

Name:
.....

Matrikel-Nr.:
.....

Platz-Nr.:

GHF H'19
29. Juli 2019
Seite 1 von 38

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	17	17	17	17
erzielte Punkte					

Gesamtbewertung

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



Name:
.....

Hinweise zur Klausur

GHF H'19
29. Juli 2019
Seite 2 von 38

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 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 38 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) bzw. im Campus System veröffentlicht. Der Zeitpunkt der Veröffentlichung wird im Internet bekannt gegeben.

Name:
.....

Aufgabe 1

(gesamt 17 Punkte)

Allgemeines

a) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild eines kurzen Abschnitts Δz einer verlustbehafteten Leitung.

(2 P.)

b) Ein zylindrischer Kupferleiter wird von einem Wechselstrom der Frequenz 10 GHz durchflossen. Die Leitfähigkeit von Kupfer beträgt $\kappa = 5,8 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}$. Wie groß ist die Eindringtiefe?

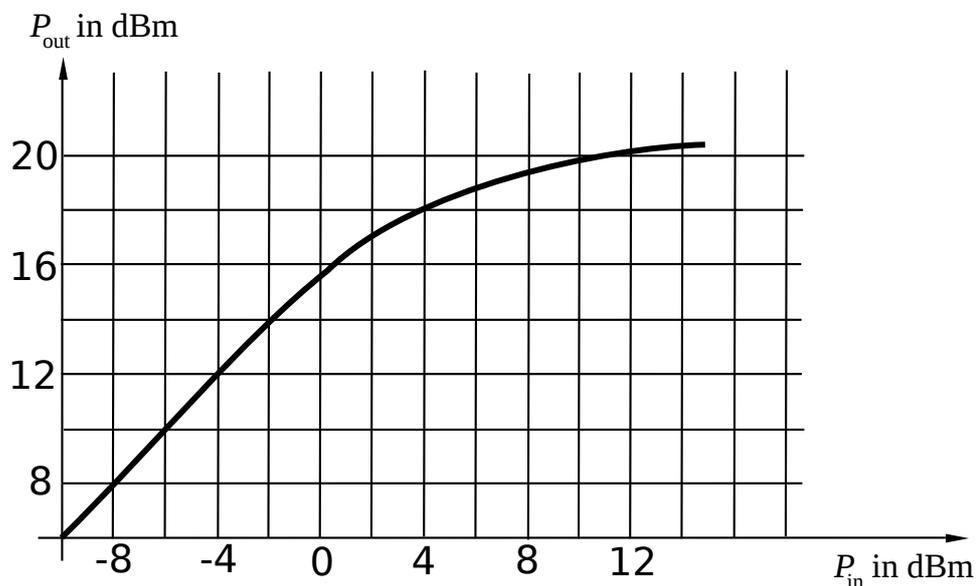
(2 P.)

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 1

c) Gegeben ist die folgende Verstärkerkennlinie. Geben Sie die Verstärkung im linearen Bereich und den 1 dB Kompressionspunkt bezogen auf den Ausgang an. Ergänzen Sie dazu die Grafik und zeichnen Sie den 1 dB Kompressionspunkt ein.

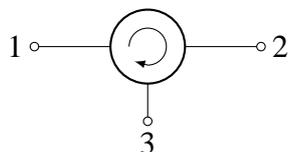
(2 P.)

Name:
.....

d) Geben Sie die S-Matrix eines idealen Zirkulators an, der verlustlos und perfekt angepasst ist.

(1P.)



$$S_{\text{Zirkulator}} = \begin{bmatrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{bmatrix}$$

e) Nennen Sie drei verschiedene Rauscharten.

(3P.)



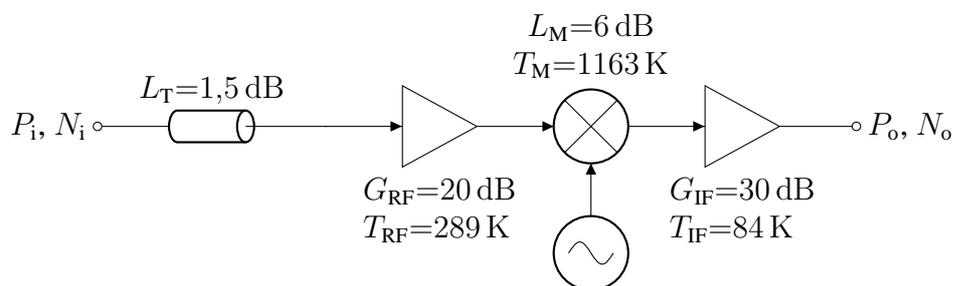
Empty rectangular box for the answer to question e).

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 1

GHF H'19
29. Juli 2019
Seite 6 von 38

Ein Mikrowellenempfänger hat folgende Parameter:



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

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

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

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

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

(2 P.)



Name:
.....

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

(5 P.)



Name:

.....

Name:
.....

Aufgabe 2

(gesamt 17 Punkte)

Mikrowellensysteme

- 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.)

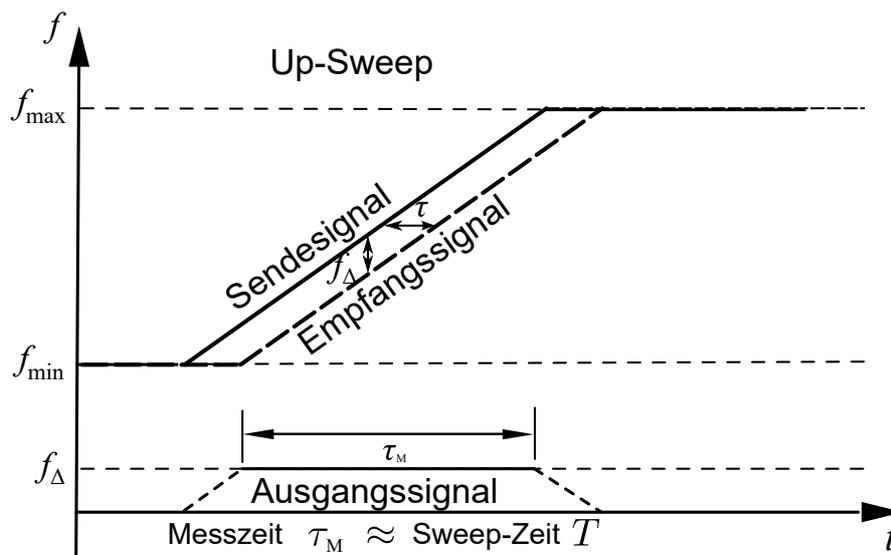
Aufgabe 2

b) Das monostatische FMCW-Radar soll nun mit einer Trägerfrequenz von $f_0 = 24$ GHz ein bewegtes Objekt mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h in einer Entfernung von 15 m mit einer Messzeit von $\tau_M = 1$ ms in Luft messen. Die Bandbreite des Radars beträgt $B = 250$ MHz.

(3 P.)



