

Name:
.....

Matrikel-Nr.:
.....

Platz-Nr.:

GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 1 von 32

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	16	18	17
erzielte Punkte					

Gesamtbewertung

Punkte maximal:	Gesamtpunkte:	Bonus:	Note:
85		Ja: ☐ Nein: ☐	



Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Name:
.....

Hinweise
zur Klausur

GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 2 von 32

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 32 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) Welche Funktion erfüllt ein Zirkulator in einem monostatischen Radarsystem?
Handelt es sich bei einem Zirkulator um ein reziprokes oder nichtreziprokes Bauelement?
Begründen Sie kurz.

(2 P.)

☐

- b) Einem Mischer werden die beiden Signale $s_1(t) = A_1 \cdot \cos(2\pi \cdot 2,5 \text{ GHz} \cdot t - \frac{\pi}{4})$ und $s_2(t) = A_2 \cdot \sin(2\pi \cdot 2,4 \text{ GHz} \cdot t)$ zugeführt. Bei welchen Frequenzen befinden sich die Intermodulations- bzw. Mischprodukte 3. Ordnung (Hinweis: Es sind 4 Frequenzen einschließlich Rechenweg gesucht.)?

(4 P.)

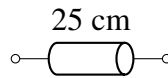
☐

Name:

Aufgabe 1

- c) Geben Sie die S-Matrix einer verlustlosen Leitung ($\epsilon_r = 1$) an, die eine Länge von $l = 25$ cm aufweist und bei einer Frequenz von $f = 4$ GHz betrieben wird. Der Wellenwiderstand der Leitung entspricht dabei dem Bezugswiderstand der S-Parameter.

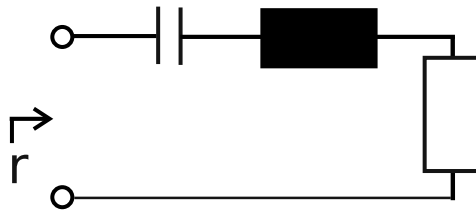
(2 P.)



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

- d) Gegeben ist folgender Schaltkreis:

(3 P.)

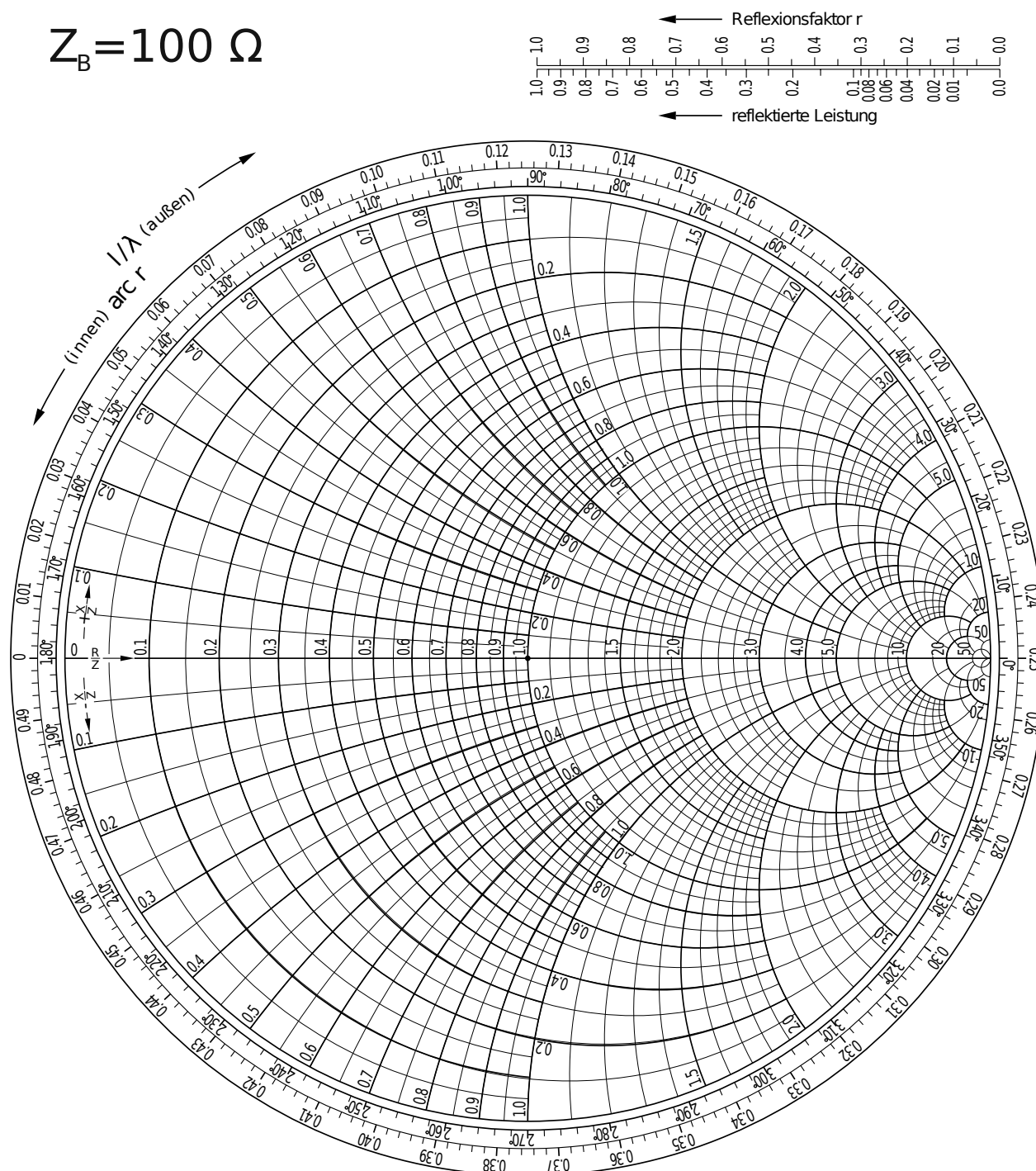


$$C = 5 \text{ pF}, L = 10 \text{ nH}, R = 80 \Omega$$

Zeichnen Sie den Verlauf des Reflexionsfaktors von $f = 0$ bis $f \rightarrow \infty$ in das gegebene Smithdiagramm für einen Bezugswiderstand von $Z_B = 100 \Omega$ ein und kennzeichnen Sie die Umlaufrichtung für zunehmende Frequenzen.

