Geben Sie das sich nun ergebende Ersatzschaltbild an und dimensionieren Sie das zusätzliche Element. ***(2 P.)***



Tiefpasskompensation:
$\omega L_s = R^2 \omega C_p$
$C_p = L/R^2 = 8{,}89\ \mathrm{pF}$

c) Zeichnen Sie den Querschnitt einer Koaxialleitung inklusive einer Momentaufnahme der elektrischen und magnetischen Feldlinien, wobei sich die elektromagnetische Welle in die Zeichenebene hinein bewegen soll. Welcher Wellentyp breitet sich in einem Koaxialleiter aus? *(3 P.)*



TEM-Welle

d) Ein Verstärker führt zu einer 8-fachen Leistung am Ausgang im Vergleich zum Schaltungseingang. Geben Sie die Verstärkung in dB an. *(1 P.)*

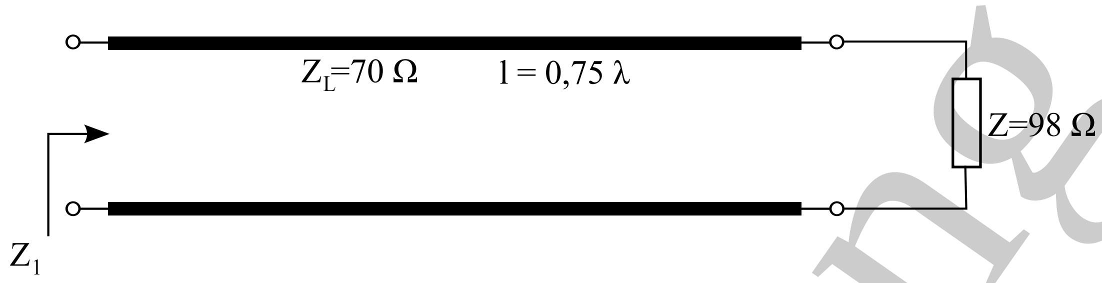
8-fache Leistungsverstärkung entspricht +9dB.

e) Ein Handyempfänger habe eine Empfangsfrequenz von 890 MHz. Dieses soll auf eine Zwischenfrequenz von 87 MHz abwärts gemischt werden. Geben Sie die zwei möglichen Lokaloszillator-Frequenzen an, die zur Abwärtsmischung verwendet werden können. *(2 P.)*

$f_{LO1} = 890\text{ MHz} - 87\text{ MHz} = 813\text{ MHz}$

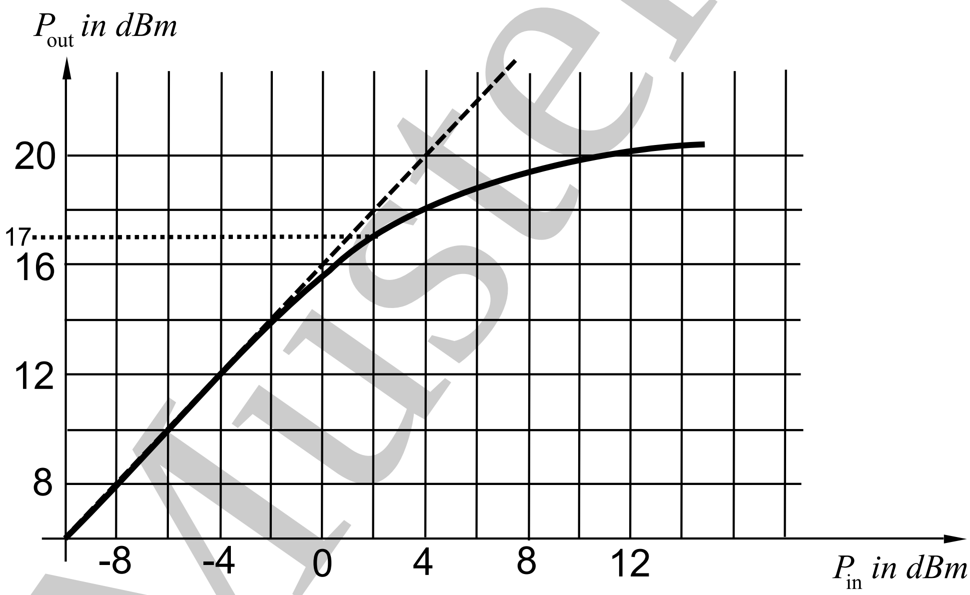
$f_{LO2} = 890\text{ MHz} + 87\text{ MHz} = 967\text{ MHz}$

f) Geben Sie die Klemmenimpedanz Z_1 an. ***(1 P.)***



Lambda-Viertel Transformation.
$Z_1 = Z/Z_L^2 = 50\ \Omega$

g) Gegeben ist die folgende Verstärkerkennlinie. Geben Sie die Verstärkung im linearen Bereich und den $\mathrm{P}_{1\mathrm{dB}}$-Punkt bezogen auf den Ausgang an. Ergänzen Sie dazu die Grafik. ***(2 P.)***



Die Verstärkung beträgt 16 dB.

Der 1dB Kompressionspunkt bezogen auf den Ausgang beträgt 17 dBm.

h) Beschreiben Sie warum in einem Mikrowellenofen das Gargut auf einem Drehteller gedreht wird, und was passieren würde wenn sich der Teller nicht dreht. *(2 P.)*

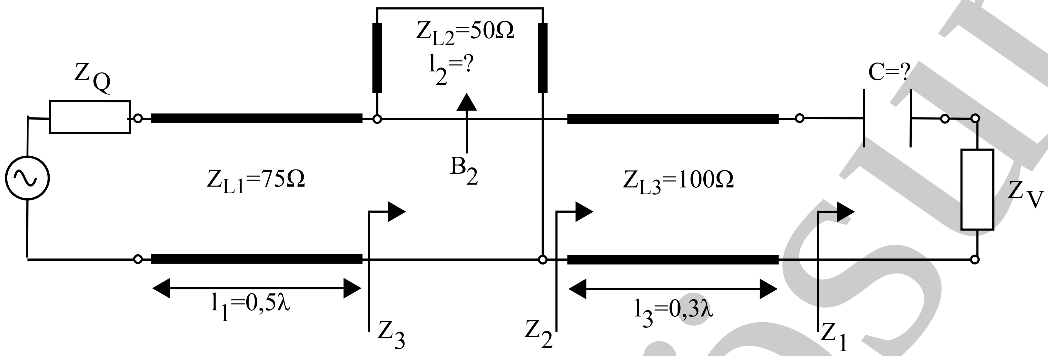
In der Mikrowelle entstehen stehende Wellen mit Feld-Maxima und -Minima. Dadurch erhitzen manche Stellen schneller als andere. Durch das Drehen wird das Gargut gleichmäßiger erhitzt. Ohne drehen wären manche Stellen sehr heiß und andere noch kalt.

Aufgabe 2

*(gesamt **17** Punkte)*

Smithdiagramm

Gegeben sei die unten skizzierte Transformationschaltung mit veränderlicher Kapazität C und einer Stichleitung mit der variablen Länge l_2. Die Werte für die übrigen Leitungen können Sie der Schaltung entnehmen. Der Wert der komplexen Quellenimpedanz beträgt $Z_Q = (10 - j40)\Omega$, die Impedanz des Verbrauchers beträgt $Z_V = (150 + j100)\Omega$. Die Betriebsfrequenz der Schaltung ist 500 MHz. Alle Leitungen sind verlustfrei.



a) Bestimmen Sie die Kapazität C und die Länge der Stichleitung l_2, so dass der Verbraucher an die Quelle leistungsangepasst ist. Begründen Sie welche Diagrammart und welchen Bezugswiderstand Sie wählen und beschreiben Sie die einzelnen Transformationsschritte. Der Lösungsweg bzw. die Zuordnung der einzelnen Transformationsschritte zu den Transformationselementen muss klar erkennbar sein. ***(12 P.)***

Die Leitung 1 ist exakt eine halbe Wellenlänge lang und hat deshalb keine Auswirkung.
Das Smith-Chart wird folglich auf $100\ \Omega$ normiert, wegen der Transformation von Leitung 3.
Prinzipiell können beide Diagrammarten verwendet werden, da sowohl eine serielle Kapazität und eine parallele Stichleitung vorkommen. Da Impedanzen gegeben sind, wählen wir die Widerstandsform.

Die Anpassbedingung lautet $Z_3 = Z_q^*$, da Leitung 1 keine Auswirkung hat.

Einzeichnen von $Z_v = (1{,}5 + j)100\ \Omega$.

Z_1 liegt auf einem R-const Kreis von Z_v aus. In diesem Fall unterhalb Z_v, da C in Richtung negativer Blindwiderstände transformiert.

