

Name:
.....

Matrikel-Nr.:
.....

Platz-Nr.:

GHF F'21
29. März 2021
Seite 1 von 42

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	16	19	17	16
erzielte Punkte					

Gesamtbewertung

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



Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Name:
.....

Hinweise
zur Klausur

GHF F'21
29. März 2021
Seite 2 von 42

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 42 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:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 1

GHF F'21
29. März 2021
Seite 3 von 42

Aufgabe 1

(gesamt 17 Punkte)

Allgemeines

☐

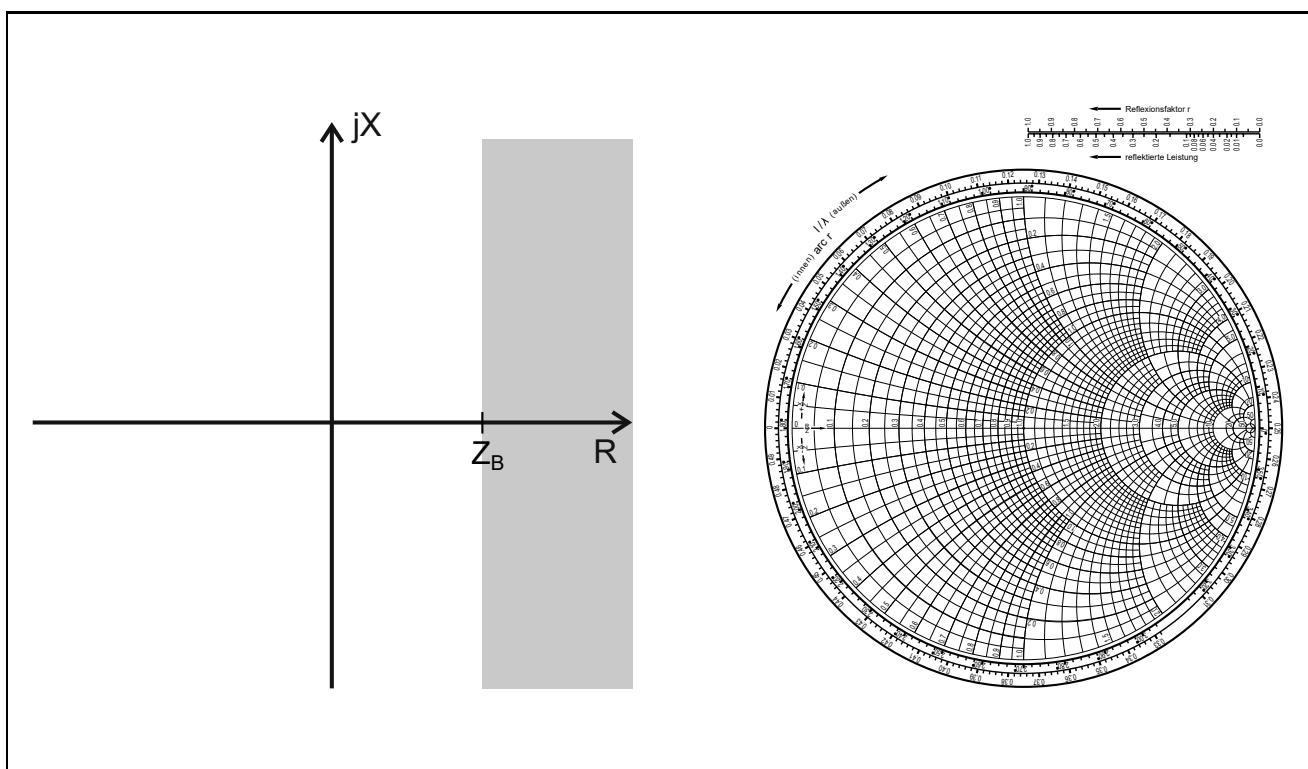
- a) Wie ist der Wellenwiderstand definiert? Geben Sie zusätzlich die Formel zur Berechnung aus Leitungsparametern an.

(2 P.)

☐

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

(1 P.)

☐

Name:

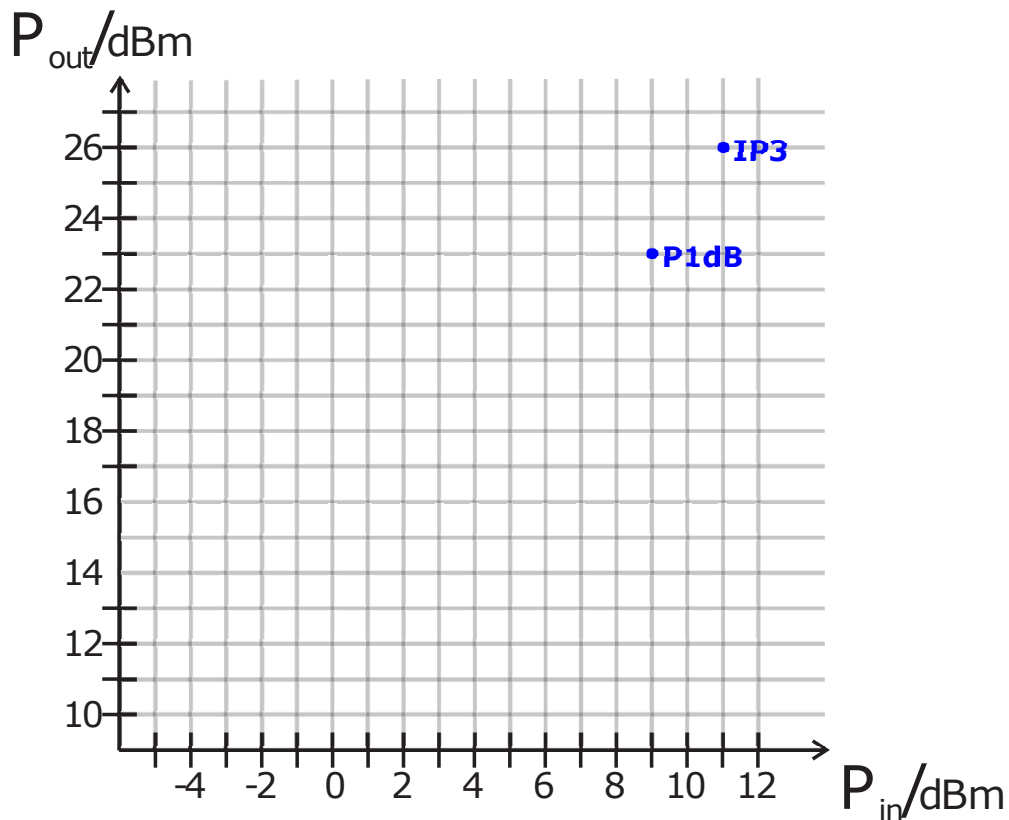
Aufgabe 1

- c) Bei einem Verstärker ist bekannt, dass seine Verstärkung im linearen Bereich $G = 15$ dB beträgt und den unten abgebildeten IP3 ($IIP3 = 11$ dBm) und 1 dB-Kompressionspunkt ($P_{1\text{dB},\text{in}} = 9$ dBm) aufweist.