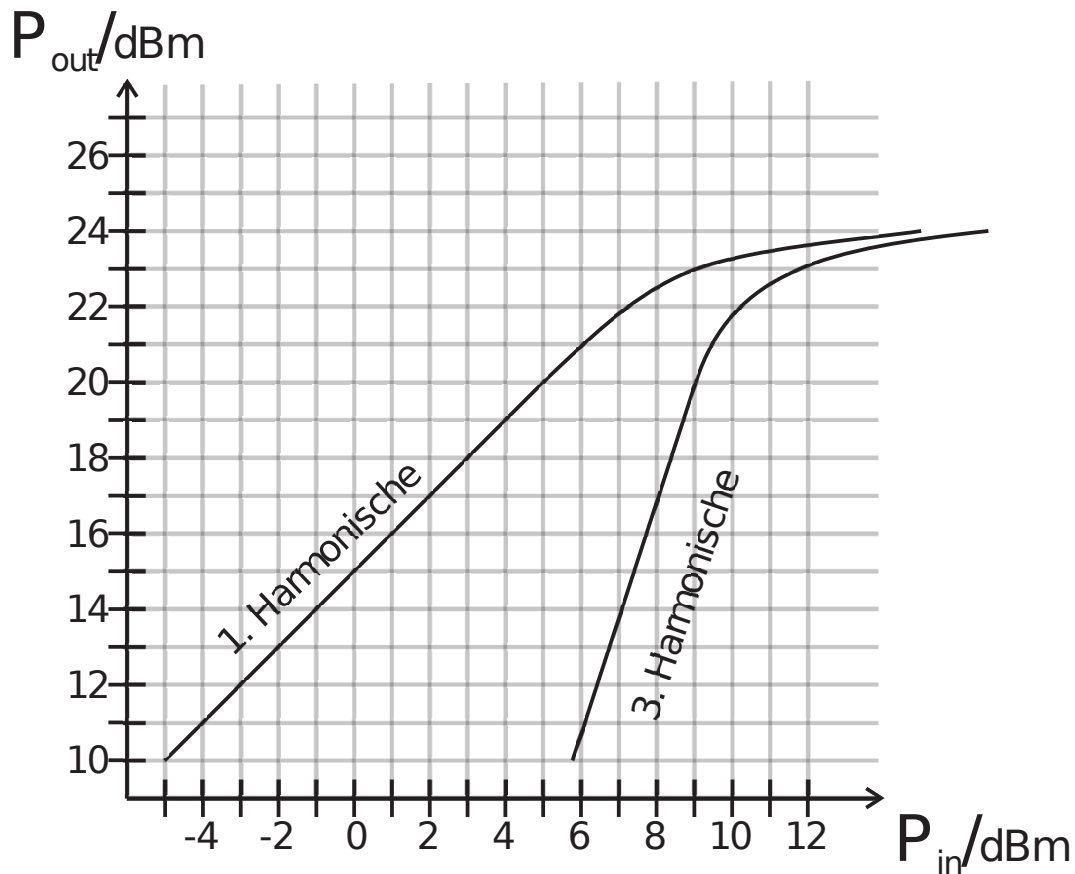
Bei welcher Frequenz schneidet der Reflexionsfaktor die reelle Achse?

.....

$$Z_B = 100 \, \Omega$$


- e) Gegeben ist die folgende Verstärkerkennlinie. Geben Sie die Verstärkung im linearen Bereich und den „Third Input Intercept Point (IIP3)“ an. Ergänzen Sie dazu die Grafik und zeichnen Sie den IIP3 ein.

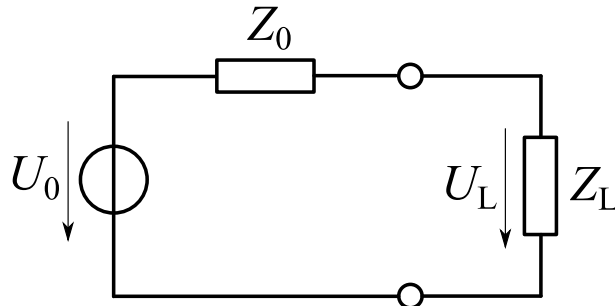
(3 P.)



Aufgabe 1

- f) Gegeben sei die unten abgebildete Schaltung, die aus einer Wechselspannungsquelle mit Amplitude $U_0 = 4 \text{ V}$ und einem Innenwiderstand von $Z_0 = 50 \Omega$ sowie einer Lastimpedanz Z_L besteht.

(3 P.)



Welche Bedingung muss für Z_L erfüllt sein, damit Leistungsanpassung herrscht? Wie groß ist die Leistung P_L in dBm, die die Quelle bei Leistungsanpassung an die Lastimpedanz abgibt?

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 2

GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 8 von 32

Aufgabe 2

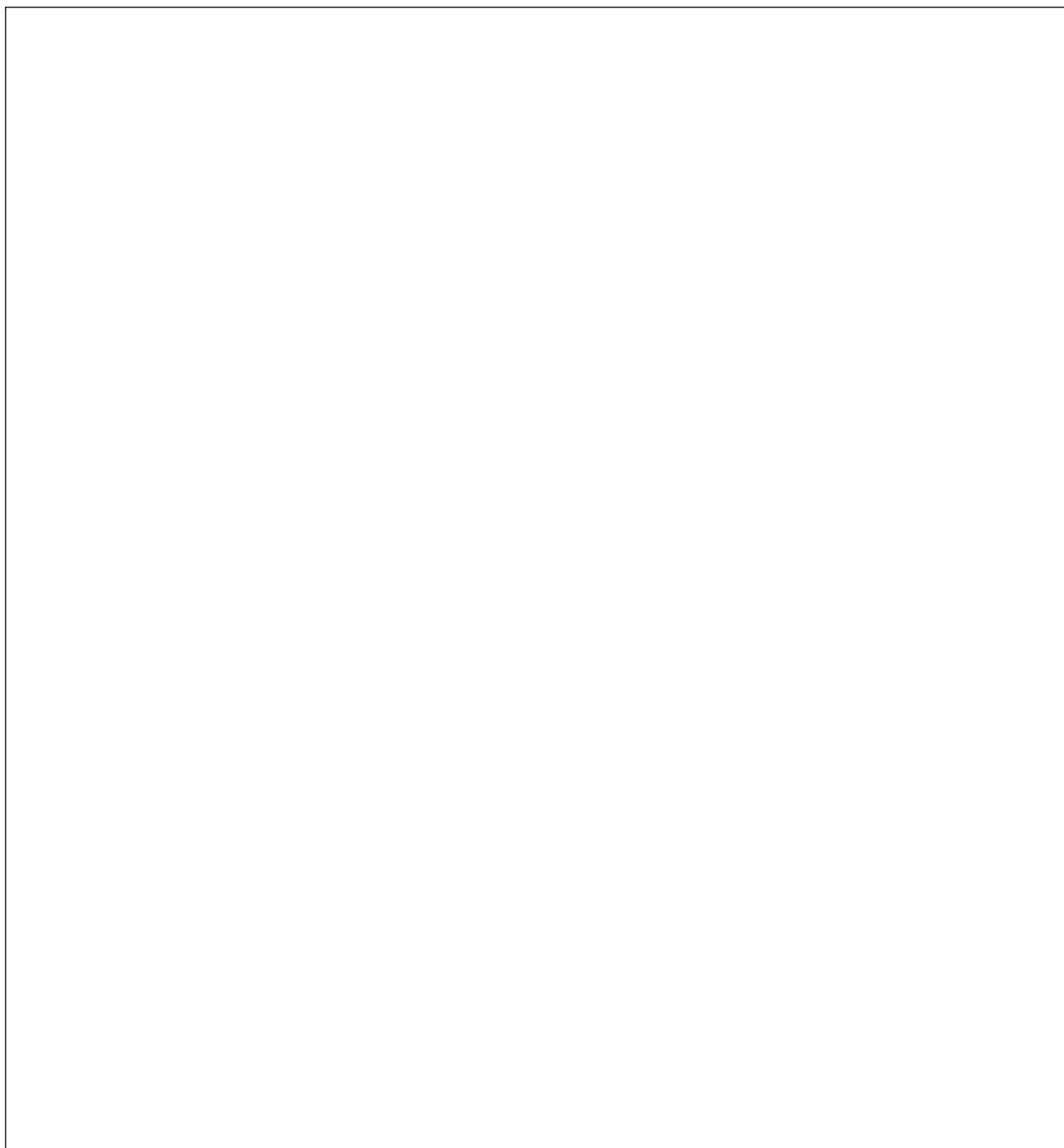
(gesamt 17 Punkte)

Radar

☐

- a) In heutigen Automobilradaren kommen FMCW-basierte Verfahren zur Anwendung. Zeichnen Sie die wichtigsten Komponenten eines solchen FMCW-Radars in ein Blockschaltbild und beschriften Sie diese.

