

Name:
.....

Matrikel-Nr.:
.....

Platz-Nr.:

GHF H'20
18. Juli 2020
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	18	17	17	16
erzielte Punkte					

Gesamtbewertung

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



Name:
.....

Hinweise zur Klausur

GHF H'20
18. Juli 2020
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. 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 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) 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. Achten Sie auf die korrekte Bezeichnung der Komponenten.

(2 P.)

- b) Für was steht die Abkürzung RADAR?

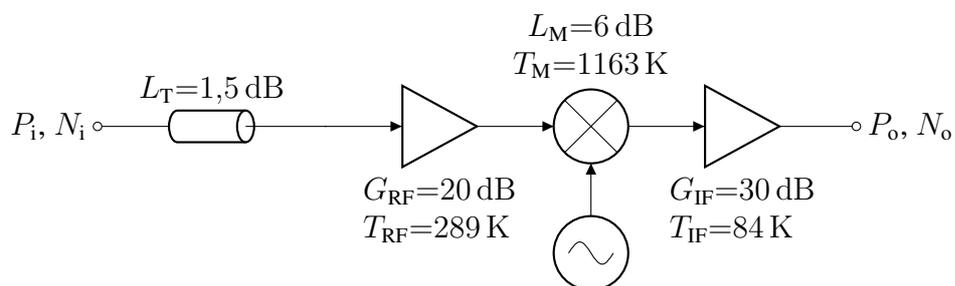
(1 P.)

- c) Welche Funktion erfüllt ein Mischer in einem Mikrowellensystem? Mit welcher Art Bauelement kann er realisiert werden?

(2 P.)

Name:
.....

Ein Mikrowellenempfänger hat folgende Parameter:



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

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

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

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

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

(2 P.)



Name:

Aufgabe 1

e) Berechnen Sie die Gesamtverstärkung und das Ausgangs-SNR in dB des Mikrowellenempfängers.

(5 P.)



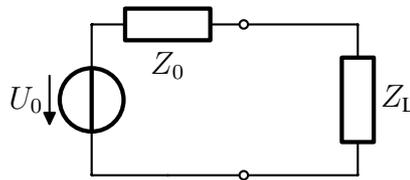
A large empty rectangular box provided for the student to write their solution to the problem.

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 1

GHF H'20
18. Juli 2020
Seite 6 von 38

Gegeben sei die unten abgebildete Wechselspannungsquelle mit Amplitude $U_0 = 2 \text{ V}$ und einem Innenwiderstand von $Z_0 = 50 \Omega$.



- f) Wie groß ist die Leistung P_0 in mW, die die Quelle bei Leistungsanpassung maximal abgeben kann?

(2 P.)



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

(3 P.)



Name:
.....

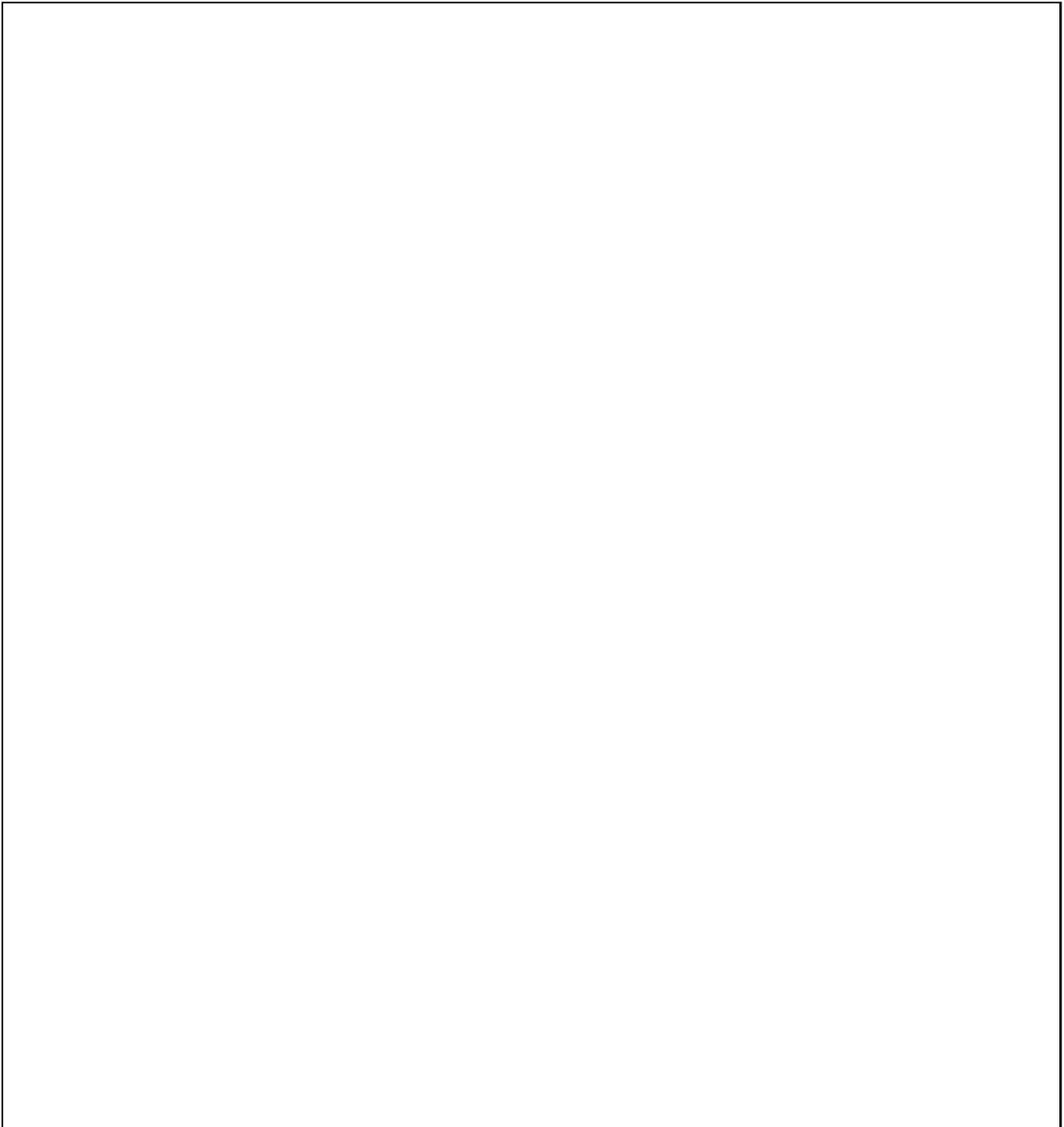
Aufgabe 2

(gesamt 18 Punkte)

Radar

- a) Zeichnen Sie die wichtigsten Komponenten eines monostatischen CW Radars in ein Blockschaltbild und beschriften Sie diese.

(4P.)



Name:
.....

- b) 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.

(5 P.)



Name:
.....

- c) Ein monostatisches FMCW-Radar soll im Automobilbereich bei 77 GHz eingesetzt werden. Die Sendeleistung beträgt $P_{Tx} = 10$ dBm und die minimale Empfangsleistung $P_{Rx} = -115$ dBm. Welcher Antennengewinn in dBi wird benötigt, damit ein Automobil mit einem RCS von $\sigma = 10 \text{ m}^2$ in 200 m Entfernung noch detektiert werden kann?

(4P.)



Name:
.....

d) Um welchen Faktor muss der Antennengewinn G vergrößert werden, wenn die maximale Reichweite R_{\max} des Radars doppelt so groß wie ursprünglich ist? Alle anderen Parameter bleiben konstant.

(2 P.)



e) Ein 24 GHz FMCW-Radar mit einer Bandbreite von $B = 500$ MHz und einer Mess- bzw. Sweeptime von $T = 2$ ms wird eingesetzt, um Messungen im Medium Luft ($\epsilon_r = 1$) durchzuführen.

(3 P.)



- Wie groß ist die Entfernungsauflösung ΔR des Radars in m?
- Wie groß ist die Dopplerauflösung Δf_D des Radars in Hz?
- Wie lang ist die Laufzeit τ vom Sender zum Empfänger für ein Objekt in 80 m Entfernung?