Leitung Z_3 dreht den kompletten Kreisbogen um $0{,}3\lambda = 216^\circ$ im Uhrzeigersinn um den Ursprung –> Z_2
Z_v wird auf $(0{,}414 - j0{,}0408)100\ \Omega$ transformiert. Die anderen Werte für Z_2 liegen oberhalb dieses Startpunkts.

Einzeichnen des Zielpunkts $Z_q^* = (0{,}1 + j0{,}4)100\ \Omega$
Für eine erfolgreiche Transformation muss Z_3 auf einem G-const-Kreis um Z_q^* liegen. Diesen folglich einzeichnen (mittels eines Thales-Kreises, da man sich in Widerstandsform befindet)

Der Schnittpunkt dieses Kreises mit Z_2 ist bei $(0{,}358 + j0{,}693)100\ \Omega$. Dieser Punkt legt folglich den Transformationsweg eindeutig fest.

Von diesem Punkt ausgehend zeichnet man den m-Kreise der Leitung 3 zurück, um so den genauen Punkt von Z_1 zu finden. Dieser liegt bei $(1{,}5 - j1{,}867)100\ \Omega$

Den ganzen Transformationsweg einzeichnen

Bauteilwerte bestimmen

Kondensator C:
$X_C = -(1{,}867 + 1)100\ \Omega = -286{,}7\ \Omega$
$C = -\frac{1}{\omega X_C} = 1{,}11\ \mathrm{pF}$

Leitung l_2:
Der Blindleitwert transformiert Z_2 in Z_q^*. Um B_2 zu bestimmen, liest man zuerst Y_2 und Y_q^* ab (180° gespiegelt im S.D.) Alternative ist die rechnerische Bestimmung.

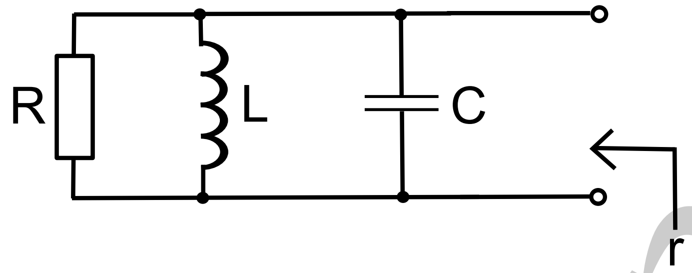
$Y_2 \cdot 100\ \Omega = 0{,}588 - j1{,}139$
$Y_q^* \cdot 100\ \Omega = 0{,}588 - j2{,}353$

Somit beträgt $B_2 \cdot 100\ \Omega = 1{,}214$

Daraus kann man die Länge von Leitung 2 bestimmen:
$B_2 \cdot Z_{L2} = -1{,}214 \frac{50\ \Omega}{100\ \Omega} = -0{,}607 = cot(\beta l_2)$

$l_2 = 0{,}163\lambda = 9{,}78\ \mathrm{cm}$

Gegeben ist ein Ein-Tor mit dem unten abgebildeten Ersatzschaltbild. Der Widerstand R beträgt $250\ \Omega$, die Kapazität C $10\ \mathrm{pF}$ und die Induktivität L $2\ \mu\mathrm{H}$.



b) Zeichnen Sie den Frequenzverlauf des Reflexionsfaktors r in Bezug auf $50\ \Omega$ in ein Smith-Diagramm. Der Frequenzbereich beträgt $3{,}9\ \mathrm{MHz}$ bis $167\ \mathrm{MHz}$. Kennzeichnen Sie jeweils die obere und untere Grenzfrequenz im Smith-Diagramm. Beschreiben Sie stichpunktartig Ihr Vorgehen und geben Sie die Werte des Reflexionsfaktors r für die obere und untere Grenzfrequenz an. *(5 P.)*

Bezugswiderstand wie gefordert $50\ \Omega$

Leitwertform wegen parallelen Blindelementen

Die Kurve muss auf einem G-const Kreis um R liegen ($\frac{1}{R}Z_B = 0{,}2$).

Berechnen der Punkte Y_{ges} für die Minimalfrequenz und die Maximalfrequenz. Die gesuchte Kurve liegt auf dem G-const-Kreis dazwischen.

$$Y_1 = Y_{ges}(3{,}9\ \mathrm{MHz})Z_B = Z_B/R + j(\omega C - \tfrac{1}{\omega L})Z_B = 0{,}2 - j1{,}0$$

$$Y_2 = Y_{ges}(167\ \mathrm{MHz})Z_B = Z_B/R + j(\omega C - \tfrac{1}{\omega L})Z_B = 0{,}2 + j0{,}5$$

Kurve einzeichnen und Endpunkte markieren.

Den Reflexionsfaktor Für die beiden Eckfrequenzen aus dem Smithdiagramm ablesen:

$r_1 = r(3{,}9\ \mathrm{MHz}) = 0.82e^{j91^\circ}$
$r_2 = r(167\ \mathrm{MHz}) = 0.725e^{j306^\circ}$

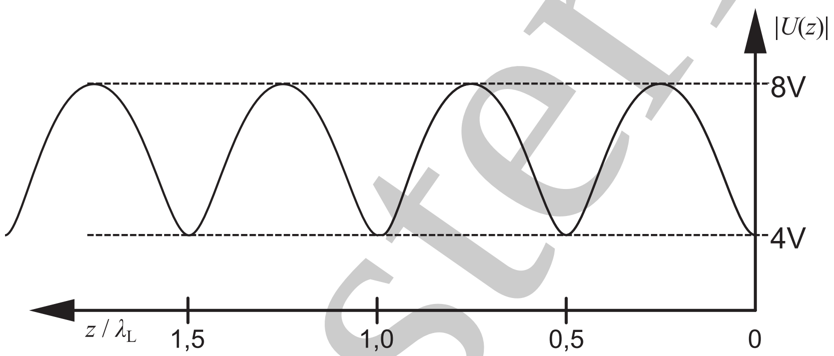
Aufgabe 3

*(gesamt **18** Punkte)*

Stehende Wellen und Hohlleiter

Gegeben sei folgende Schaltung, in der ein Generator mit dem Innenwiderstand $R_i = Z_L$ und der Leerlaufspannung U_0 bei der Frequenz $f_0 = 1$ GHz einen reellen Widerstand $R_V < Z_L$ über eine verlustlose Leitung mit dem Wellenwiderstand Z_L speist.

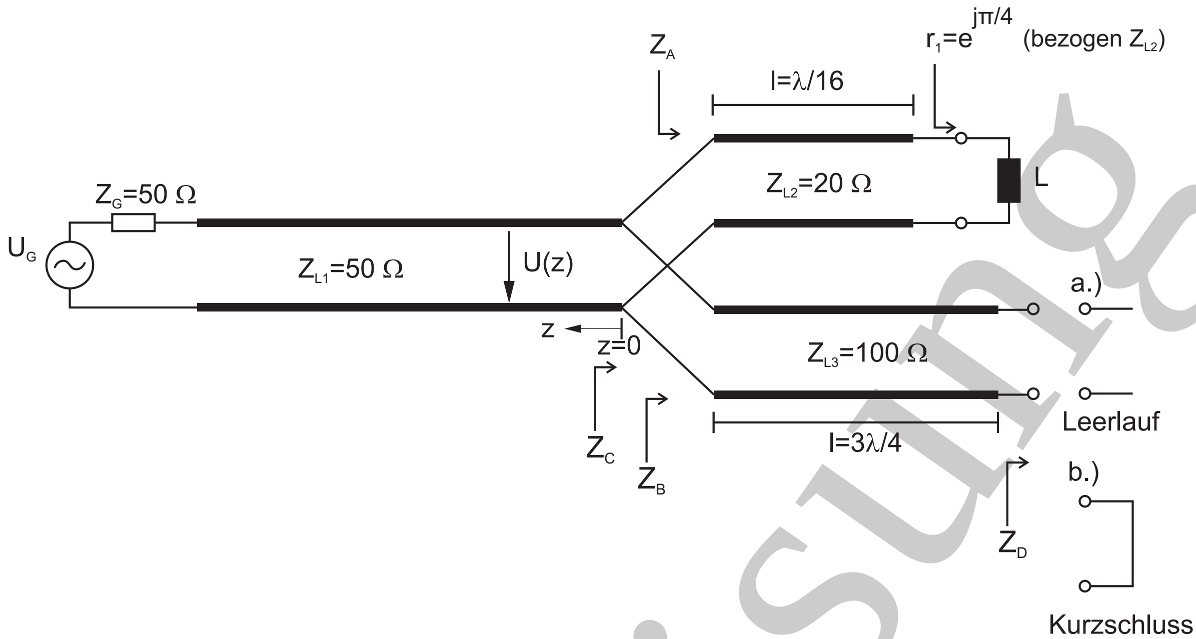
a) Folgende Spannungen werden auf der Leitung gemessen: $U_{min} = 4$ V $U_{max} = 8$ V Skizzieren Sie den Spannungsverlauf im untenstehenden Diagramm (Achsenbeschriftung!) und bestimmen Sie R_V und $|U_0|$. (Hinweis: $|U_H| = |U_0|/2$) ***(4 P.)***



