

Name:
.....

Matrikel-Nr.:
.....

Platz-Nr.:

GHF F'22
22. März 2022
Seite 1 von 40

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: ☐ Nein: ☐	



Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Name:
.....

Hinweise
zur Klausur

GHF F'22
22. März 2022
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:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 1

GHF F'22
22. März 2022
Seite 3 von 40

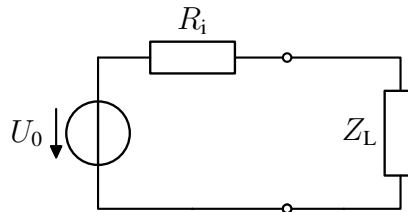
Aufgabe 1

(gesamt 17 Punkte)

Allgemeines

☐

Gegeben sei die unten abgebildete Schaltung, aus einer Wechselspannungsquelle mit Amplitude $U_0 = 4\text{ V}$ 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 $(25 + j25)\ \Omega$. Wie groß ist der Reflektionsfaktor und die von Z_L aufgenommene Wirkleistung in mW?

(2 P.)

Name:
.....

Aufgabe 1

- c) Einem Empfänger mit einer Rauschzahl von 13 dB und einer Verstärkung von 30 dB soll zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses ein Verstärker vorgeschaltet werden. Wählen Sie aus der folgenden Tabelle den geeignetsten Verstärker aus. Begründen Sie die Auswahl und geben Sie die sich ergebende Gesamt-Rauschtemperatur in Kelvin an.

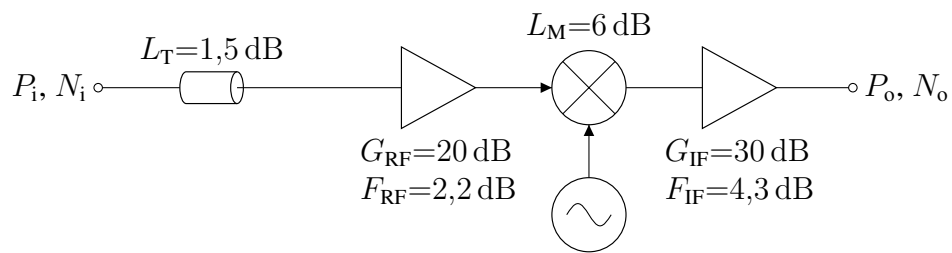
(5 P.)



Verstärker	Verstärkung	Rauschzahl
A	24 dB	4 dB
B	16 dB	3 dB
C	13 dB	3 dB

Aufgabe 1

Ein Mikrowellenempfänger hat folgende Parameter:



$$P_i = -70 \text{ dBm}$$

$$f = 6 \text{ GHz}$$

$$B = 10 \text{ MHz}$$

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

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

(2 P.)



Name:
.....

Aufgabe 1

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

(4P.)



Name:

.....

Aufgabe 1

- f) Welche Ebene wird in einem Smith Diagramm dargestellt? Worin liegt der wesentliche Unterschied zwischen einem Smith Diagramm in Leitwertform und einem solchen in Widerstandsform?

(2 P.)



Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

GHF F'22

22. März 2022

Seite 8 von 40

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 2

GHF F'22
22. März 2022
Seite 9 von 40

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:

Aufgabe 2

- b) Ein monostatisches FMCW-Radar soll im Automobilbereich als Automatic Cruise Control (ACC) Radar bei 77 GHz eingesetzt werden. Die Sendeleistung beträgt $P_{Tx} = 12 \text{ dBm}$, der Gewinn von Sende- und Empfangsantenne $G = 15 \text{ dBi}$ und das kleinste zu detektierende Ziel weist einen Radarrückstreuquerschnitt (RCS) von $\sigma = 1 \text{ m}^2$ auf. Wie hoch ist die Reichweite $R_{\max}$ des Radars, wenn dieses eine minimale Empfangsleistung von $P_{Rx} = -125 \text{ dBm}$ benötigt?

(4 P.)



- c) Um welchen Faktor muss der Antennengewinn G vergrößert werden, wenn die maximale Reichweite des Radars doppelt so groß wie ursprünglich ist? Alle anderen Parameter bleiben konstant.

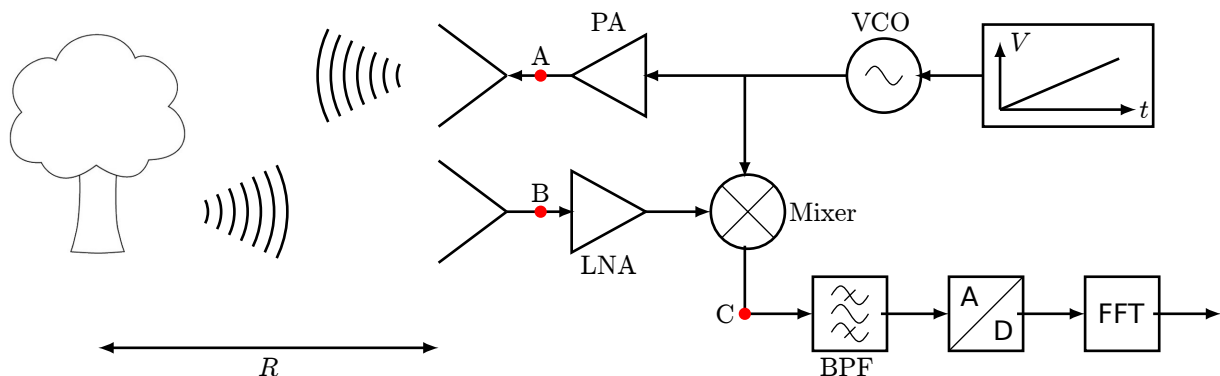
(2 P.)



Aufgabe 2

d)

(6 P.)



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

- e) 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.

(2 P.)



Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 3

GHF F'22
 22. März 2022
Seite 13 von 40

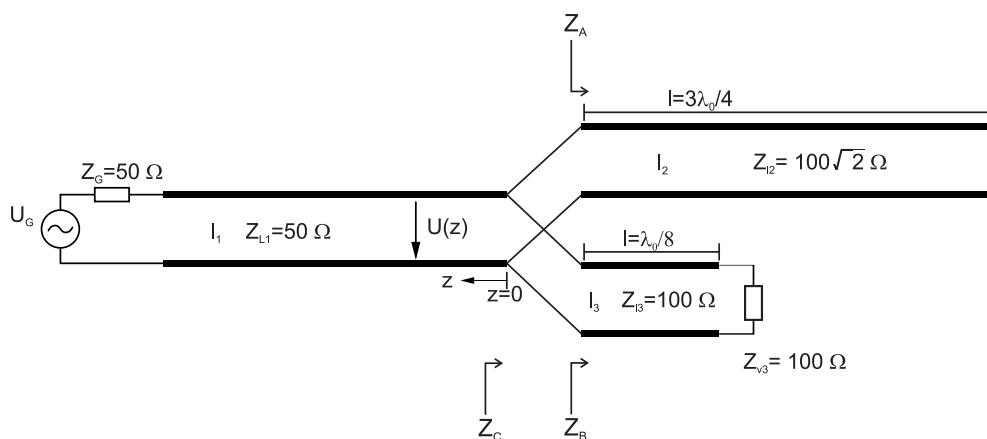
Aufgabe 3

(gesamt 17 Punkte)

Leitungen und stehende Wellen



Gegeben sei folgende Schaltung.



- a) Der Generator speist die Schaltung bei der Frequenz f_0 . Zeichnen Sie die Verteilung des Betrages $|U(z)|$ der komplexen Spannungsamplitude $U(z)$ auf der Messleitung (l_1) für $z \geq 0$ in das dafür vorgesehene Diagramm ein. Die Leitungen können als verlustfrei betrachtet werden. Achten Sie auf korrekte Achsenbeschriftung und erläutern Sie ihr Vorgehen.

(4P.)



Name:

Aufgabe 3

- b) Wie müssen Sie die jetzt leer laufende Leitung l_2 abschließen, damit bei $z = 0$ Anpassung vorliegt?

(2 P.)



- c) Sie haben nun die Möglichkeit die Leitung l_2 inklusive Abschluss komplett zu entfernen. Wie viel Leistung erreicht den Verbraucher Z_{v3} , wenn Sie die Leitung l_2 inklusive Abschluss komplett zu entfernen? Wie viel wenn Sie $Z_A = 100 \Omega$ annehmen? Der Generator speist die Schaltung mit $U_G = 3 \text{ V} \sin(2\pi ft)$.

(3 P.)

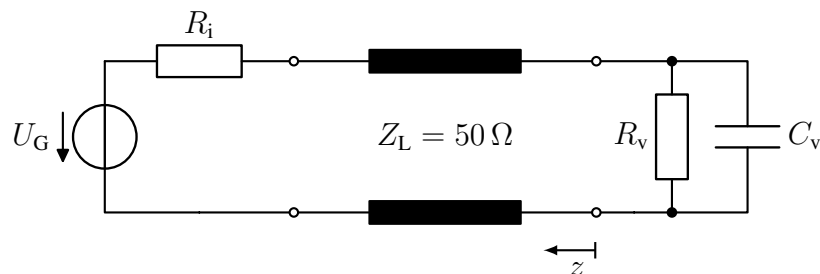


Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 3

GHF F'22
 22. März 2022
Seite 15 von 40

Gegeben sei nun 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 eine 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.)



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

(1 P.)



Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 3

GHF F'22
22. März 2022
Seite 16 von 40

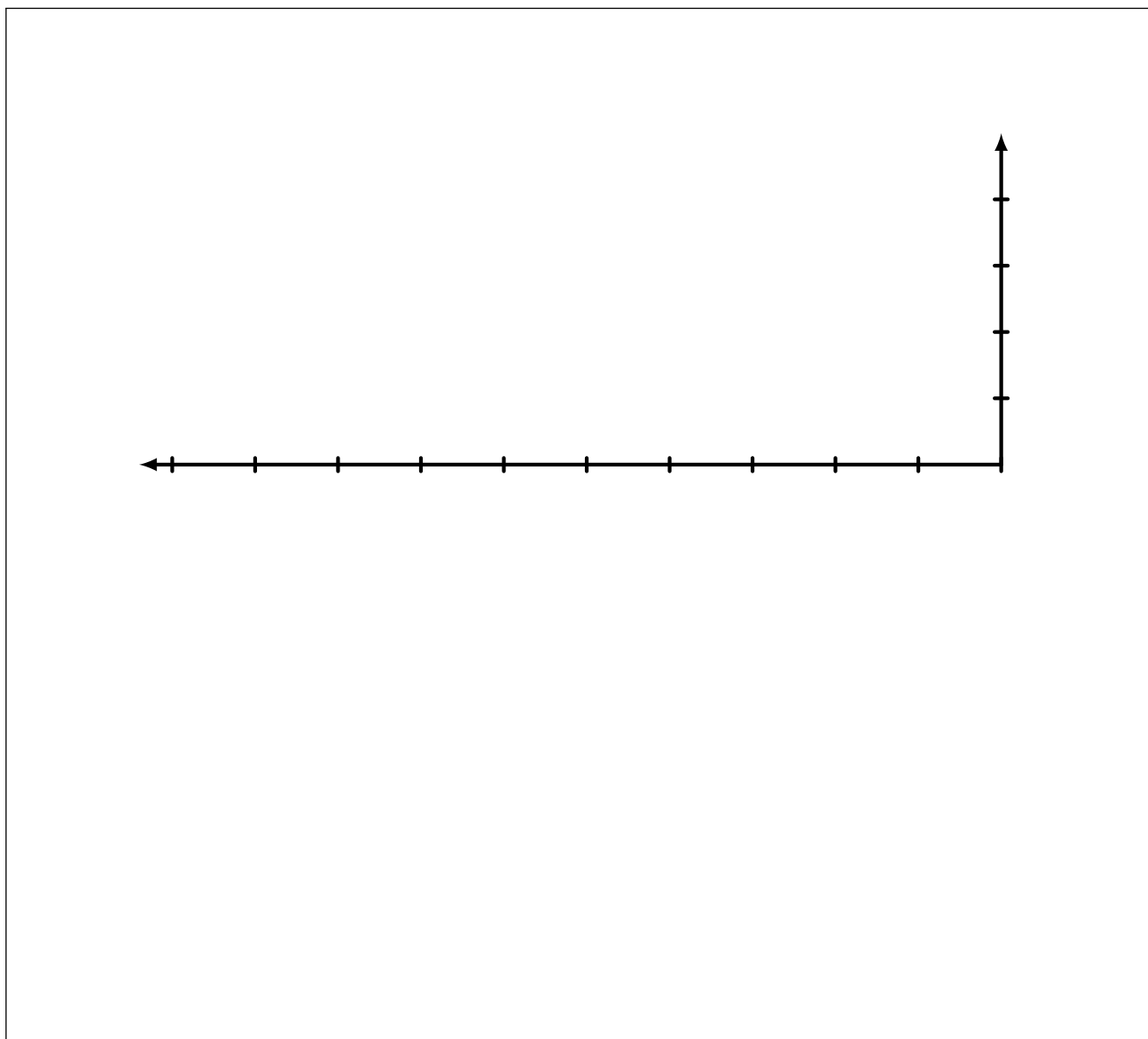
f) Berechnen Sie $|U(0)|$.