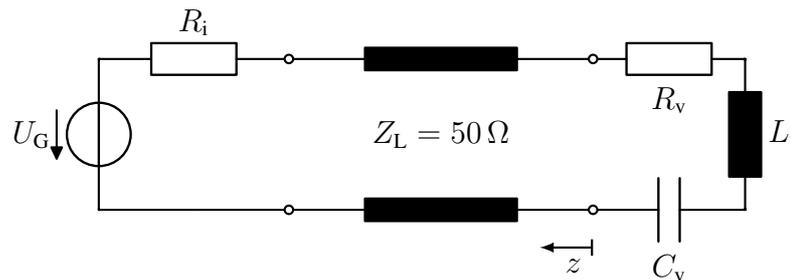
Aufgabe 3

Aufgabe 3

(gesamt 17 Punkte)

Stehende Wellen und Leitungen

Gegeben sei folgende Schaltung, in der ein Generator mit dem Innenwiderstand $R_i = Z_L$, der Leerlaufspannung U_G und mit der Frequenz $f_0 = 951,1$ MHz eine komplexe Last über eine verlustlose Luftleitung ($\epsilon_r = 1$) mit dem Wellenwiderstand Z_L speist. Die Last besteht aus einer Serienschaltung von R_v , L_v und C_v . Die Bauteilwerte sind: $C_v = 4$ pF, $L_v = 7$ nH, $R_v = 100 \Omega$.



a) Berechnen Sie die komplexe Lastimpedanz und den Reflexionsfaktor r_v

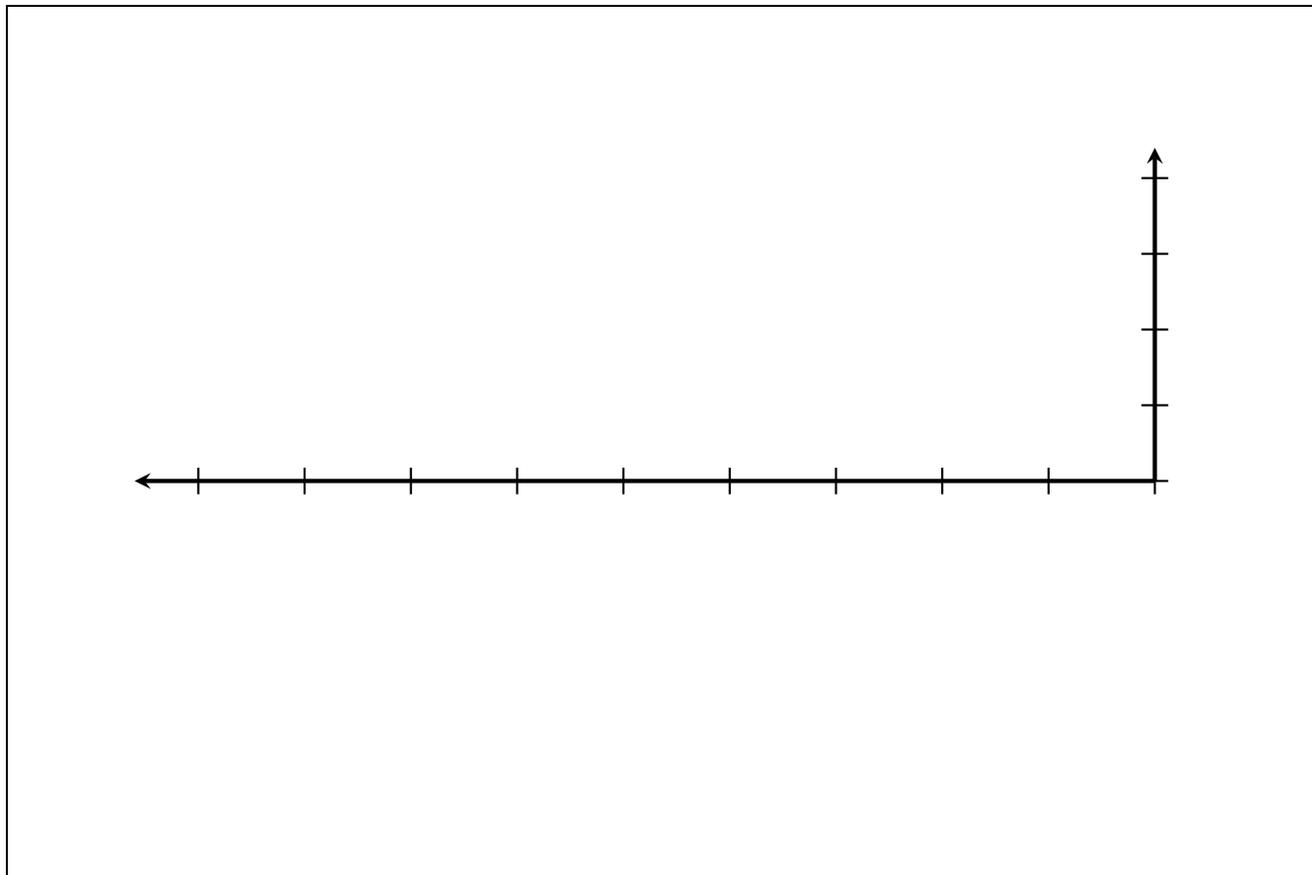
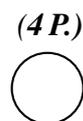
(2 P.)



Name:
.....

Aufgabe 3

- b) Zeichnen Sie die Verteilung des Betrages $|U(z)|$ (Einhüllende) der komplexen Spannungsamplitude $U(z)$ auf der Leitung in das dafür vorgesehene Diagramm ein. (4P.)
Achten Sie auf korrekte Achsenbeschriftung.

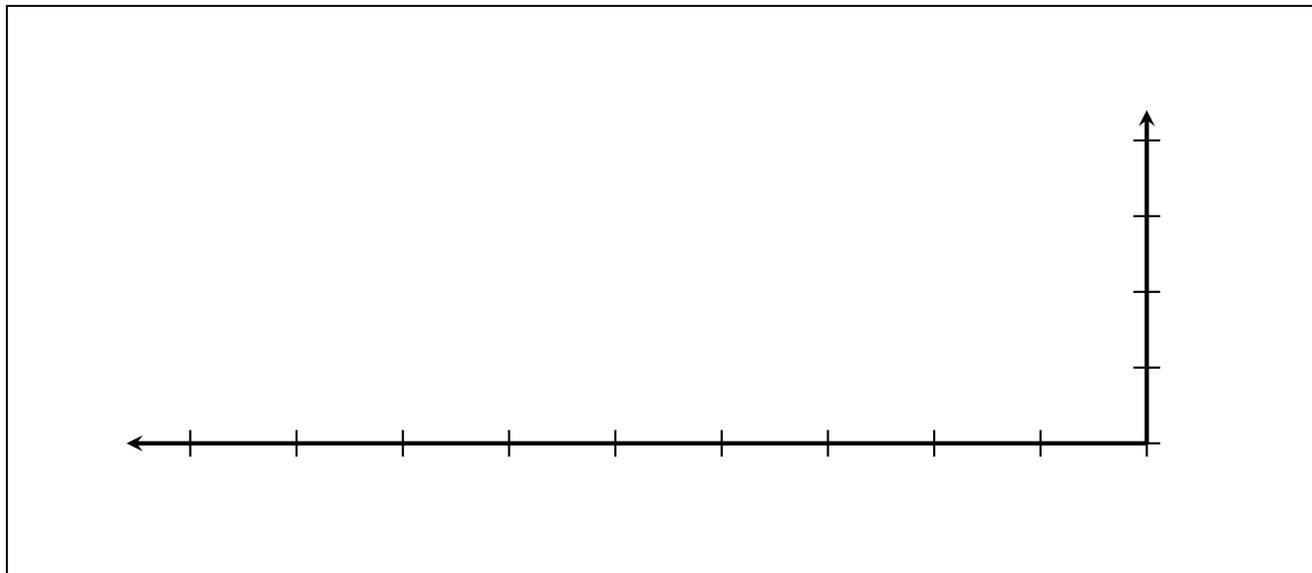


- c) An welcher Stelle tritt das erste Maximum der Einhüllenden auf, wenn sich die Frequenz zu $f_1 = 2f_0$ erhöht? (2P.)