- Wie groß ist die Entfernungsauflösung ΔR des Radars?
- Wie groß ist die Dopplerauflösung Δf_D des Radars?
- Wie groß ist die gemessene Dopplerverschiebung f_D des Objekts?



Name:
.....

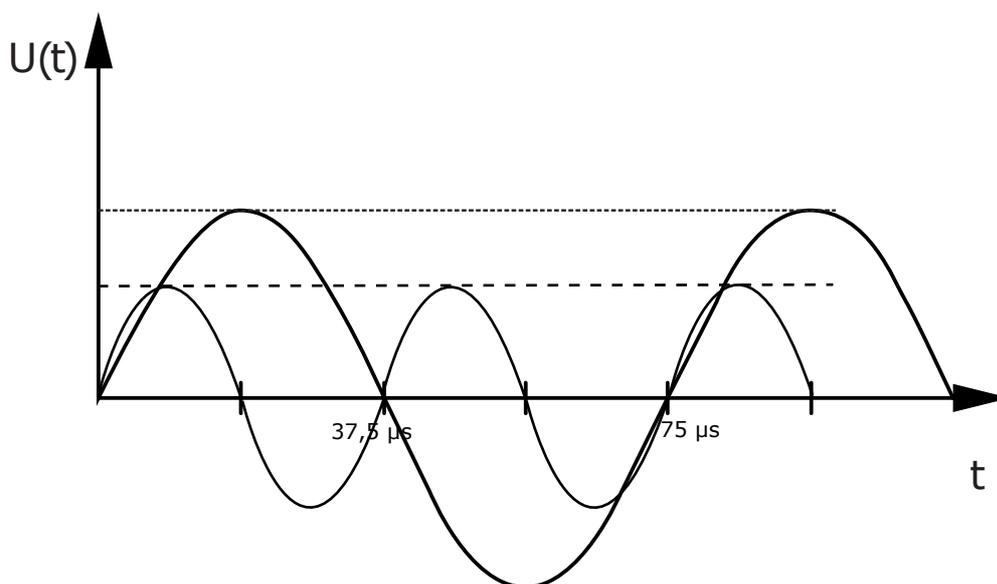
- c) Das monostatische FMCW-Radar sendet bei einer Frequenz von 24 GHz mit einer Leistung von 12 dBm. Welchen Antennengewinn in dBi weist das Radar auf, wenn sich für ein Objekt mit einem RCS von 10 m^2 in einer Entfernung von 15 m eine Empfangsleistung am Antennenausgang von -80 dBm ergibt?

(4P.)



- d) Gegeben seien die beiden in folgender Grafik dargestellten Ausgangssignale des vorher beschriebenen Radars ($B = 250 \text{ MHz}$). Berechnen Sie an Hand der Periodendauern $T_{r,1} = 37,5 \mu\text{s}$ und $T_{r,2} = 75 \mu\text{s}$, in welcher Entfernung sich die beiden zugehörigen Ziele befinden.

(4P.)



Name:
.....

e) Wie hoch ist die äquivalente Rauschtemperatur T_A einer Antenne mit einem Antennenwirkungsgrad von $\eta = 0,9$, einer Umgebungstemperatur von $T_{\text{therm}} = 300 \text{ K}$ und einer Hintergrundtemperatur von $T_H = 150 \text{ K}$?

(1P)

f) Wie lautet die Definition des komplexen Poynting-Vektor \vec{S} ? Geben Sie eine mathematische Definition an.

(1P)

Name:
.....

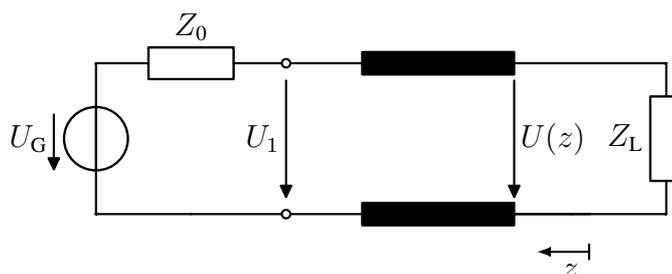
Aufgabe 3

(gesamt 17 Punkte)



Stehende Wellen und Leitungen

Gegeben sei die in der Skizze gezeigte verlustfreie Leitung mit Leitungswellenwiderstand $Z_0 = 50 \Omega$. Die Leitung wird von einer Wechselspannungsquelle gespeist, die eine Spannungsamplitude von $U_G = 2 \text{ V}$ und eine Frequenz von $f = 600 \text{ MHz}$ aufweist. Die Last habe eine Impedanz von $Z_L = (10 + j20) \Omega$.



a) Bestimmen Sie das Stehwellenverhältnis auf der Leitung.

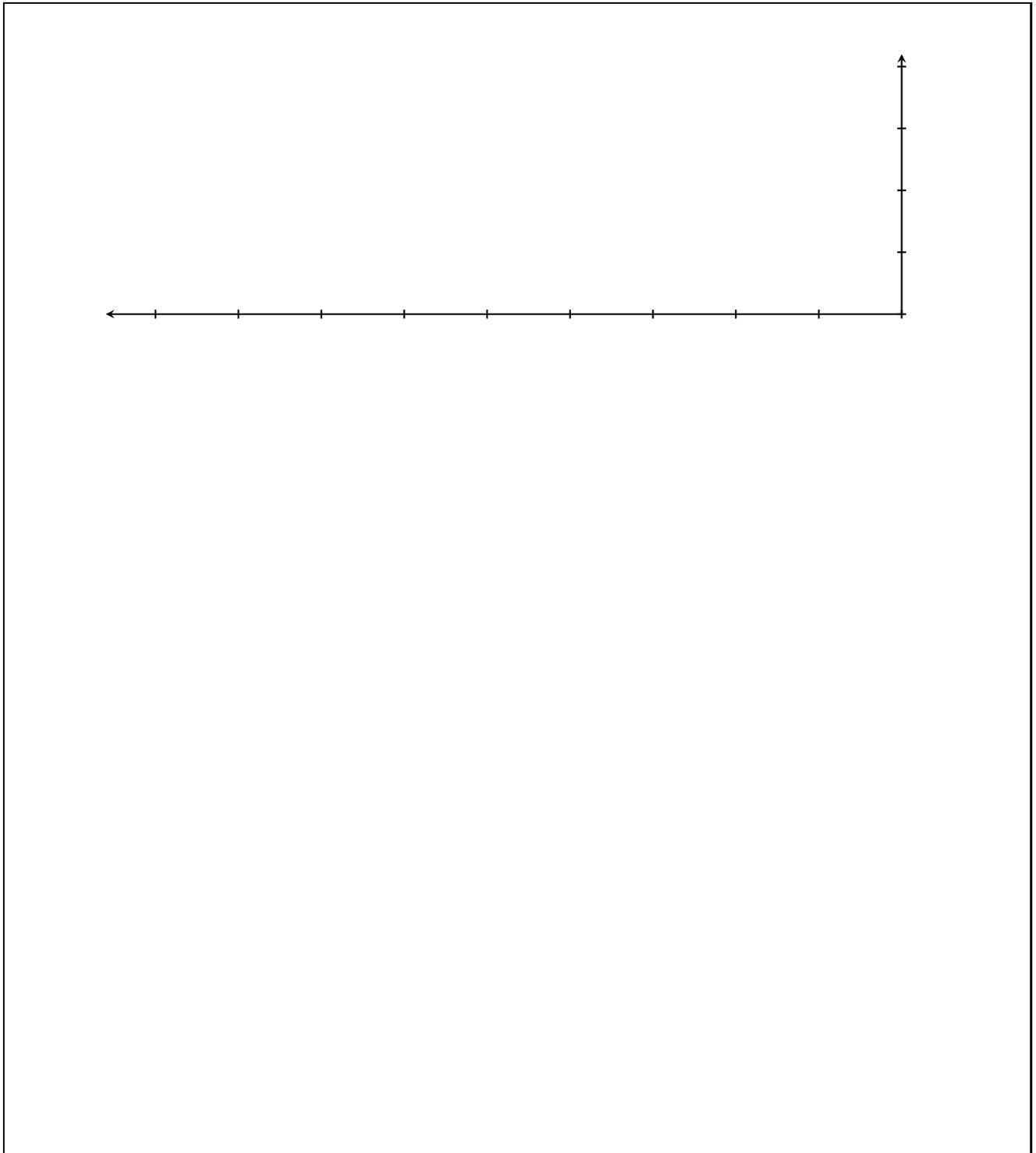
(4P.)



