

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	17	18	18	16	16
erzielte Punkte					

Gesamtbewertung

Punkte maximal:	Gesamtpunkte:	Bonus:	Note:
85		Ja: <input type="checkbox"/> Nein: <input type="checkbox"/>	



Name:
.....

Hinweise zur Klausur

GHF H'21
17. Juli 2021
Seite 2 von 40

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. 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 oder grüne Farbe noch Bleistift** und kennzeichnen Sie Ihre Ergebnisse deutlich. Lösungen in roter und grüner 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**, d.h. 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 40 Seiten und besteht aus 5 Aufgaben. **Prüfen Sie** diese direkt nach Erhalt **auf Vollständigkeit**.
10. Die Ergebnisse der Klausur werden nach der Korrektur im Campus System veröffentlicht. Der Zeitpunkt der Veröffentlichung wird im Internet bekannt gegeben.

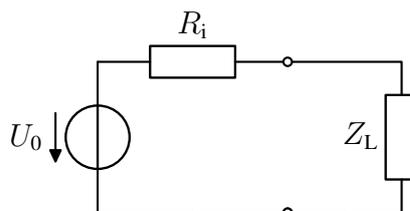
Name:
.....

Aufgabe 1

(gesamt 17 Punkte)

Allgemeines

Gegeben sei die unten abgebildete Schaltung, aus einer Wechselspannungsquelle mit Amplitude $U_0 = 3\text{ V}$ und einem Innenwiderstand von $R_i = 50\ \Omega$ sowie einer Lastimpedanz Z_L .



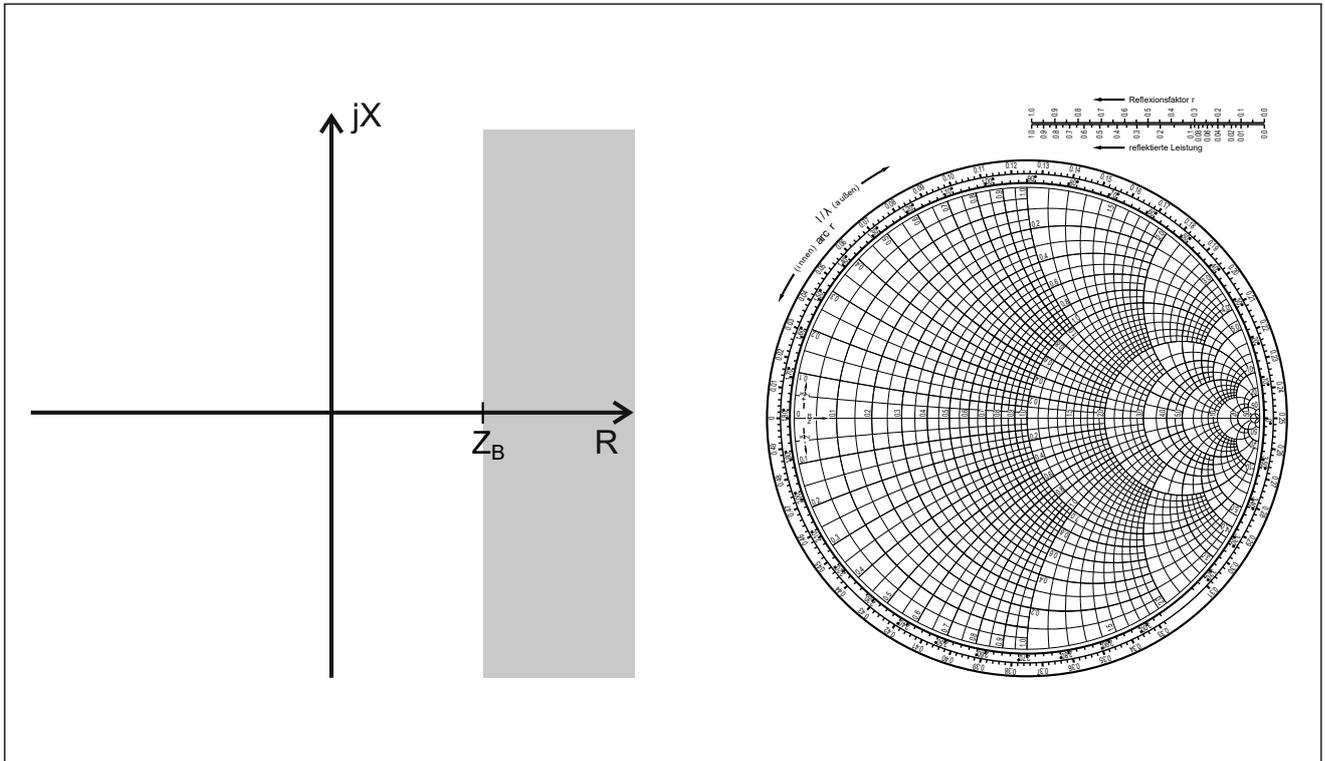
- a) Welche Bedingung muss für Z_L erfüllt sein, damit Leistungsanpassung herrscht? Wie groß ist die Leistung P_0 in mW, die die Quelle bei Leistungsanpassung an die Lastimpedanz abgibt? (2 P.)

- b) Die Lastimpedanz Z_L beträgt nun $(20 + j10)\ \Omega$. Wie groß ist die von Z_L aufgenommene Wirkleistung in mW? (2 P.)

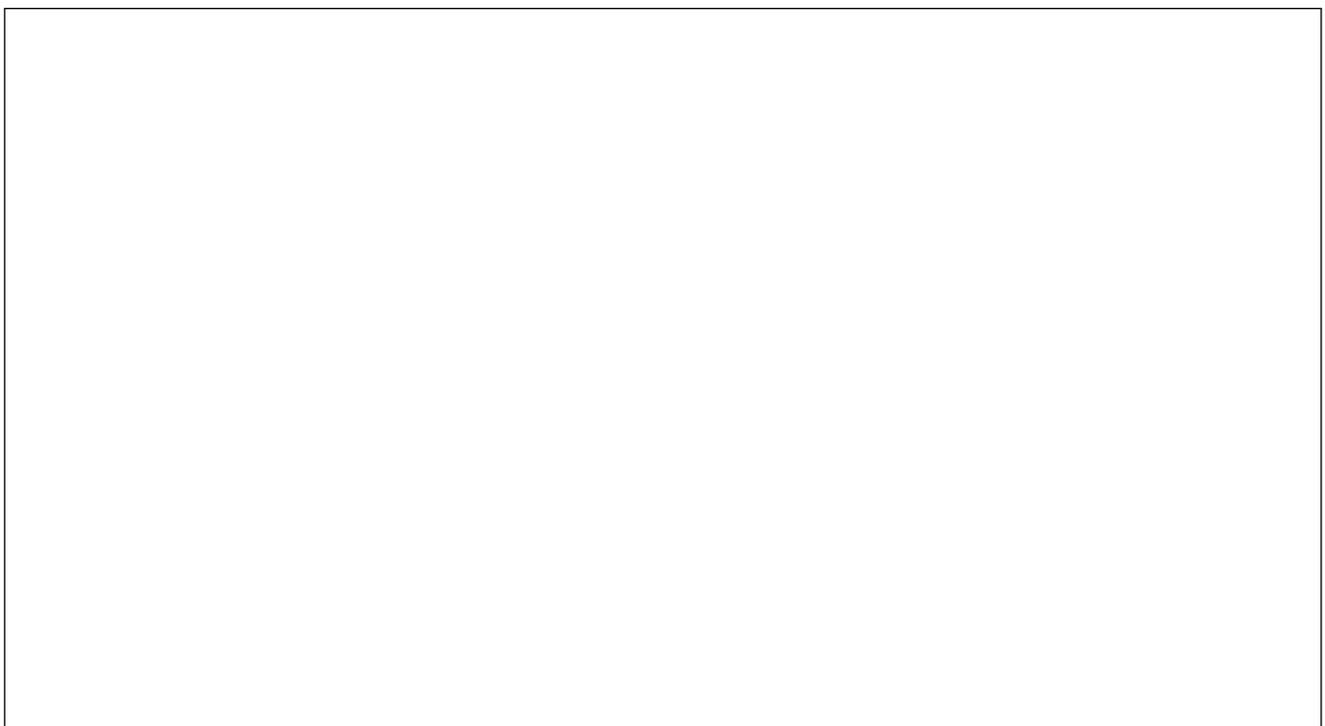
Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 1

- c) Markieren Sie im Smithdiagramm den in der Widerstandsebene ($Z_B = 50 \Omega$) markierten Bereich. (2 P.)