(3 P.)



Zeichnen Sie die Verstärkerkennlinie der 1. Harmonischen ein und skizzieren Sie den Verlauf der Kennlinie der 3. Harmonischen.



Name:

Aufgabe 1

- d) Einem Empfänger mit einer Rauschzahl von 16 dB und einer Verstärkung von 27 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.)

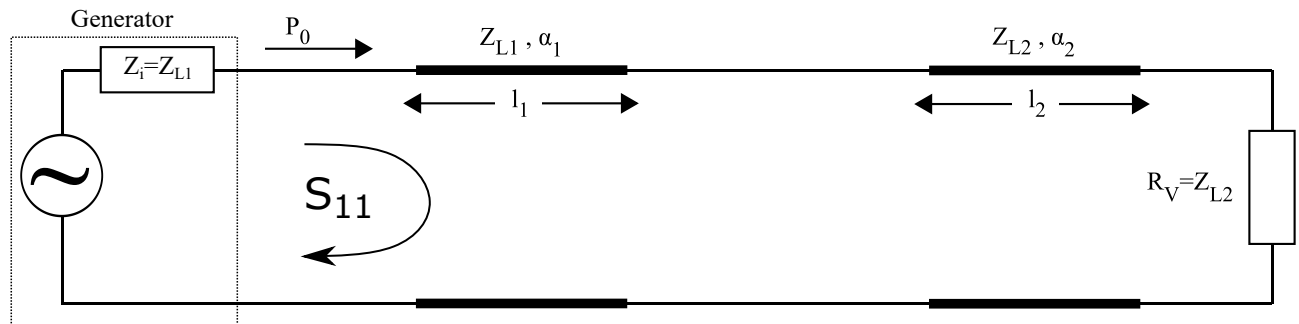


Verstärker	Verstärkung	Rauschzahl
A	20 dB	5 dB
B	18 dB	4 dB
C	16 dB	4 dB

Aufgabe 1

- e) Ein Generator speist die Leitungskonfiguration mit einer Leistung P_0 . Über zwei schwach verlustbehaftete Leitungen der Längen l_1 und l_2 wird ein reeller Verbraucher R_V angeschlossen.

(6P.)



$$\begin{aligned} Z_{L1} &= 50 \, \Omega, & \alpha_1 &= 0.2 \, \text{dB/m}, & l_1 &= 15 \, \text{m} \\ Z_{L2} &= 150 \, \Omega, & \alpha_2 &= 1.2 \, \text{dB/m}, & l_2 &= 5 \, \text{m} \\ P_0 &= 1 \, \text{W}, & f &= 300 \, \text{MHz} \end{aligned}$$

- Wie viel Leistung erreicht den Verbraucher?
- Wie viel Leistung wird in den Leitungen verbraucht?
- Wie groß ist $|S_{11}|$ der Gesamtschaltung in dB?

Hinweis: Für diese Aufgabe benötigen Sie kein Smithdiagramm.

Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Aufgabe 1

GHF F'21

29. März 2021

Seite 7 von 42

Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

GHF F'21

29. März 2021

Seite 8 von 42

Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 2

GHF F'21
29. März 2021
Seite 9 von 42

Aufgabe 2

(gesamt **16 Punkte**)

Radar

☐

- a) Zeichnen Sie die wichtigsten Komponenten eines monostatischen FMCW Radars in ein Blockschaltbild. Beschriften Sie die Bauteile und geben Sie bei den einzelnen Leitungsabschnitten die Frequenz sowie die Ausbreitungsrichtung des dort jeweils vorliegenden Signals an.

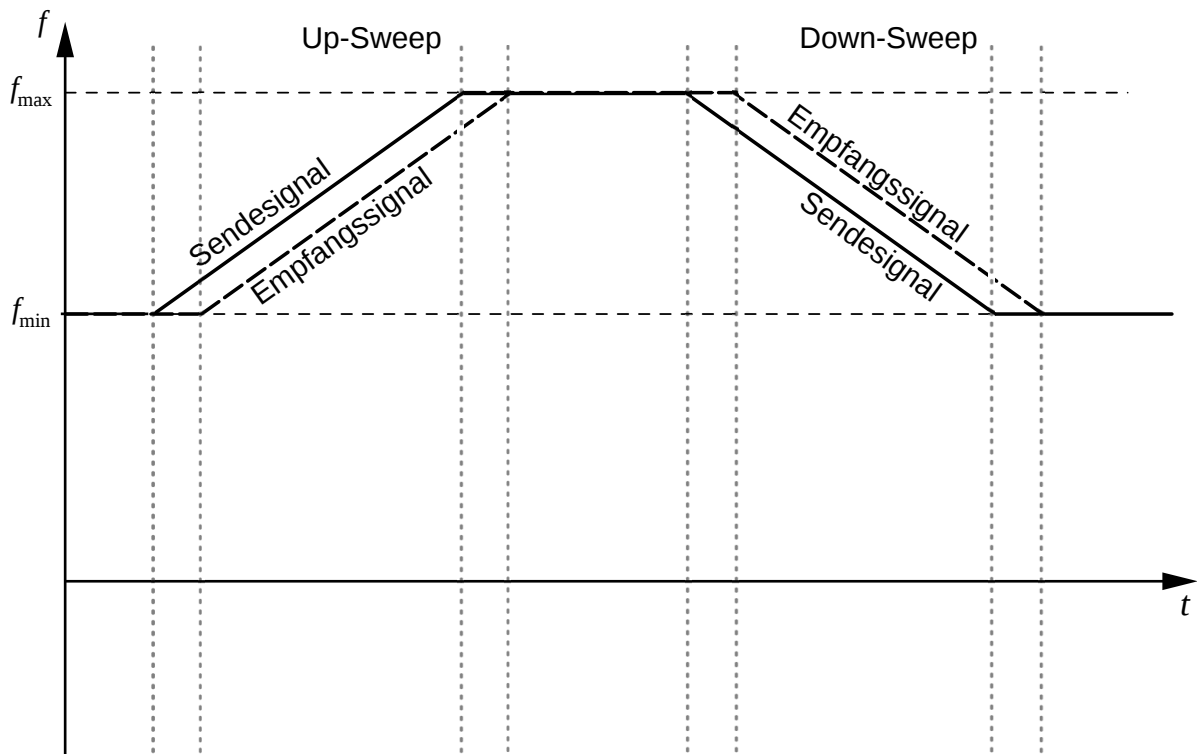
(**4P.**)