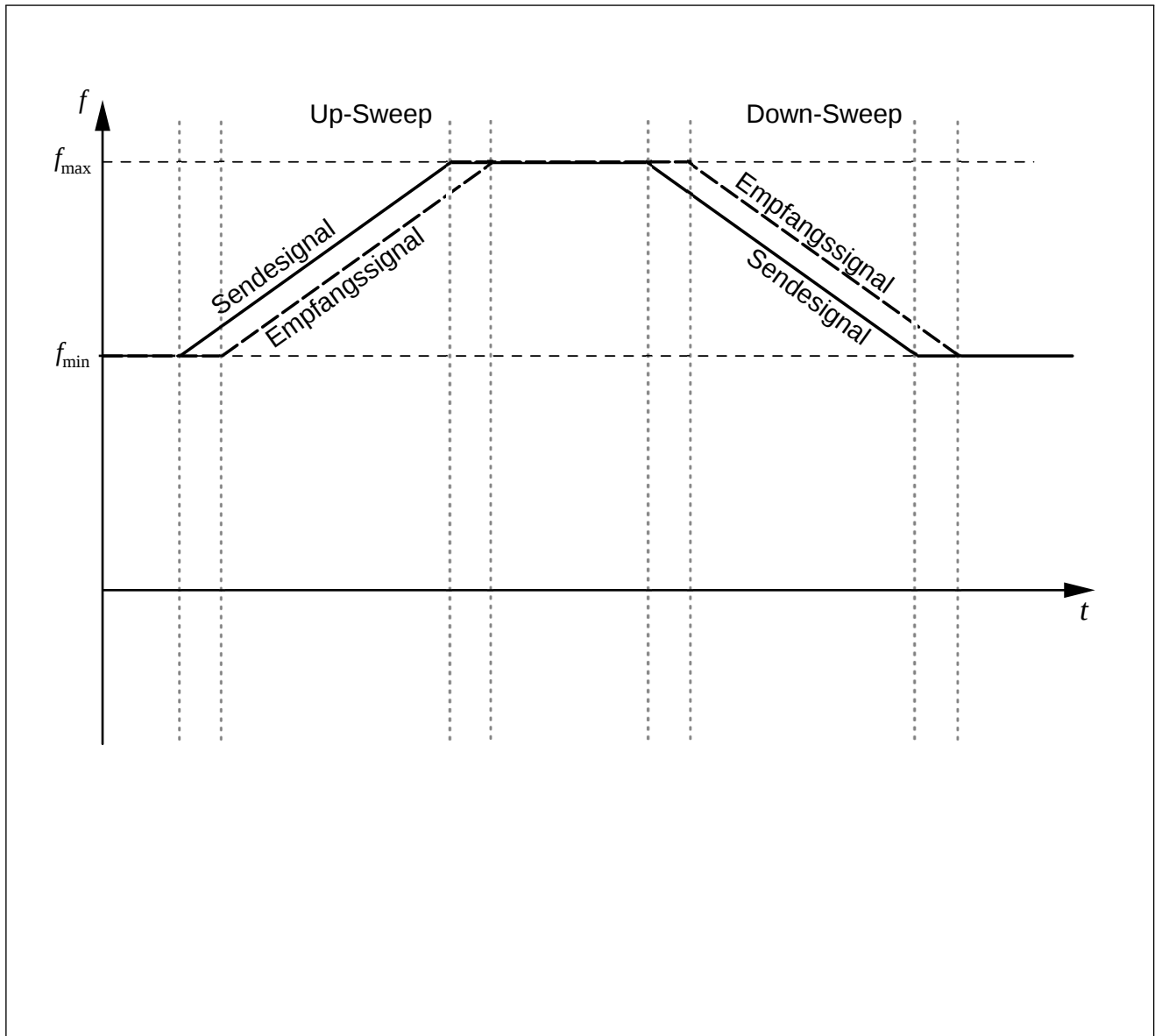
(4P.)

☐

Aufgabe 2

- b) Die unten stehende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Frequenz von Sende- und Empfangssignal. Zeichnen Sie ausgehend hiervon den zeitlichen Verlauf der Beat-Frequenz f_{Δ} , die sich durch Mischen des Empfangs- und Sendesignals im Empfänger ergibt.

(4P.)



Name:

Aufgabe 2

c) Ein 24 GHz FMCW-Radar mit einer Bandbreite von $B = 200$ MHz und einer Mess- bzw. Sweepdauer von $T = 5$ 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 50 m Entfernung?

d) Wofür steht die Abkürzung „EIRP“? Wie ist diese definiert?

(2 P.)



Name:
.....

Aufgabe 2

- e) Ein monostatisches FMCW-Radar soll im Automobilbereich als Automatic Cruise Control (ACC) Radar bei 24 GHz eingesetzt werden. Die Sendeleistung beträgt $P_{Tx} = 12$ dBm und der Gewinn von Sende- und Empfangsantenne $G = 8$ dBi. Welchen Radarrückstreuquerschnitt (RCS) σ muss ein Objekt in einer Entfernung von 100 m mindestens aufweisen, wenn das Radar eine minimale Empfangsleistung von $P_{Rx} = -125$ dBm benötigt?

(4P.)

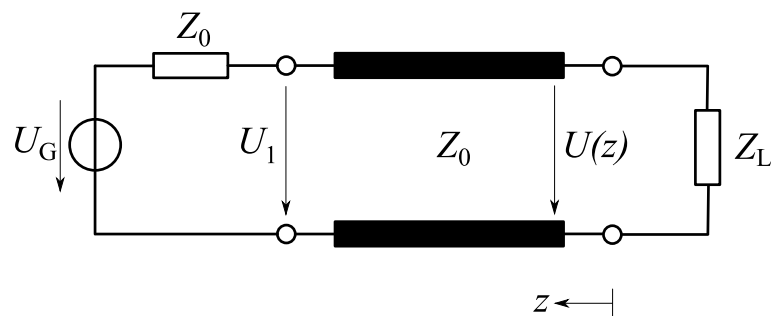


Aufgabe 3

(gesamt 16 Punkte)

Stehende Wellen und Leitungen

Gegeben sei die in der Skizze gezeigte verlustfreie Leitung mit Leitungswellenwiderstand $Z_0 = 100 \Omega$. Die Leitung wird von einer Wechselspannungsquelle gespeist, die eine Spannungsamplitude von $U_G = 2 \text{ V}$ aufweist. Der auf Z_0 bezogene Reflexionsfaktor der Lastimpedanz Z_L beträgt $r_L = 0,25$.



- a) Berechnen Sie den jeweils kleinsten Wert $\frac{z}{\lambda} > 0$, für den $|U(z)|$ minimal bzw. maximal wird.

(3 P.)



Name:

.....

Aufgabe 3

b) Berechnen Sie das Minimum und Maximum von $|U(z)|$ auf der Leitung.

(2 P.)