- d) Zeichnen Sie das vollständige Ersatzschaltbild einer Spule. Nennen Sie zwei mögliche Ursachen für Verluste in der Spule. (3 P.)

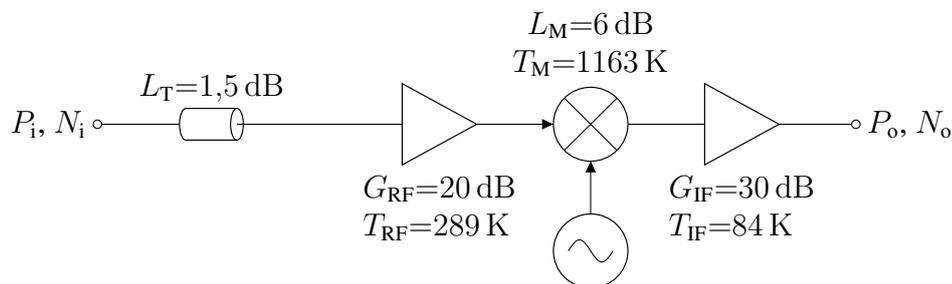


Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 1

GHF H'21
17. Juli 2021
Seite 5 von 40

Ein Mikrowellenempfänger hat folgende Parameter:



$$P_i = -80 \text{ dBm}$$

$$f = 4 \text{ GHz}$$

$$B = 1 \text{ MHz}$$

$$T_0 = 290 \text{ K (Bezugs- und Umgebungstemperatur)}$$

e) Berechnen Sie das Eingangs-SNR in dB des Mikrowellenempfängers.

(2 P.)



Name:

Aufgabe 1

f) Berechnen Sie das Ausgangs-SNR des Mikrowellenempfängers in dB.

(6P.)



Name:
.....

Aufgabe 2

(gesamt 18 Punkte)

Radar

- a) Leiten Sie die monostatische Radargleichung für das FMCW-Radar her, ausgehend von einem Sender mit der Sendeleistung P_t , dem Antennengewinn G (gleich für Sender und Empfänger), sowie dem Abstand R und dem Radarrückstreuquerschnitt σ eines Zielobjekts. Beschreiben Sie dabei die einzelnen Herleitungspunkte mit Stichpunkten und fertigen Sie eine passende Skizze an.

(4P.)

Name:
.....

- b) Ein monostatisches FMCW-Radar soll im Automobilbereich bei 77 GHz eingesetzt werden. Die Sendeleistung beträgt $P_{Tx} = 10$ dBm und der Gewinn von Sende- und Empfangsantenne $G = 15$ dBi. Welchen Radarrückstreuquerschnitt (RCS) σ muss ein Objekt in einer Entfernung von 100 m mindestens aufweisen, wenn das Radar eine minimale Empfangsleistung von $P_{Rx} = -120$ dBm benötigt? Geben Sie das Ergebnis zusätzlich in dBm^2 an.

(4P.)



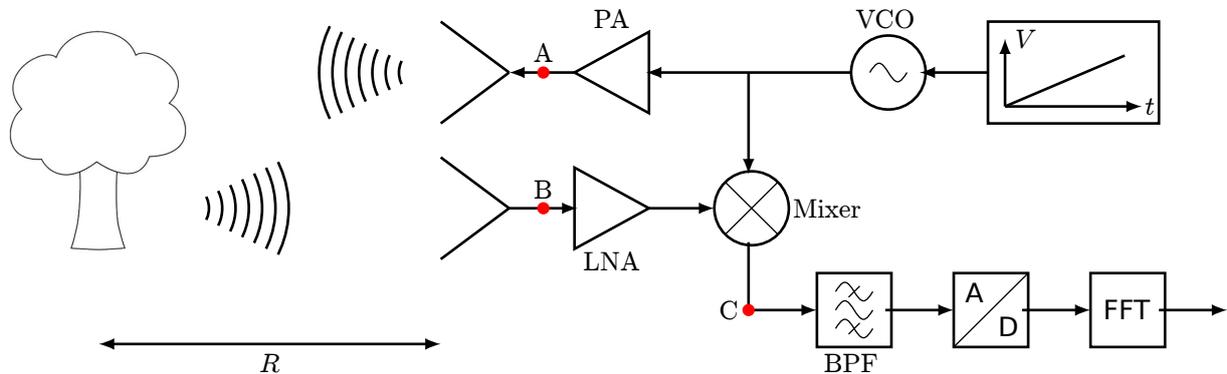
Empty rectangular box for the answer.

Aufgabe 2

(6 P.)

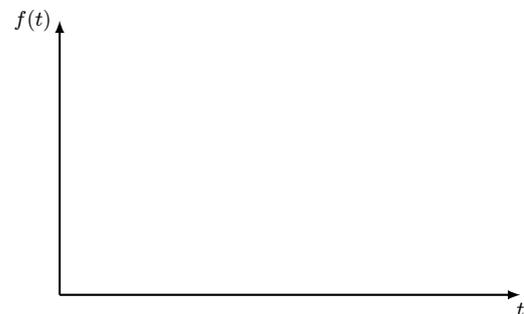


c)



Ein FMCW-Radar sendet ein Signal aus, das an einem stationärem Objekt reflektiert wird und wieder zum Radar zurückkehrt. Skizzieren Sie den Signal- und Frequenzverlauf einer Aufwärtsrampe an den Punkten A, B & C über der Zeit t in die dafür vorgesehenen Diagramme. Markieren und beschriften Sie die jeweiligen Zeitpunkte am Beginn und Ende der Sende- & Empfangsrampe, sowie die *beat frequency* f_b .

A & B



C



Name:

Aufgabe 2

- d) Welche Signalgröße wird bei einem FMCW-Radar zur Ermittlung der Zielentfernung gemessen? Leiten Sie die Beziehung zwischen dieser Größe und der Entfernung des Ziels R her. Die Zwischenschritte müssen nachvollziehbar sein.

(4P.)



A large empty rectangular box provided for the student to write their answer to the question.

Name:
.....

Aufgabe 3

(gesamt 18 Punkte)

Stehende Wellen und Leitungen

a) Skizzieren Sie die Feldlinien (E- und H-Feld) der Grundmode in einer Koaxialleitung.

(2 P.)

b) Welche Mode wird in einer Koaxialleitung im Allgemeinen verwendet? Gibt es eine maximale Frequenz bei der eine Koaxialleitung verwendet werden kann? Begründen Sie ihre Antwort!

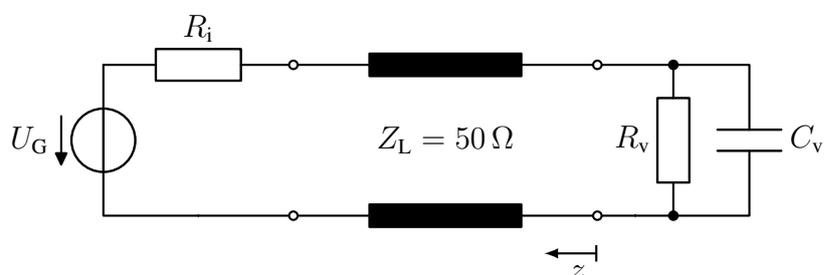
(2 P.)

Name:
.....

c) Wie ist die Übernahmefrequenz definiert? Welcher Verlustmechanismus dominiert oberhalb dieser Frequenz? (2 P.)



Gegeben sei folgende Schaltung, in der ein Generator mit dem Innenwiderstand $R_i = Z_L$, der Leerlaufspannung $U_G = 1\text{ V}$ und mit der Frequenz $f_0 = 1\text{ GHz}$ eine komplexe Last über die oben dimensionierte Mikrostreifenleitung mit dem Wellenwiderstand $Z_L = 50\ \Omega$ speist. Die Last besteht aus einer Kapazität mit $C_v = 15\text{ pF}$ und einem Parallelwiderstand $R_v = 10\ \Omega$.



d) Berechnen Sie den Reflexionsfaktor r_v und das Stehwellenverhältnis auf der Leitung. (3 P.)



Name:
.....

e) Berechnen Sie $|U|_{\max}$ und $|U|_{\min}$ der stehenden Welle auf der Leitung.

(1P.)



f) Berechnen Sie $|U(0)|$.

(1P.)