Aus $R_V < Z_L$ und R_V = reell folgt:
$|U(z=0)| = U_{min} \iff r_V$ = reel und negativ

$$
\begin{aligned}
|r_V| &= (1-m)/(1+m) \\
m &= U_{min}/U_{max} = \frac{1}{2} \Rightarrow r_V = -\frac{1}{3} \Rightarrow R_V = Z_L \cdot \frac{1+r_V}{1-r_V} = \underline{37{,}5\ \Omega} \\
|U_H| &= \frac{U_{min}+U_{max}}{2} = \underline{6\ \text{V}} \\
|U_0| &= 2U_H = \underline{12\ \text{V}}
\end{aligned}
$$

b) Nun wird die nachfolgende Schaltung untersucht: ***(6 P.)***

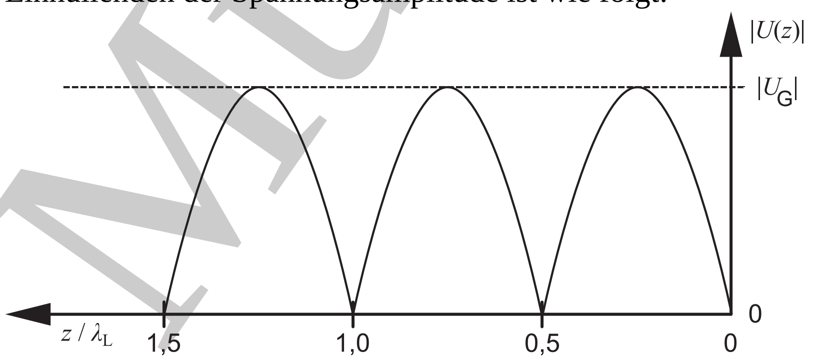


Leitung L_3 ist entweder mit einem Leerlauf [Fall a.)] oder einem Kurzschluss [Fall b.)] abgeschlossen. Zeichnen Sie für beide Fälle die Verteilung des Betrages $|U(z)|$ (Einhüllende) der komplexen Spannungsamplitude $U(z)$ auf der Leitung (L_1) für z $\geq$ 0 in das dafür vorgesehene Diagramm ein. Beschriften Sie die Achsen des Diagramms und machen Sie deutlich, welcher Verlauf zu Fall a.) und Fall b.) gehört! Die Generatorimpedanz sei $Z_\mathrm{G} = Z_{\mathrm{L}_1}$.

Fall a.):
Die Leitung L_3 hat die Länge $l = 3 \cdot \frac{\lambda}{4}$ und transformiert somit den Leerlauf an ihrem Ende in einen Kurzschluss an ihrem Anfang.

$$Z_B = \frac{Z_{L_3}^2}{\infty} = 0\ \Omega$$

Unabhängig von der Impedanz am Eingang von Leitung L_2 ist Leitung L_1 somit an ihrem Ende kurzgeschlossen! Der Reflexionsfaktor an Ende von Leitung L_1 ist $r_C = -1$ und der Verlauf der Einhüllenden der Spannungsamplitude ist wie folgt:



Fall b.):
Der Reflexionsfaktor am Ende der Leitung L_3 ist $r = -1$ (Kurzschluss). Durch die Leitungstransformation mit der Länge $l = 3\frac{\lambda}{4}$ ergibt sich am Anfang der Leitung folgender Reflexionsfaktor:

$$r_{L3,anf} = r_{L3,end} \cdot e^{-j \cdot -2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l} = -1 \cdot e^{-j \cdot -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot 3\frac{\lambda}{4}} = -1 \cdot e^{-j \cdot 3 \cdot \pi} = 1$$

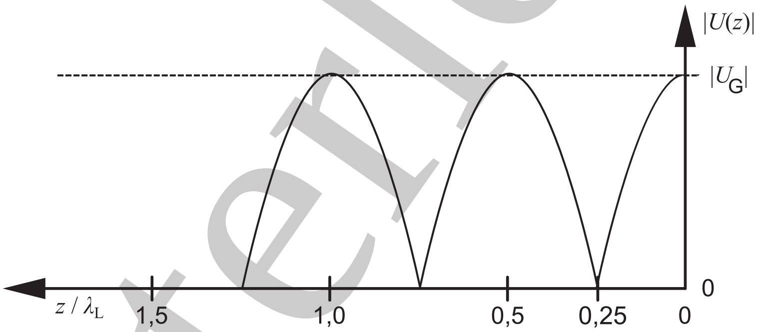
Die Leitung L_3 erscheint für Leitung L_1 also wie ein zu Leitung L_2 anliegender Leerlauf! Um die Impedanz am Ende der Leitung L_1 zu bestimmen muss also noch die Impedanz am Anfang der Leitung L_2 bestimmt werden. Diese Impedanz läßt sich wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} r_{L2,anf} &= r_{L2,end} \cdot e^{-j \cdot -2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l} = e^{j \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot e^{-j \cdot -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot 1\frac{\lambda}{16}} = e^{(j-j) \cdot \frac{\pi}{4}} = 1 \\ \Rightarrow Z_a &= Z_{L2}\frac{1 + r_{L2,anf}}{1 - r_{L2,anf}} = Z_{L2}\frac{1+1}{1-1} = \infty \end{aligned}$$

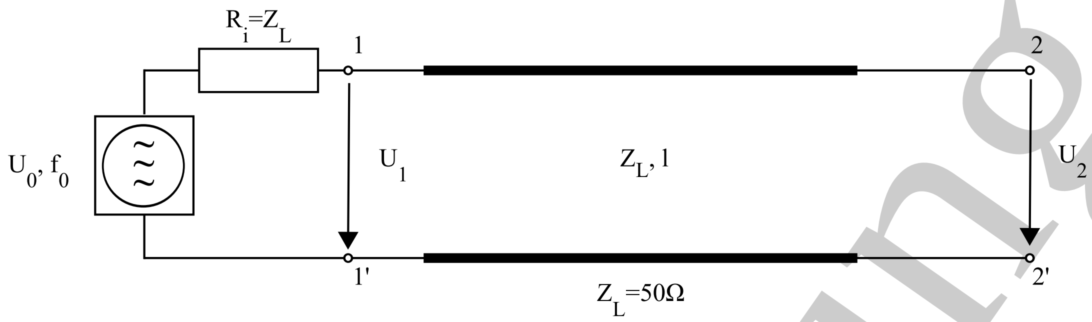
Da die Impedanzen am Ende von Leitung L_2 und L_3 jeweils ∞ sind ergibt sich für den Reflexionsfaktor am Ende von Leitung L_1:

$$r_{L1,end} = \frac{\infty - Z_{L1}}{\infty + Z_{L1}} = 1 \text{ (Leerlauf)}$$

Die Einh“ullende der Spannungsamplitude sieht wie folgt aus:



c) In der nachfolgenden Schaltung speist ein Generator mit dem Innenwiderstand $R_\mathrm{i} = Z_\mathrm{L}$ und der Leerlaufspannung U_0 bei der Frequenz f_0 eine verlustlose Leitung mit dem Wellenwiderstand Z_L und der Länge $l < \lambda/4$. ***(8 P.)***

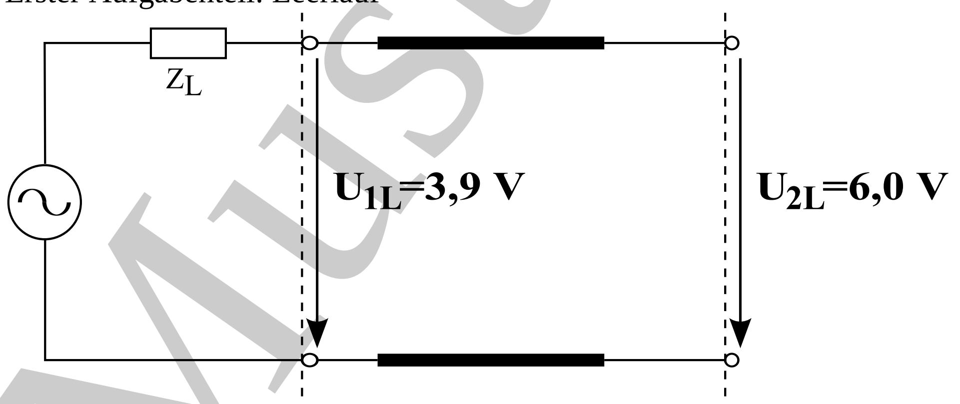


Bei Leerlauf an den Klemmen $2, 2'$ werden die Spannungen
$|U|_{1\mathrm{L}} = U_{1\mathrm{L}} = 3{,}9$ V und $|U|_{2\mathrm{L}} = U_{2\mathrm{L}} = 6{,}0$ V
gemessen.