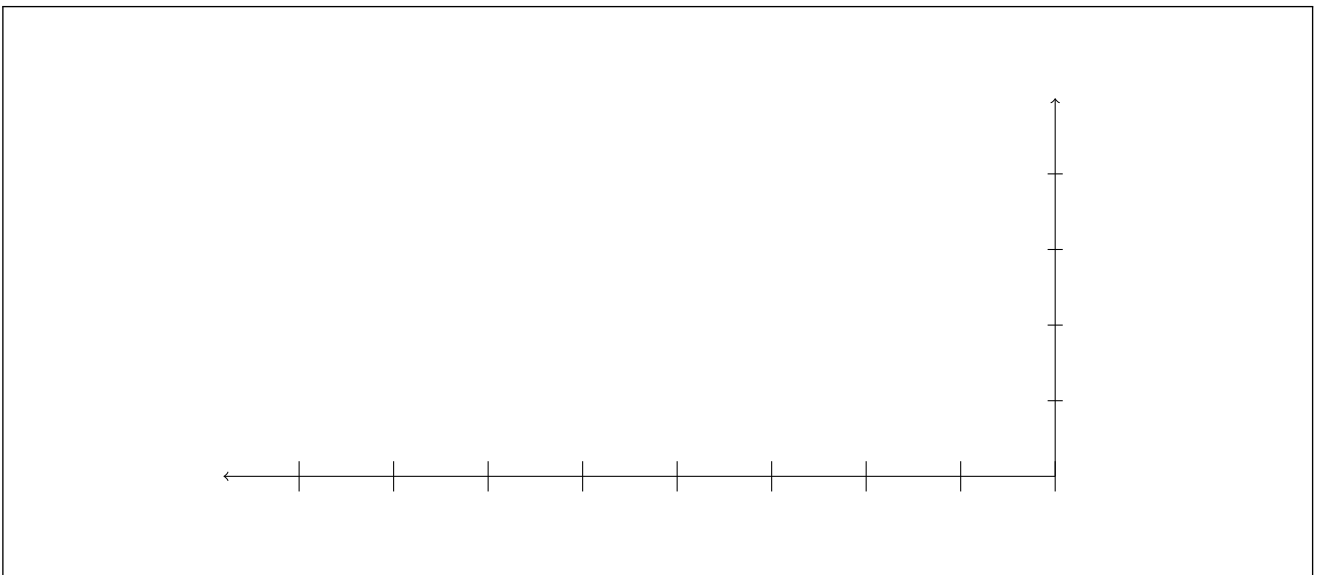
c) Berechnen Sie den Wert für $|U(z)|$ an der Stelle $z = 0$.

(1 P.)



d) Skizzieren Sie mithilfe Ihrer Ergebnisse aus a) bis c) den Spannungsverlauf auf der Leitung. Achten Sie auf korrekte Achsenbeschriftungen inklusive Einheiten.

(2 P.)

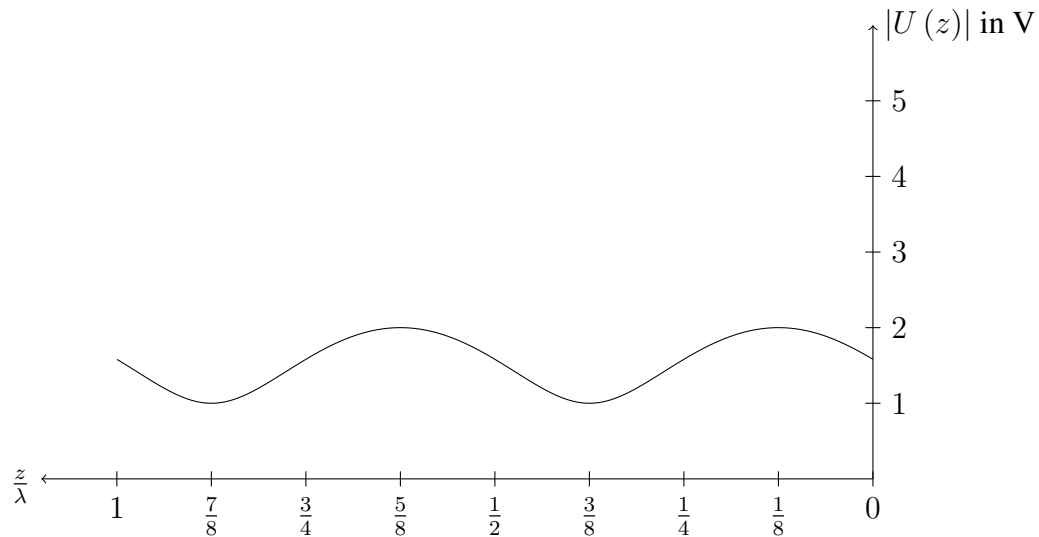


Name:

Aufgabe 3

- e) 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.

(3 P.)



Name:

Aufgabe 3

- f) Welche Bedingung gilt für den Realteil der Ausbreitungskonstante γ im Fall einer verlustlosen Leitung?

(1 P.)

☐

- g) Wie ist die Übernahmefrequenz definiert?

(1 P.)

☐

- h) Gegeben sei eine Leitung mit $Z_0 = 50 \Omega$ und Länge $l = \frac{\lambda}{4}$, die mit einer Lastimpedanz abgeschlossen ist, die durch den Reflexionsfaktor $r_L = 0,2 e^{j\frac{\pi}{4}}$ beschrieben wird (Bezug ebenfalls Z_0). Bestimmen Sie den Reflexionsfaktor am Eingang der Leitung.

(2 P.)

☐

- i) Von einer unbekannten Lastimpedanz Z_L wird der Reflexionsfaktor $r_L = 0,25$ gemessen (Bezug $Z_0 = 100 \Omega$). Berechnen Sie den Wert der Lastimpedanz Z_L in Ω .

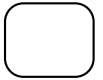
(1 P.)

☐

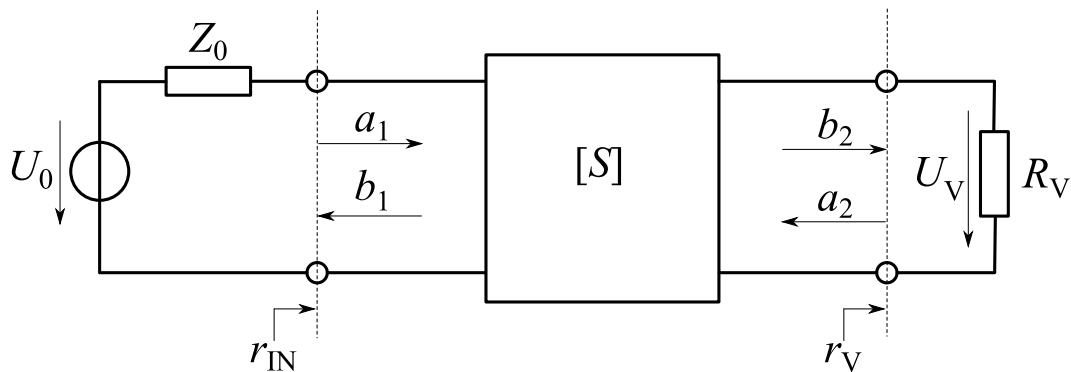
Aufgabe 4

Aufgabe 4

(gesamt 18 Punkte)

Mikrowellen-Netzwerkanalyse

Das unten gezeigte Zweitor wird durch die Streumatrix $[S] = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,05 \\ 10 & 0,2 \end{pmatrix}$ beschrieben. Der Bezugswiderstand für die Streuparameter ist $Z_0 = 50 \Omega$. Das Zweitor wird so gespeist, dass sich $a_1 = 1 \sqrt{W}$ ergibt. Der Eingangsreflexionsfaktor (bezogen auf Z_0) beträgt $r_{IN} = 0,3$.



- a) Berechnen Sie den Wert des Reflexionsfaktors r_V in obiger Anordnung (bezogen auf Z_0).

(4P.)