(1 P.)



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 4

GHF F'22
22. März 2022
Seite 17 von 40

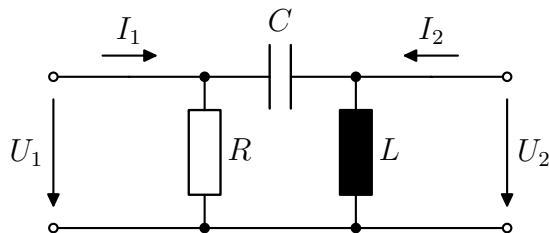
Aufgabe 4

(gesamt 17 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 Admittanzparameter des Zweitors.

(4P.)

Name:

Aufgabe 4

Gegeben sei folgendes Zweitor:

- Bei der Einspeisung in das Zweitor entstehen Verluste. Die Verlustleistung ist jeweils 10 % der eingespeisten Leistung.
- Beide Tore sind ideal angepasst.

c) Geben Sie die S-Parameter (linear) des Zweitores an. Begründen Sie Ihre Antwort.

(3 P.)



d) Ist das Zweitor umkehrbar? Begründen Sie Ihre Antwort.

(1 P.)



Name:

Aufgabe 4

- e) An Port 1 wird ein Signal mit der Leistung $P_{in} = -10 \text{ dBm}$ eingespeist. Geben Sie die Ausgangsleistung an Port 2 an.

(2 P.)

Falls sie Teilaufgabe c) nicht lösen konnten, nutzen Sie folgende S-Matrix für das Zweitor:

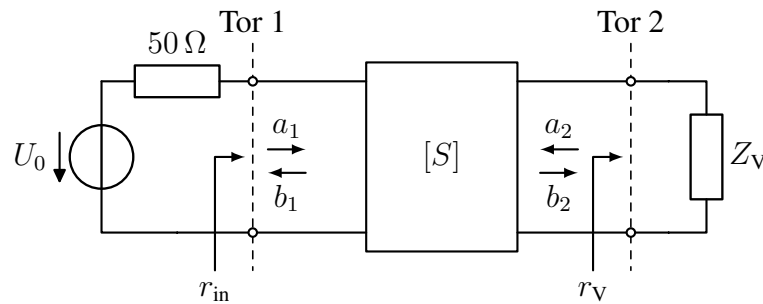


$$S = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,7 \\ 0,9 & 0,3 \end{bmatrix}$$

Aufgabe 4

Das unten gezeigte Zweitor verbindet einen Generator mit der Generatorspannung U_0 und einem Innenwiderstand von $50\ \Omega$ mit einem Verbraucher Z_V . Das Zweitor soll so gespeist werden, dass $b_2 = 0,5\sqrt{W}$ ergibt. Die Lastimpedanz beträgt $Z_V = 30\ \Omega$. Das Zweitor hat folgende Matrix mit Bezug $Z_0 = 50\ \Omega$:

$$S = \begin{bmatrix} 0,3 & -0,4 \\ 0,8 & 0,4 \end{bmatrix}$$



f) Wie groß ist die von R_V aufgenommene Wirkleistung?

(2 P.)



Name:

Aufgabe 4

- g) Berechnen Sie allgemein den Reflexionsfaktor r_{in} am Eingang als Funktion von r_{V} und den S -Parametern des Zweitports. Berechnen Sie außerdem r_{in} und Z_{in} für die hier vorliegende Schaltung.

(4P.)



Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 5

GHF F'22
22. März 2022
Seite 22 von 40

Aufgabe 5

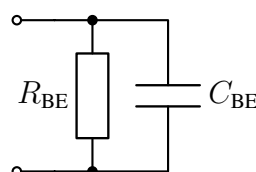
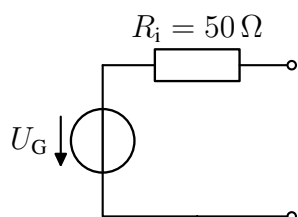
(gesamt 16 Punkte)

Smith Diagramm



- a) Der Eingang eines Transistorverstärkers in Emitterschaltung soll an einen Signalgenerator mit Innenwiderstand $50\ \Omega$ angepasst werden. Die Betriebsfrequenz beträgt $2,4\ \text{GHz}$. Als Ersatzschaltbild für den Eingang des Transistors dient eine Parallelschaltung aus $R_{\text{BE}} = 500\ \Omega$ und, $C_{\text{BE}} = 0,53\ \text{pF}$:

(5 P.)



Wählen Sie ein mögliches Anpassnetzwerk aus einer Spule und einem Kondensator. Dimensionieren Sie diese Elemente mit Hilfe des Smith Diagramms und zeichnen Sie ihre Schaltung mit Bauteilwerten in obiges Schaltbild ein. Beschreiben Sie kurz alle Schritte des Lösungswegs.

Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Aufgabe 5

GHF F'22

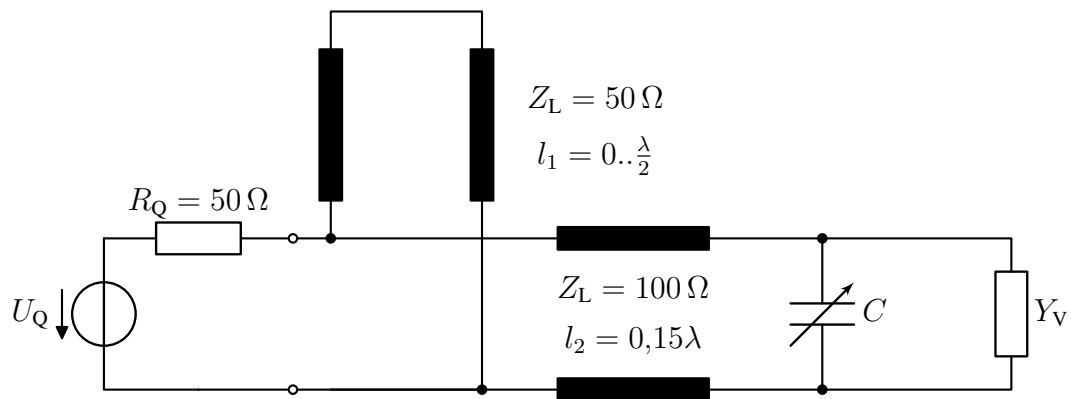
22. März 2022

Seite 23 von 40

Aufgabe 5

- b) Ein einstellbares Anpassnetzwerk soll genutzt werden um verschiedene Admittanzen Y_V an eine Quellimpedanz von $50\ \Omega$ anzupassen:

(6 P.)



Ermitteln Sie grafisch den Bereich, in dem die Schaltung so eingestellt werden kann, dass Anpassung herrscht. Schraffieren Sie das Ergebnis in einem geeigneten Smith Diagramm. Beschreiben Sie kurz alle Schritte des Lösungswegs.

Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Aufgabe 5

GHF F'22

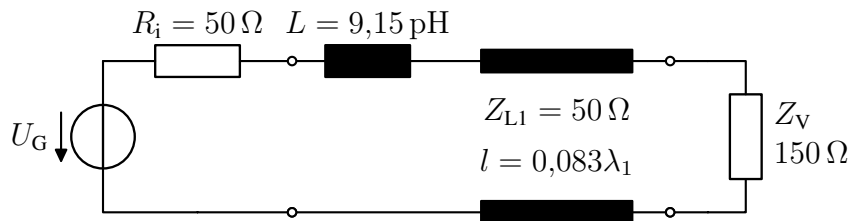
22. März 2022

Seite 25 von 40

Aufgabe 5

- c) Ein Verbraucher Z_V ist mit folgender Schaltung bei $f_1 = 1 \text{ GHz}$ an eine Quelle mit 50Ω angepasst. Die Frequenz verschiebt sich nun auf $f_2 = 1,5 \text{ GHz}$. Bestimmen Sie den Reflexionsfaktor und das Stehwellenverhältnis der Schaltung mit Bezug zur Quelle bei f_2 mit Hilfe des Smith Diagramms.

(5 P.)



Name:

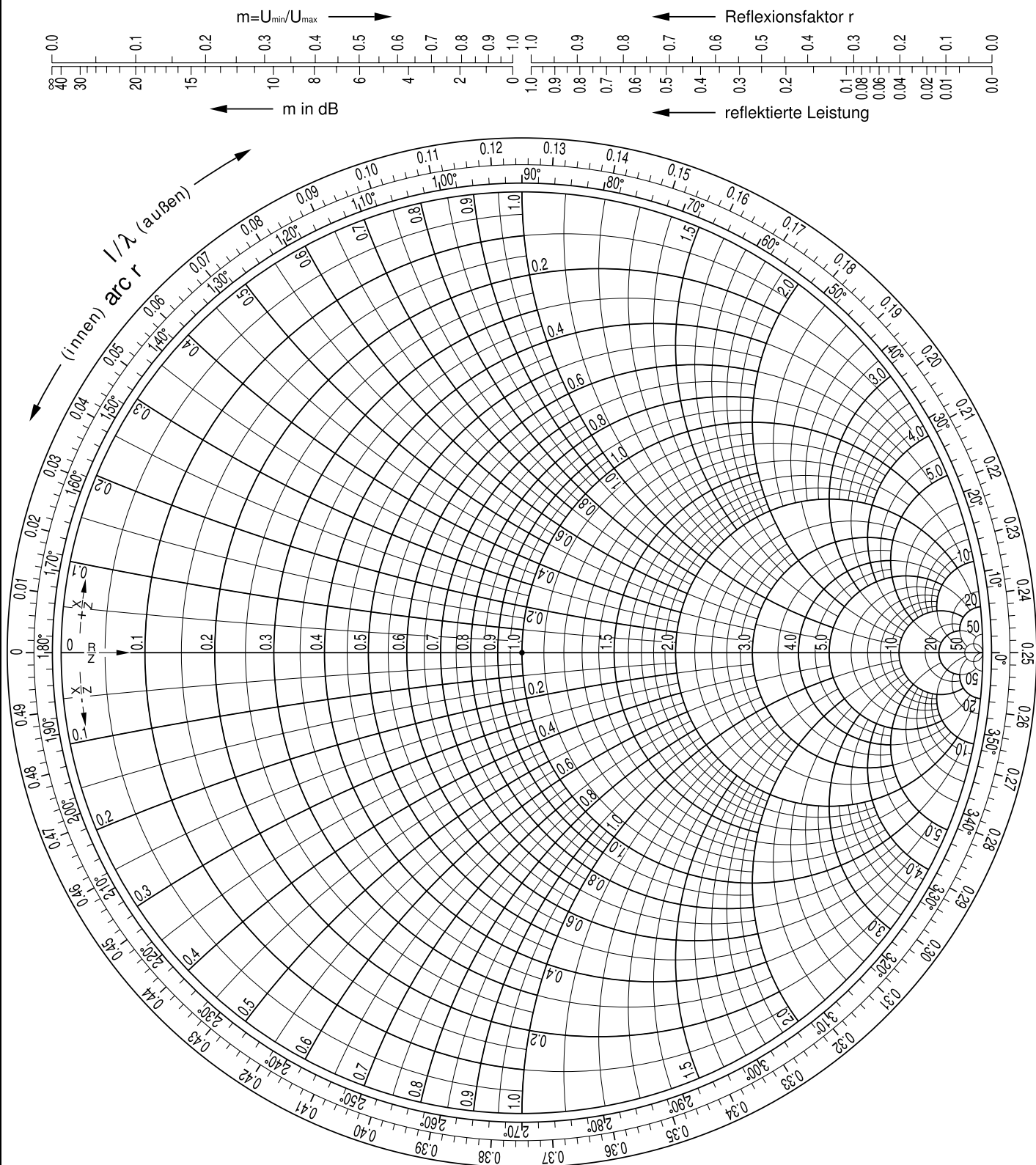
Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