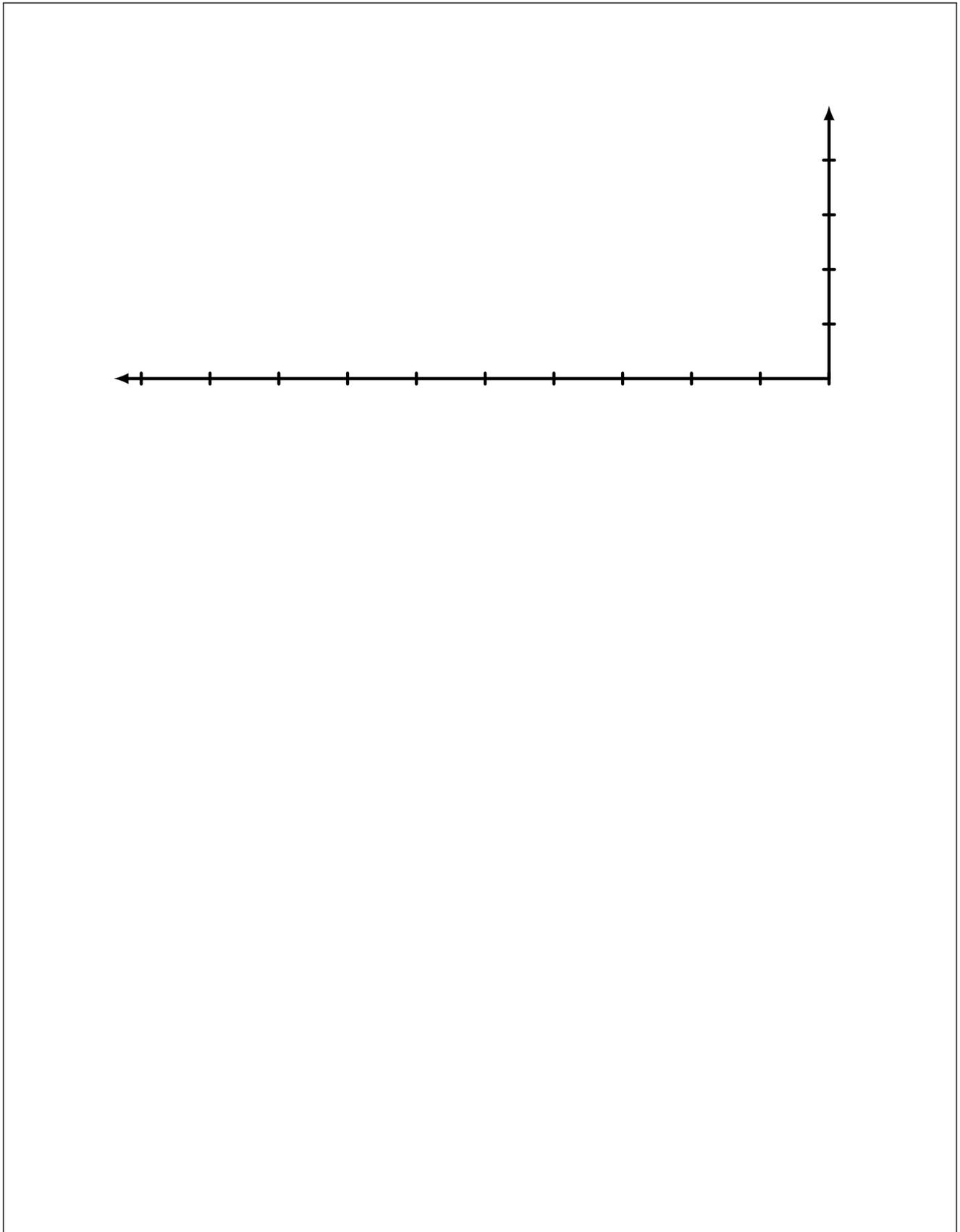


Name:

Aufgabe 3

- g) Zeichnen Sie die Verteilung des Betrages $|U(z)|$ (Einhüllende) der komplexen Spannungsamplitude $U(z)$ auf der Leitung in das dafür vorgesehene Diagramm ein.
Achten Sie auf korrekte Achsenbeschriftung.

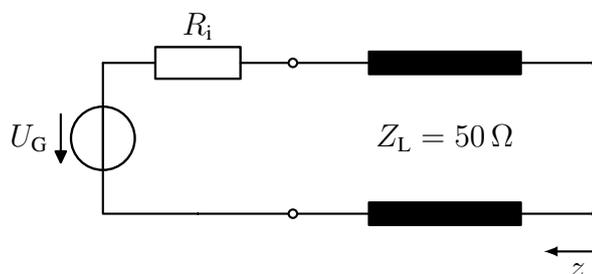
(3 P.)



Name:
.....

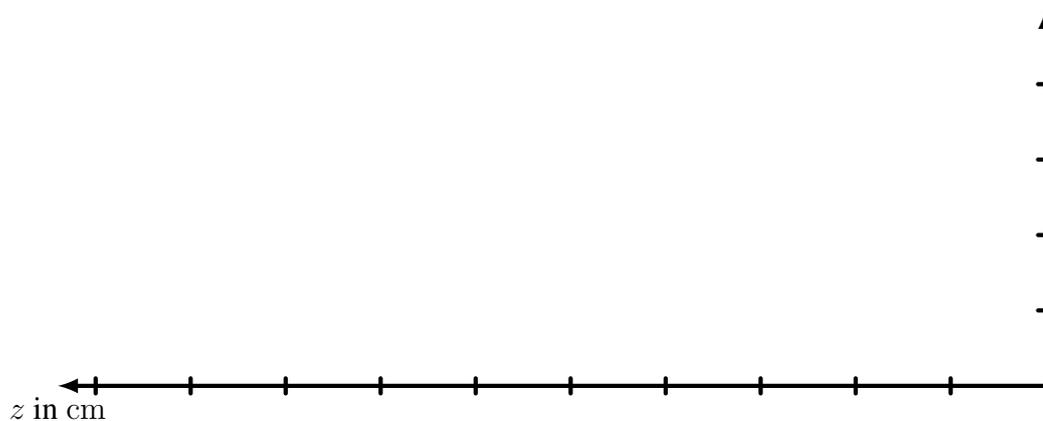
Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 3

Gegeben sei folgende Schaltung, in der ein Generator mit dem Innenwiderstand $R_i = Z_L$, der Leerlaufspannung U_G und der Frequenz $f_0 = 3 \text{ GHz}$ eine mit einem Dielektrikum gefüllte Leitung ($\epsilon_{r,\text{eff}} = 4$) mit dem Wellenwiderstand $Z_L = 50 \Omega$ speist. Die Leitung ist an ihrem Ende kurzgeschlossen. Die Leitung kann als verlustlos angenommen werden.



- h) Skizzieren Sie die Einhüllende des Spannungsverlaufs auf der Leitung. Der Kurzschluss befindet sich bei $z = 0$. Nutzen Sie das unten stehende Diagramm. Achten Sie auf die Achsenbeschriftung. Die x-Achse soll nicht auf die Wellenlänge normiert werden!

(4P.)



Name:

.....

Name:
.....

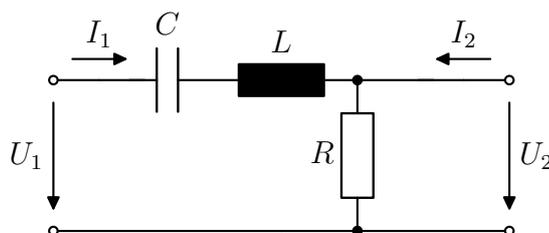
Aufgabe 4

(gesamt 16 Punkte)

Mikrowellen-Netzwerkanalyse



Gegeben sei folgendes Zweitor.



- a) Um welchen Filtertyp handelt es sich bei folgendem Zweitor (Tiefpass, Hochpass, Bandpass, Bandstop)?

(1P.)



- b) Bestimmen Sie die Z -Parameter Z_{11} und Z_{12} des Zweitors.

(2P.)



Name:

Aufgabe 4

c) Leiten Sie die S-Parametermatrix einer angepassten verlustbehafteten Leitung der Länge l her. (3 P.)