Name:

Aufgabe 4

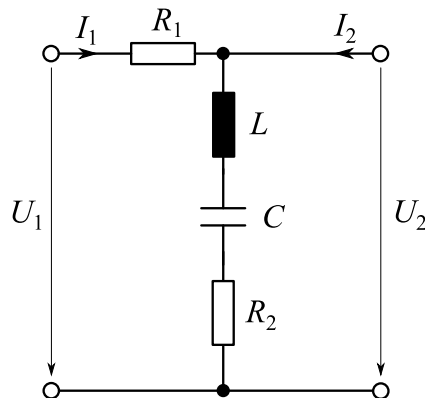
- b) Leiten Sie allgemein den Reflexionsfaktor r_{IN} als Funktion von r_{V} und den S -Parametern des Zweitorts her.

(3 P.)



Aufgabe 4

Gegeben sei folgendes Zweitor.



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

(2 P.)



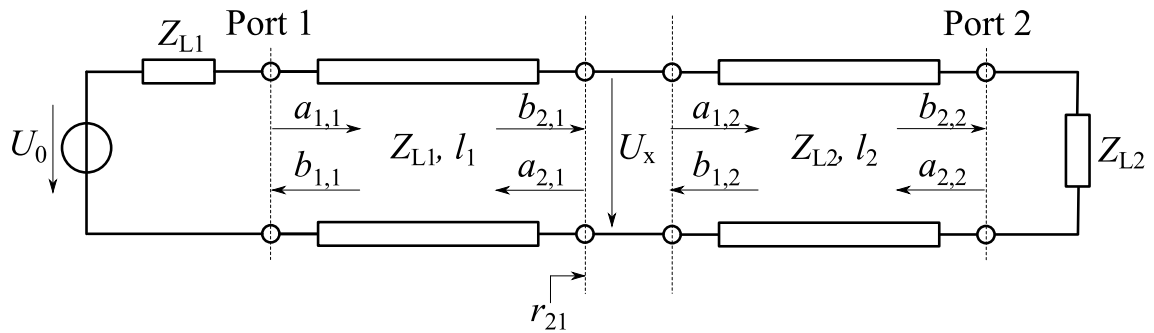
d) Für obiges Zweitor gelte nun $R_1 = 25 \Omega$, $R_2 = 50 \Omega$. Welcher Wert (lineare Angabe) ergibt sich für den Streuparameter S_{11} bei der Resonanzfrequenz des Schwingkreises? Der Bezugswiderstand für die Streuparameter ist $Z_0 = 50 \Omega$.

(2 P.)



- e) Gegeben sei folgende Leitungsanordnung aus zwei verlustfreien Leitungen mit Leitungswellenwiderständen Z_{L1} und Z_{L2} und zugehörigen Längen l_1 bzw. l_2 . Der Bezugswiderstand zur Bestimmung der S -Parameter ist Z_{L1} für Port 1, und Z_{L2} für Port 2. Berechnen Sie für die gezeigte Leitungsanordnung den Streuparameter S_{11} in Abhängigkeit von Z_{L1} , Z_{L2} , l_1 und l_2 .

(3 P.)



Name:

.....

Aufgabe 4

- f) Berechnen Sie für obige Leitungsanordnung den Streuparameter S_{21} in Abhängigkeit von Z_{L1} , Z_{L2} , l_1 und l_2 . Bezeichnen Sie die von Ihnen genutzten Streuvariablen gemäß obiger Skizze.

(4P.)



Name:
.....

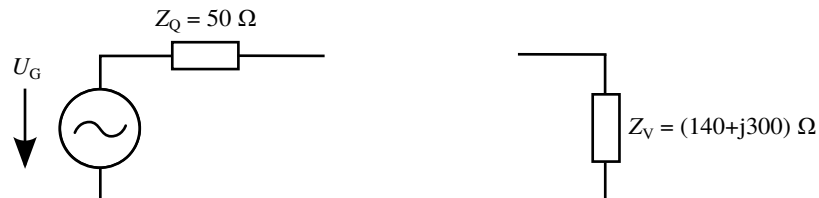
Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 5

GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 21 von 32

Aufgabe 5

(gesamt 17 Punkte)

Smithdiagramm



a)

(5 P.)

Ein Verbraucher mit der Impedanz $Z_V = (140 + j300) \Omega$ soll an eine Quelle mit der Impedanz $Z_Q = 50 \Omega$ reflexionsfrei angeschlossen werden. Zur Verfügung stehen Ihnen folgende Elemente:

- einen seriellen Kondensatoren mit beliebiger Kapazität
- eine Leitung beliebiger Länge mit Wellenwiderstand $Z_L = 200 \Omega$

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 Werte bzw. Leitungslängen der verwendeten Elemente an, für die bei einer Frequenz von $f = 5 \text{ GHz}$ Anpassung herrscht. Alle Leitungen sind verlustfrei und besitzen eine relative Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 1$.

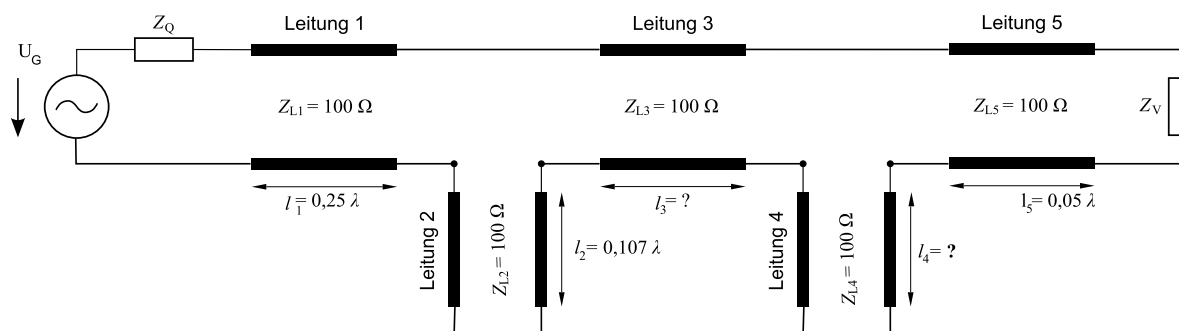
Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Aufgabe 5

GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 22 von 32

Aufgabe 5



b)

(11P.)

Der Verbraucher mit der Impedanz $Z_V = 300\Omega$ soll nun mit der dargestellten Schaltung an die Quelle mit der Impedanz $Z_Q = 100\Omega$ reflexionsfrei angeschlossen werden. Bestimmen Sie die Längen l_3/λ und l_4/λ für Leistungsanpassung so, dass l_3 möglichst kurz wird. Zeichnen Sie den zugehörigen Transformationsweg beginnend bei der Verbraucherimpedanz Z_V in ein geeignet normiertes Smithdiagramm ein und bestimmen Sie daraus die benötigten Leitungslängen, so dass Anpassung besteht. Alle Transformationsschritte sind aufzuführen und zu begründen, wobei Zwischenimpedanzen klar erkennbar sein müssen. Die Zuordnung der Leitungen zu den einzelnen Transformationsschritten muss nachvollziehbar sein.



Name:

.....

Aufgabe 5

- c) Wie ändern sich die Längen der Leitungen 2 und 4 wenn diese aus technischen Gründen mit einem Leerlauf abgeschlossen werden müssen?