☐

Aufgabe 2

- b) Die unten stehende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Frequenz von Sende- und Empfangssignal des FMCW Radars aus der vorherigen Aufgabe. Zeichnen Sie ausgehend hiervon den zeitlichen Verlauf der Beat-Frequenz f_{Δ} , die sich durch Mischen des Empfangs- und Sendesignals im Empfänger ergibt und markieren Sie die Messzeit τ_m . Warum wird für die Signalauswertung das Signal der steigenden und der fallenden Rampe verwendet?

(4P.)



Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 2

GHF F'21
29. März 2021
Seite 11 von 42

- c) 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

- d) Ein monostatisches FMCW-Radar soll im Automobilbereich bei 77 GHz eingesetzt werden. Die Sendeleistung beträgt $P_{\text{Tx}} = 15 \text{ dBm}$ und der Gewinn von Sende- und Empfangsantenne $G = 18 \text{ dBi}$. Welchen Radarrückstreuquerschnitt (RCS) σ muss ein Objekt in einer Entfernung von 200 m mindestens aufweisen, wenn das Radar eine minimale Empfangsleistung von $P_{\text{Rx}} = -100 \text{ dBm}$ benötigt? Geben Sie das Ergebnis zusätzlich in dBm^2 an.

(4P.)



Aufgabe 3

Aufgabe 3

(gesamt 19 Punkte)

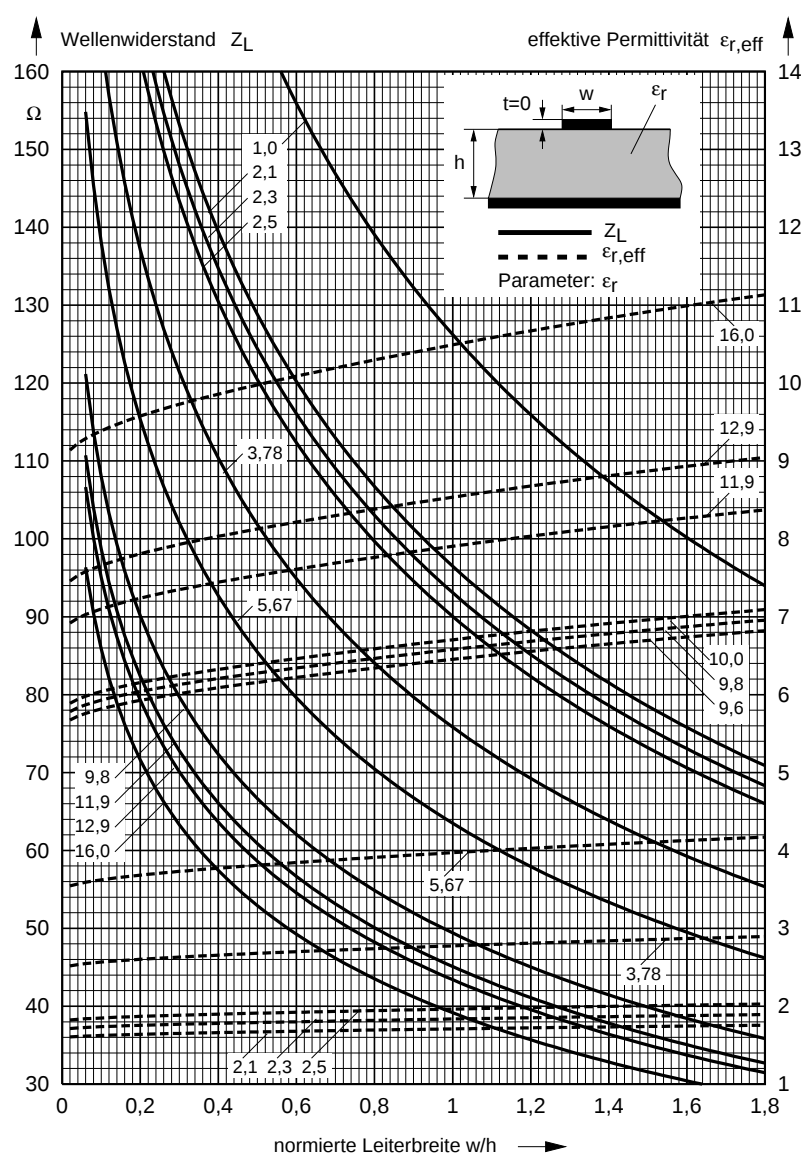
Stehende Wellen und Leitungen



Ein Aluminiumoxid Substrat soll verwendet werden, um eine Mikrostreifenleitung zu realisieren. Das Substrat hat eine Dicke von $h = 254 \mu\text{m}$, eine Permittivität von $\epsilon_r = 9,8$ und ist von beiden Seiten mit $3 \mu\text{m}$ Gold beschichtet.

- a) Bestimmen Sie die Leiterbreite w bei der die Mikrostreifenleitung einen Wellenwiderstand $Z_L = 50 \Omega$ besitzt. Nutzen Sie folgendes Diagramm.