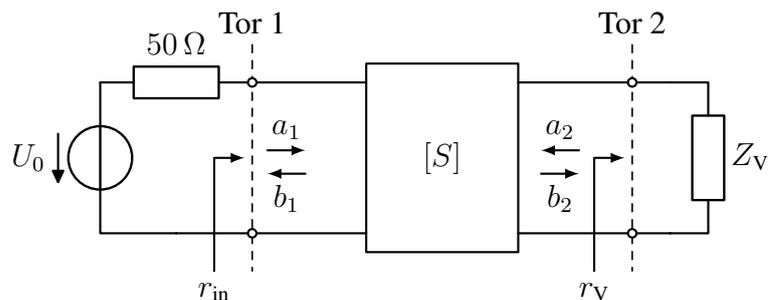


Name:

Aufgabe 4

Das unten gezeigte Zweitor verbindet einen Generator mit der Generatorspannung U_0 und einem Innenwiderstand von 50Ω mit einem Verbraucher Z_V . Das Zweitor soll so gespeist werden, dass $b_2 = 1 \sqrt{W}$ ergibt. Die Lastimpedanz beträgt $Z_V = Z_0/5$. Das Zweitor hat folgende Matrix mit Bezug $Z_0 = 50 \Omega$:

$$S = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,3 \\ 0,9 & 0,1 \end{bmatrix}$$



d) Wie groß ist die von R_V aufgenommene Wirkleistung.

(2 P.)



e) Berechnen sie den Wert für a_1 .

(2 P.)



Name:

Aufgabe 4

f) Berechnen Sie allgemein den Reflexionsfaktor r_{in} am Eingang als Funktion von r_V und den S -Parametern des Zweitors. Berechnen Sie außerdem r_{in} für die hier vorliegende Schaltung.

(3 P.)



g) Berechnen Sie die Verlustleistung des Zweitors in der oben gezeigten Anordnung.

(3 P.)



Name:
.....

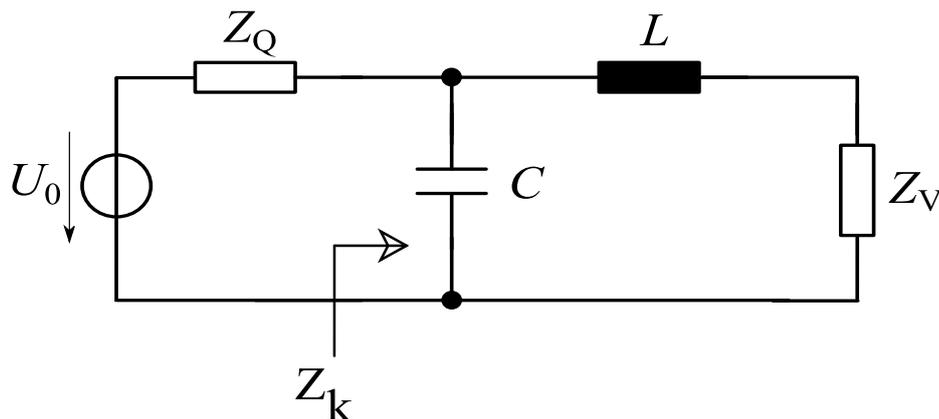
Aufgabe 5

(gesamt 16 Punkte)

Smithdiagramm

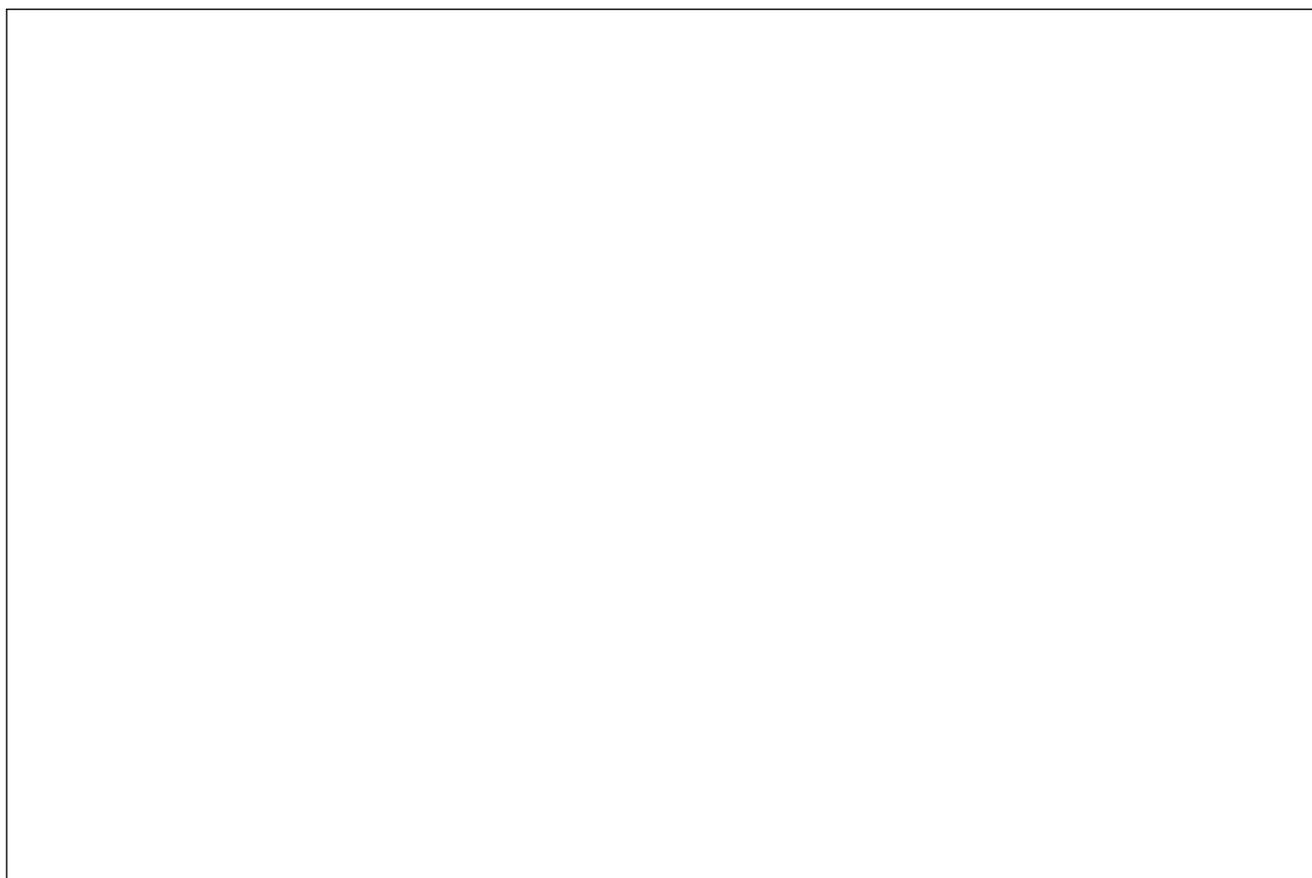


Mithilfe des unten gezeigten Netzwerks soll die Lastimpedanz $Z_V = (50 + j50) \Omega$ an die Quellimpedanz Z_Q angepasst werden.



- a) Markieren Sie in einem Smithdiagramm ($Z_B = 50 \Omega$) den Bereich, in dem sich Z_k bei Variation von L und C befinden kann. Begründen Sie Ihr Vorgehen. Die Zuordnung der Transformationsschritte zu den Transformationselementen muss klar erkennbar sein.

(4P.)



Name:

.....

Aufgabe 5

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the majority of the page below the header. It is intended for the student to write their solution to the task.

Name:
.....

b)

(5 P.)