(1P)



Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

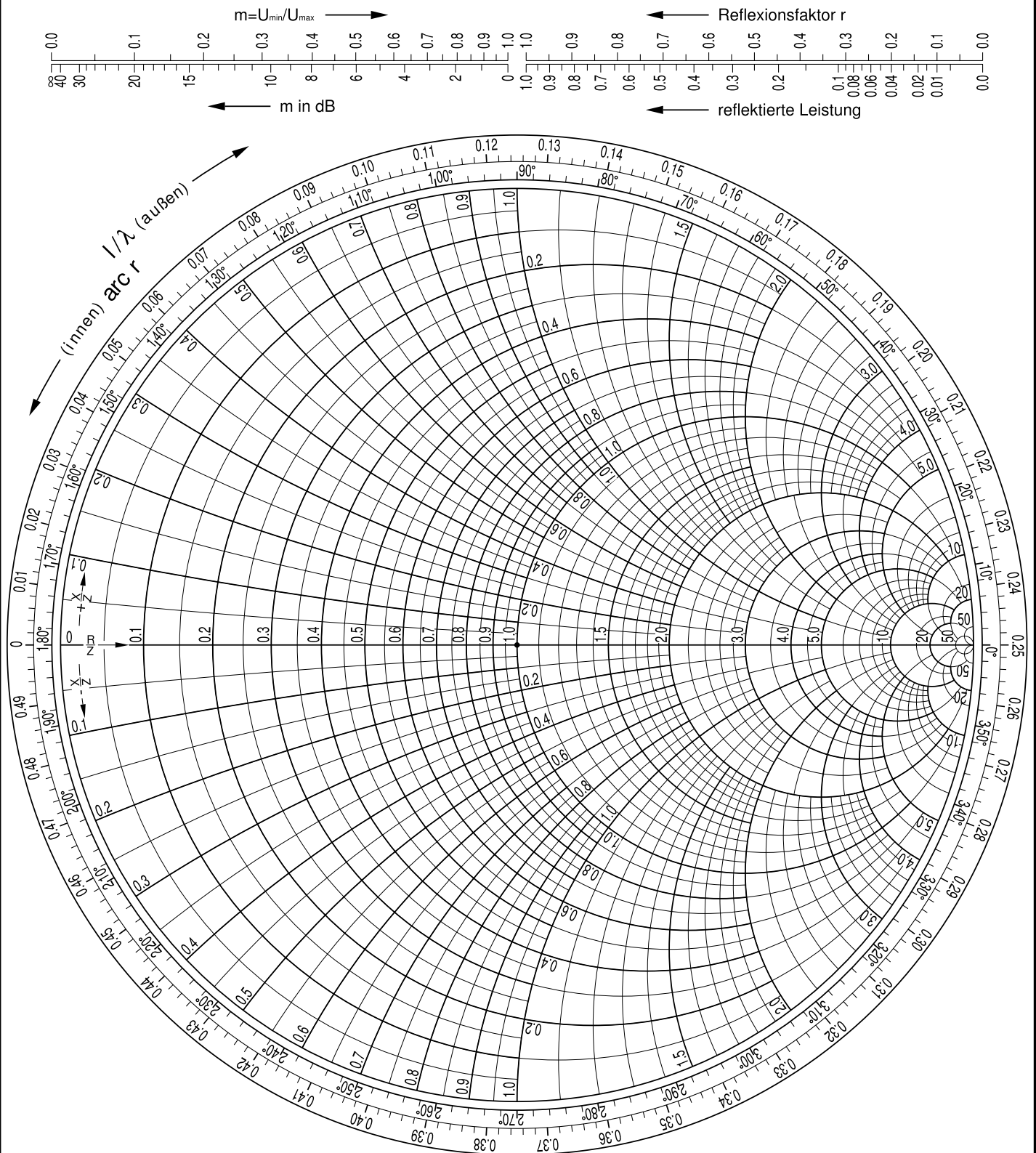
GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 25 von 32

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:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

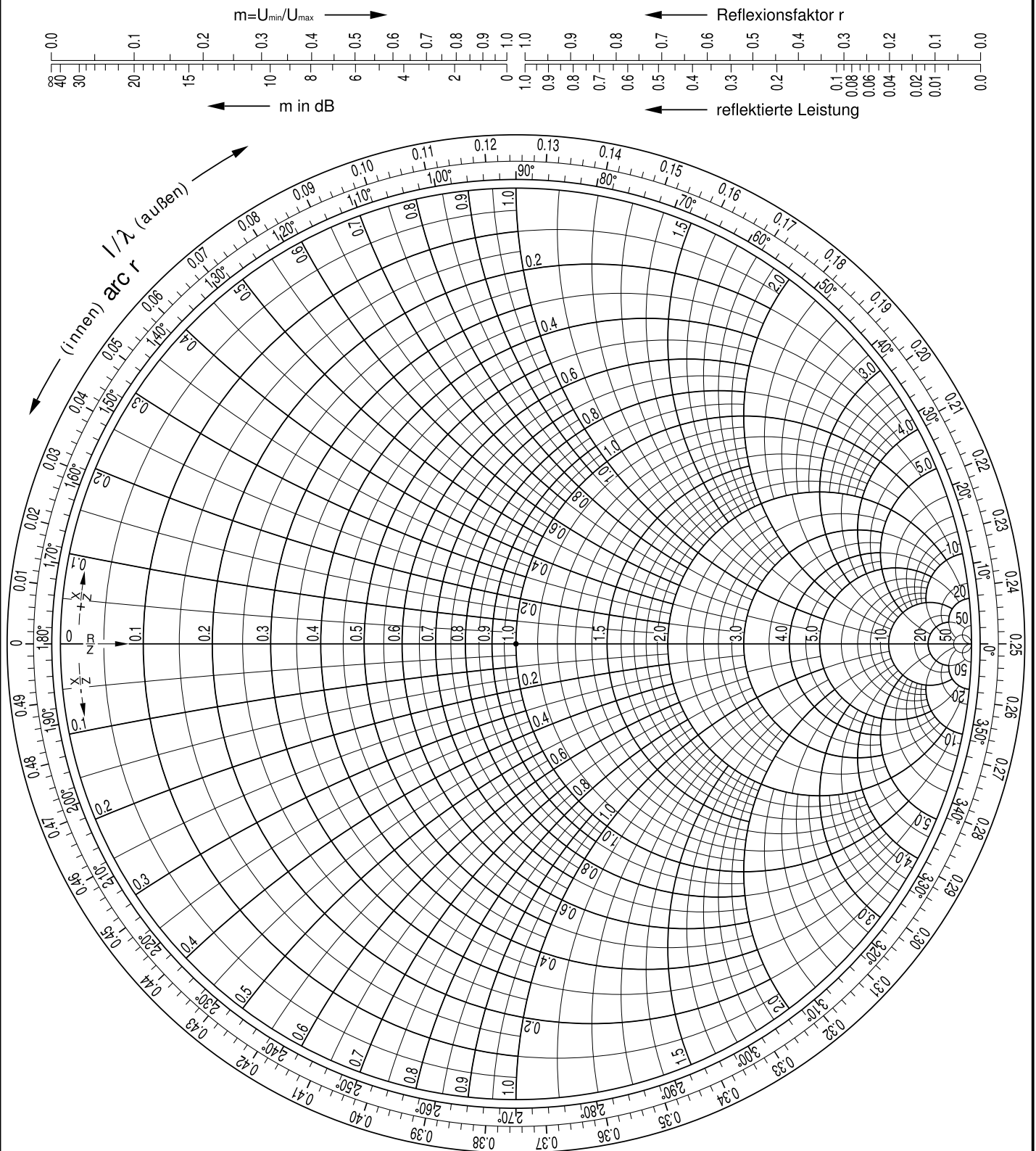
GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 26 von 32

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:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