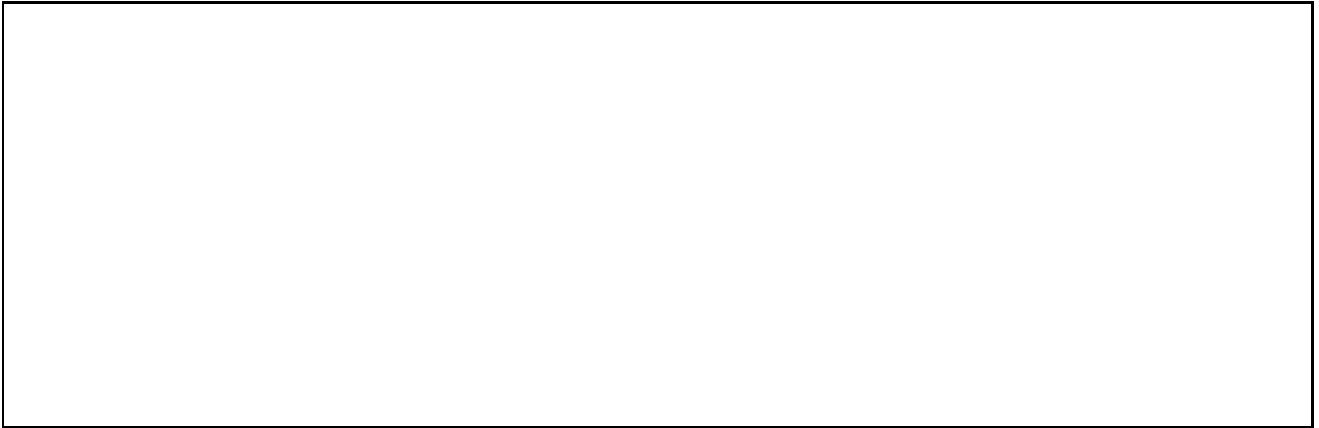
(2 P.)



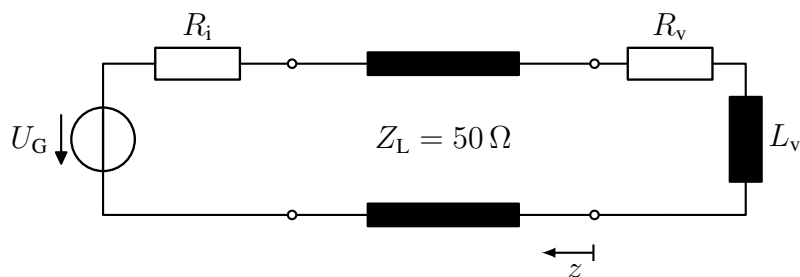
Aufgabe 3

- b) Zeichnen Sie den Querschnitt der Mikrostreifenleitung und skizzieren Sie die Feldlinien (E- und H-Feld).

(2 P.)



Gegeben sei folgende Schaltung, in der ein Generator mit dem Innenwiderstand $R_i = Z_L$, der Leerlaufspannung U_G und mit der Frequenz $f_0 = 1$ GHz eine komplexe Last über die oben dimensionierte Mikrostreifenleitung mit dem Wellenwiderstand $Z_L = 50 \Omega$ speist. Die Last besteht aus einer Induktivität mit $L_v = 3,3$ nH und einem Serienwiderstand $R_v = 5 \Omega$.



- c) Berechnen Sie den Reflexionsfaktor r_v und das Stehwellenverhältnis auf der Leitung.

(3 P.)

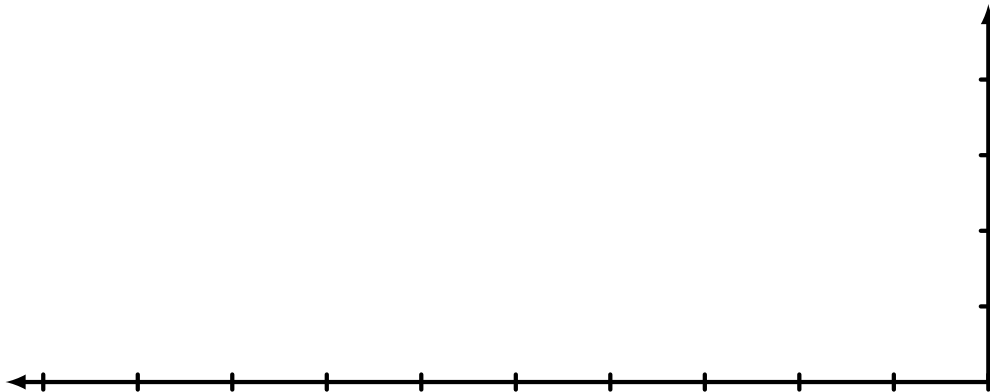


Name:

Aufgabe 3

- d)** 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.

(4P.)



Name:

Aufgabe 3

e) Berechnen Sie die Wellenlänge auf der Mikrostreifenleitung.

(2 P.)



f) Gegeben sei eine am Ende kurzgeschlossene, 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 .

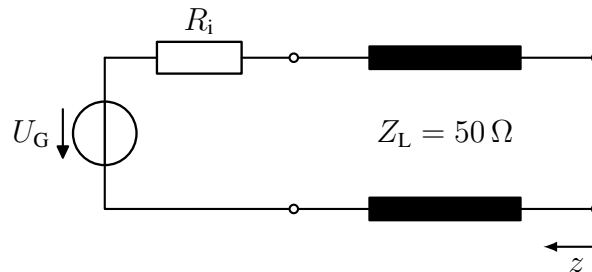
(2 P.)