Beschaltet man die Klemme $2, 2'$ mit einer passenden Induktivität L, so läßt sich $|U|_{1\mathrm{i}} = |U|_{2\mathrm{i}}$ einstellen.

1. Wie groß ist die auf die Wellenlänge bezogene Leitungslänge l/λ, damit sich im Leerlauf die angegebenen Spannungen $U_{1\mathrm{L}}$ und $U_{2\mathrm{L}}$ einstellen? (Bedingung: $l/\lambda < 0{,}25$!)
2. Bestimmen Sie die Größe ωL. (Hinweis: Um ωL zu bestimmen ist es hilfreich anstelle einer Iduktivität ein zusätzliches Stück Leitung ($l < \lambda/4$) mit kurzgeschlossenem Ende anzuschließen und den Spannungsverlauf zu untersuchen.)
3. Wie groß sind $|U|_{1\mathrm{i}}$ und $|U|_{2\mathrm{i}}$?

Erster Aufgabenteil: Leerlauf



- Für den Leerlauffall beträgt der Reflexionsfaktor $r = 1$.
- Damit folgt $U_R(0) = U_H(0)$ und somit für die Spannung auf der Leitung:

$$U(z) = U_H(z) + U_R(z) = U_H(0)e^{j\beta z} + U_R(0)e^{-j\beta z}$$

- Für die Spannung an der Klemme 2 folgt direkt:

$$U_{2L} = U(0) = U_H(0) + U_R(0) = 2U_H(0)$$

- Auf der restlichen Leitung gilt:

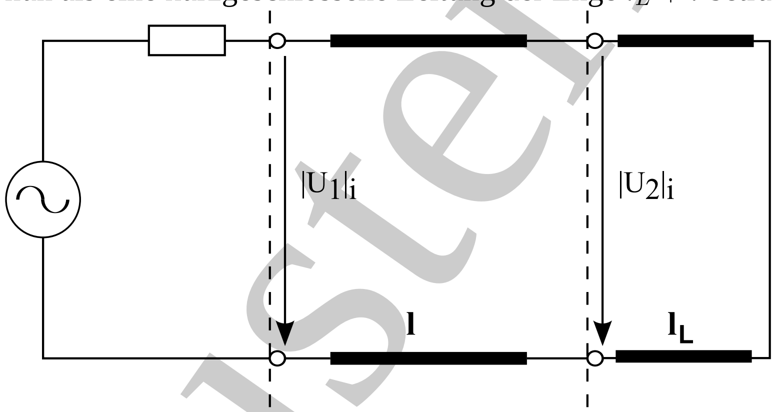
$$U(z) = U_H(0) \cdot (e^{j\beta z} + e^{-j\beta z}) = 2U_H(0) \cdot \cos(\beta z) = U_{2L} \cdot \cos(\beta z)$$

- Mit dieser Gleichung kann nun die Leitungslänge l bestimmt werden, für die sich $U_{1L} = 3{,}9V$ ergibt:

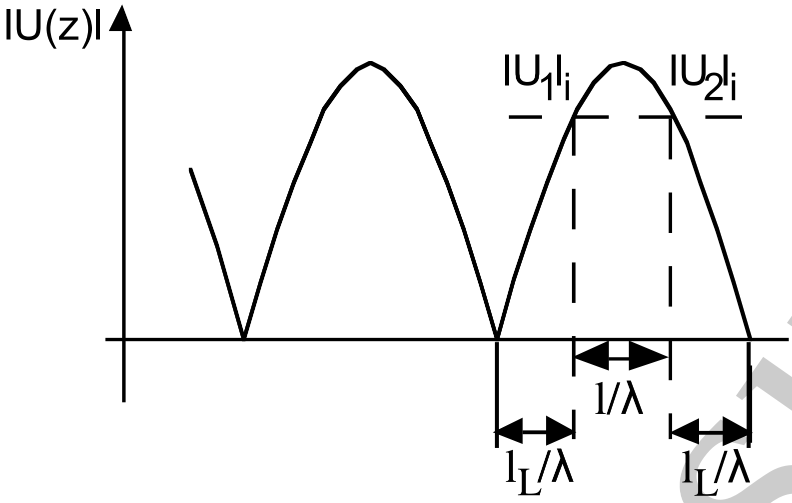
$$U_{1L} = U(l) = U_{2L} \cdot \cos(\beta l) \;\Rightarrow\; \cos(\beta l) = \frac{3{,}9}{6{,}0} \;\Rightarrow\; \frac{l}{\lambda} = 0{,}137$$

Zweiter Aufgabenteil: induktiver Abschluss

- Eine Induktivität kann in der Hochfrequenztechnik auch durch eine kurzgeschlossene Leitung der Länge $l_L < \lambda/4$ realisiert werden. Durch diese Vereinfachung kann die Schaltung nun als eine kurzgeschlossene Leitung der Lnge $l_L + l$ betrachtet werden.



- Mit der Spannungsverteilung auf einer kurzgeschlossenen Leitung und der Vorgabe in der Aufgabenstellung, dass $|U_2|_i = |U_1|_i$ gilt, kann aus Symmetriegründen angenommen werden, dass $l + 2l_L = \lambda/2$ gilt.



- Für die Leitungslänge l_L, die der Induktivität entspricht gilt folglich

$$\frac{l_L}{\lambda} = 0{,}1815$$

- Somit kann die gesuchte Induktivität ωL berechnet werden, die der kurzgeschlossenen Leitung der Länge l_L entspricht.

$$\frac{\omega L}{Z_L} = j\tan(\beta l_0) = j2{,}178 \;\Rightarrow\; \omega L = 108{,}9\ \Omega$$

- Zuletzt kann noch die gesuchte Spannungsamplitude an den Klemmen 1 und 2 berechnet werden

$$|U(z)| = U_{max} \cdot \sin(\beta z),\; U_{max} = |U_2|_L = 6\ \mathrm{V}$$

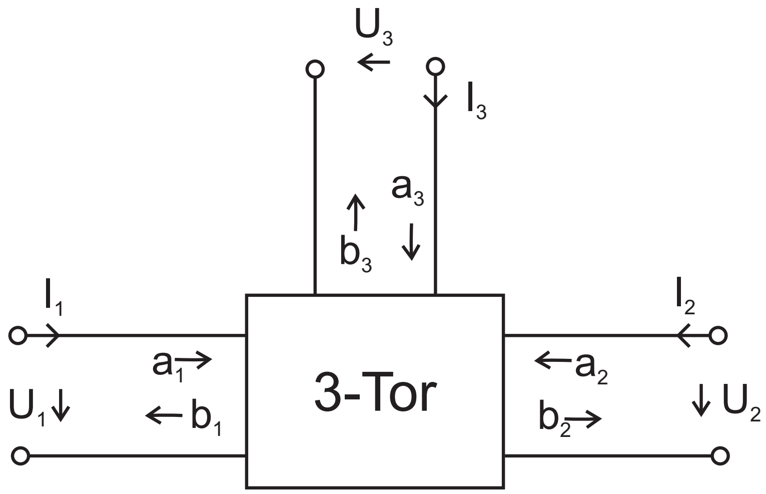
$$|U_2|_i = |U_1|_i = |U(l_L)| = U_H(0)e^{j\beta l_L} + U_R(0)e^{-j\beta l_L}$$

$$|U_2|_i = |U_1|_i = U_H(0)(e^{j\beta l_L} - e^{-j\beta l_L}) = 2U_H(0)\sin(\beta l_L) = 5{,}453\ \mathrm{V}$$

Aufgabe 4

*(gesamt **21** Punkte)*

S-Parameter

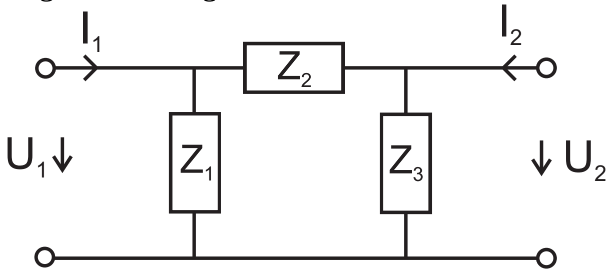


a) Wie sind die folgenden Parameter eines 3-Tors definiert? ***(3 P.)***

- Z_{13}
- Y_{33}
- S_{21}

- $Z_{13} = \left.\frac{U_1}{I_3}\right|_{I_1=0, I_2=0}$
- $Y_{33} = \left.\frac{I_3}{U_3}\right|_{U_1=0, U_2=0}$
- $S_{21} = \left.\frac{b_2}{a_1}\right|_{a_2=0, a_3=0}$

b) Gegeben sei folgendes 2-Tor: *(4 P.)*

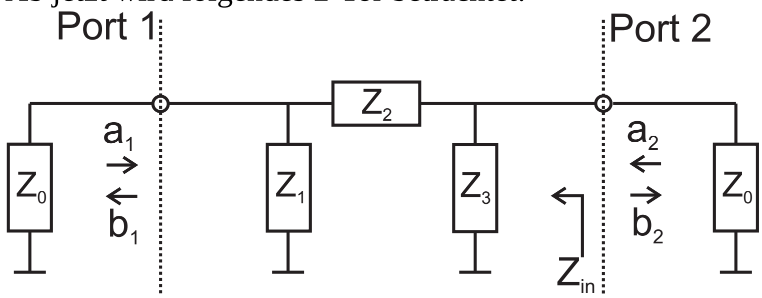


Bestimmen Sie die Y-Parameter des 2-Tors.
Ist das 2-Tor symmetrisch umkehrbar wenn folgendes gilt: $Z_1 = Z_3$?