GHF F'22
 22. März 2022
 Seite 27 von 40

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

GHF F'22

22. März 2022

Seite 28 von 40

Name:

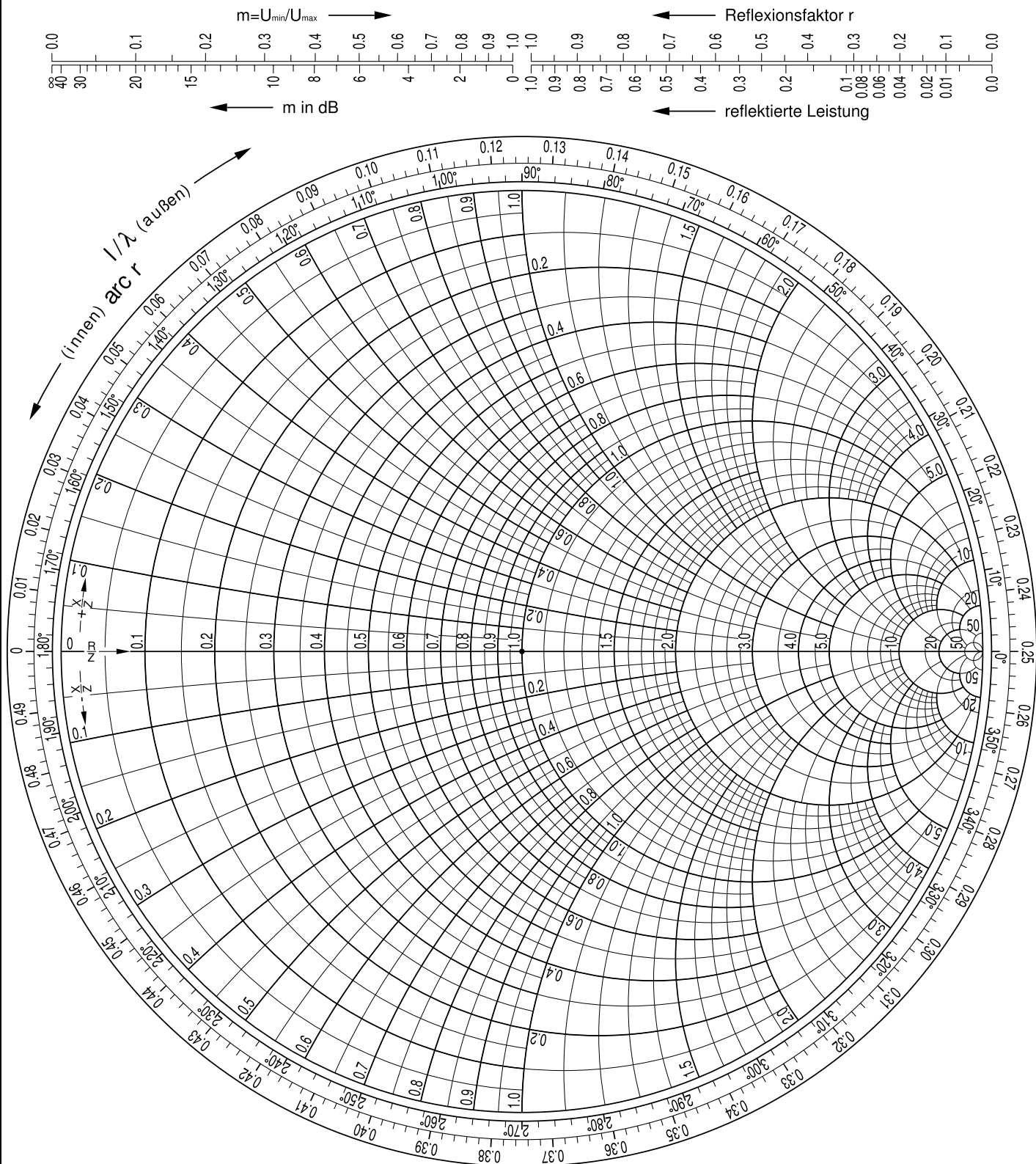
Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

GHF F'22
 22. März 2022
 Seite 29 von 40

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

GHF F'22

22. März 2022

Seite 30 von 40

Name:

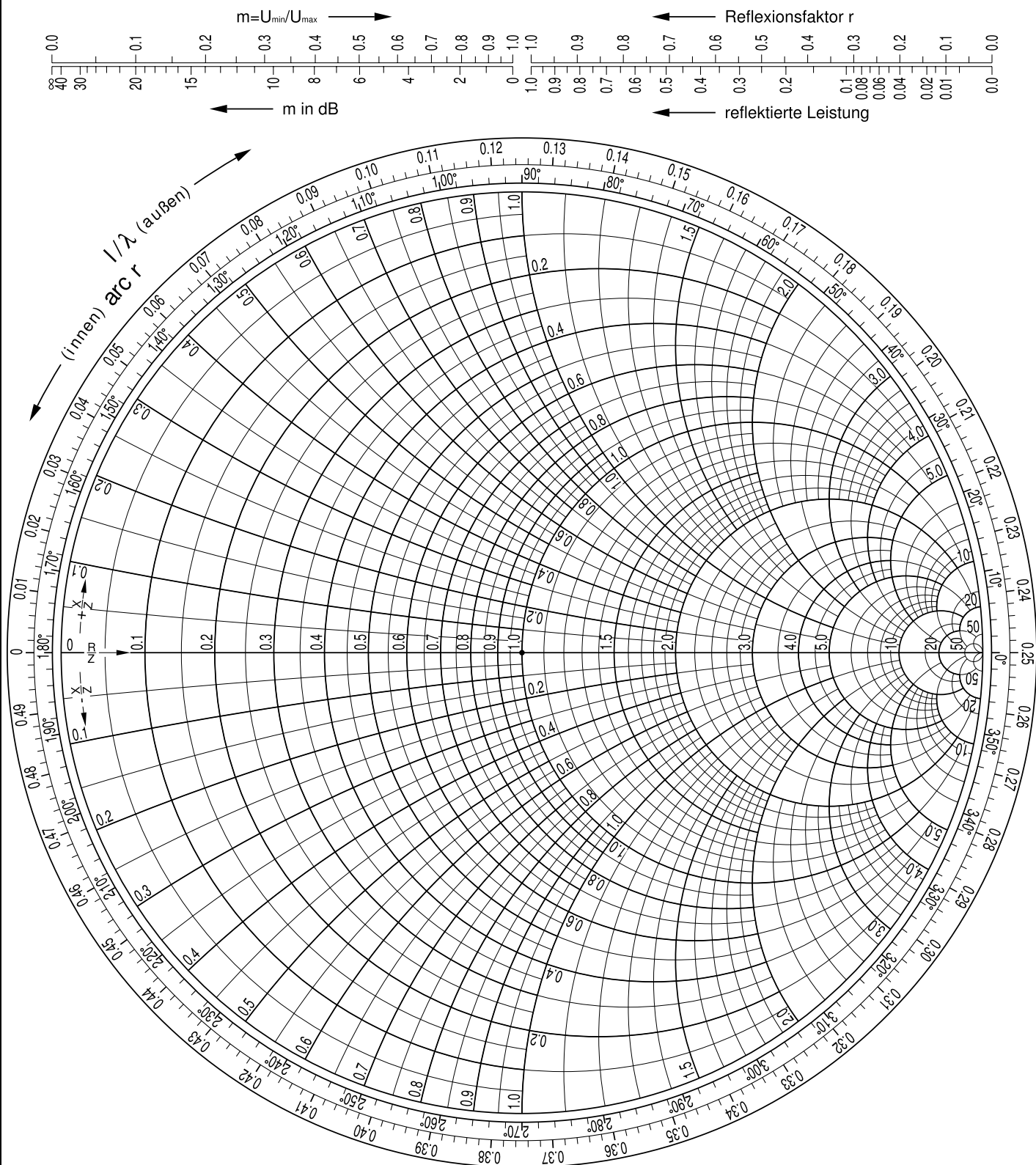
Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

GHF F'22
 22. März 2022
 Seite 31 von 40

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

GHF F'22

22. März 2022

Seite 32 von 40

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

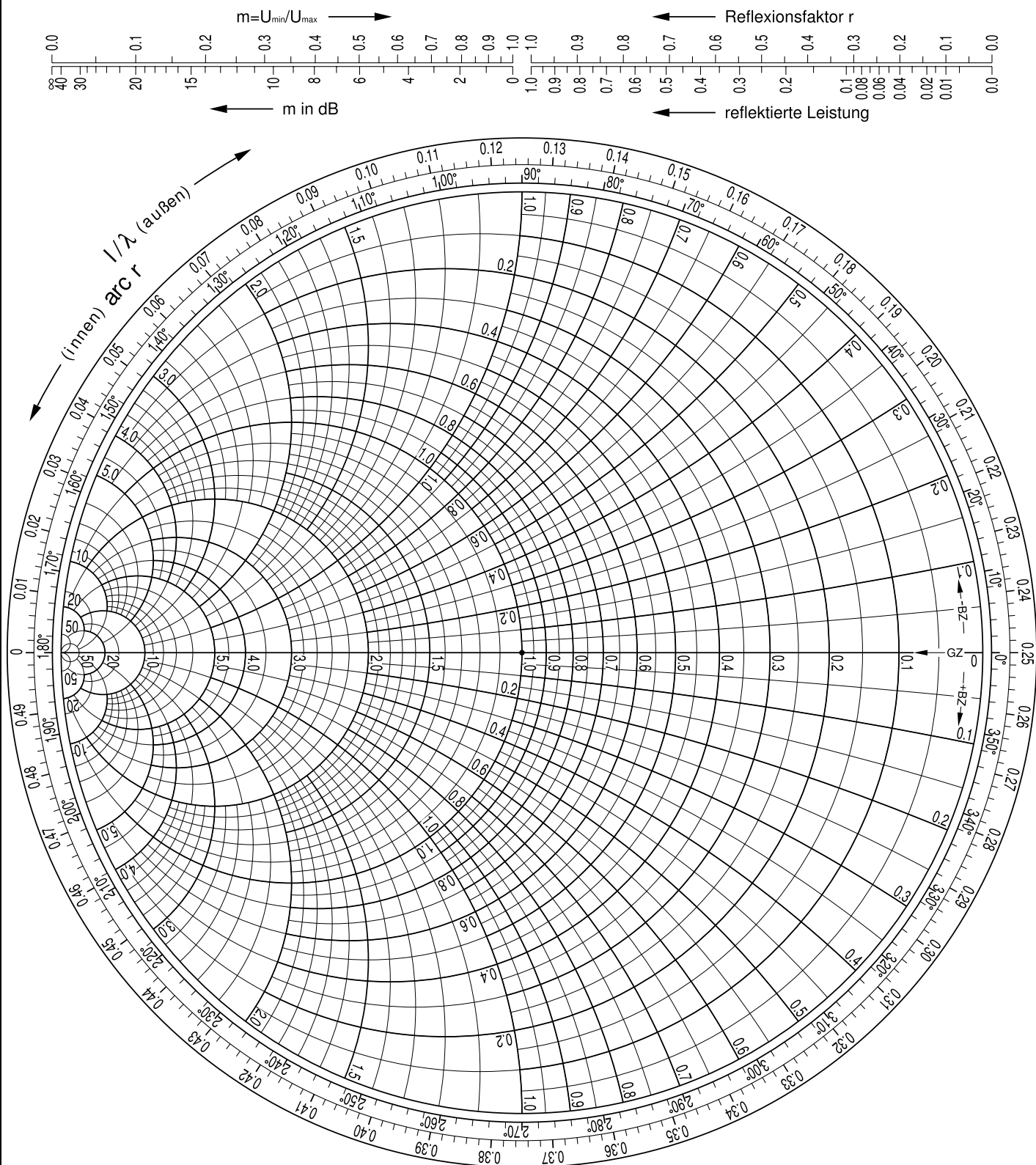
Smith-Diagramm

GHF F'22
 22. März 2022
 Seite 33 von 40

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:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