Name:
.....

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



e) Wie ist die Übernahmefrequenz definiert? (1 P.)

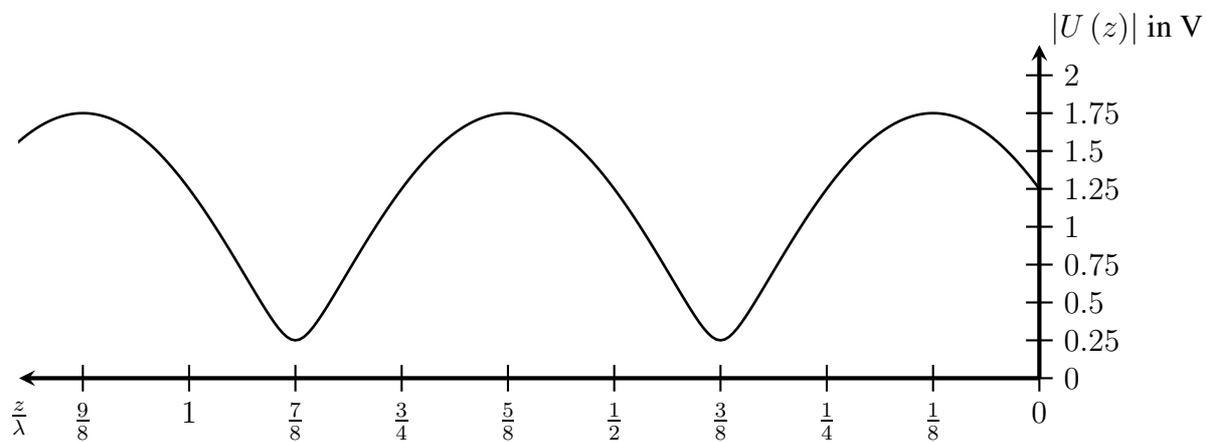
f) Gegeben sei eine am Ende offene, verlustlose Leitung mit $Z_0 = 50 \Omega$ und der Länge $l = \frac{\lambda}{12}$. Bestimmen Sie die Eingangsimpedanz der Leitung sowie den Reflexionsfaktor (bezogen auf 50Ω) am Eingang. (2 P.)

Name:
.....

Aufgabe 3

g) 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.)



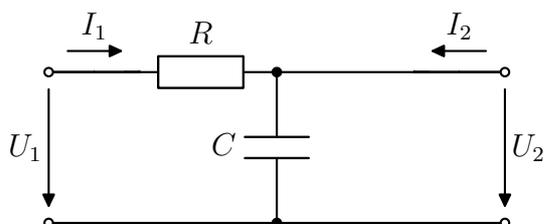
Name:
.....

Aufgabe 4

(gesamt 17 Punkte)

Mikrowellen-Netzwerkanalyse

Gegeben sei folgendes Zweitor.



a) Bestimmen Sie die $ABCD$ -Parameter des Zweitors.

(6 P.)

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 4

GHF H'20
18. Juli 2020
Seite 16 von 38

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

(1P.)

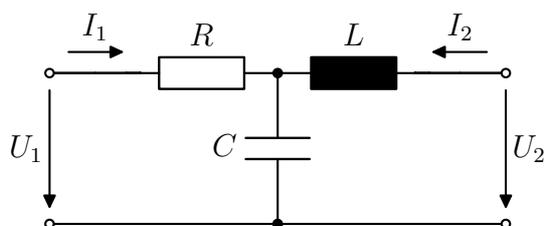


c) Berechnen Sie den Parameter D der $ABCD$ -Matrix der folgenden Schaltung. Die $ABCD$ -Matrix einer seriellen Spule ist

(2P.)



$$[A_L] = \begin{pmatrix} 1 & j\omega L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

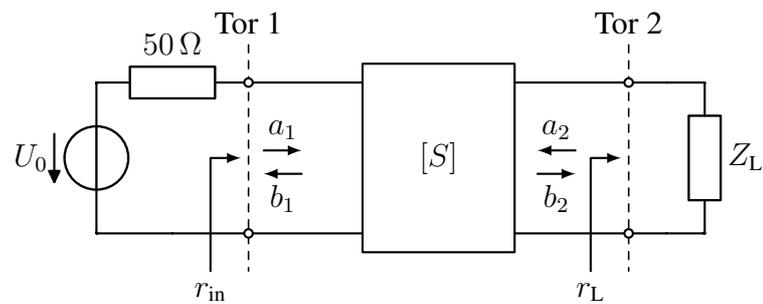


Aufgabe 4

- d) Berechnen Sie r_{in} und Z_{in} der folgenden Schaltung. Die Lastimpedanz beträgt $Z_L = 100 \Omega$.
Das Zweitor folgende Matrix mit Bezug 50Ω :

(4P.)

$$S = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,02 \\ 15 & 0 \end{bmatrix}$$



Name:

Aufgabe 4

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

(4P.)

- Das Zweitor ist verlustfrei.
- Der Eingang (Tor 1) reflektiert 10 % der Eingangsleistung.
- 70 % der an Tor 2 eingespeisten Leistung wird an Tor 1 abgegeben.



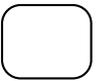
Begründen Sie ihre Antwort.

Name:
.....

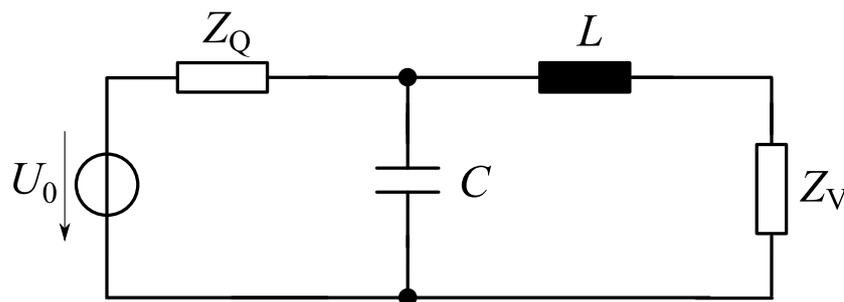
Aufgabe 5

(gesamt 16 Punkte)

Smithdiagramm



Mithilfe des unten gezeigten Netzwerks soll die Lastimpedanz $Z_V = (150 + j100) \Omega$ so an die Quellimpedanz $Z_Q = (100 + j240) \Omega$ angepasst werden, dass die maximal mögliche Leistung von der Quelle zur Last übertragen wird.



- a) Bestimmen Sie für eine Speisefrequenz von $f = 100 \text{ kHz}$ die Werte für die Elemente L und C des Anpassnetzwerks. Markieren Sie die einzelnen Transformationsschritte in einem Smithchart ($Z_B = 100 \Omega$) und begründen Sie Ihr Vorgehen. Die Zuordnung der einzelnen Transformationsschritte zu den Transformationselementen muss klar erkennbar sein.