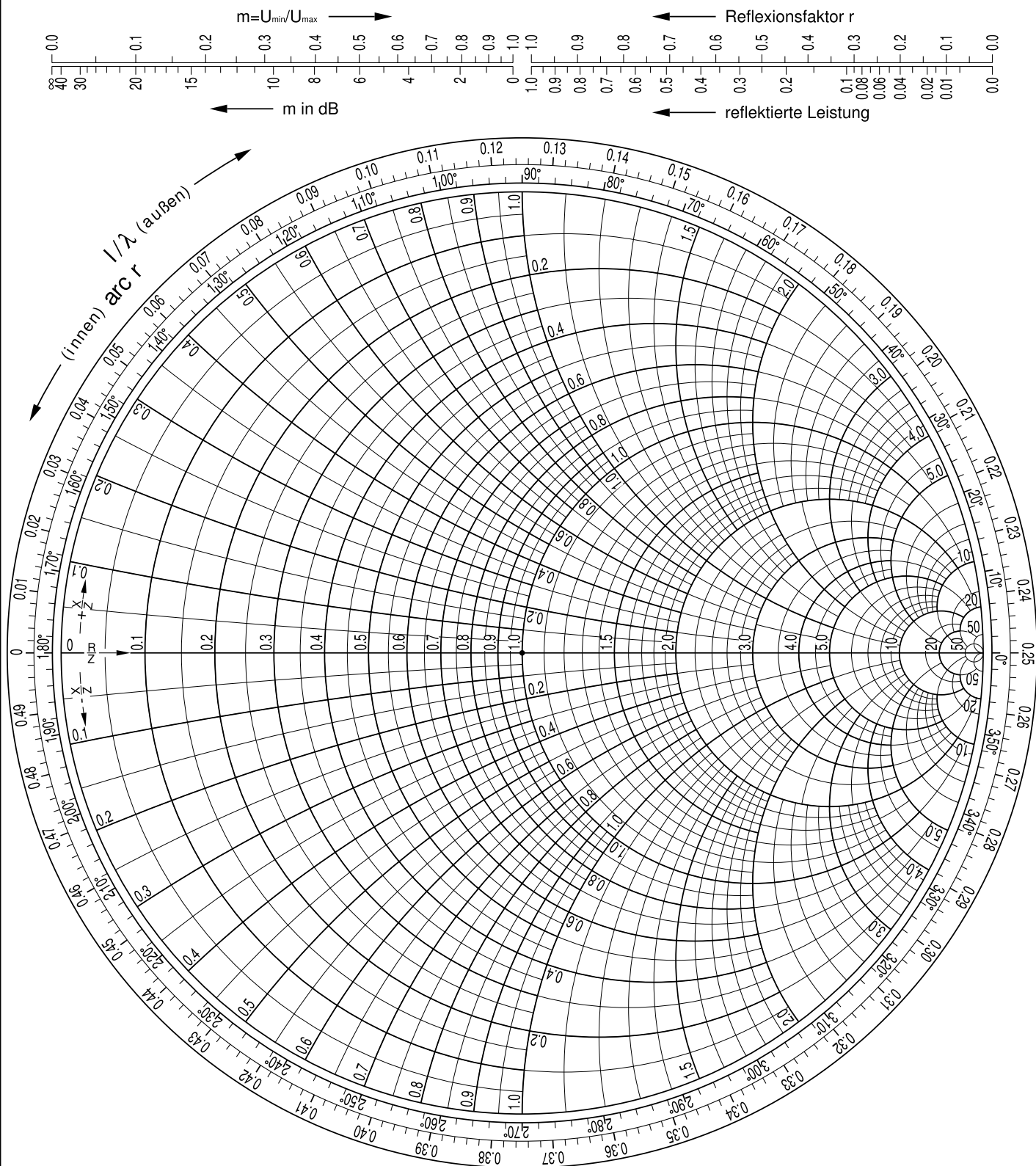
Smith-Diagramm

GHF F'18
 15. Februar 2018
 Seite 27 von 32

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:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

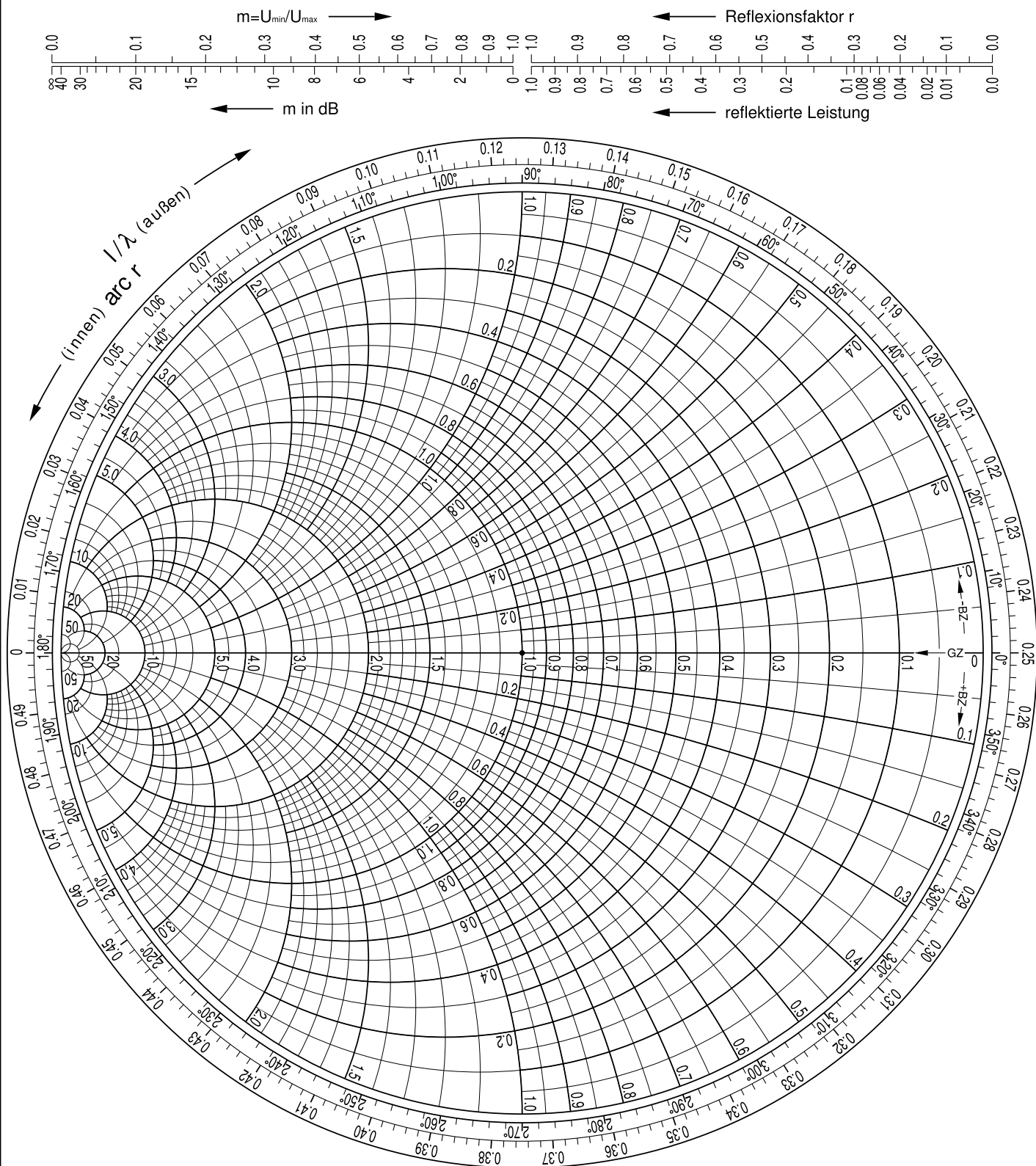
Smith-Diagramm

GHF F'18
 15. Februar 2018
 Seite 28 von 32

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!