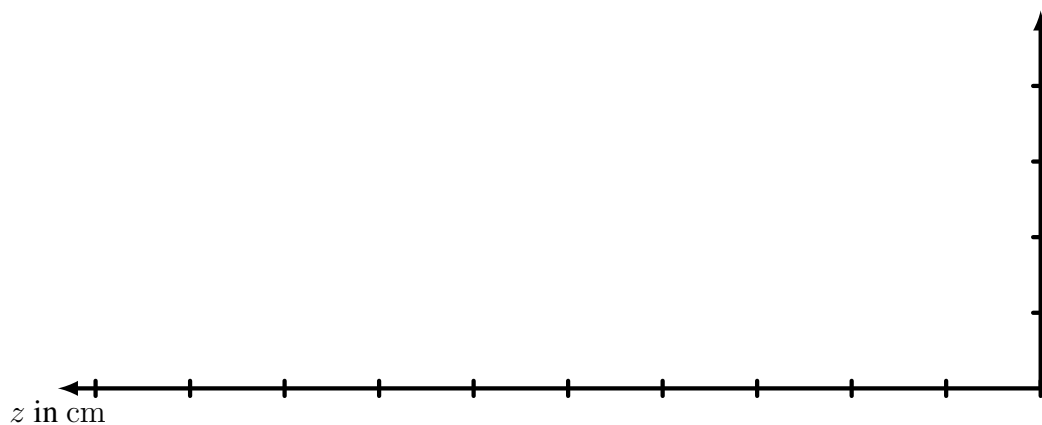
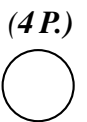
Name:

Aufgabe 3

Gegeben sei folgende Schaltung, in der ein Generator mit dem Innenwiderstand $R_i = Z_L$, der Leerlaufspannung U_G und der Frequenz $f_0 = 3 \text{ GHz}$ eine luftgefüllte Leitung ($\epsilon_r = 1$) mit dem Wellenwiderstand $Z_L = 50 \Omega$ speist. Die Leitung ist an ihrem Ende offen.



- g) Skizzieren Sie die Einhüllende des Spannungsverlaufs auf der offenen Leitung. Der Leerlauf befindet sich bei $z = 0$. Nutzen Sie das unten stehende Diagramm. Achten Sie auf die Achsenbeschriftung. Die x-Achse soll nicht auf die Wellenlänge normiert werden! (4P.)



Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

GHF F'21

29. März 2021

Seite 18 von 42

Aufgabe 4

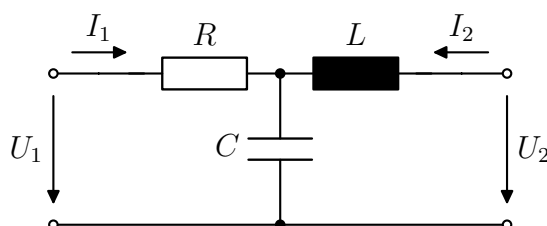
Aufgabe 4

(gesamt 17 Punkte)

Mikrowellen-Netzwerkanalyse

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

(1 P.)



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

(4 P.)

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

Begründen Sie ihre Antwort.

Aufgabe 4

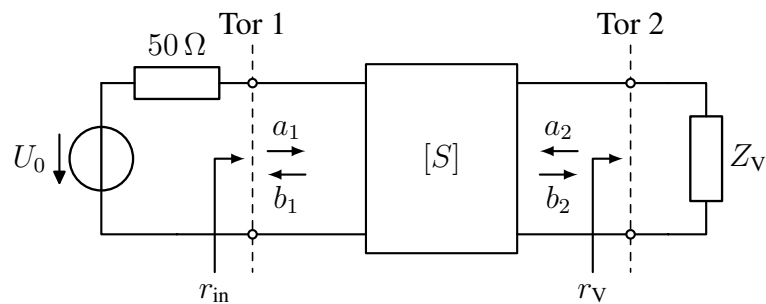
- c) Das unten gezeigte Zweitor verbindet einen Generator mit der Generatorspannung U_0 und einem Innenwiderstand von $50\ \Omega$ mit einem Verbraucher Z_V . Das Zweitor soll so gespeist werden, dass dem Verbraucher eine Wirkleistung von $1\ \text{W}$ zugeführt wird. Die Lastimpedanz beträgt $Z_V = Z_0/4$. Das Zweitor hat folgende Matrix mit Bezug $Z_0 = 50\ \Omega$:

(6P.)



$$S = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,3 \\ 0,5 & 0,2 \end{bmatrix}$$

Berechnen sie den Wert für a_1 .



Name:
.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Aufgabe 4

GHF F'21
29. März 2021
Seite 21 von 42

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

(3 P.)



- e) Berechnen Sie die Verlustleistung des Zweitorts in der oben gezeigten Anordnung. Wenn Sie in der vorherigen Aufgabe kein Ergebnis erhalten haben, rechnen Sie mit $a_1 = 4 \sqrt{W}$.

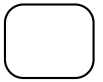
(3 P.)



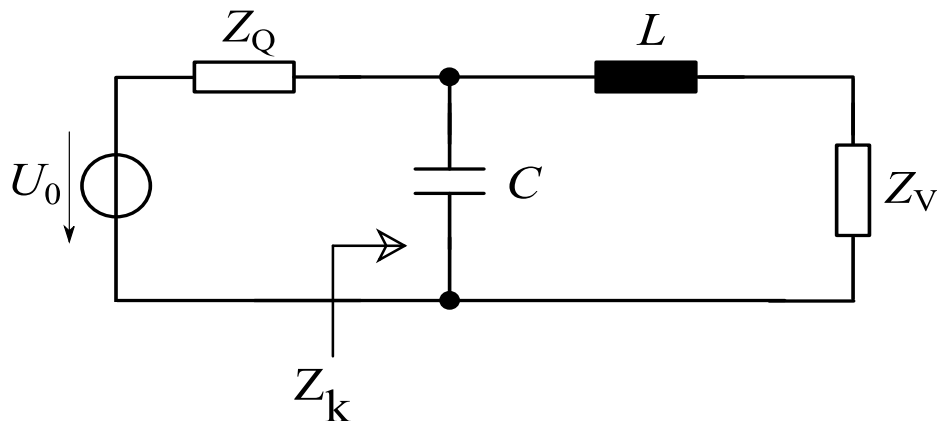
Aufgabe 5

Aufgabe 5

(gesamt 16 Punkte)