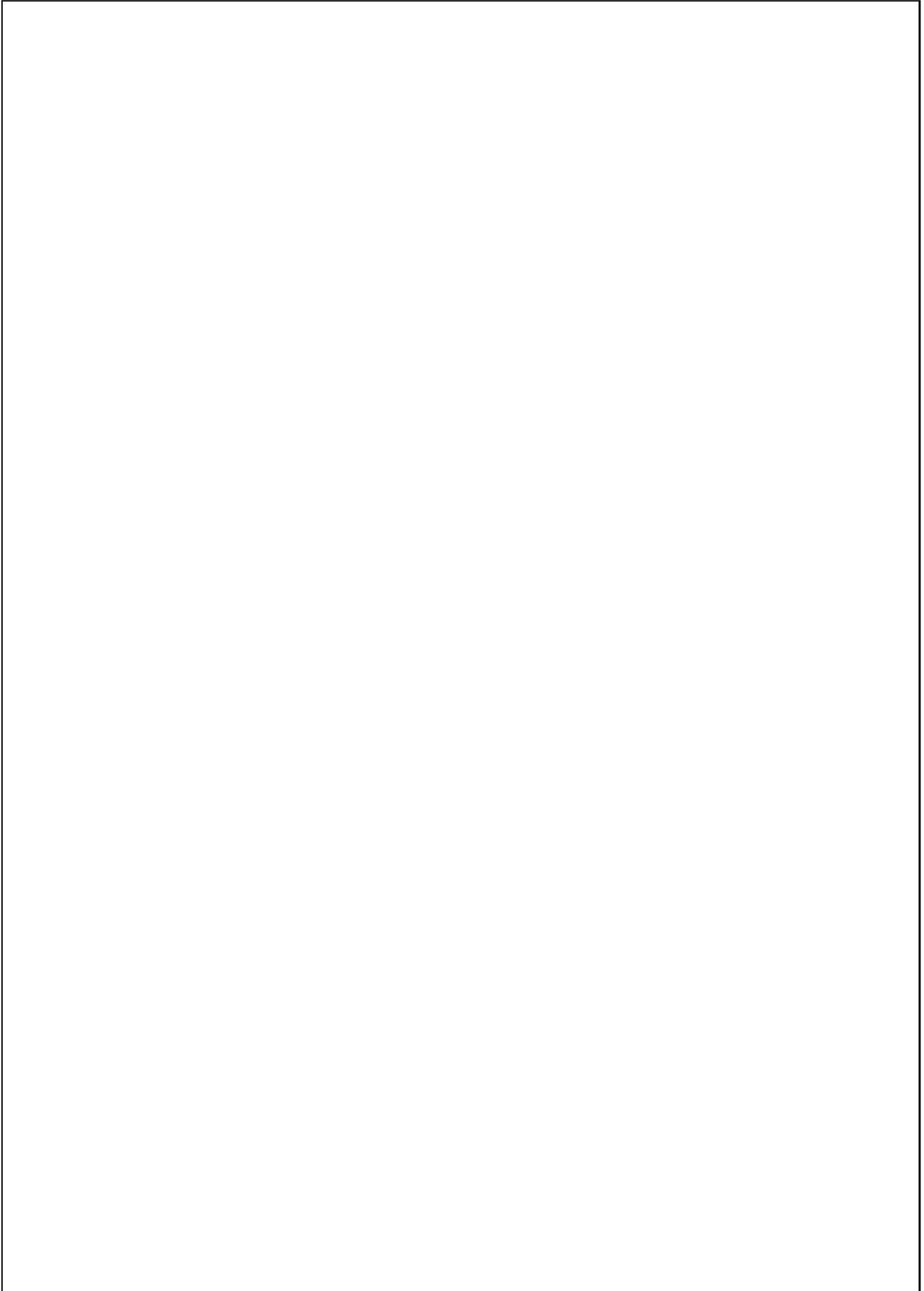
(5 P.)



Name:

.....

Aufgabe 5

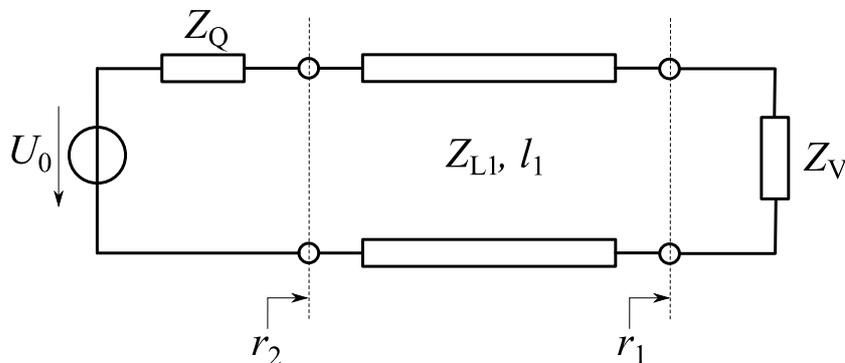


Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 5

GHF H'20
18. Juli 2020
Seite 21 von 38

Gegeben sei das abgebildete Netzwerk, das aus einer Lastimpedanz $Z_V = 500 \Omega$, einer Quellimpedanz $Z_Q = 20 \Omega$ und einer Anpassleitung mit $Z_{L1} = 100 \Omega$ und $l_1 = \lambda/4$ besteht.



- b) Wählen Sie eine geeignete Bezugsimpedanz und zeichnen Sie die normierte Start- & Zielimpedanz sowie die Impedanztransformation durch die Anpassleitung in ein Smithdiagramm ein. Bestimmen Sie aus dem Smithdiagramm die Reflexionsfaktoren r_1 und r_2 .

(4P.)



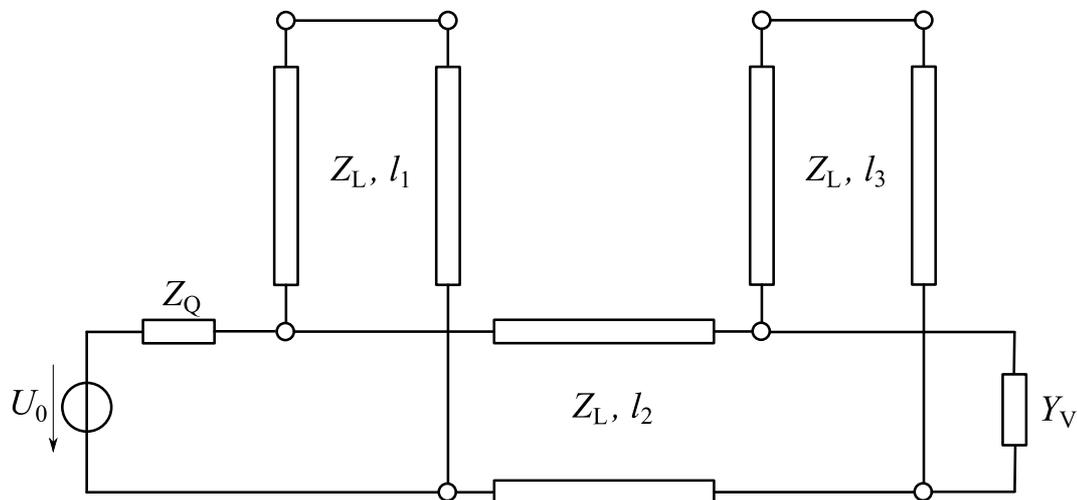
Empty box for the student's solution to part b), including the Smith diagram and calculations for reflection coefficients.

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 5

GHF H'20
18. Juli 2020
Seite 22 von 38

Die unten gezeigte Leitungsanordnung wird dazu genutzt, die Lastadmittanz $Y_V = (0,01 - j0,006) \text{ S}$ 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.