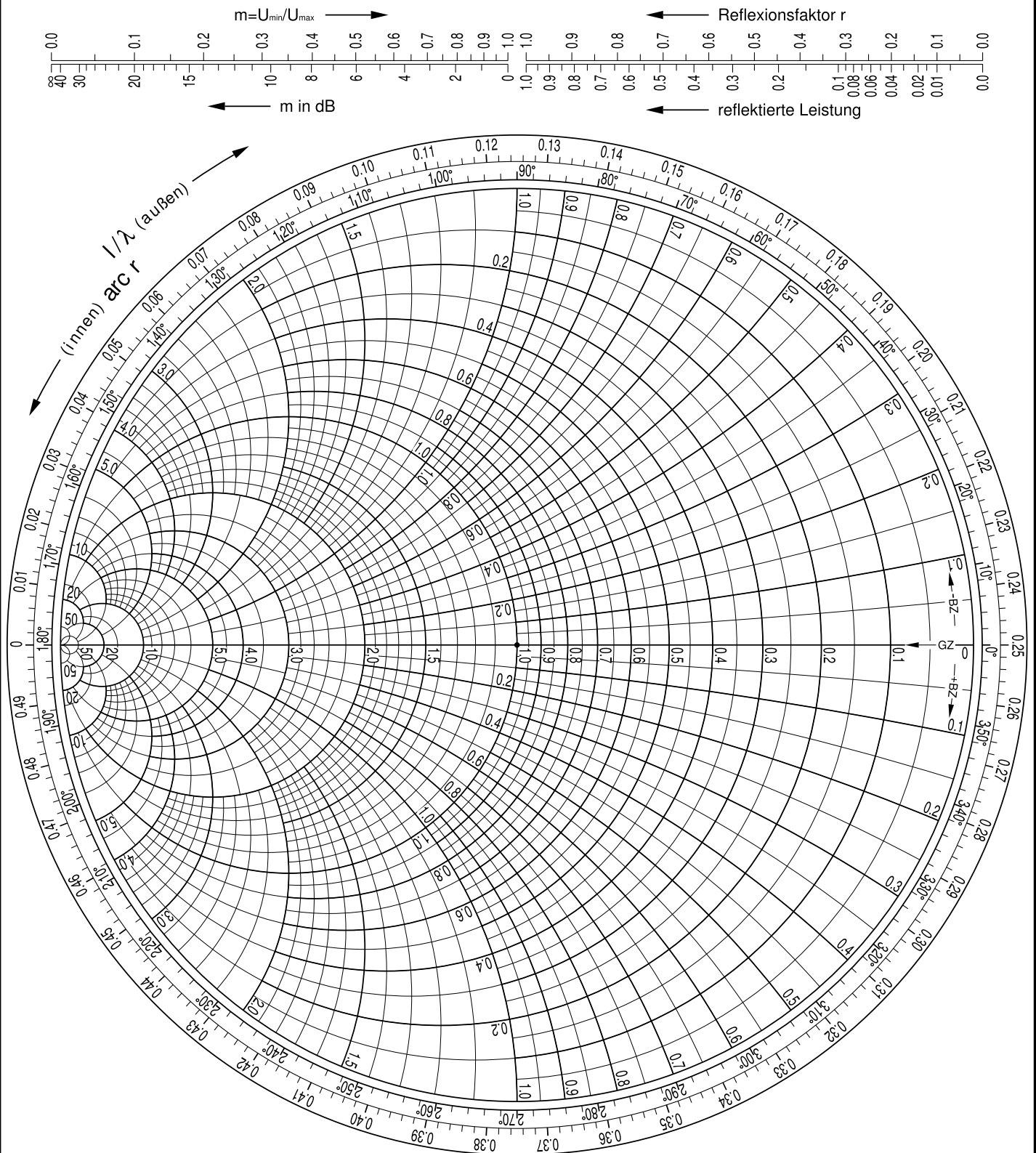
Name:

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!

.....

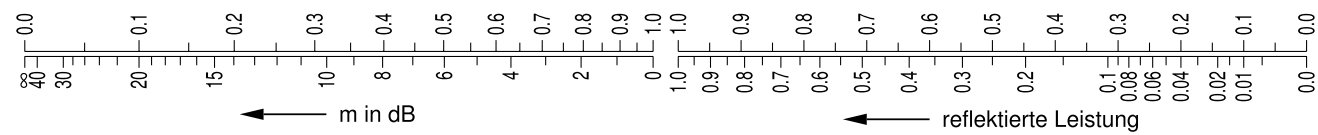
Smith-Diagramm

15. Februar 2018

Seite 30 von 32

Aufgabennummer:

Bezugswiderstand $Z_B =$

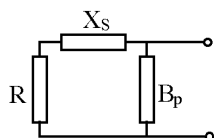
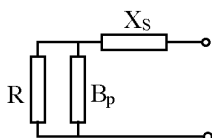
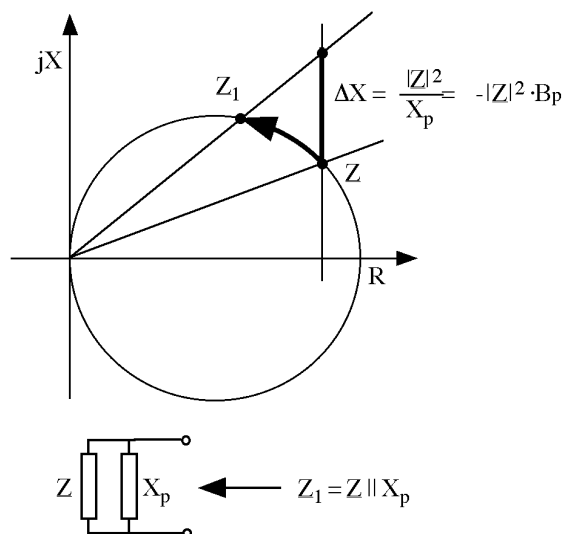
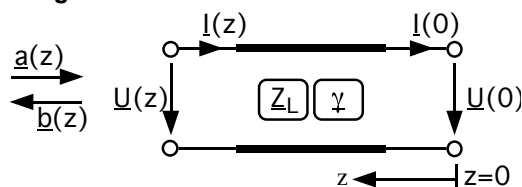


Wichtig: Diagramm wird nur gewertet, wenn der obenstehende Datenteil mit Name und Aufgabennummer korrekt ausgefüllt ist. Bezugswiderstand nicht vergessen!

Impedanz $\longleftrightarrow \frac{Z=1/Y}$ **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 ElementenBedingungen 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**

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

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

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

Koaxialleitung

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

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

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

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 → 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

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

Dem Verbraucher zugeführte Wirkleistung P_w

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

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

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

Transformation durch Kettenschaltung einer Leitung

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

Konstanten

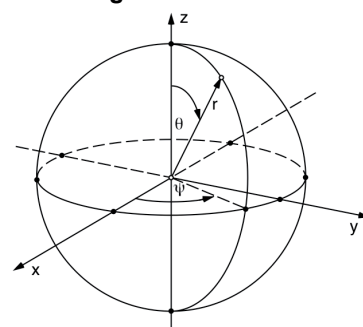
$$Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 120\pi \Omega$$

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

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

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

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

KugelkoordinatenAzimuth: ψ Elevation: θ

$$\text{Volumen: } V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$\text{Oberfläche: } F = 4\pi r^2$$

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Formelblatt Zweitorparameter

GHF F'18
15. Februar 2018
Seite 32 von 32

	[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}