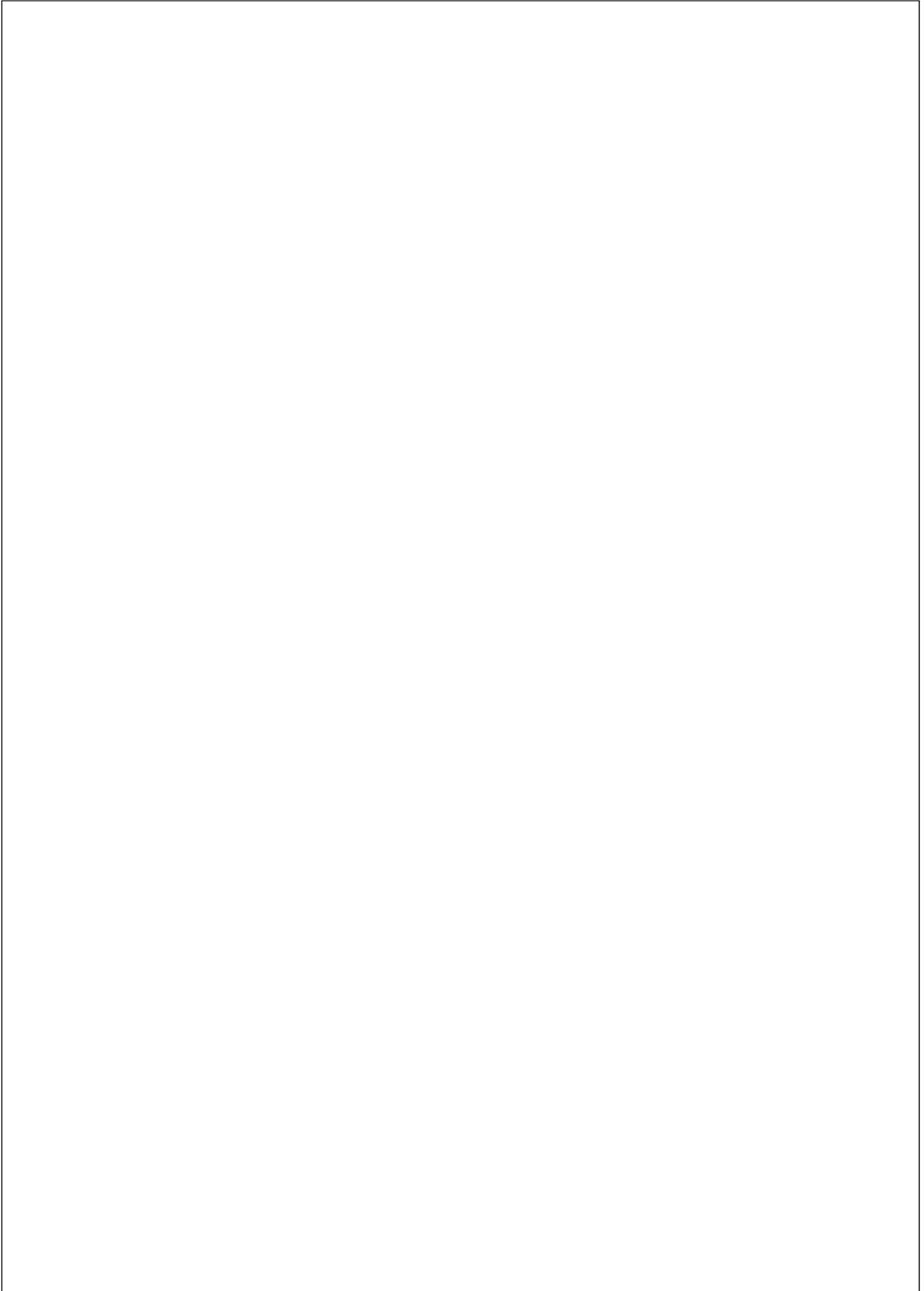
Ein Verbraucher mit der Impedanz $Z_V = (75 + j100) \Omega$ soll an eine Quelle mit der Impedanz $Z_Q = 50 \Omega$ reflexionsfrei angeschlossen werden. Zur Verfügung stehen Ihnen folgende Elemente:

- eine Spule mit beliebiger Induktivität
- eine Leitung beliebiger Länge mit Wellenwiderstand $Z_L = 50 \Omega$

Zeichnen Sie eine möglichst einfache Anpassschaltung mit genau zwei Elementen in obiges Schaltbild. Zeichnen Sie den Transformationsweg in ein Smith Diagramm ein und geben Sie die Induktivität der Spule L und die Länge der Leitung l an, für die bei einer Frequenz von 2 GHz Anpassung herrscht. Alle Leitungen sind verlustfrei.

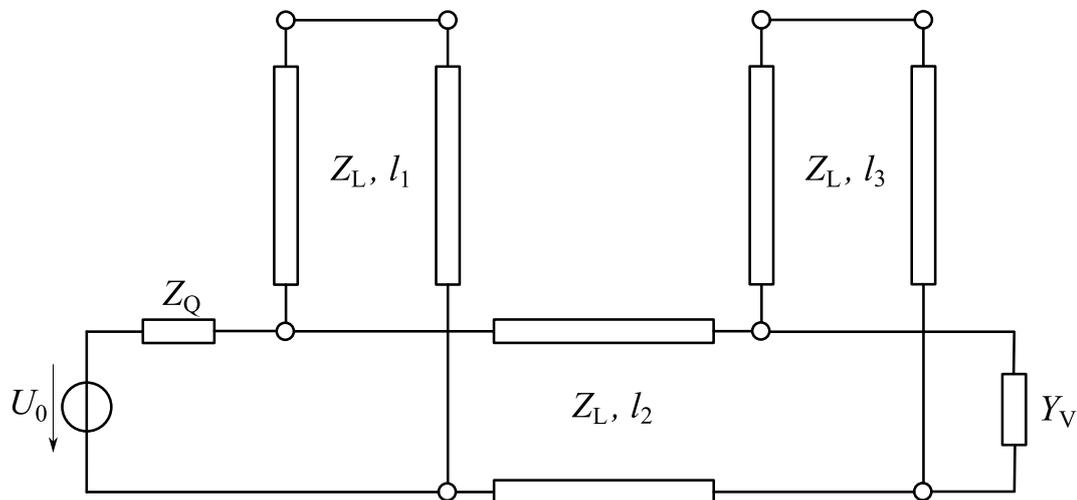
Name:
.....

Aufgabe 5



Aufgabe 5

Die unten gezeigte Leitungsanordnung wird dazu genutzt, die Lastadmittanz $Y_V = (10 - j6)$ mS an den Quellwiderstand $Z_Q = 250 \Omega$ anzupassen. Die kurzgeschlossenen Stichleitungen besitzen die Längen $l_1/\lambda = 0,3475$ und $l_3/\lambda = 0,134$. Alle drei Leitungen weisen einen Wellenwiderstand $Z_L = 100 \Omega$ auf.



- c) Bestimmen Sie mithilfe des Smithcharts die Länge l_2/λ , sodass die Lastadmittanz optimal an den Quellwiderstand angepasst ist. (7 P.)
- Markieren Sie die einzelnen Transformationsschritte in einem Smithchart und begründen Sie Ihr Vorgehen. Die Zuordnung der einzelnen Transformationsschritte zu den Transformationselementen muss klar erkennbar sein.

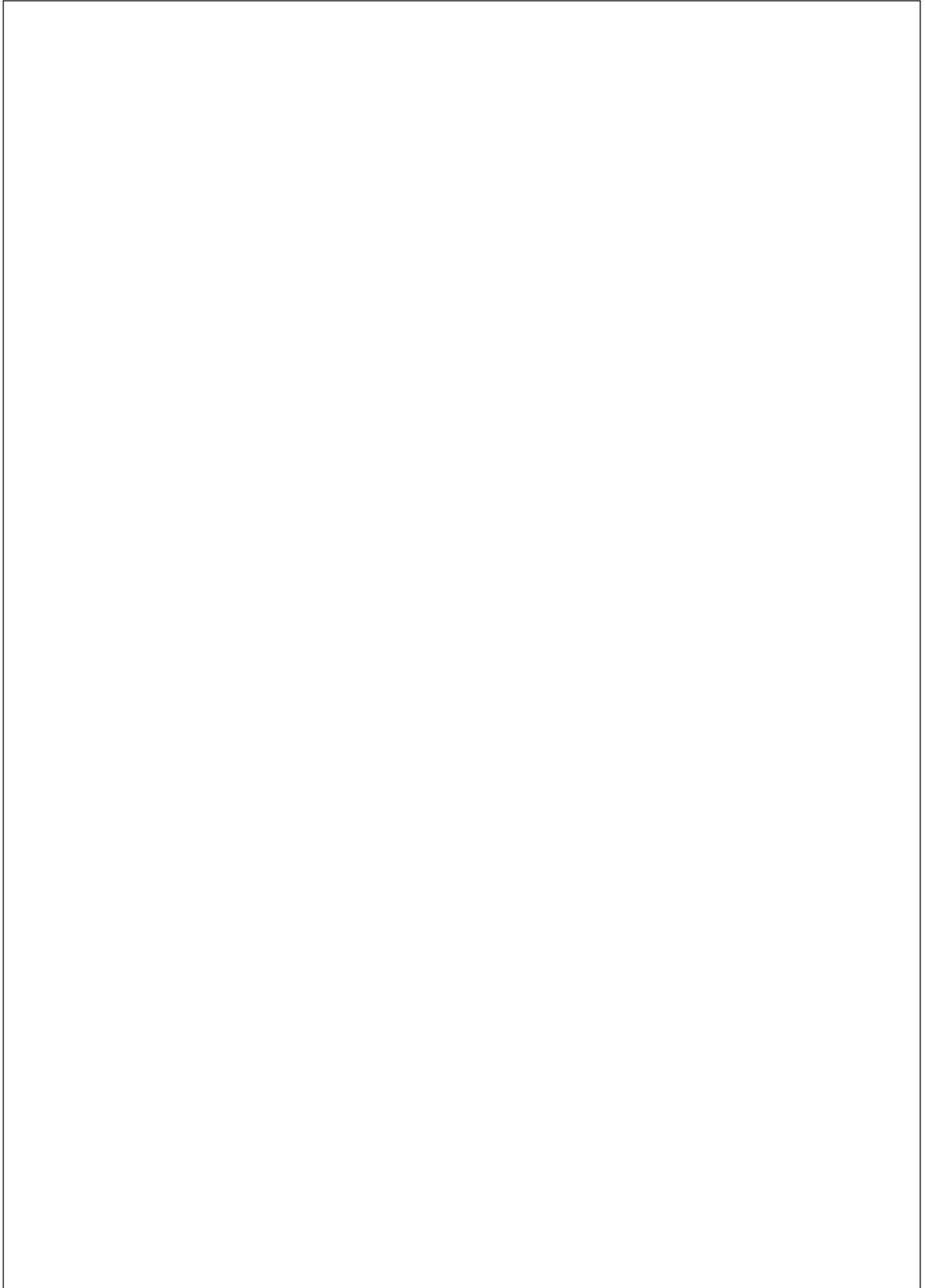
(7 P.)