Name:
.....

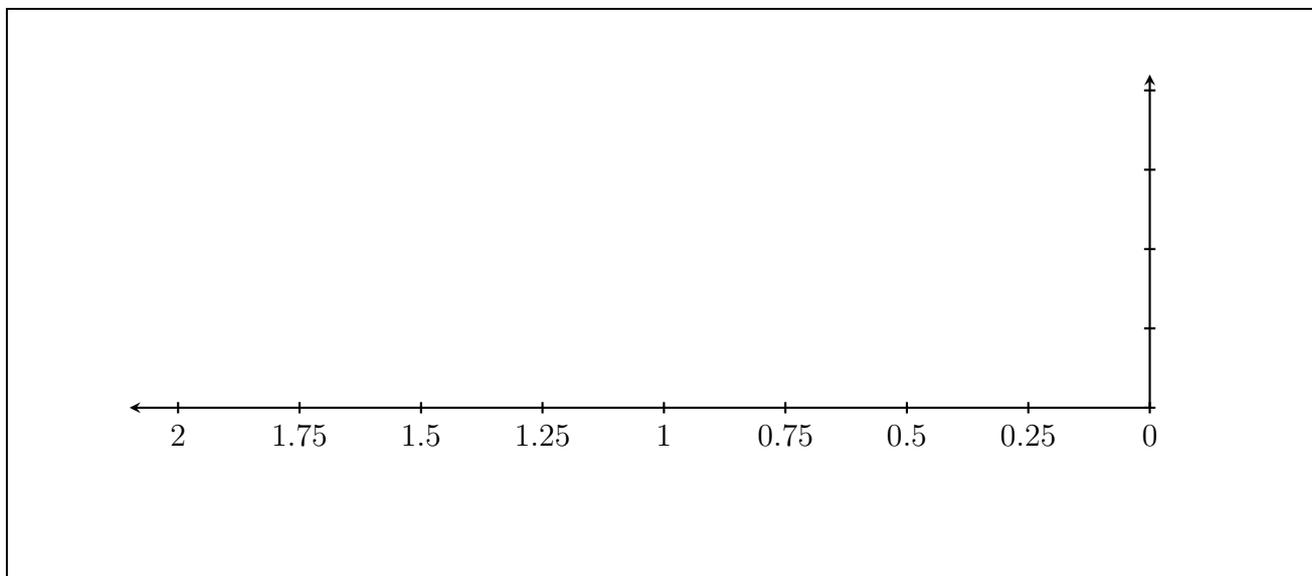
b) Skizzieren Sie den Spannungsverlauf auf der Leitung. Achten Sie auf korrekte Achsenbeschriftungen inklusive Einheiten.

(4P.)



Name:
.....

- c) Skizzieren Sie den Spannungsverlauf auf einer verlustbehafteten kurzgeschlossenen Leitung. Der Kurzschluss befindet sich bei $z = 0$. Achten Sie auf korrekte Achsenbeschriftungen. (2 P.)



- d) Welche Frequenzabhängigkeit weist die Querdämpfung einer Leitung auf und welcher physikalische Effekt ist dafür verantwortlich? (2 P.)



- e) Gegeben sei eine kurzgeschlossene, verlustlose Leitung mit $Z_0 = 50 \Omega$ und der Länge $l = \frac{\lambda}{12}$. Bestimmen Sie die Eingangsimpedanz der Leitung. (1 P.)

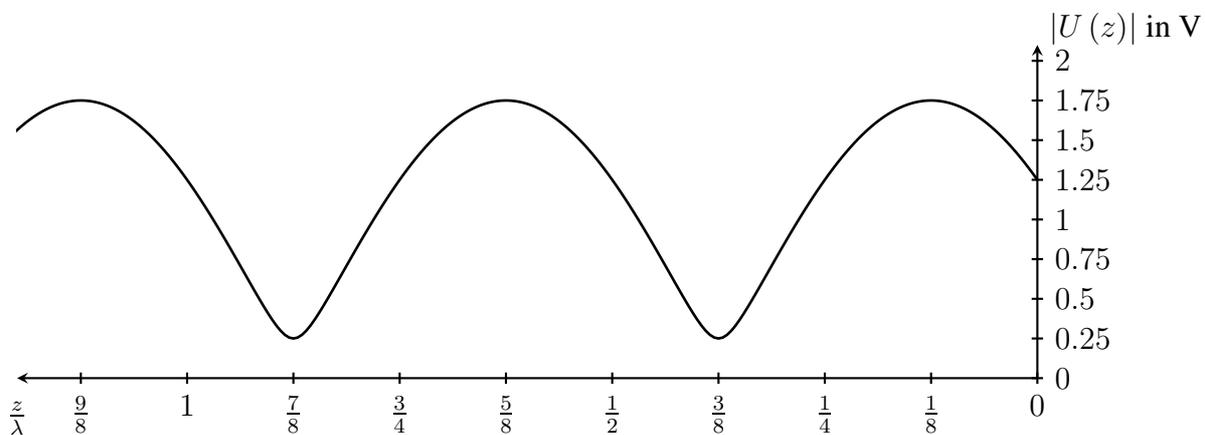


Name:
.....

Aufgabe 3

f) Gegeben sei der folgende Spannungsverlauf auf einer verlustlosen Leitung mit Wellenwiderstand $Z_0 = 50 \Omega$. Ermitteln Sie Phase (im Bereich $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_L \leq \frac{\pi}{2}$) und Betrag des Reflexionsfaktors der Lastimpedanz, mit der die Leitung an der Stelle $\frac{z}{\lambda} = 0$ abgeschlossen ist.