GHF F'22

22. März 2022

Seite 34 von 40

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

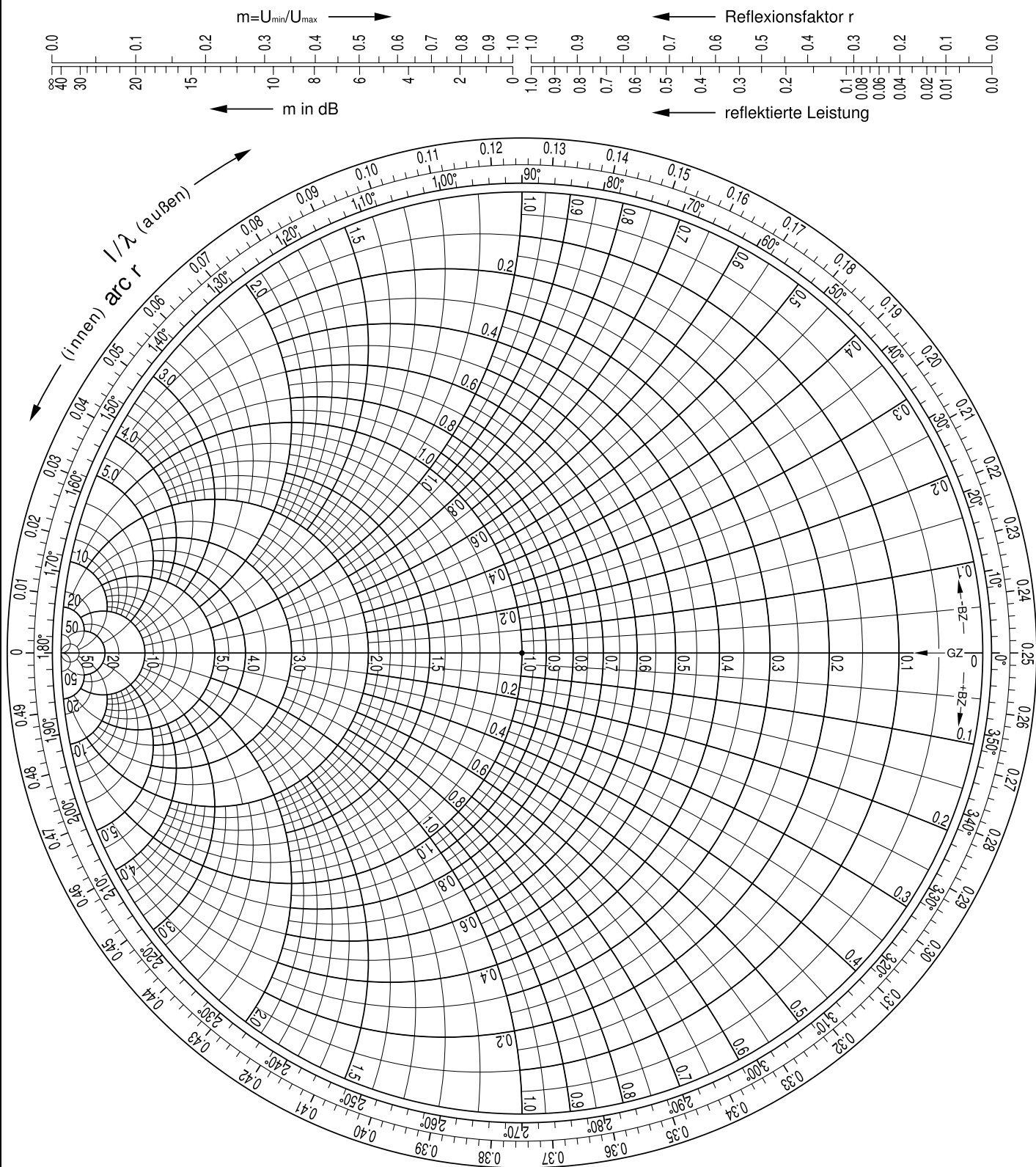
Smith-Diagramm

GHF F'22
 22. März 2022
 Seite 35 von 40

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:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