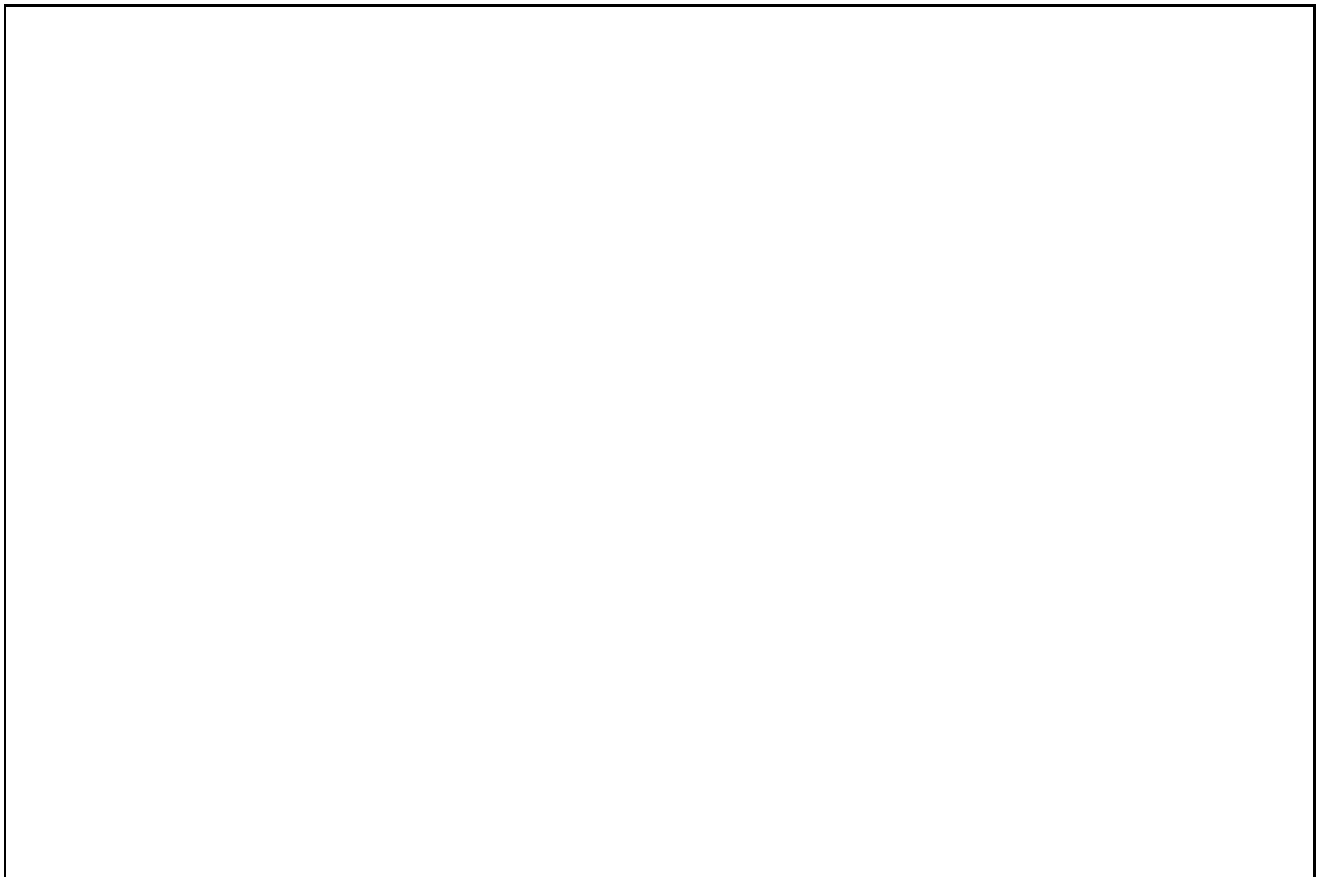
Smithdiagramm

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



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

(4P.)



Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Aufgabe 5

GHF F'21

29. März 2021

Seite 23 von 42

Aufgabe 5

b)

(5 P.)



Ein Verbraucher mit der Impedanz $Z_V = (150 + j200) \Omega$ soll an eine Quelle mit der Impedanz $Z_Q = 100 \Omega$ reflexionsfrei angeschlossen werden. Zur Verfügung stehen Ihnen folgende Elemente:

- eine Spule mit beliebiger Induktivität
- eine Leitung beliebiger Länge mit Wellenwiderstand $Z_L = 100 \Omega$

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

Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Aufgabe 5

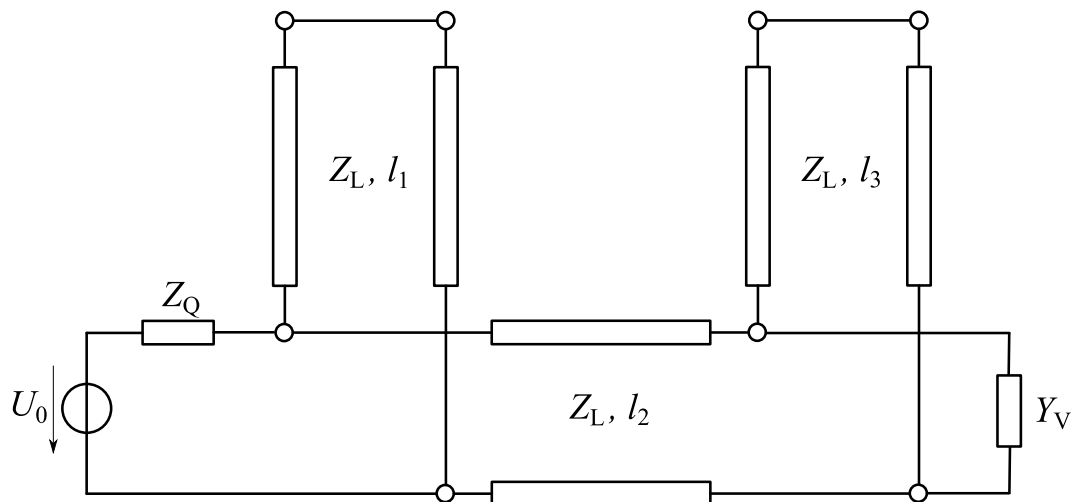
GHF F'21

29. März 2021

Seite 25 von 42

Aufgabe 5

Die unten gezeigte Leitungsanordnung wird dazu genutzt, die Lastadmittanz $Y_V = (0,02 - j0,012) \text{ S}$ an den Quellwiderstand $Z_Q = 125 \Omega$ anzupassen. Die kurzgeschlossenen Stichleitungen besitzen die Längen $l_1/\lambda = 0,3475$ und $l_3/\lambda = 0,134$. Alle drei Leitungen weisen einen Wellenwiderstand $Z_L = 50 \Omega$ auf.



- c) Bestimmen Sie mithilfe des Smithcharts die Länge l_2/λ , sodass die Lastadmittanz optimal an den Quellwiderstand angepasst ist.