- $$\begin{aligned} Y_{11} &= \left.\frac{I_1}{U_1}\right|_{U_2=0} &\Rightarrow\ & Y_{11} = \frac{(Z_1+Z_2)}{Z_1\cdot Z_2} \\ Y_{12} &= \left.\frac{I_1}{U_2}\right|_{U_1=0} &\Rightarrow\ & Y_{12} = -\frac{1}{Z_2} \\ Y_{21} &= \left.\frac{I_2}{U_1}\right|_{U_2=0} &\Rightarrow\ & Y_{21} = -\frac{1}{Z_2} \\ Y_{22} &= \left.\frac{I_2}{U_2}\right|_{U_1=0} &\Rightarrow\ & Y_{22} = \frac{(Z_3+Z_2)}{Z_3\cdot Z_2} \end{aligned}$$

- Unter der Voraussetzung, dass $Z_1 = Z_3$, ergibt sich das $Y_{12} = Y_{21}$ und $Y_{22} = Y_{11}$ ist. $\Rightarrow$ Das 2-Tor ist symmetrisch umkehrbar.

Ab jetzt wird folgendes 2-Tor betrachtet:



$$Z_1 = 150\ \Omega$$
$$Z_2 = 38\ \Omega$$
$$Z_3 = Z_1$$

Der Bezugswellenwiderstand von Port 1 und Port 2 ist als $Z_0 = 50\ \Omega$ definiert.

c) Wird weniger als $\frac{1}{1000}$ der an Port 2 eingespeisten Leistung (a_2) reflektiert? Geben Sie zusätzlich den Reflexionsfaktor in dB an. ***(3 P.)***

- Berechnung von S_{22}:

$$S_{22} = r = \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0}$$

$$Z_{in} = Z_3||(Z_2 + (Z_1||Z_0))$$

$$Z_3 = Z_1 \Rightarrow Z_{in} = \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_0}{Z_1+Z_0})}{Z_1 + (Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_0}{Z_1+Z_0})} = 50{,}222\ \Omega$$

$$\Rightarrow S_{22} = r = \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0} = 2{,}212 \cdot 10^{-3} \Rightarrow S_{22}|_{dB} = 20log_{10}(2{,}212 \cdot 10^{-3}) = -53{,}1 \text{ dB}$$

- Alternativ: Berechnung von S_{22} aus Y-Parametern:

$$S_{22} = \frac{(Y_0+Y_{11})(Y_0-Y_{22})+Y_{12}Y_{21}}{(Y_{11}+Y_0)(Y_{22}+Y_0)-Y_{12}Y_{21}}$$

$$= \frac{(\frac{1}{Z_0}+\frac{Z_1+Z_2}{Z_1 \cdot Z_2})(\frac{1}{Z_0}-\frac{Z_1+Z_2}{Z_1 \cdot Z_2})+\frac{1}{Z_2}^2}{(\frac{Z_1+Z_2}{Z_1 \cdot Z_2}+\frac{1}{Z_0})^2-\frac{1}{Z_2}^2}$$

$$= 2{,}212 \cdot 10^{-3} \Rightarrow S_{22}|_{dB} = 20log_{10}(2{,}212 \cdot 10^{-3}) = -53{,}1 \text{ dB}$$

- Es wird weniger als $\frac{1}{1000}$ der an Port 2 eingespeisten Leistung reflektiert.

d) Die Schaltung aus Aufgabenteil c) stellt ein Dämpfungsglied dar. Ein sinusförmiges Signal mit der Leistung $10\,\mathrm{Watt}$ wird an Tor 1 eingespeist. Wie groß ist die an Tor 2 messbare Ausgangsleistung in dBm? ***(3 P.)***

Berechnung von S_{21}:

$$
\begin{aligned}
S_{21} &= \frac{2 \cdot Y_{21} Y_0}{(Y_{11}+Y_0)(Y_{22}+Y_0) - Y_{12}Y_{21}} \\
&= \frac{2\frac{1}{Z_2}\frac{1}{Z_0}}{(\frac{Z_1+Z_2}{Z_1 \cdot Z_2}+\frac{1}{Z_0})^2 - \frac{1}{Z_2}^2} \\
&= 0{,}498 \Rightarrow S_{21}|_{dB} = 20 log_{10}(0.498) = -6{,}06\text{ dB} \\
\Rightarrow P_{out} &= P_{in}|_{dBm} + (-S_{23}|_{dB}) = 10 \cdot log_{10}(\frac{10}{0{,}001}) - 6{,}06\text{ dB} = 33{,}94\text{ dBm}
\end{aligned}
$$

e) Um das Signal mit einem Oszilloskop untersuchen zu können, an dem maximal eine Spitzenspannung von $5\ \mathrm{V}$ (gemessen an $50\ \Omega$) anliegen darf, soll das 2-Tor n-mal hintereinander geschaltet werden. Bestimmen Sie n (die Anzahl der kaskadierten 2-Tore). ***(3 P.)***

Beim Durchlauf durch das 2-Tor verliert ein Signal $6\ \mathrm{dB}$ bzw. $\frac{3}{4}$ seiner Leistung und $\frac{1}{2}$ seiner Spannung (U_{rms}).

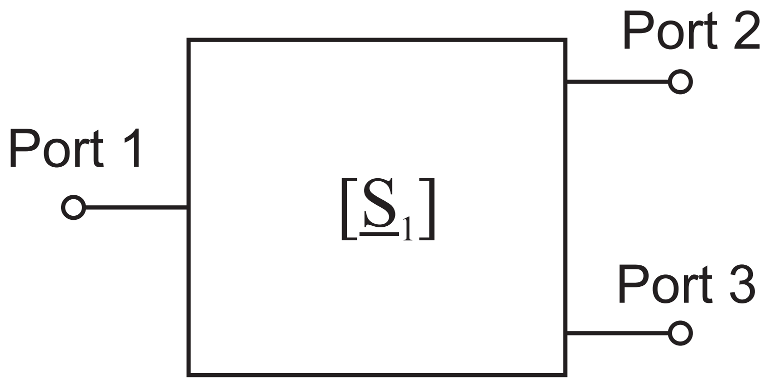
$$P_2 = \frac{U_{rms}^2}{Z_0} = \frac{(\frac{\hat{U}}{\sqrt{2}})^2}{Z_0}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{4^n} \Rightarrow n = log_4(\frac{P_1}{P_2})$$

$$n = \frac{P_1}{\frac{(\frac{\hat{U}}{\sqrt{2}})^2}{Z_0}} = 2{,}661$$

Wenn man das 2-Tor dreimal hintereinander hängt, beträgt die Spitzenspannung $2{,}8\ \mathrm{Volt}$ und liegt damit unter $5\ \mathrm{Volt}$.

f) Gegeben sei folgende S-Parameter Matrix eines 3-Tors: ***(5 P.)***



$$[\underline{S}_1] \quad = \quad \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

Bestimmen Sie die S-Parameter mit Hilfe der folgenden Angaben:

- Port 1 bis Port 3 haben eine Anpassung (Reflexionsfaktor) von -$6\ \mathrm{dB}$.
- Die an Port 1 bis Port 3 reflektierten Signale werden an den Ports um 180° gedreht.
- Die Leistung eines an Port 1 eingespeisten Signals teilt sich zu $\frac{2}{3}$ auf Port 2 und $\frac{1}{3}$ auf Port 3 auf.
- Das 3-Tor ist passiv und verlustlos.
- Ein Signal, das von einem Port zu einem anderen Port transmittiert wird, unterliegt einer Verzögerung von einer $\frac{3}{4}$ Periodendauer.
- Port 2 und Port 3 sind ideal entkoppelt. (Es findet keine Transmission zwischen beiden Ports statt.)