Name:

.....

Aufgabe 5



Name:

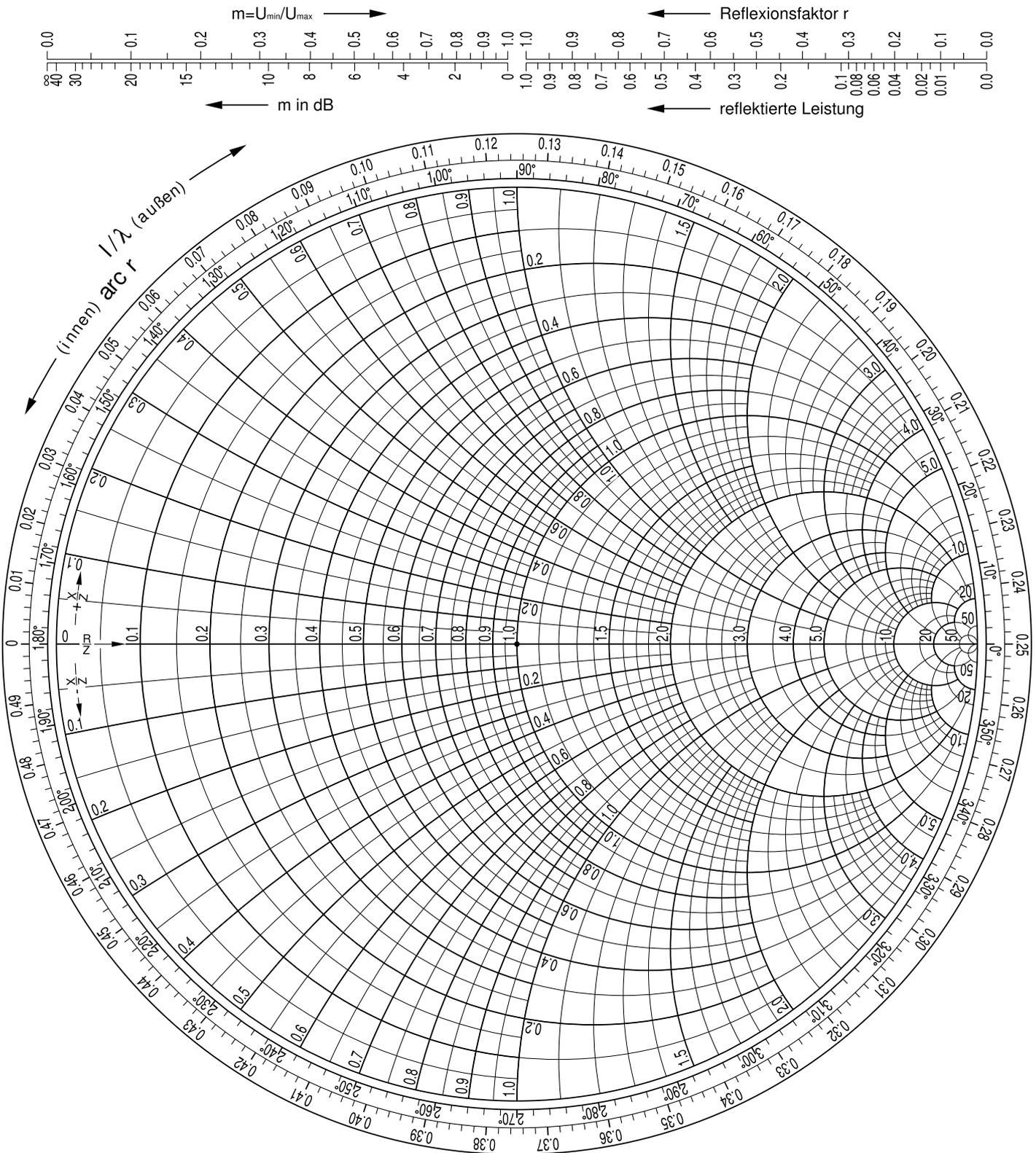
Smith-Diagramm

zugehörige

Aufgabennummer:

Widerstandsform

Bezugswiderstand $Z_B =$ _____



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

Name:

.....

Name:

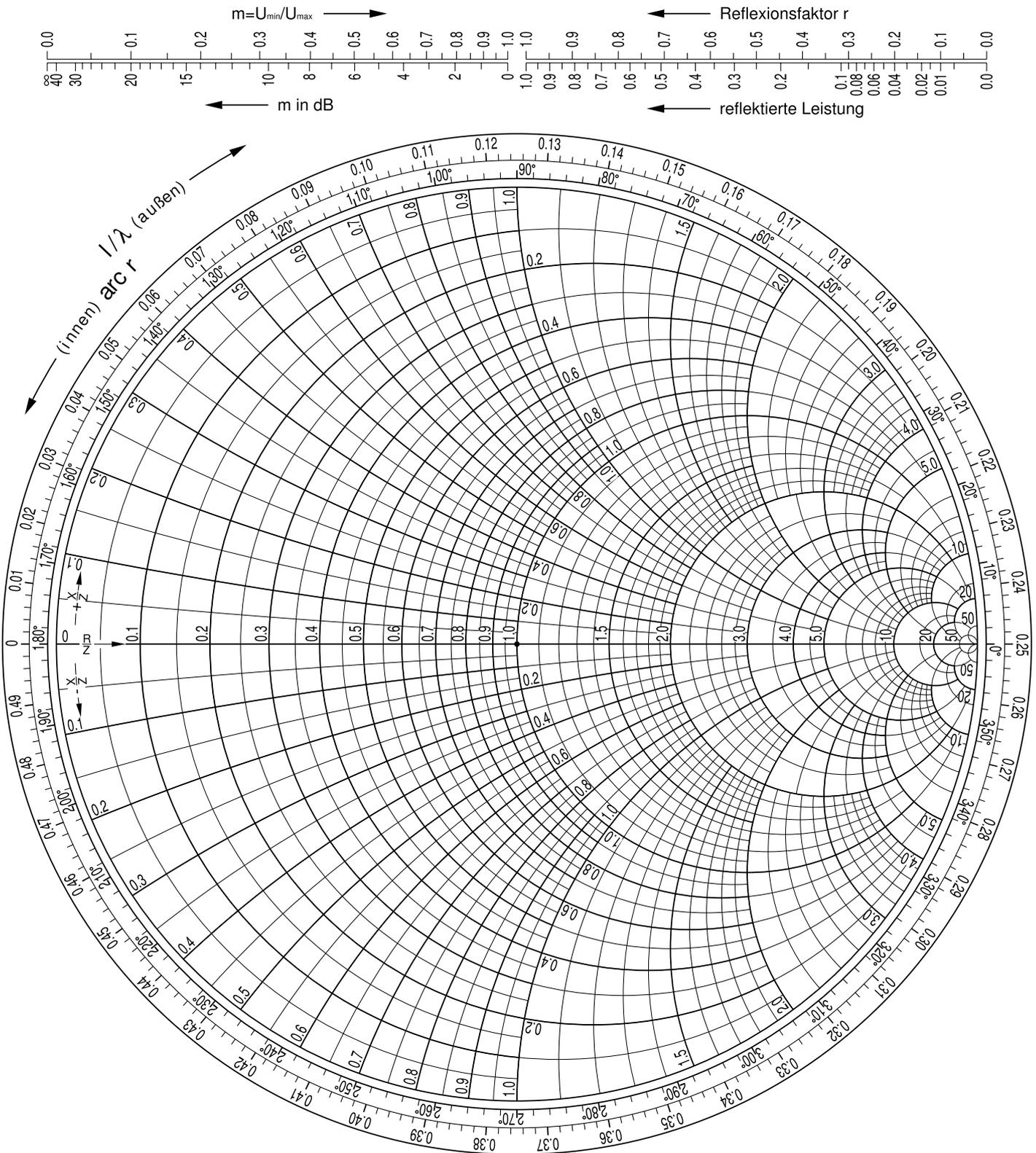
Smith-Diagramm

zugehörige

Aufgabennummer:

Widerstandsform

Bezugswiderstand $Z_B =$ _____



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

Name:

.....