(4P.)



Empty box for the student's solution.

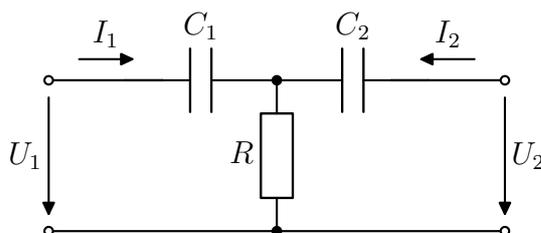
Name:
.....

Aufgabe 4

(gesamt 17 Punkte)

Mikrowellen-Netzwerkanalyse

Gegeben sei folgendes Zweitor.



a) Bestimmen Sie die Z -Parameter des Zweitors.

(4P.)

b) Um welchen Filtertyp handelt es sich bei obigem Zweitor (Tiefpass, Hochpass, Bandpass, Bandstop)?

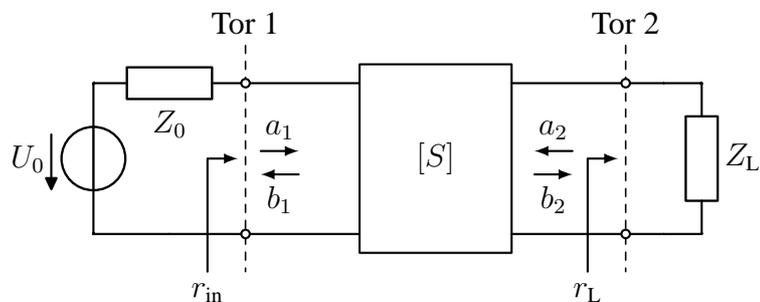
(1P.)

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 4

c) Leiten Sie allgemein den Reflexionsfaktor r_{in} als Funktion von r_L und den S -Parametern des folgenden Zweitports her.

(4P.)



Empty box for the solution.

Name:
.....

d) Geben Sie die S-Parameter eines Zweitors mit folgenden Eigenschaften an:

(3 P.)

- Das Zweitor ist verlustfrei und umkehrbar.
- Ein- und Ausgang reflektieren 20 % der Eingangsleistung.



Begründen Sie ihre Antwort.

e) Geben Sie die S-Parameter einer angepassten verlustfreien Leitung an.

(1 P.)



Name:
.....

f) Ein Bauteil hat folgende S-Parameter:

(4P.)

$$S_{dB} = \begin{bmatrix} -10 & -25 \\ 17 & -10 \end{bmatrix}$$



- Ist das Bauteil umkehrbar?
- Handelt es sich um ein aktives Bauteil?
- Welche Leistung wird von Tor 2 abgegeben, wenn an Tor 1 -3 dBm eingespeist werden. Geben Sie das Ergebnis in W an.

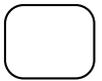
Begründen Sie ihre Antwort.

Name:
.....

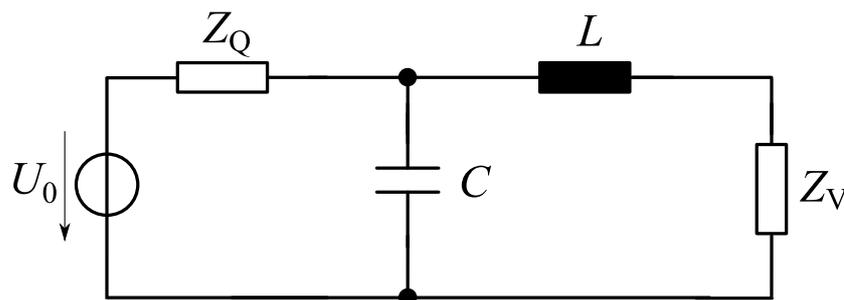
Aufgabe 5

(gesamt 17 Punkte)

Smithdiagramm



Mithilfe des unten gezeigten Netzwerks soll die Lastimpedanz $Z_V = (75 + j50) \Omega$ so an die Quellimpedanz $Z_Q = (50 + j120) \Omega$ angepasst werden, dass die maximal mögliche Leistung von der Quelle zur Last übertragen wird.



- a) Bestimmen Sie für eine Speisefrequenz von $f = 100 \text{ MHz}$ die Werte für die Elemente L und C des Anpassnetzwerks.

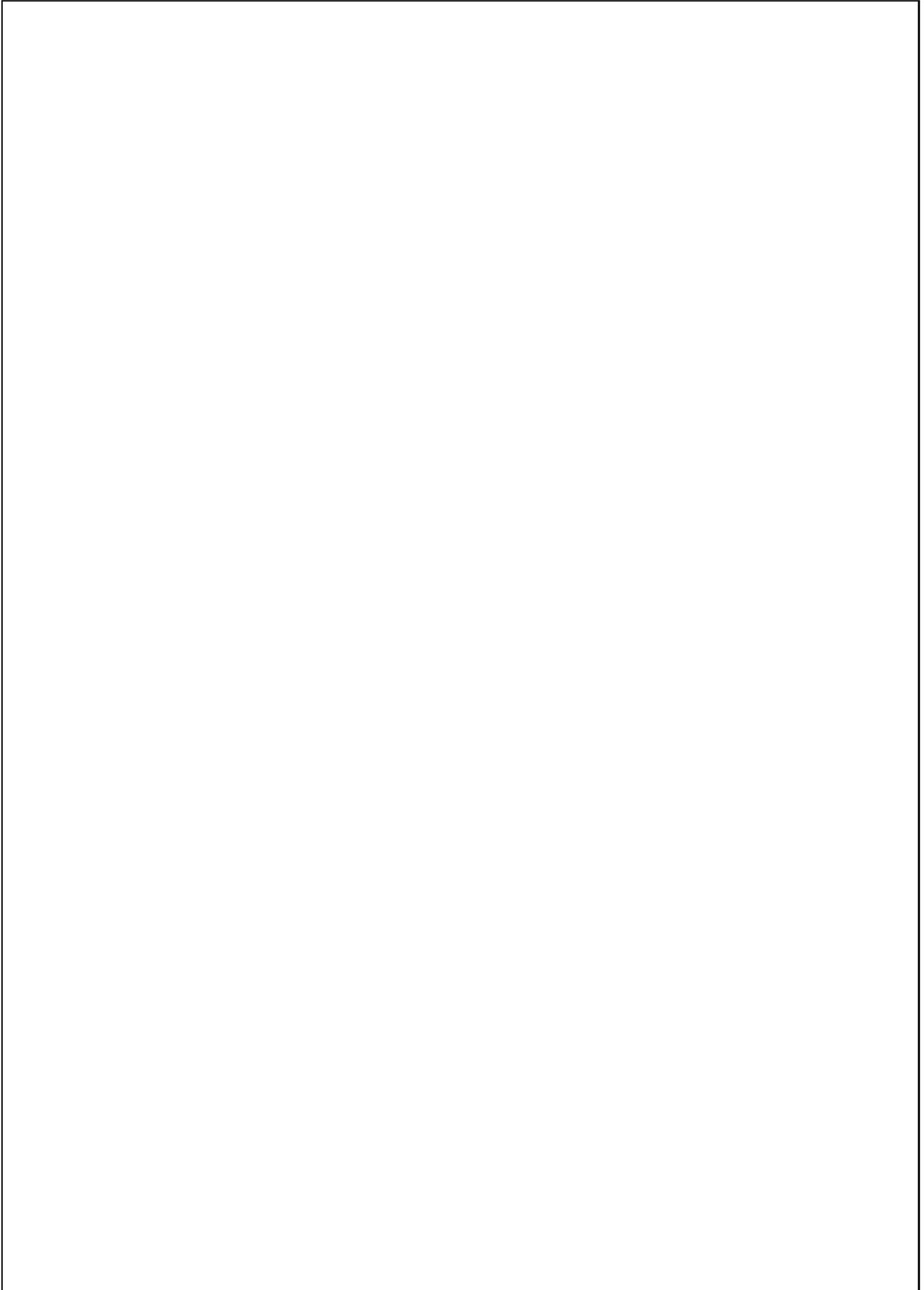
(5 P.)