- Punkt 1:
  $|S_{11}| = |S_{22}| = |S_{33}| = 10^{-\frac{6}{20}} = \frac{1}{2}$

- Punkt 2:
  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = \frac{1}{2} \cdot e^{-j180}$

- Punkt 3 und Punkt 4:
  Leistungserhaltung:
  $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 = 1$
  $|S_{21}|^2 = 2\,|S_{31}|^2 \Rightarrow |S_{21}|^2 = \frac{1-|S_{11}|^2}{\frac{2}{3}}$
  $|S_{21}|^2 = \frac{1-\frac{1}{2}^2}{\frac{2}{3}} = 0.5$
  $|S_{31}|^2 = \frac{1-\frac{1}{2}^2}{\frac{1}{3}} = 0.25$

- Punkt 5:
  $S_{21} = 0.707 \cdot e^{-j270}$

- Punkt 5:
  $S_{31} = 0.5 \cdot e^{-j270}$

- Punkt 1, Punkt 4, Punkt 5 und Punkt 6:
  $S_{12} = 0.866 \cdot e^{-j270}$und $S_{13} = 0.866 \cdot e^{-j270}$

- Punkt 6:
  $S_{32} = S_{23} = 0$

$$[|\underline{S_1}|] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 0.866 \cdot e^{-j90} & 0.866 \cdot e^{-j90} \\ 0.707 \cdot e^{-j270} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0.5 \cdot e^{-j270} & 0 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Aufgabe 5

*(gesamt **17** Punkte)*

Mikrowellensysteme

a) Ein Puls-Radar mit der Betriebsfrequenz $10\,\mathrm{GHz}$ hat einen Sende- sowie Empfangs-Antennengewinn von 28 dBi und eine Puls-Sendeleistung von 2 kW. Der geringste Empfangspegel, der vom Radar detektiert werden kann beträgt -90 dBm. Bis zu welcher Reichweite kann ein Ziel mit einem Rückstreuquerschnitt von $12\,\mathrm{m}^2$ detektiert werden? Nennen Sie zwei Möglichkeiten diese Reichweite zu erhöhen. ***(5 P.)***

Gewinn in lineare Größe umrechnen:
$G = 10^{28/10} = 631$

Geforderte Empfangsleistung in lineare Größe umrechnen:
$P_{min} = 10^{-90/10} mW = 10^{-12} W$

Wellenlänge:
$\lambda = c_0/f = 0{,}03m$

Umstellen der Radargleichung liefert die maximale Entfernung:
$R_{max} = \left(\frac{P_S G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{min}}\right)^{1/4} = 8114m$

2 aus:

- Antennengewinn erhöhen
- Sendeleistung erhöhen
- Empfänger-Empfindlichkeit verbessern
- Frequenz verringern bzw. Wellenlänge erhöhen

b) Welche Pulswiederholfrequenz wählen Sie in einem Puls-Radar, so dass Sie mindestens bis zu einer Reichweite von 5 km Ziele eindeutig detektieren können? *(2 P.)*

Das Radarsignal muss den Hin- und Rückweg zum Ziel zurücklegen. Während dieser Zeit darf kein neuer Puls abgestrahlt werden.
Maximale Signal-Laufzeit $T_{max} = \frac{2R_max}{c_0} = 33{,}3\ \mu\mathrm{s}$
PRF darf also maximal $PRF_{max} = 1/T_{max} = 30\ \mathrm{kHz}$ betragen.

c) Eine Antenne mit dem Antennengewinn G_{Ant} wird an ihren Anschlussklemmen kurzgeschlossen. Welchen Radarrückstreuquerschnitt hat diese kurzgeschlossene Antenne in Richtung ihrer Hauptstrahlrichtung? *(4 P.)*

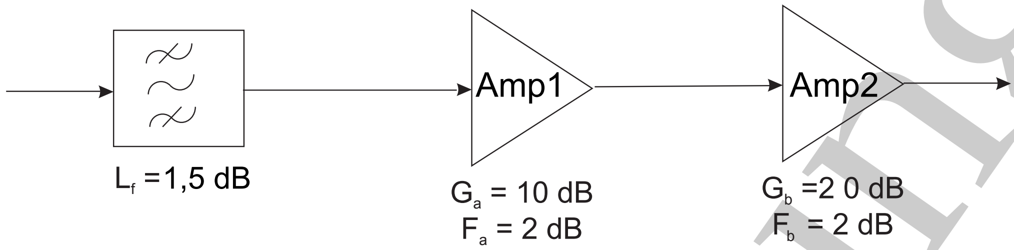
Man denke sich ein Radar, dass ein Radarsignal in Richtung der kurzgeschlossenen Antenne schickt, und das reflektierte Signal wieder empfängt. Durch den Kurzschluss wird in der Antenne die komplette empfangene Leistung wieder abgesendet. Die Empfangsleistung kann man mittels der Friis-Übertragungsgleichung berechnen:

$$P_r = \frac{P_t G_{radar}}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2 G_{Ant}}{4\pi} \frac{G_{Ant}}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2 G_{radar}}{4\pi}$$

Durch Koeffizientenvergleich mit der Radargleichung $P_r = \frac{P_t G_{radar}^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$ kann man den Rückstreuquerschnitt bestimmen:

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{Ant}^2$$

d) Ein W-LAN Empfänger mit dem unten abgebildeten Blockschaltbild arbeitet bei der Betriebsfrequenz 2.4 GHz mit einer Bandbreite von 100 MHz. Berechnen Sie die Gesamt-Rauschzahl des Empfängers, für den Fall dass er sich auf Zimmertemperatur (290 K) befindet. Welches Signal-zu-Rausch-Verhältnis ergibt sich am Ausgang, wenn der Eingangs-Signalpegel -90 dBm beträgt? In welcher Reihenfolge würden Sie die Komponenten schalten um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern? ***(6 P.)***



Die Rauschzahl des Filter entspricht seinem Verlust (1,5 dB).
Im ersten Schritt alle Rauschzahlen und Verstärkungen in lineare Werte umrechnen:
$10^{1{,}5/10} = 1{,}41$, $10^{2/10} = 1{,}58$, $10^{10/10} = 10$ und $10^{20/10} = 100$.

Nun die Werte in die Formel für eine kaskadierte Rauschzahl einsetzen:
$F_{cas} = F_1 + \frac{F_2-1}{G_1} + \frac{F_3-1}{G_1G_2} = 1{,}41 + (1{,}41)(1{,}58-1) + (1{,}41/10)(1{,}58-1) = 2{,}31 = 3{,}64dB$

Signalleistung am Ausgang:
$P_{sig,out} = -90dNm - 1{,}5dB + 10dB + 20dB = -61{,}6dBm$

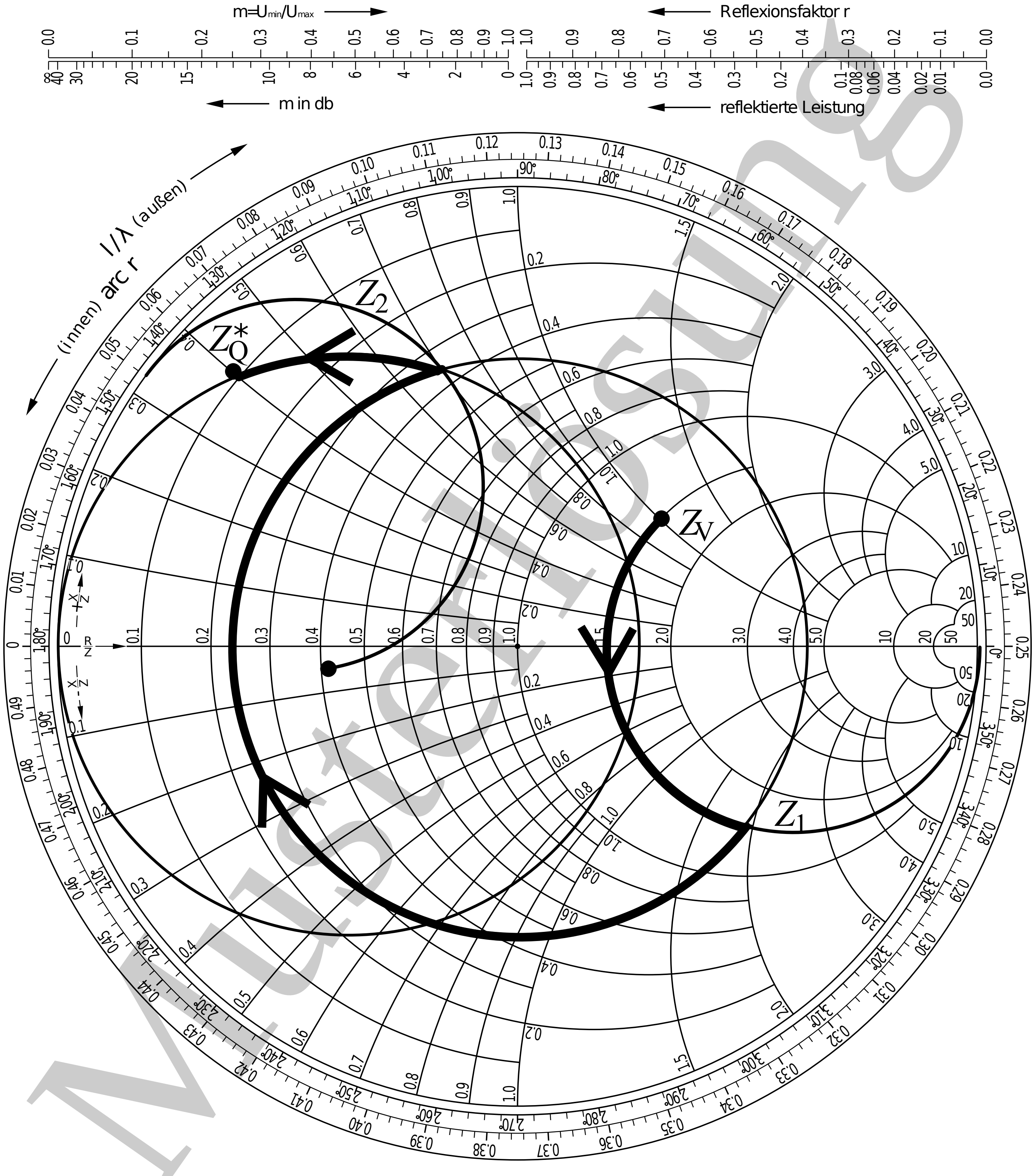
Rauschleistung am Ausgang:
$P_{noise,in} = G_{cas}k(T_{e,cas} + T_0)B = k(F_{cas} - 1 + 1)T_0BG_{cas} = 6{,}6 \cdot 10^{-10}W = -61{,}8dBm$