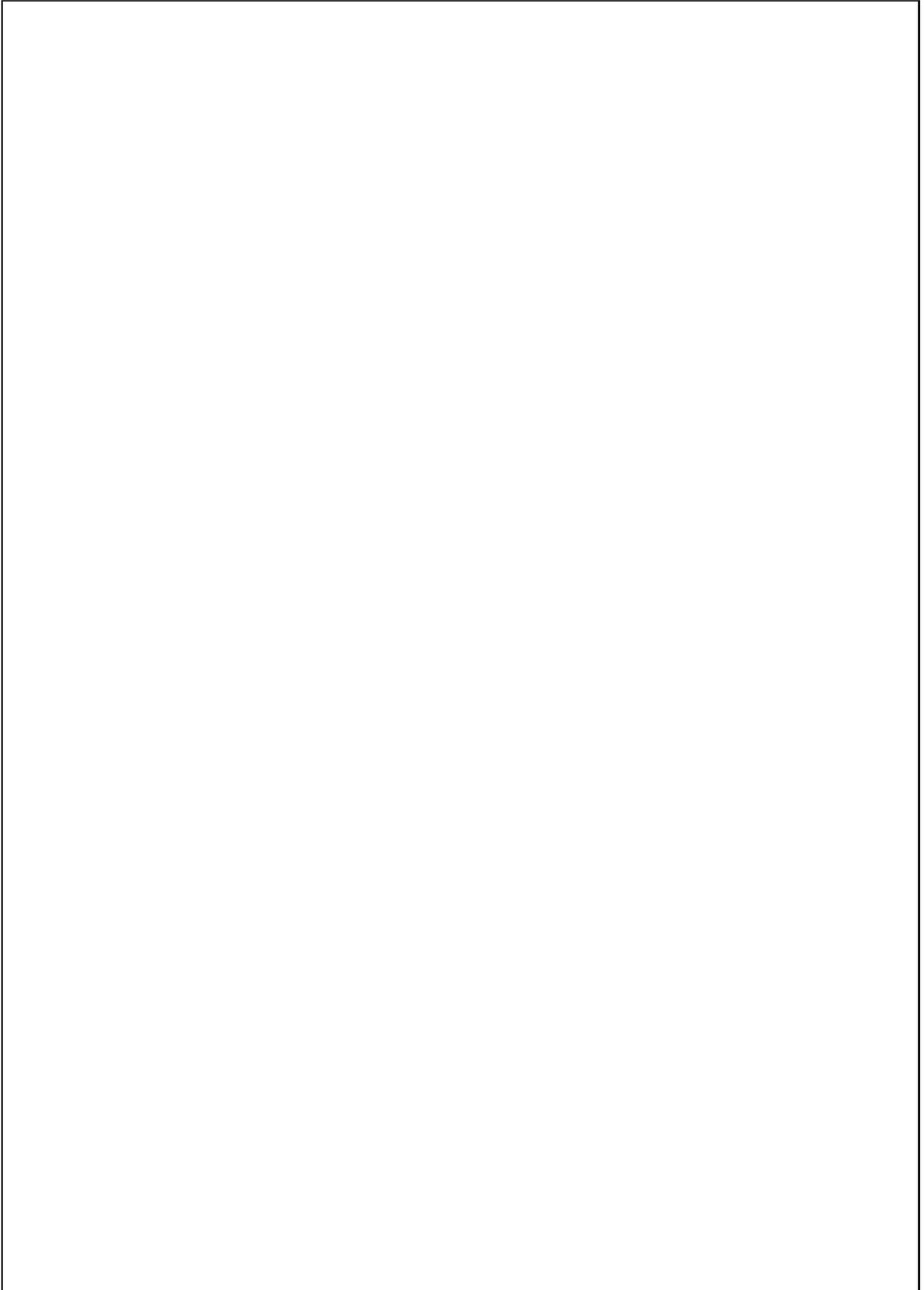
- c) Bestimmen Sie mithilfe des Smithcharts die Länge l_2/λ , sodass die Lastadmittanz optimal an den Quellwiderstand angepasst ist. Markieren Sie die einzelnen Transformationsschritte in einem Smithchart und begründen Sie Ihr Vorgehen. Die Zuordnung der einzelnen Transformationsschritte zu den Transformationselementen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

(7P.)



Name:
.....

Aufgabe 5



Name:

.....

Name:

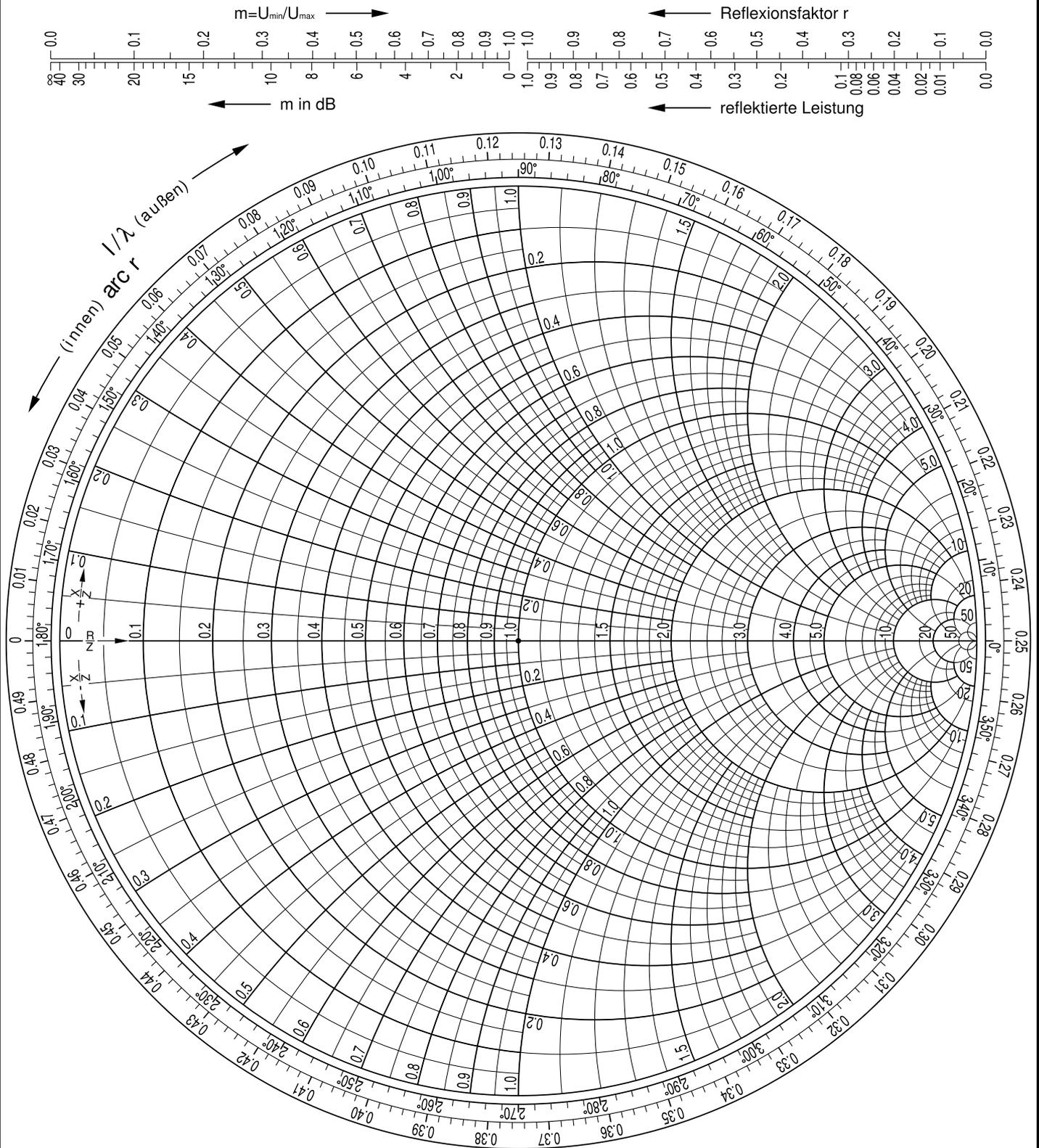
Smith-Diagramm

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:

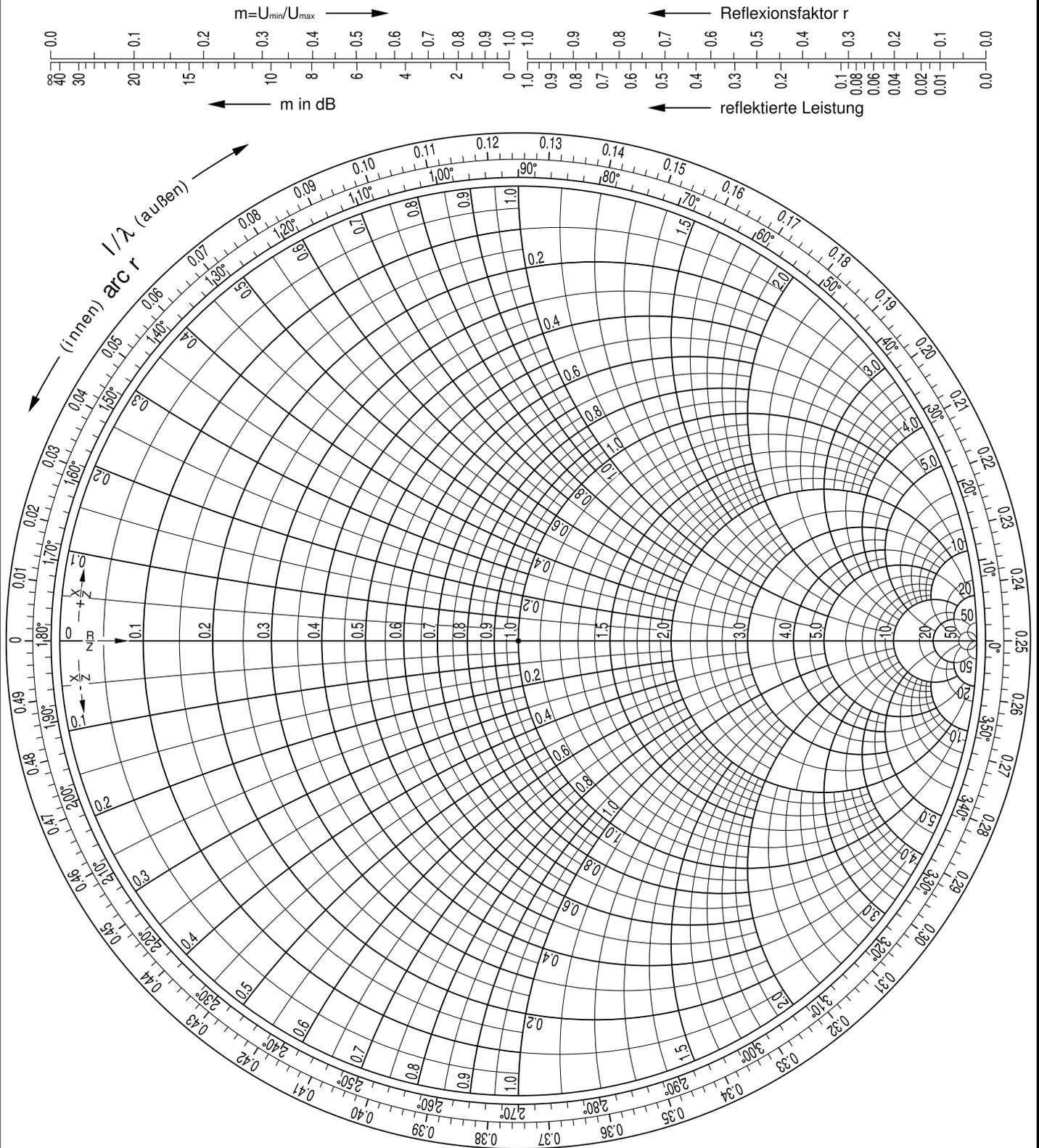
Smith-Diagramm

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:

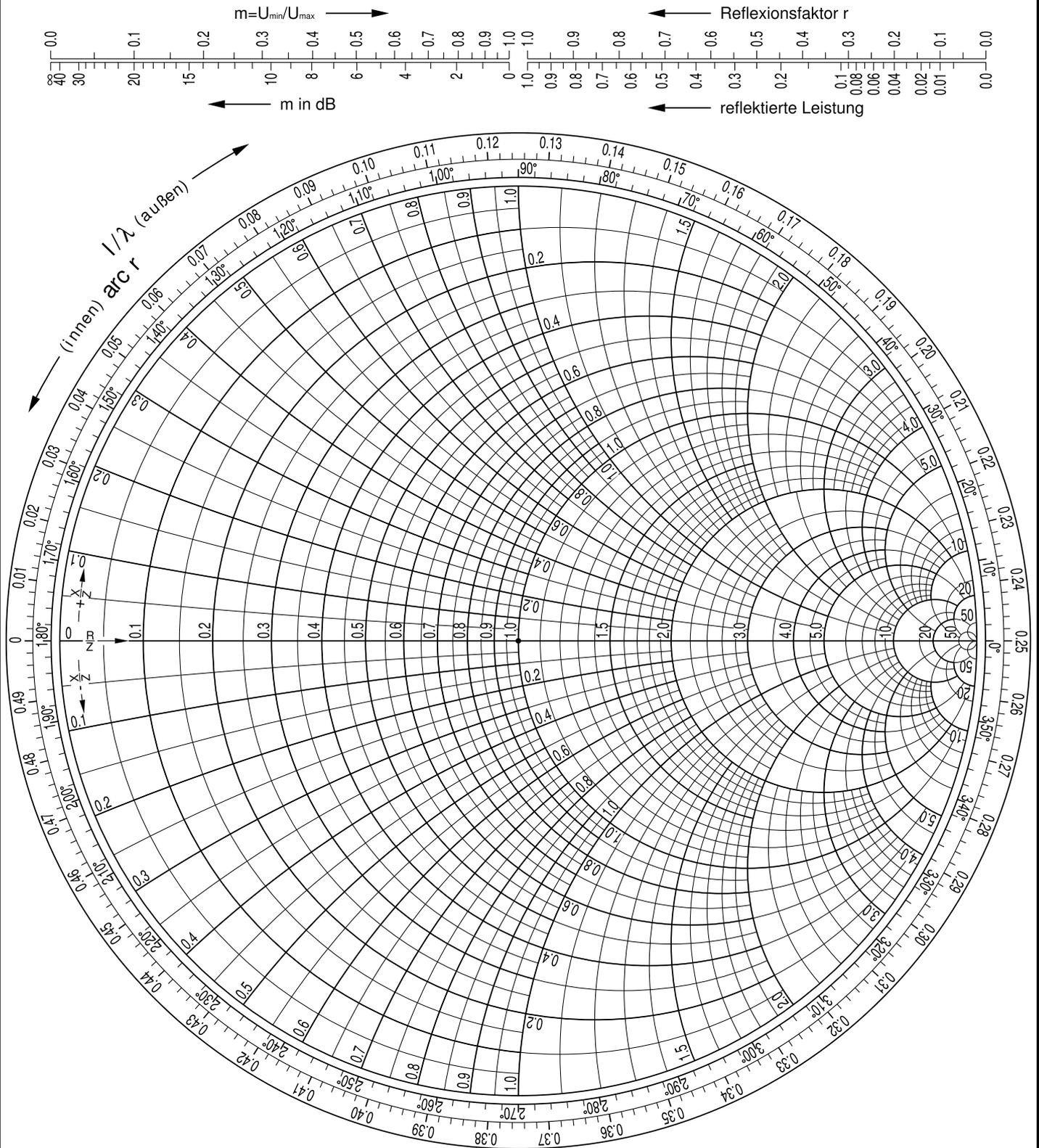
Smith-Diagramm

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:

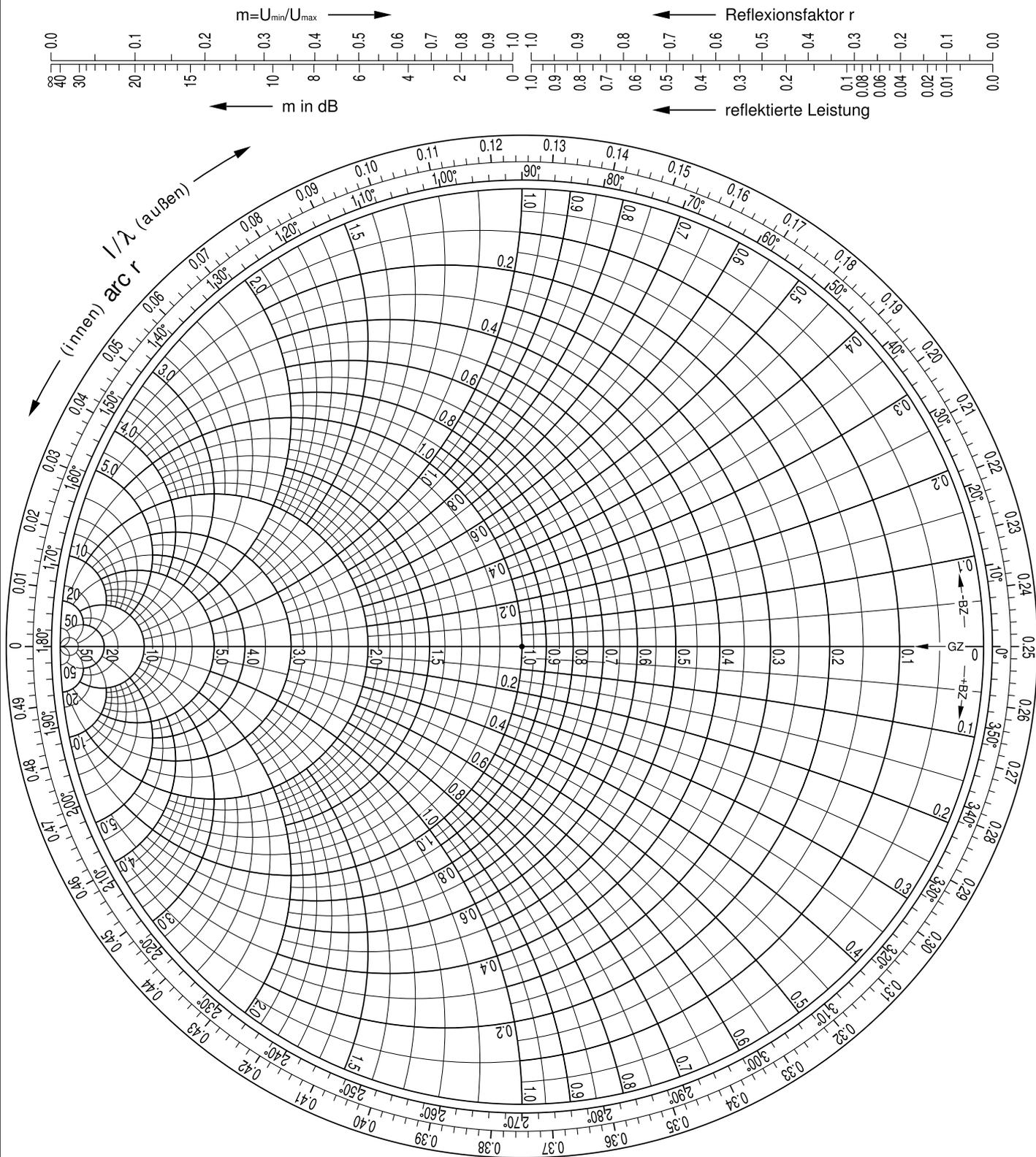
.....