Markieren Sie die einzelnen Transformationsschritte in einem Smith-Chart ($Z_B = 50 \Omega$) und begründen Sie Ihr Vorgehen. Die Zuordnung der einzelnen Transformationsschritte zu den Transformationselementen muss klar erkennbar sein.



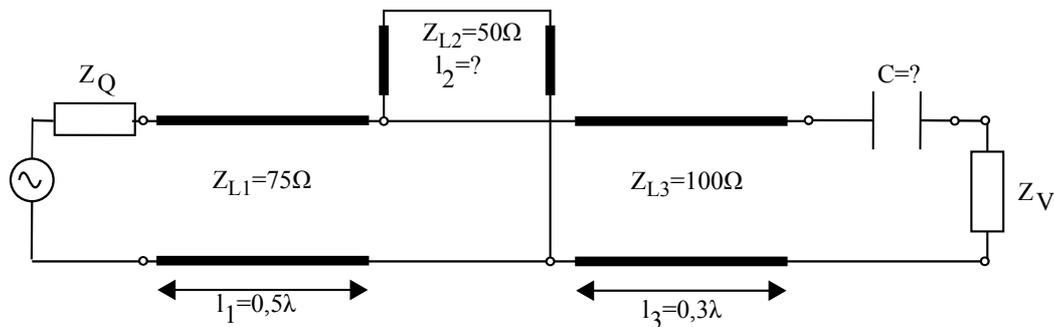
Name:
.....

Aufgabe 5



Aufgabe 5

Gegeben sei die unten skizzierte Transformationsschaltung 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.



- b) 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 Transformations-elementen muss klar erkennbar sein.

(12 P.)



Name:
.....

Aufgabe 5

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

Name:

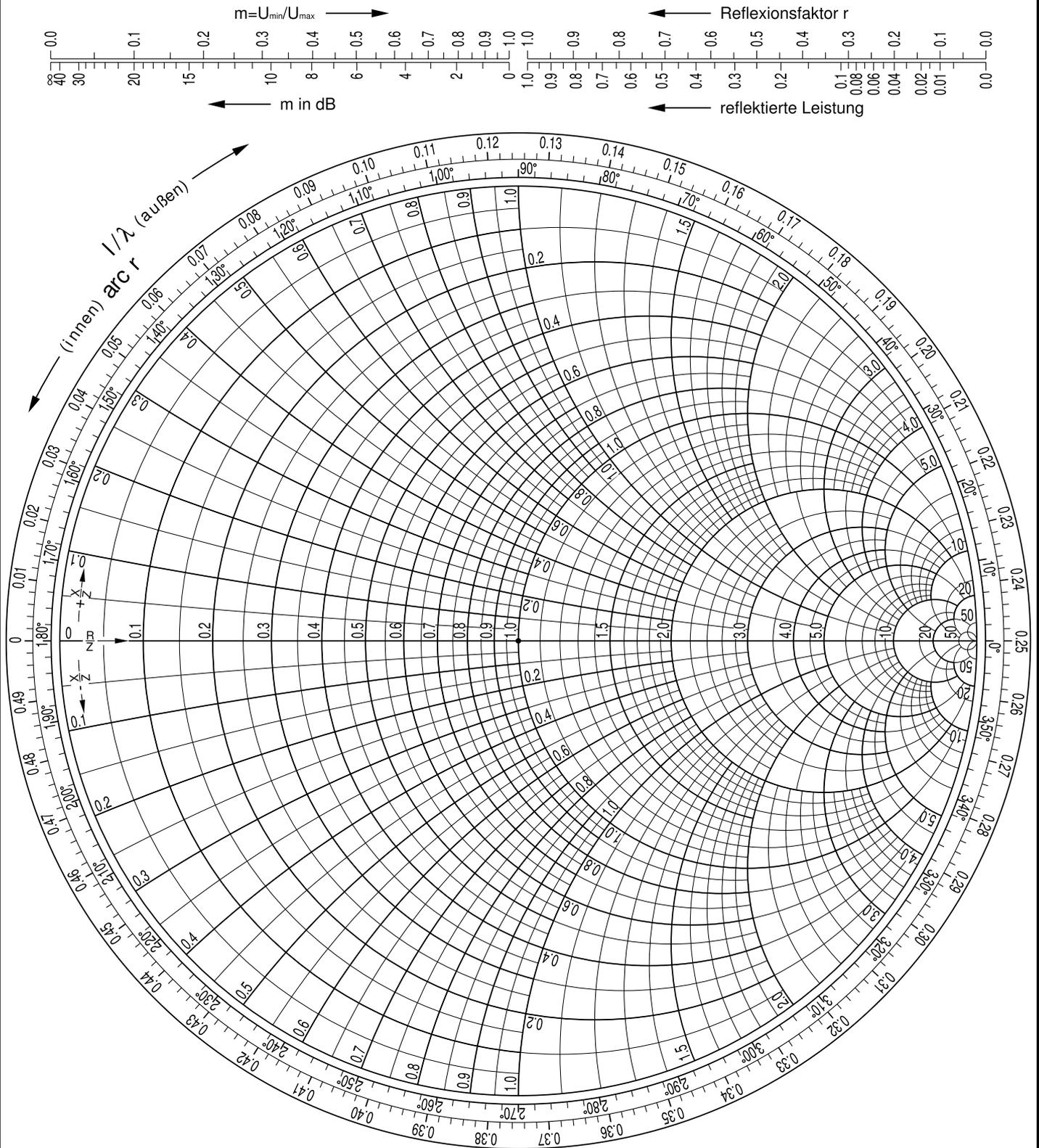
Smith-Diagramm

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:

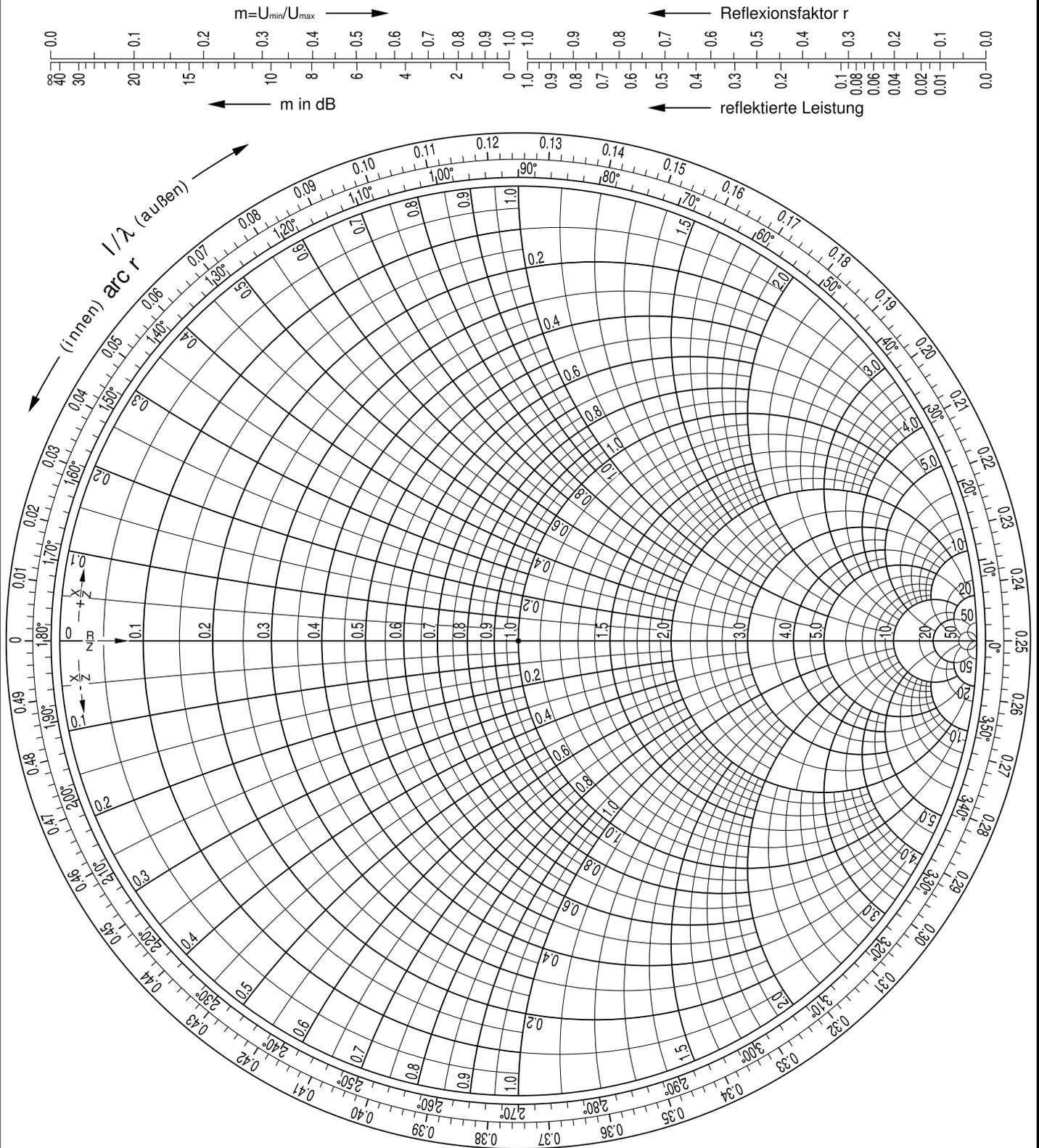
Smith-Diagramm

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:

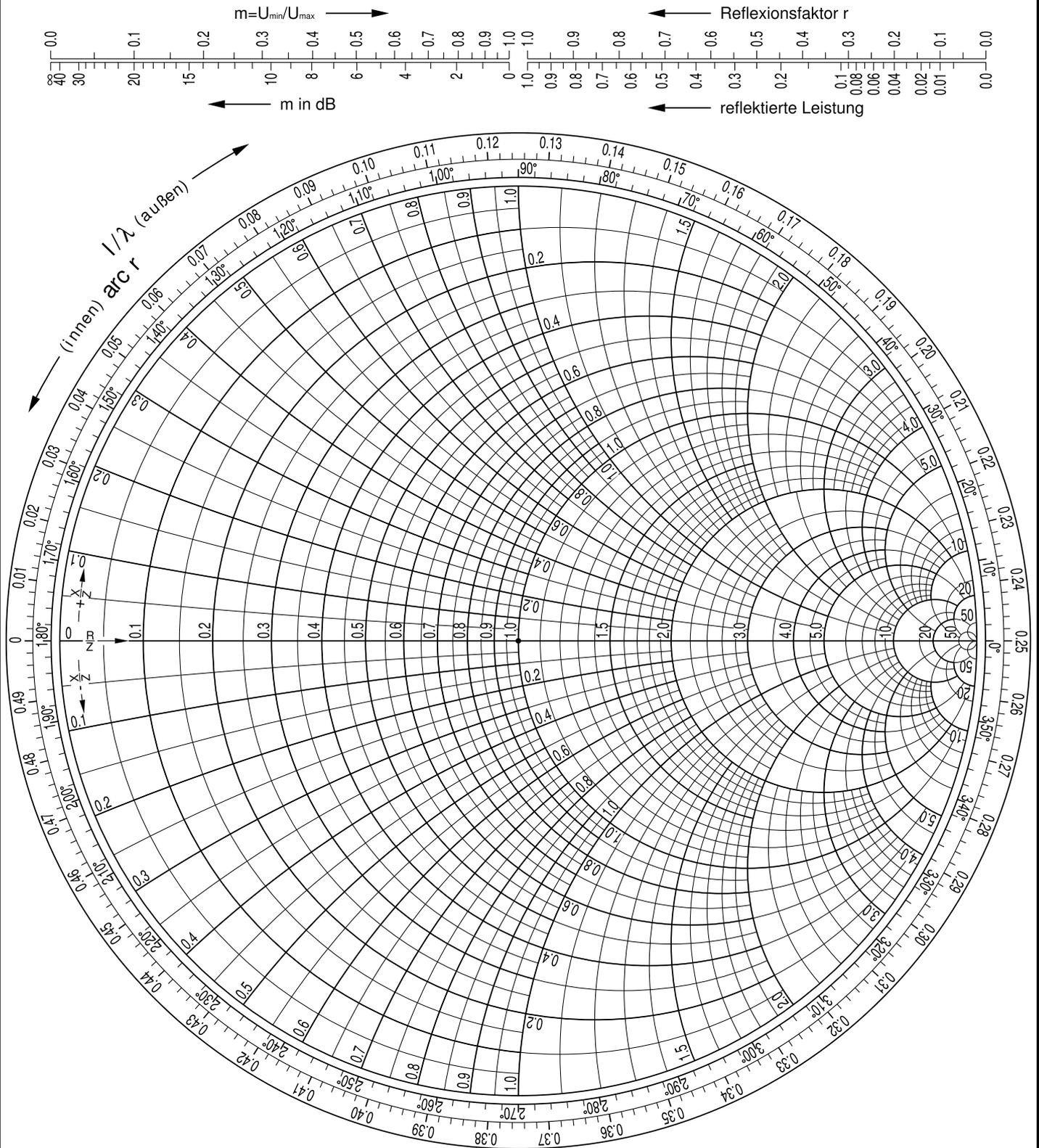
Smith-Diagramm

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:

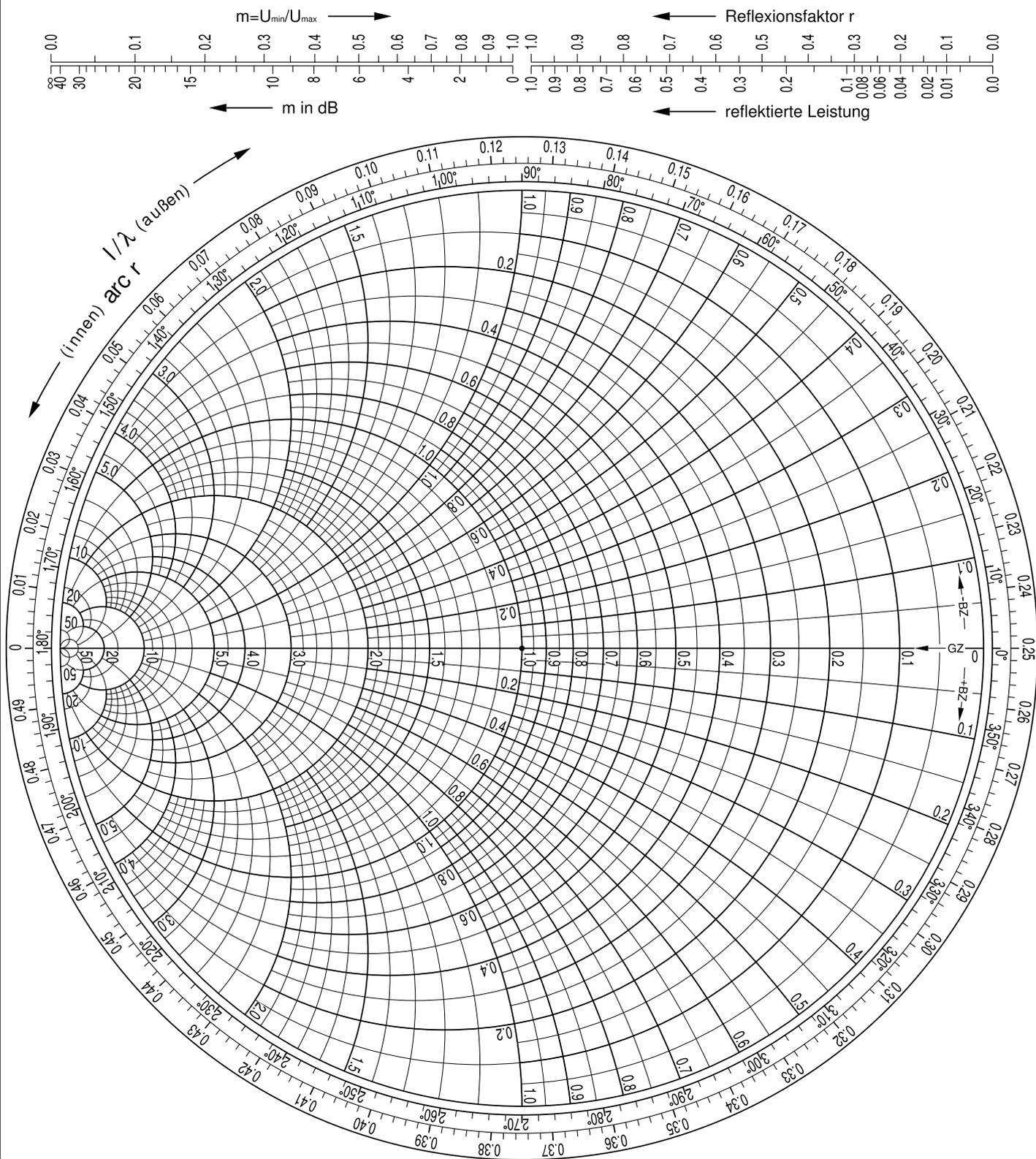
.....

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:

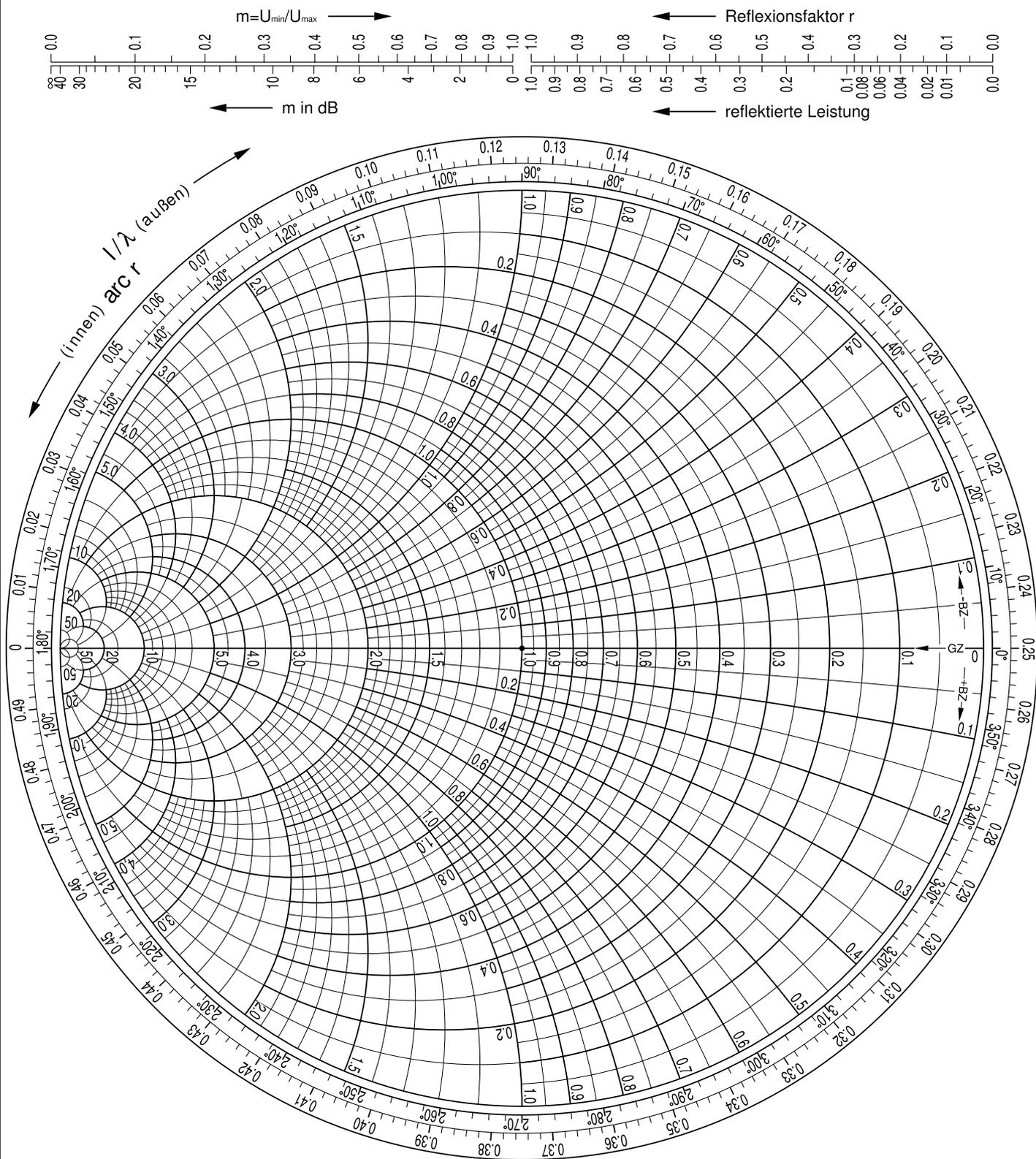
.....