SNR: $SNR = -61{,}5dBm - (-61{,}8dBm) = 0{,}3dB$

Für ein optimales SNR am Ausgang müsste man die Elemente in genau umgekehrter Reihenfolge schalten: Amp 2, Amp 1, Filter.

zugehrige
Aufgabennummer: 2a

Widerstandsform
Bezugswiderstand $Z_{\mathrm{B}} = \underline{100\ \Omega}$

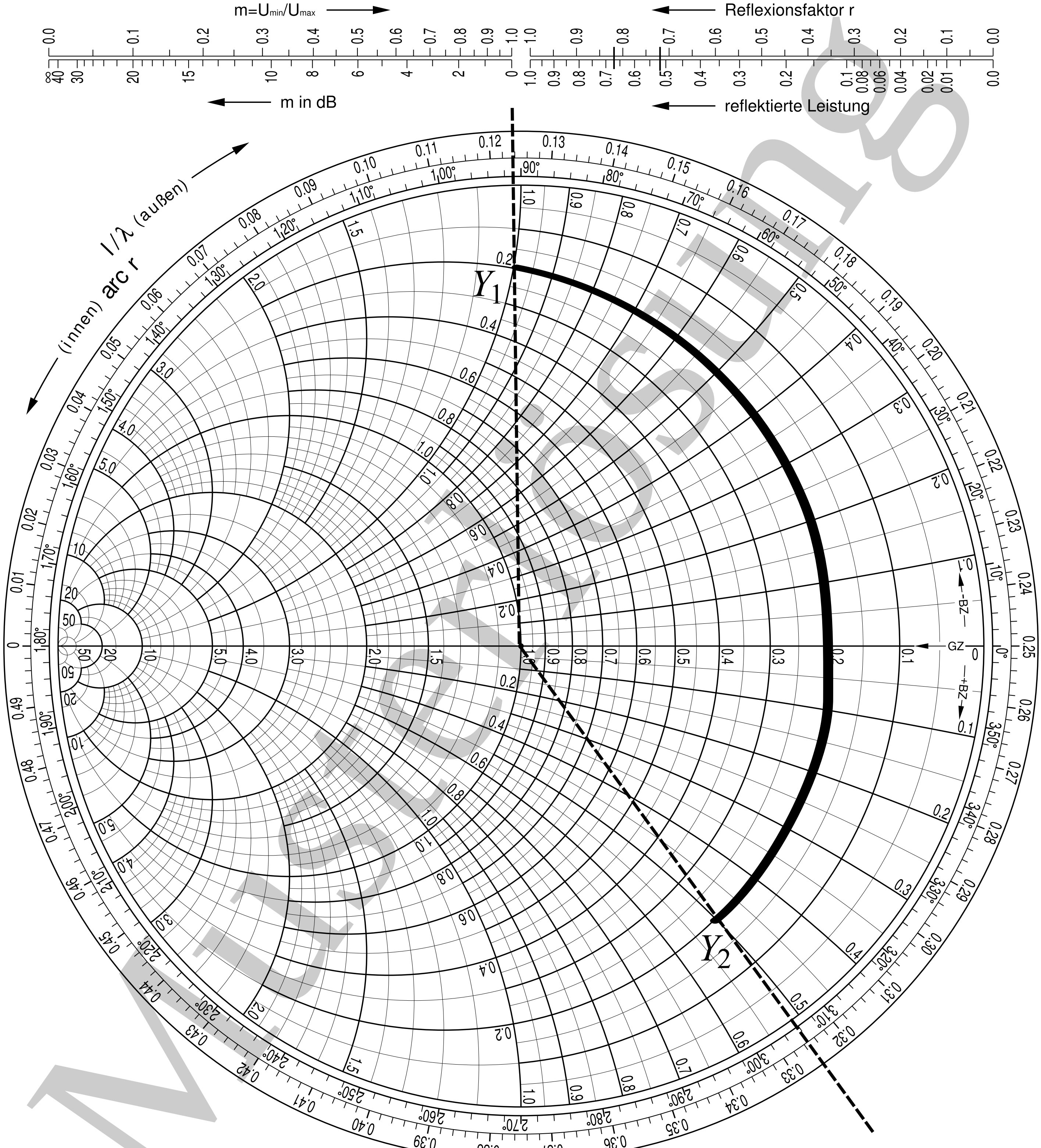


Wichtig: Diagramm wird nur gewertet, wenn der obenstehende Datenteil mit Name und Aufgabennummer korrekt ausgefllt ist. Bezugswiderstand nicht vergessen!

zugehrige
Aufgabennummer: 2b

Leitwertform

Bezugswiderstand $Z_{\mathrm{B}} = \underline{50\ \Omega}$



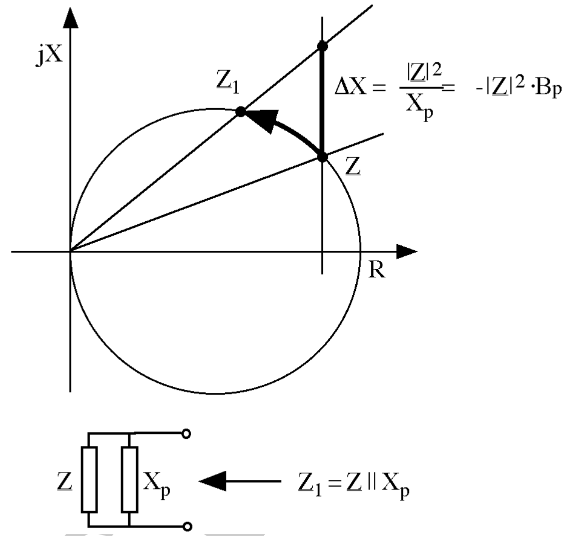
Wichtig: Diagramm wird nur gewertet, wenn der obenstehende Datenteil mit Name und Aufgabennummer korrekt ugefllt ist. Bezugswiderstand nicht vergessen!