Name:

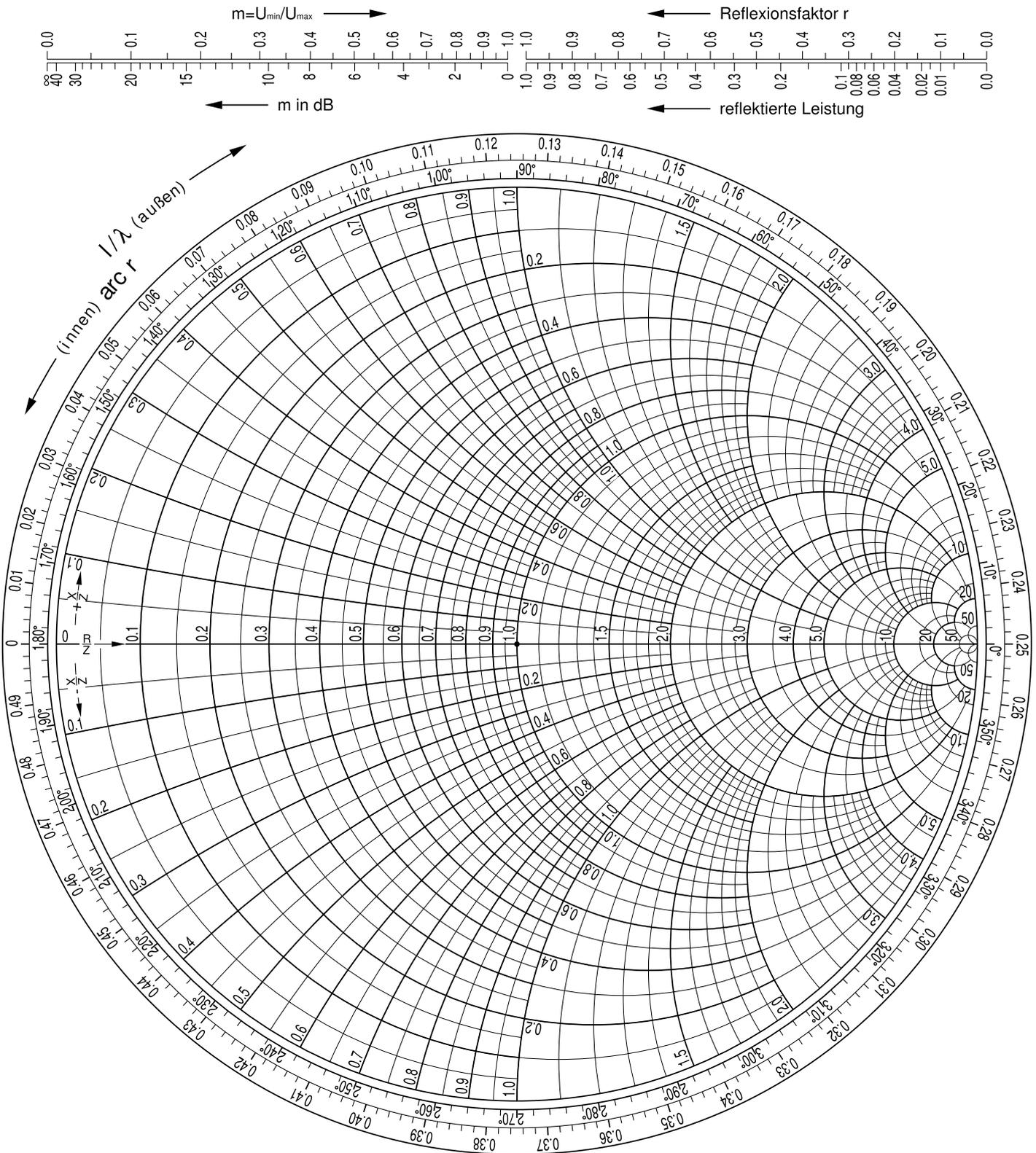
Smith-Diagramm

zugehörige

Aufgabennummer:

Widerstandsform

Bezugswiderstand $Z_B =$ _____



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

Name:

.....

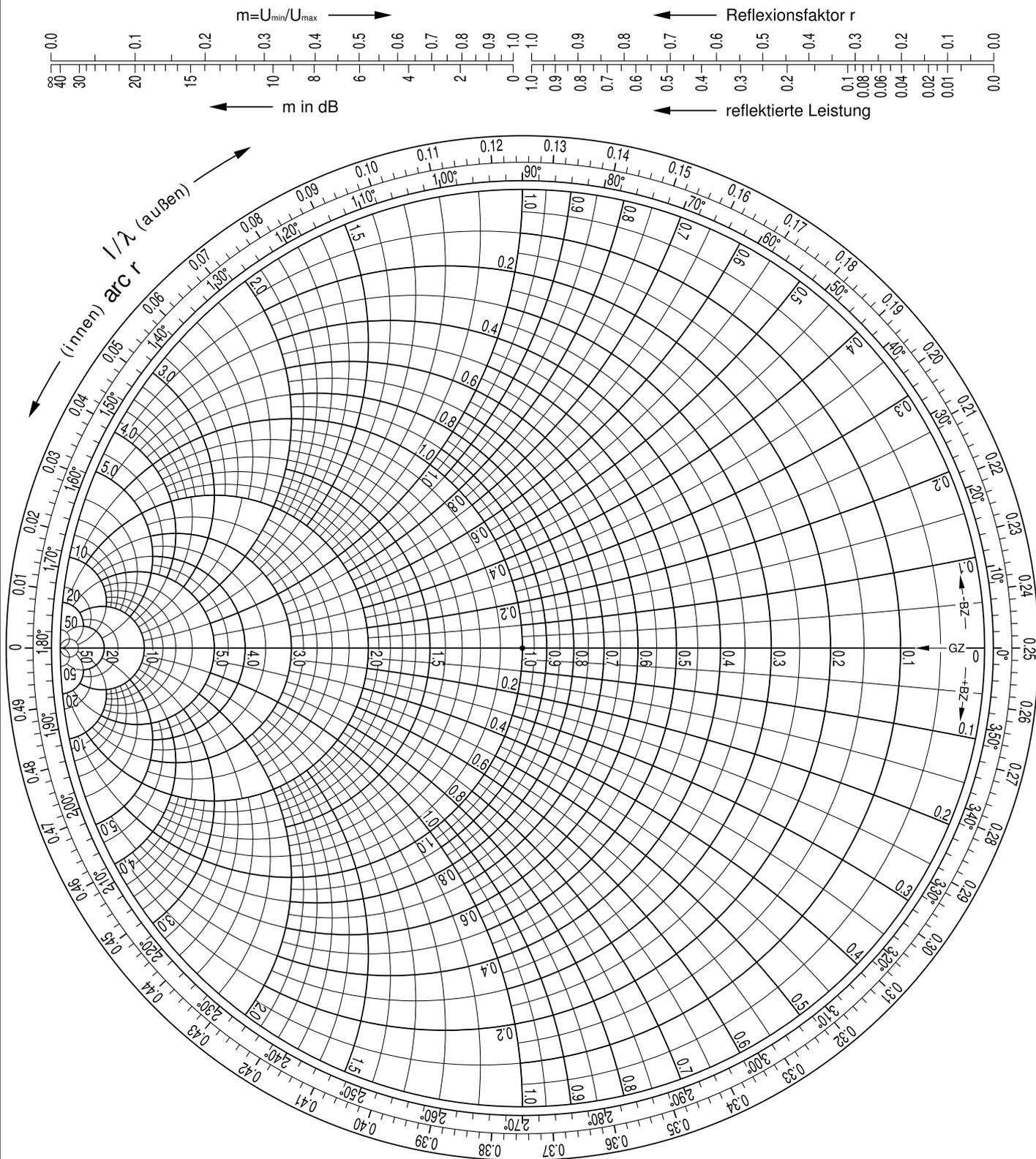
Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Smith-Diagramm

zugehörige
Aufgabennummer:

Leitwertform

Bezugswiderstand $Z_B =$ _____



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

Name:

.....