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:

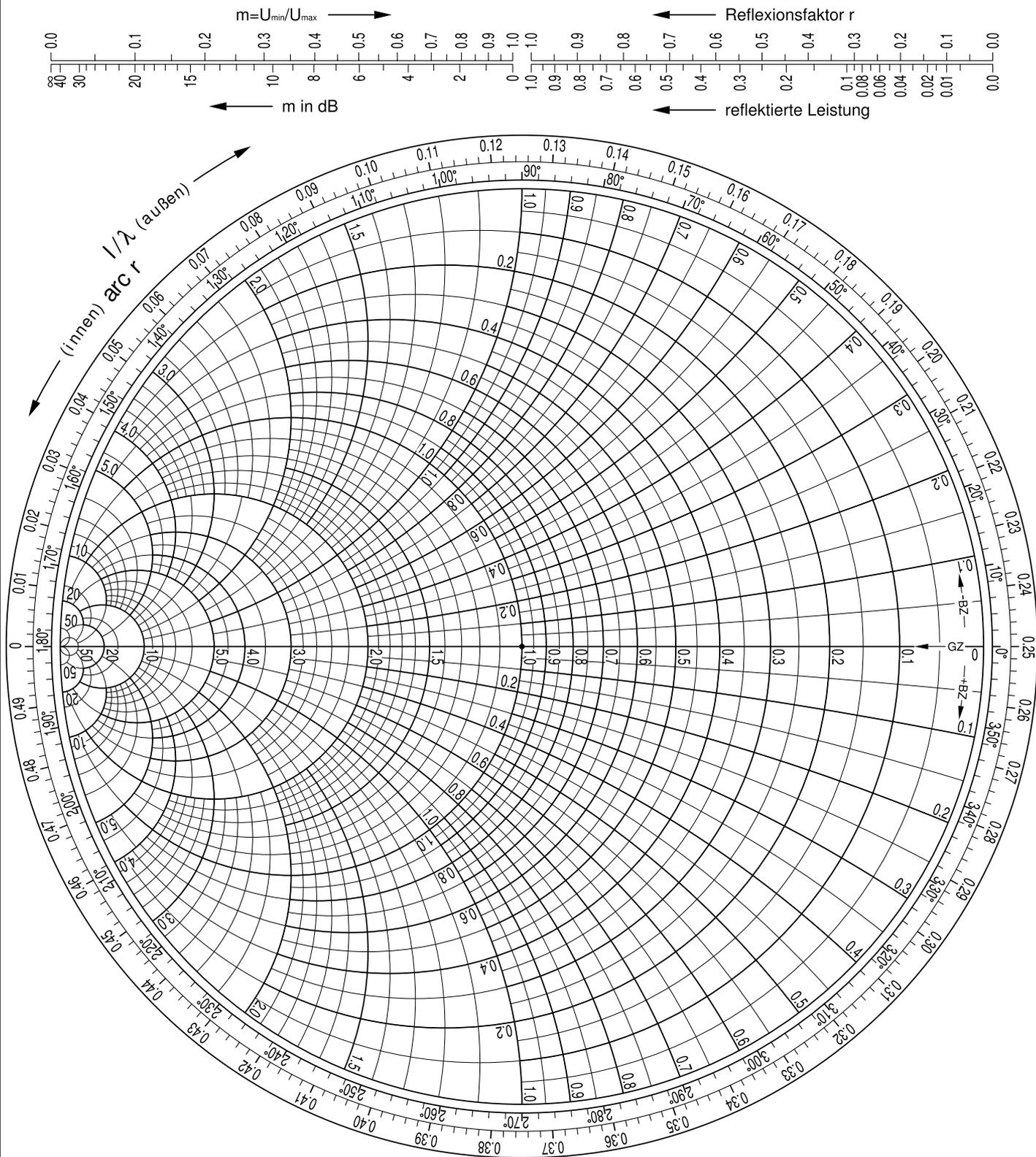
.....

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:

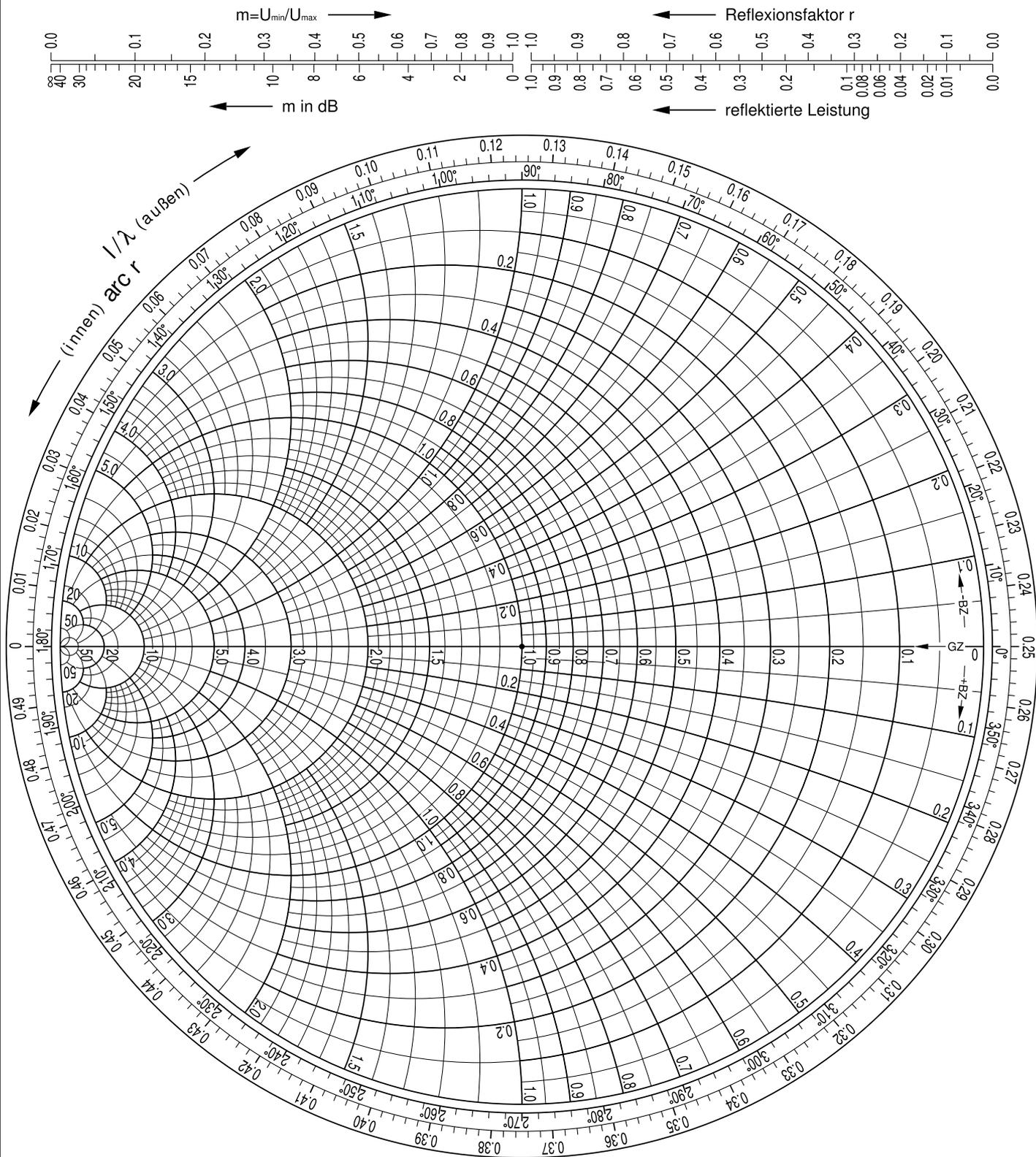
.....