Impedanz $\xleftrightarrow{Z=1/Y}$ Admittanz

$$\underline{Z} = R + jX \qquad \underline{Y} = G + jB$$

$$\underline{Z} = \frac{G}{G^2+B^2} - j\frac{B}{G^2+B^2} \qquad \underline{Y} = \frac{R}{R^2+X^2} - j\frac{X}{R^2+X^2}$$

Hilfskonstruktion zur Transformation



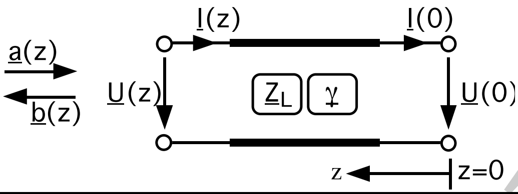
Kompensation mit dualen Elementen

Bedingungen für Kompensation: $X_s = R^2 \cdot B_p$

Frequenzfaktor: $F(f) = \sqrt{X_s \cdot B_p}$

krit. Frequenz, Grenzfrequenz: $|F(f_k)| = 1$

Leitungen



$$\underline{U}(z) = \underline{U}_H(0)e^{\underline{\gamma} z} + \underline{U}_R(0)e^{-\underline{\gamma} z} = \sqrt{\underline{Z}_L}\left(\underline{a}(z)+\underline{b}(z)\right)$$

$$\underline{I}(z) = \frac{\underline{U}_H(0)}{\underline{Z}_L}e^{\underline{\gamma} z} - \frac{\underline{U}_R(0)}{\underline{Z}_L}e^{-\underline{\gamma} z} = \frac{1}{\sqrt{\underline{Z}_L}}\left(\underline{a}(z)-\underline{b}(z)\right)$$

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R'+j\omega L')(G'+j\omega C')}; \quad \underline{Z}_L = \sqrt{\frac{R'+j\omega L'}{G'+j\omega C'}}$$

Koaxialleitung

$$Z_L = \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\cdot\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$$

ungedämpfte Leitung (homogenes Dielektrikum und konst. Querschnitt)

$$\beta = \omega\cdot\sqrt{L'C'} = \omega\cdot\sqrt{\mu\varepsilon}\ ; \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}\ ; \quad C' = \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{Z_L}\ ; \quad L' = Z_L\cdot\sqrt{\mu\varepsilon}\ ; \quad v_\varphi = \frac{\omega}{\beta}$$

schwach gedämpfte Leitungen ($R' \ll \omega L'$; $G' \ll \omega C'$)

$$\alpha \approx \frac{1}{2}\left(\frac{R'}{Z_L} + G'\cdot Z_L\right)\ ; \quad G' = \omega C'\cdot\tan(\delta_c)\ ; \quad R' \sim \frac{1}{\kappa\cdot s}$$

Eindringtiefe s

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega\kappa\mu}}$$

Reflexionsfaktor $\underline{r}$

$$\underline{r}(z) = \frac{\underline{U}_R(z)}{\underline{U}_H(z)} = \frac{\underline{b}(z)}{\underline{a}(z)} = \frac{\underline{b}(0)}{\underline{a}(0)}\cdot e^{-2\underline{\gamma} z}$$

Dämpfung einer Leitung der Länge l (für hinlaufende Welle a)

$$D/\mathrm{dB} = 10\cdot\log\left(\frac{P_a(\ell)}{P_a(0)}\right) = 10\cdot\log\left(e^{2\alpha\ell}\right)$$

Reflexionsfaktor → Impedanz

$$\underline{r}(\ell) = \frac{\underline{Z}(\ell)-\underline{Z}_L}{\underline{Z}(\ell)+\underline{Z}_L}\ ; \quad \underline{Z}(\ell) = \frac{\underline{U}(\ell)}{\underline{I}(\ell)} = \frac{1+\underline{r}(\ell)}{1-\underline{r}(\ell)}\cdot\underline{Z}_L$$

Anpassungsfaktor, Stehwellenverhältnis

$$m = \frac{1}{\mathrm{VSWR}} = \frac{1-|\underline{r}|}{1+|\underline{r}|} = \frac{U_{min}}{U_{max}}$$

Dem Verbraucher zugeführte Wirkleistung P_W

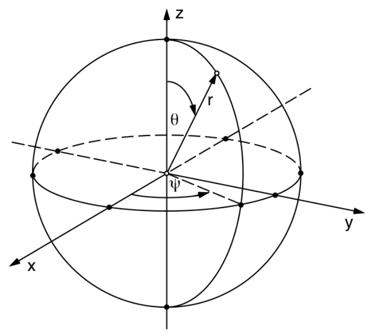
mit: $\underline{a}(z) = \frac{\underline{U}_H(z)}{\sqrt{\underline{Z}_L}} = \sqrt{\underline{Z}_L}\cdot\underline{I}_H(z)$

$$P_W = P_a(0) - P_b(0) = \frac{1}{2}\left(\left|\underline{a}(0)\right|^2 - \left|\underline{b}(0)\right|^2\right) = \frac{1}{2}\left|\underline{a}(0)\right|^2\cdot\left(1-\left|\underline{r}(0)\right|^2\right)$$

Transformation durch Kettenschaltung einer Leitung

$$\underline{Z}(\ell) = \underline{Z}_L\cdot\frac{\underline{Z}(0)+\underline{Z}_L\tanh(\underline{\gamma}\ell)}{\underline{Z}_L+\underline{Z}(0)\tanh(\underline{\gamma}\ell)} = \underline{Z}(0)\cdot\left.\frac{1+j\frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}(0)}\cdot\tan(\beta\ell)}{1+j\frac{\underline{Z}(0)}{\underline{Z}_L}\cdot\tan(\beta\ell)}\right|_{\alpha=0}$$

Kugelkoordinaten



Azimuth: ψ Elevation: θ

Volumen: $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ Oberfläche: $F = 4\pi r^2$

Konstanten

$$Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} = 120\pi\ \Omega$$

$$c_o = 2{,}997925\cdot 10^8\ \frac{m}{s}$$

$$k = 1{,}38065\cdot 10^{-23}\ \frac{Ws}{K}$$

$$\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}\ \frac{Vs}{Am}$$

$$\varepsilon_o = 8{,}854\cdot 10^{-12}\ \frac{As}{Vm}$$

	$[\mathbf{S}]$	$[\mathbf{Z}]$	$[\mathbf{Y}]$	$[\mathbf{A}]$ (ABCD)	$[\mathbf{T}]$
S_{11}	S_{11}	$\frac{(Z_{11}-Z_0)(Z_{22}+Z_0)-Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11}+Z_0)(Z_{22}+Z_0)-Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{(Y_0-Y_{11})(Y_0+Y_{22})+Y_{12}Y_{21}}{(Y_{11}+Y_0)(Y_{22}+Y_0)-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{A+B/Z_0-CZ_0-D}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$	$\frac{T_{12}}{T_{22}}$
S_{12}	S_{12}	$\frac{2Z_{12}Z_0}{(Z_{11}+Z_0)(Z_{22}+Z_0)-Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{-2Y_{12}Y_0}{(Y_{11}+Y_0)(Y_{22}+Y_0)-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{2(AD-BC)}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$	$\frac{T_{11}T_{22}-T_{12}T_{21}}{T_{22}}$
S_{21}	S_{21}	$\frac{2Z_{21}Z_0}{(Z_{11}+Z_0)(Z_{22}+Z_0)-Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{-2Y_{21}Y_0}{(Y_{11}+Y_0)(Y_{22}+Y_0)-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{2}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$	$\frac{1}{T_{22}}$
S_{22}	S_{22}	$\frac{(Z_{11}+Z_0)(Z_{22}-Z_0)-Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11}+Z_0)(Z_{22}+Z_0)-Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{(Y_0+Y_{11})(Y_0-Y_{22})+Y_{12}Y_{21}}{(Y_{11}+Y_0)(Y_{22}+Y_0)-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{-A+B/Z_0-CZ_0+D}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$	$\frac{-T_{21}}{T_{22}}$
Z_{11}	$Z_0\,\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{11}	$\frac{Y_{22}}{Y_{11}Y_{22}-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{A}{C}$	
Z_{12}	$Z_0\,\frac{2S_{12}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{12}	$\frac{-Y_{12}}{Y_{11}Y_{22}-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{AD-BC}{C}$	
Z_{21}	$Z_0\,\frac{2S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{21}	$\frac{-Y_{21}}{Y_{11}Y_{22}-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{1}{C}$	
Z_{22}	$Z_0\,\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{22}	$\frac{Y_{11}}{Y_{11}Y_{22}-Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{D}{C}$	
Y_{11}	$Y_0\,\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{Z_{22}}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}}$	Y_{11}	$\frac{D}{B}$	
Y_{12}	$Y_0\,\frac{-2S_{12}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{-Z_{12}}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}}$	Y_{12}	$\frac{BC-AD}{B}$	
Y_{21}	$Y_0\,\frac{-2S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{-Z_{21}}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}}$	Y_{21}	$\frac{-1}{B}$	
Y_{22}	$Y_0\,\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{Z_{11}}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}}$	Y_{22}	$\frac{A}{B}$	
A	$\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{Z_{11}}{Z_{21}}$	$\frac{-Y_{22}}{Y_{21}}$	A	
B	$Z_0\,\frac{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}}{Z_{21}}$	$\frac{-1}{Y_{21}}$	B	
C	$\frac{1}{Z_0}\,\frac{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{1}{Z_{21}}$	$\frac{Y_{12}Y_{21}-Y_{11}Y_{22}}{Y_{21}}$	C	
D	$\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{Z_{22}}{Z_{21}}$	$\frac{-Y_{11}}{Y_{21}}$	D	
T_{11}	$\frac{S_{12}S_{21}-S_{11}S_{22}}{S_{21}}$				T_{11}
T_{12}	$\frac{S_{11}}{S_{21}}$				T_{12}
T_{21}	$\frac{-S_{22}}{S_{21}}$				T_{21}
T_{22}	$\frac{1}{S_{21}}$				T_{22}