Name:
.....

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:

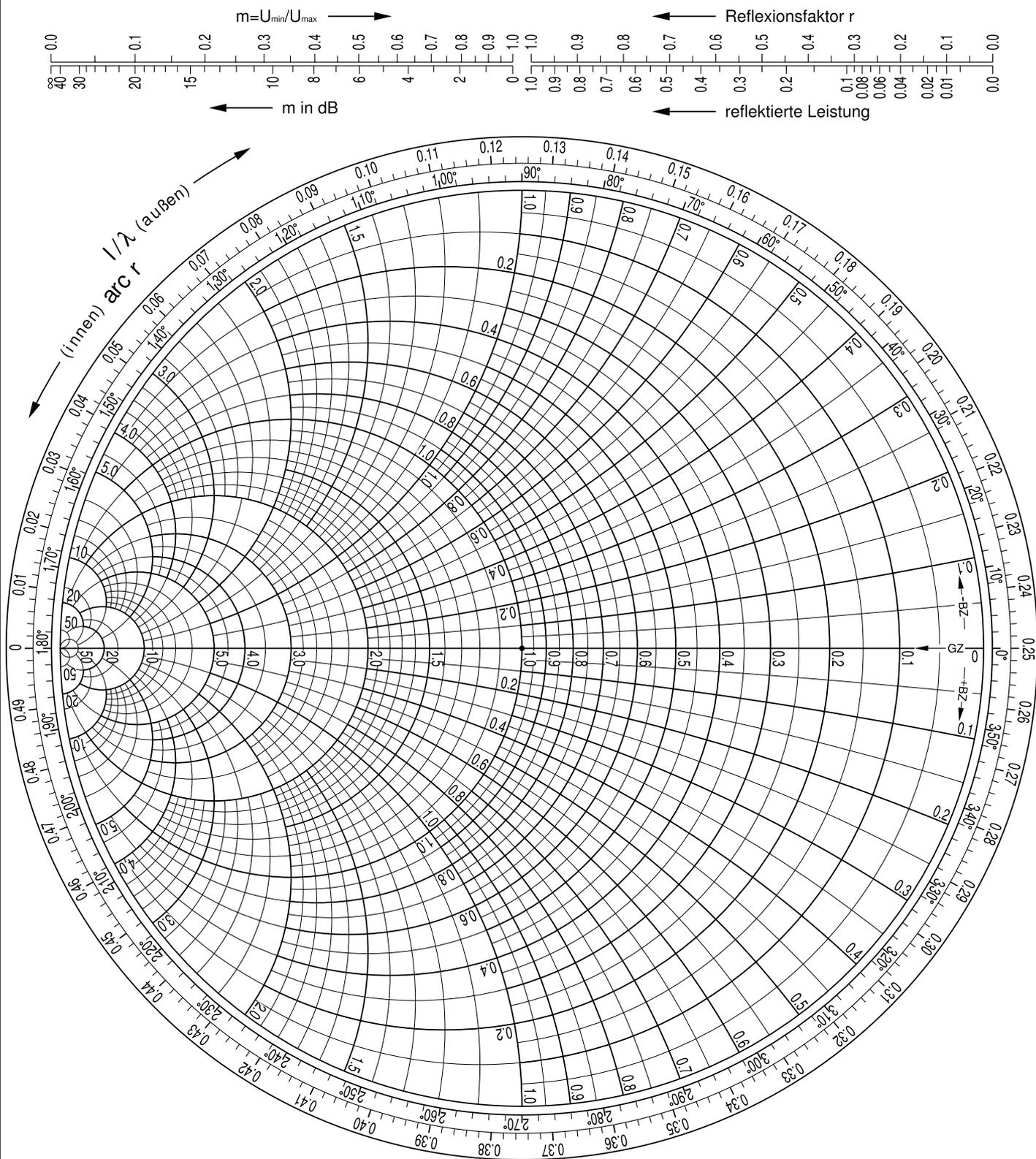
.....

Name:
.....

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:

.....

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

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

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

Hilfskonstruktion zur Transformation

$\Delta X = \frac{|Z|^2}{X_p} = -|Z|^2 \cdot B_p$

$Z_1 = Z \parallel X_p$

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

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

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

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

Koaxialleitung **ungedämpfte Leitung (homogenes Dielektrikum und konst. Querschnitt)**

$$Z_L = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \quad \beta = \omega \cdot \sqrt{L'C'} = \omega \cdot \sqrt{\mu\epsilon}; \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}; \quad C' = \frac{\sqrt{\mu\epsilon}}{Z_L}; \quad L' = Z_L \cdot \sqrt{\mu\epsilon}; \quad v_\varphi = \frac{\omega}{\beta}$$

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

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

Eindringtiefe s **Reflexionsfaktor r**

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu}} \quad \underline{r}(z) = \frac{\underline{U}_R(z)}{\underline{U}_H(z)} = \frac{\underline{b}(z)}{\underline{a}(z)} = \frac{\underline{b}(0)}{\underline{a}(0)} \cdot e^{-2\gamma z}$$

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

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

Reflexionsfaktor → Impedanz

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

Anpassungsfaktor, Stehwellenverhältnis

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

Dem Verbraucher zugeführte Wirkleistung Pw

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

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

Kugelkoordinaten

Azimuth: ψ Elevation: θ

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

Konstanten

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

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

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

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

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

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}	$\frac{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} - Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{-A + B/Z_0 - CZ_0 + D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\frac{-T_{21}}{T_{22}}$
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}