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik Smith-Diagramm

zugehörige
Aufgabennummer:

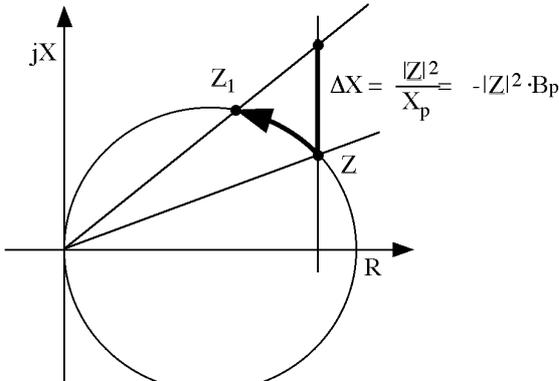
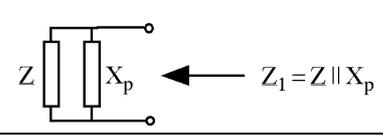
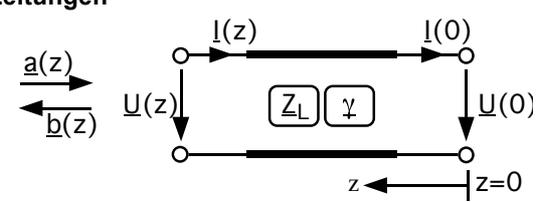
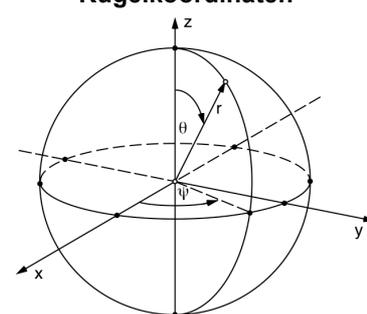
Leitwertform
Bezugswiderstand $Z_B =$ _____



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

Name:

.....

<p style="text-align: center;">Impedanz $\xleftrightarrow{Z=Y}$ Admittanz</p> $\underline{Z} = R + jX \quad \underline{Y} = G + jB$ $\underline{Z} = \frac{G}{G^2 + B^2} - j \frac{B}{G^2 + B^2} \quad \underline{Y} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}$	<p style="text-align: center;">Hilfskonstruktion zur Transformation</p> 
<p style="text-align: center;">Kompensation mit dualen Elementen</p>  <p>Bedingungen für Kompensation: $X_s = R^2 \cdot B_p$ Frequenzfaktor: $F(f) = \sqrt{X_s \cdot B_p}$ krit. Frequenz, Grenzfrequenz: $F(f_k) = 1$</p>	
<p>Leitungen</p>  <p style="text-align: right;"> $\underline{U}(z) = \underline{U}_H(0)e^{jz} + \underline{U}_R(0)e^{-jz} = \sqrt{Z_L}(\underline{a}(z) + \underline{b}(z))$ $\underline{I}(z) = \frac{\underline{U}_H(0)}{Z_L}e^{jz} - \frac{\underline{U}_R(0)}{Z_L}e^{-jz} = \frac{1}{\sqrt{Z_L}}(\underline{a}(z) - \underline{b}(z))$ $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}; \quad \underline{Z}_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$ </p>	<p>Koaxialleitung</p> $\underline{Z}_L = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$
<p>ungedämpfte Leitung (homogenes Dielektrikum und konst. Querschnitt)</p> $\beta = \omega \cdot \sqrt{L' C'} = \omega \cdot \sqrt{\mu \epsilon}; \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}; \quad C' = \frac{\sqrt{\mu \epsilon}}{Z_L}; \quad L' = Z_L \cdot \sqrt{\mu \epsilon}; \quad v_\varphi = \frac{\omega}{\beta}$	<p>Dämpfung einer Leitung der Länge l (für hinlaufende Welle a)</p> $D/\text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_a(l)}{P_a(0)}\right) = 10 \cdot \log(e^{2\alpha l})$
<p>schwach gedämpfte Leitungen ($R' \ll \omega L'; G' \ll \omega C'$)</p> $\alpha \approx \frac{1}{2} \left(\frac{R'}{Z_L} + G' \cdot Z_L \right); \quad G' = \omega C' \cdot \tan(\delta_c); \quad R' \sim \frac{1}{\kappa \cdot s}$	<p style="text-align: center;">Reflexionsfaktor \underline{r}</p> $\underline{r}(z) = \frac{\underline{U}_R(z)}{\underline{U}_H(z)} = \frac{\underline{b}(z)}{\underline{a}(z)} = \frac{\underline{b}(0)}{\underline{a}(0)} \cdot e^{-2jz}$
<p>Eindringtiefe s</p> $s = \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu}}$	<p style="text-align: center;">Reflexionsfaktor \rightarrow Impedanz</p> $\underline{r}(l) = \frac{\underline{Z}(l) - \underline{Z}_L}{\underline{Z}(l) + \underline{Z}_L}; \quad \underline{Z}(l) = \frac{\underline{U}(l)}{\underline{I}(l)} = \frac{1 + \underline{r}(l)}{1 - \underline{r}(l)} \cdot \underline{Z}_L$
<p>Anpassungsfaktor, Stehwellenverhältnis</p> $m = \frac{1}{\text{VSWR}} = \frac{1 - \underline{r} }{1 + \underline{r} } = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}$	<p>Dem Verbraucher zugeführte Wirkleistung P_w</p> <p>mit: $\underline{a}(z) = \frac{\underline{U}_H(z)}{\sqrt{Z_L}} = \sqrt{Z_L} \cdot \underline{I}_H(z)$</p> $P_w = P_a(0) - P_b(0) = \frac{1}{2} (\underline{a}(0) ^2 - \underline{b}(0) ^2) = \frac{1}{2} \underline{a}(0) ^2 \cdot (1 - \underline{r}(0) ^2)$
<p>Transformation durch Kettenschaltung einer Leitung</p> $\underline{Z}(l) = \underline{Z}_L \cdot \frac{\underline{Z}(0) + \underline{Z}_L \tanh(j\gamma l)}{\underline{Z}_L + \underline{Z}(0) \tanh(j\gamma l)} = \underline{Z}(0) \cdot \frac{1 + j \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}(0)} \tan(\beta l)}{1 + j \frac{\underline{Z}(0)}{\underline{Z}_L} \tan(\beta l)} \Big _{\alpha=0}$	<p style="text-align: center;">Kugelkoordinaten</p>  <p style="text-align: center;">Azimuth: ψ Elevation: θ Volumen: $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ Oberfläche: $F = 4 \pi r^2$</p>
<p style="text-align: center;">Konstanten</p> $Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 120\pi \Omega$ $c_o = 2,997925 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$	$k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$ $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$ $\epsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Formelblatt Zweitorparameter

GHF H'20
18. Juli 2020
Seite 38 von 38

	[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}