Name:

.....

Name:

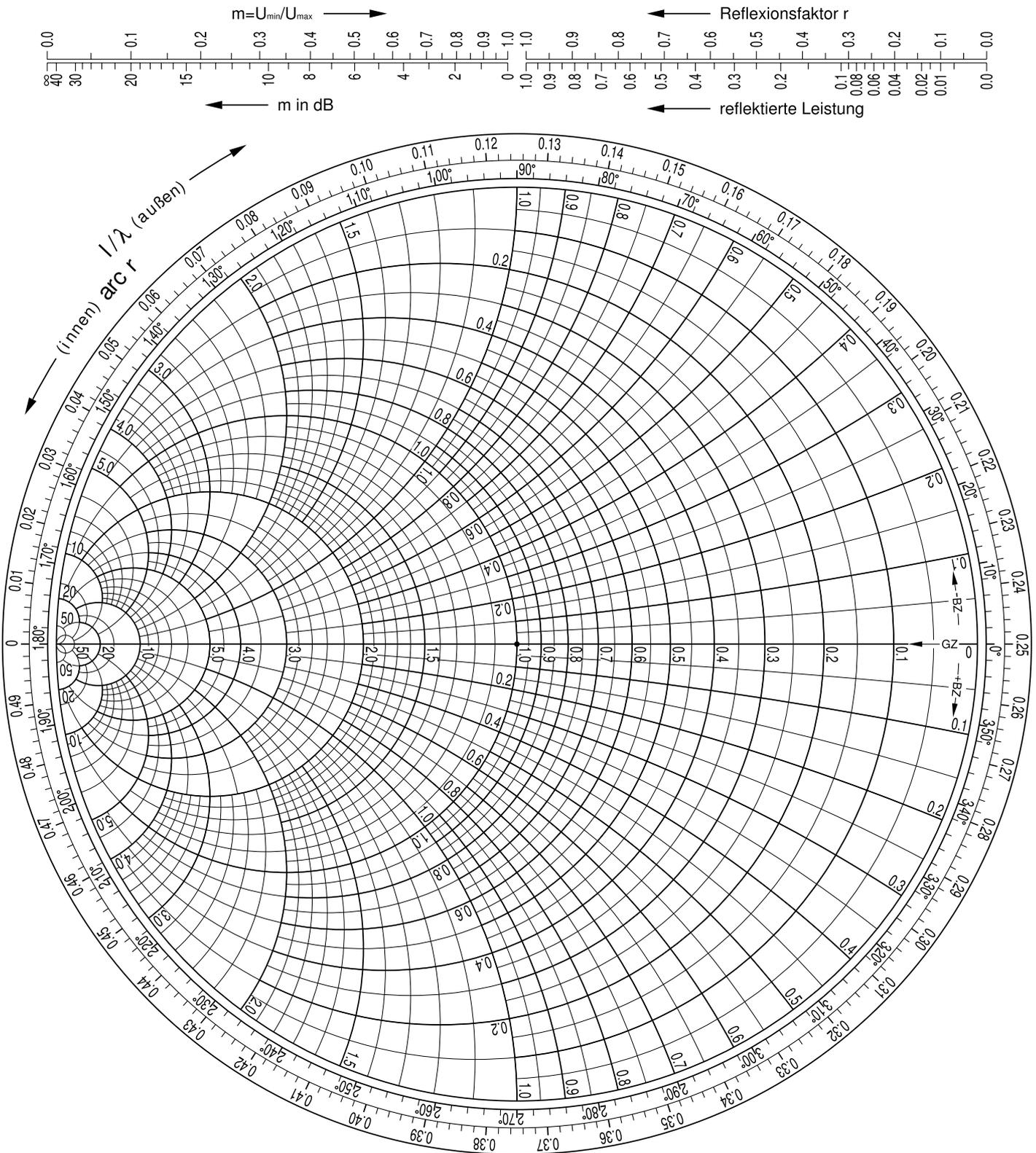
Smith-Diagramm

zugehörige

Aufgabennummer:

Leitwertform

Bezugswiderstand $Z_B =$ _____



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

Name:

.....

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

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

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

Kompensation mit dualen Elementen

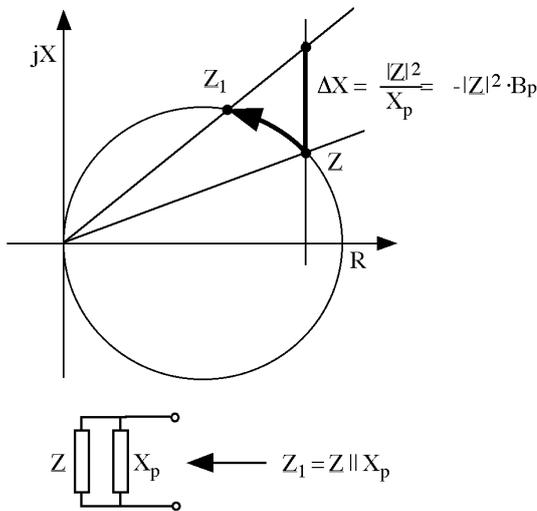


Bedingungen für Kompensation: $X_s = R^2 \cdot B_p$

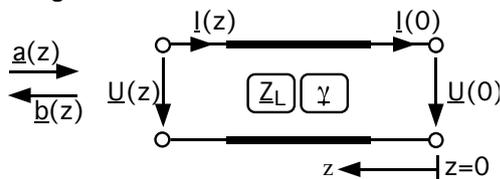
Frequenzfaktor: $F(f) = \sqrt{X_s \cdot B_p}$

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

Hilfskonstruktion zur Transformation



Leitungen



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

$$\underline{I}(z) = \frac{\underline{U}_H(0)}{Z_L} e^{+\gamma z} - \frac{\underline{U}_R(0)}{Z_L} e^{-\gamma z} = \frac{1}{\sqrt{Z_L}} (\underline{a}(z) - \underline{b}(z))$$

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

Koaxialleitung

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

ungedämpfte Leitung (homogenes Dielektrikum und konst. Querschnitt)

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

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

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

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

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

Eindringtiefe s

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

Reflexionsfaktor r

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

Reflexionsfaktor \rightarrow Impedanz

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

Anpassungsfaktor, Stehwellenverhältnis

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

Dem Verbraucher zugeführte Wirkleistung P_w

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

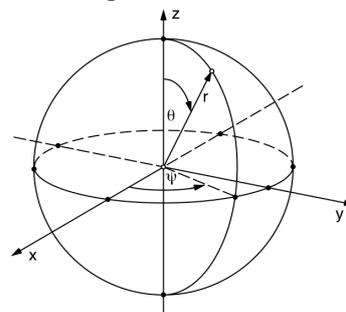
$$P_w = P_a(0) - P_b(0) = \frac{1}{2} (|\underline{a}(0)|^2 - |\underline{b}(0)|^2)$$

$$= \frac{1}{2} |\underline{a}(0)|^2 \cdot (1 - |\underline{r}(0)|^2)$$

Transformation durch Kettenschaltung einer Leitung

$$\underline{Z}(\ell) = Z_L \cdot \frac{\underline{Z}(0) + Z_L \tanh(\underline{\gamma}\ell)}{Z_L + \underline{Z}(0) \tanh(\underline{\gamma}\ell)} = \underline{Z}(0) \cdot \frac{1 + j \frac{Z_L}{\underline{Z}(0)} \cdot \tan(\beta\ell)}{1 + j \frac{\underline{Z}(0)}{Z_L} \cdot \tan(\beta\ell)} \Big|_{\alpha=0}$$

Kugelkoordinaten



Azimuth: ψ Elevation: θ

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

Konstanten

$$Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \Omega$$

$$c_0 = 2,997925 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

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

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

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Formelblatt Zweitorparameter

	[S]	[Z]	[Y]	[A] (ABCD)	[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}	$\frac{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}}{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{-A + B/Z_0 + CZ_0 + D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\frac{-T_{21}}{T_{22}}$
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}