GHF F'22

22. März 2022

Seite 36 von 40

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

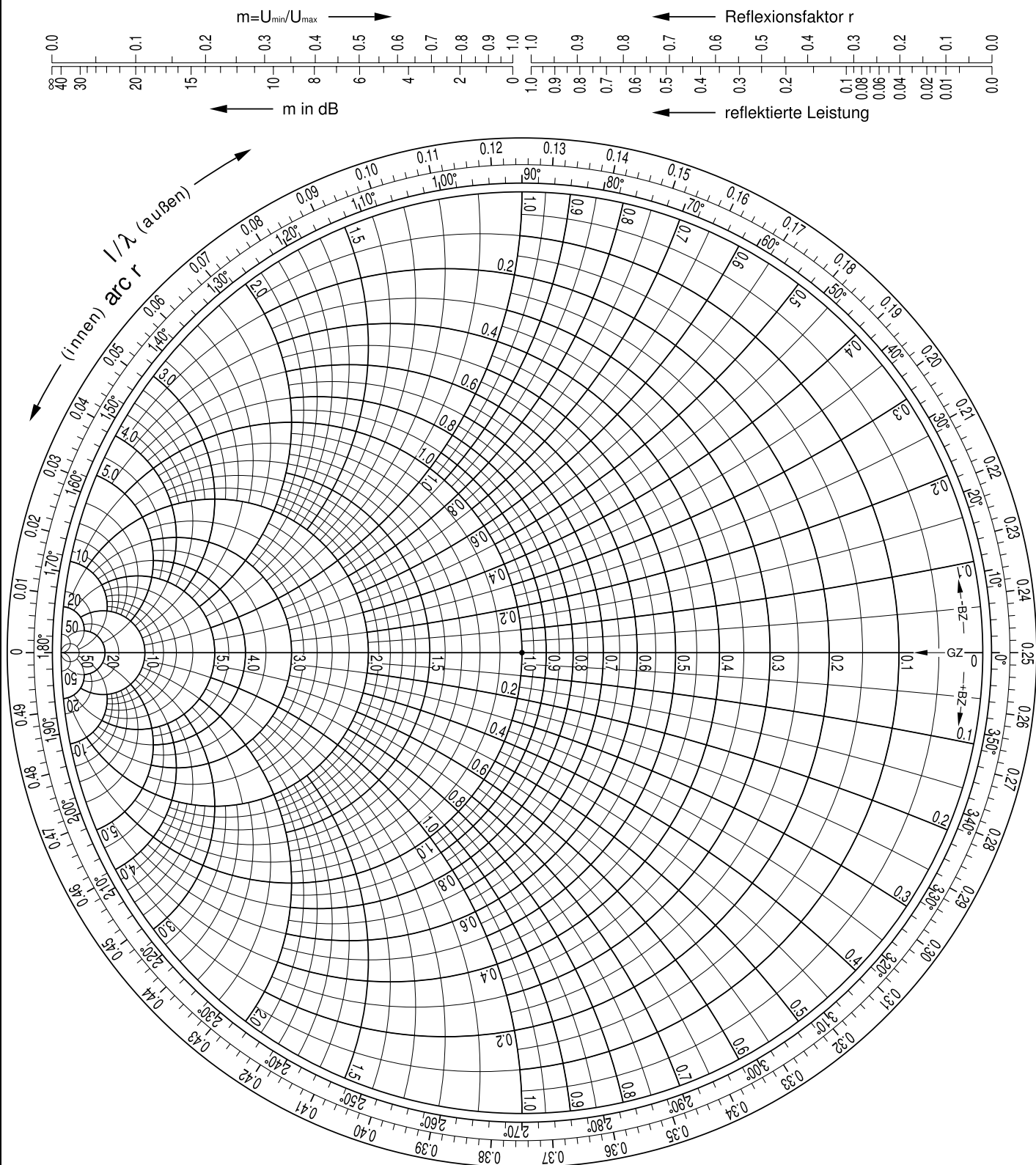
Smith-Diagramm

GHF F'22
 22. März 2022
 Seite 37 von 40

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:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

GHF F'22

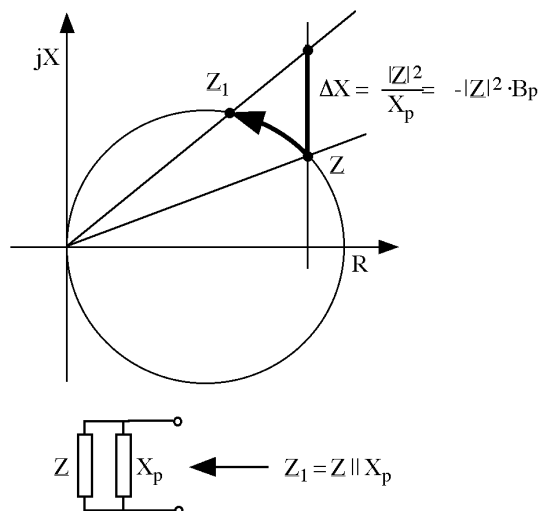
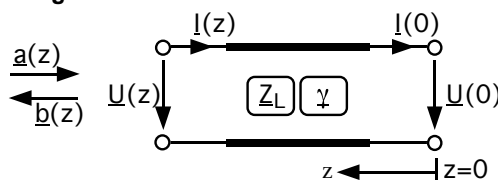
22. März 2022

Seite 38 von 40

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 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**

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

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

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

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)

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

Eindringtiefe s

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

Reflexionsfaktor $\underline{r}$

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

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

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

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

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

Konstanten

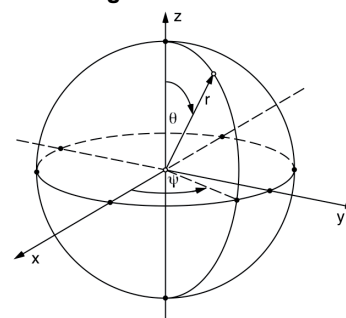
$$Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \, \Omega$$

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

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

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

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

KugelkoordinatenAzimuth: ψ Elevation: θ

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

$$\text{Oberfläche: } F = 4\pi r^2$$

Name:		Grundlagen der Hochfrequenztechnik			GHF F'22	
.....		Formelblatt Zweitorparameter			22. März 2022	
					Seite 40 von 40	
	[S]	[Z]	[Y]	[A] (ABCD)	[T]	
S_{11}	S_{11}	$\frac{(Z_{11} - Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{(Y_0 - Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{A + B/Z_0 - C'Z_0 - D}{A + B/Z_0 + C'Z_0 + D}$	$\frac{T_{12}}{T_{22}}$	
S_{12}	S_{12}	$\frac{2Z_{12}Z_0}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{-2Y_{12}Y_0}{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{2(AD - BC)}{A + B/Z_0 + C'Z_0 + D}$	$\frac{T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21}}{T_{22}}$	
S_{21}	S_{21}	$\frac{2Z_{21}Z_0}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{-2Y_{21}Y_0}{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{A + B/Z_0 + C'Z_0 + D}{-A + B/Z_0 - C'Z_0 + D}$	$\frac{1}{T_{22}}$	
S_{22}	S_{22}	$\frac{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} - Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$	$\frac{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} - Y_0) - Y_{12}Y_{21}}{(Y_{11} + Y_0)(Y_{22} + Y_0) - Y_{12}Y_{21}}$	$\frac{-A + B/Z_0 - C'Z_0 + D}{A + B/Z_0 + C'Z_0 + D}$	$\frac{-T_{21}}{T_{22}}$	
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}	