(7P.)

Markieren Sie die einzelnen Transformationsschritte in einem Smithchart und begründen Sie Ihr Vorgehen. Die Zuordnung der einzelnen Transformationsschritte zu den Transformations-elementen muss klar erkennbar sein.



Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Aufgabe 5

GHF F'21

29. März 2021

Seite 27 von 42

Name:

.....

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

GHF F'21

29. März 2021

Seite 28 von 42

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

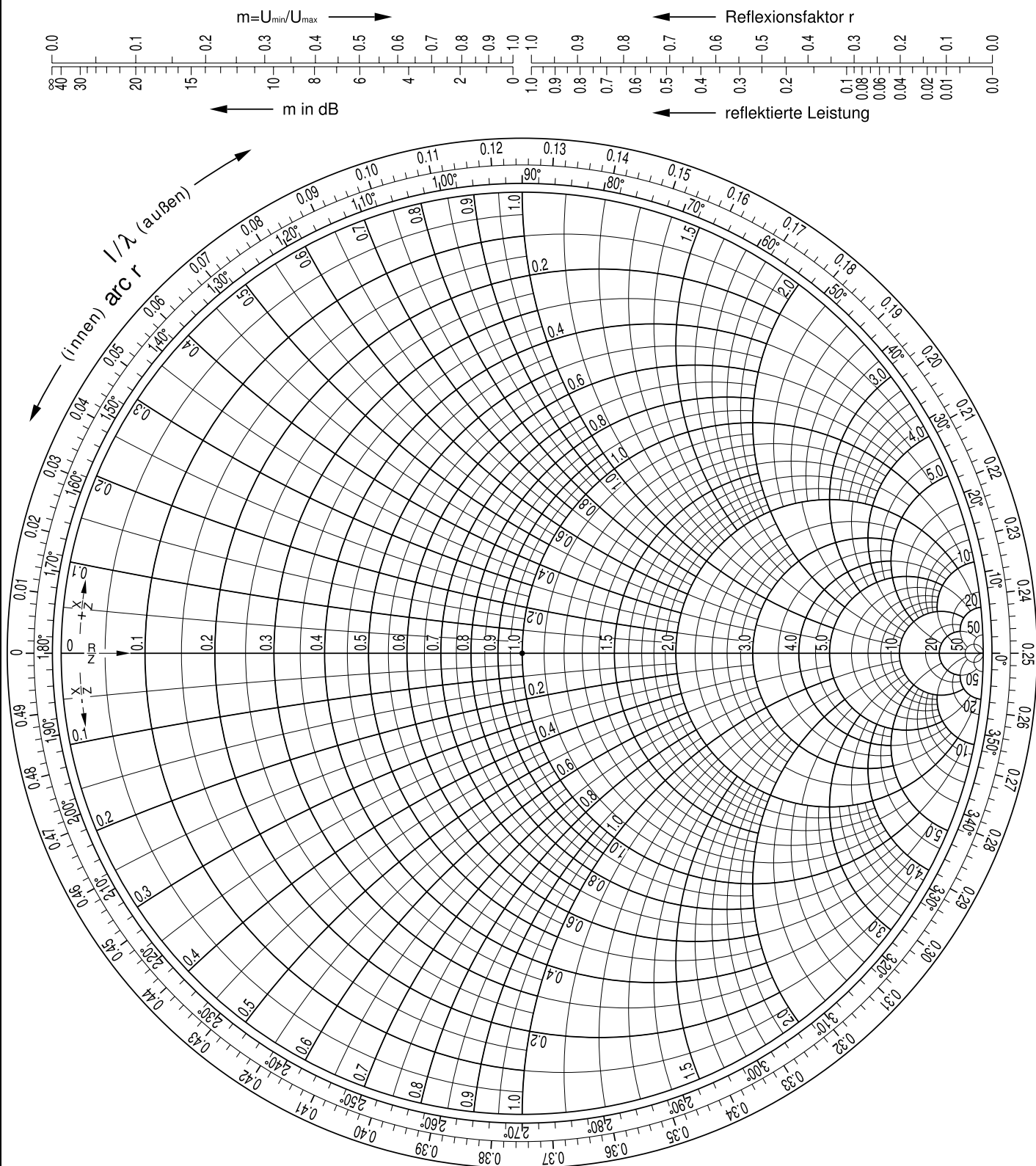
GHF F'21
29. März 2021
Seite 29 von 42

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'21

29. März 2021

Seite 30 von 42

Name:

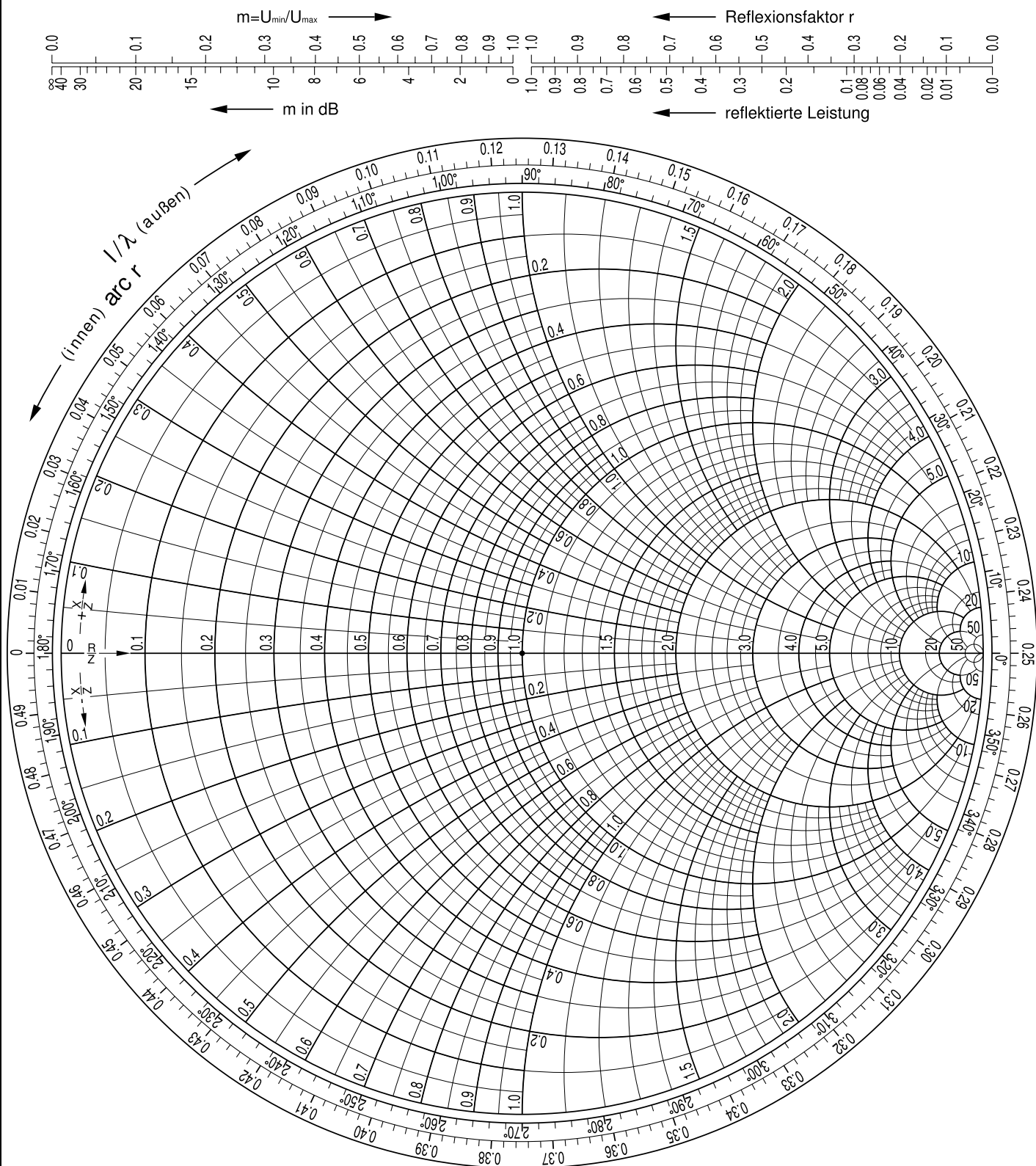
Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

GHF F'21
 29. März 2021
 Seite 31 von 42

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'21

29. März 2021

Seite 32 von 42

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

Smith-Diagramm

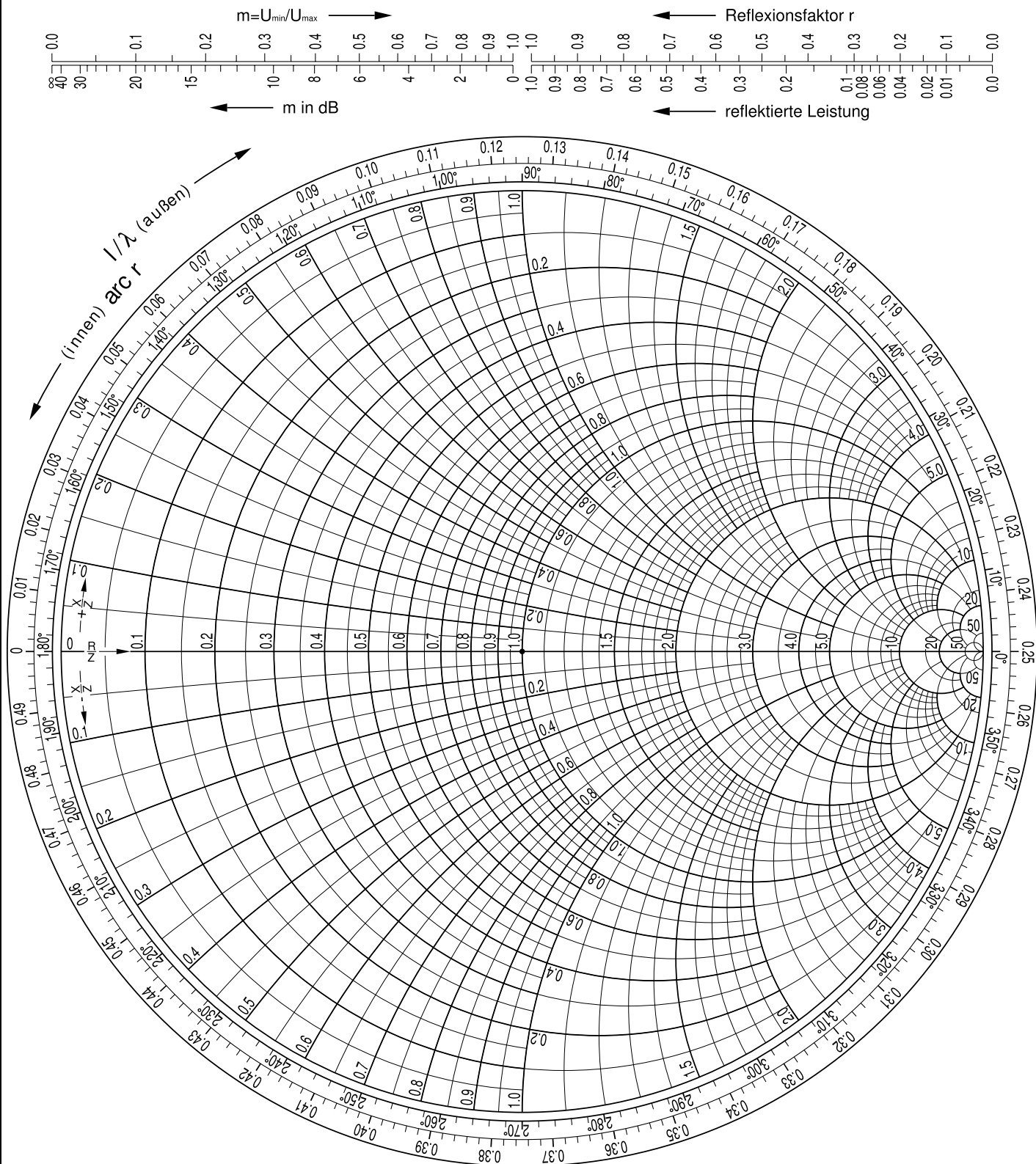
GHF F'21
29. März 2021
Seite 33 von 42

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'21

29. März 2021

Seite 34 von 42

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

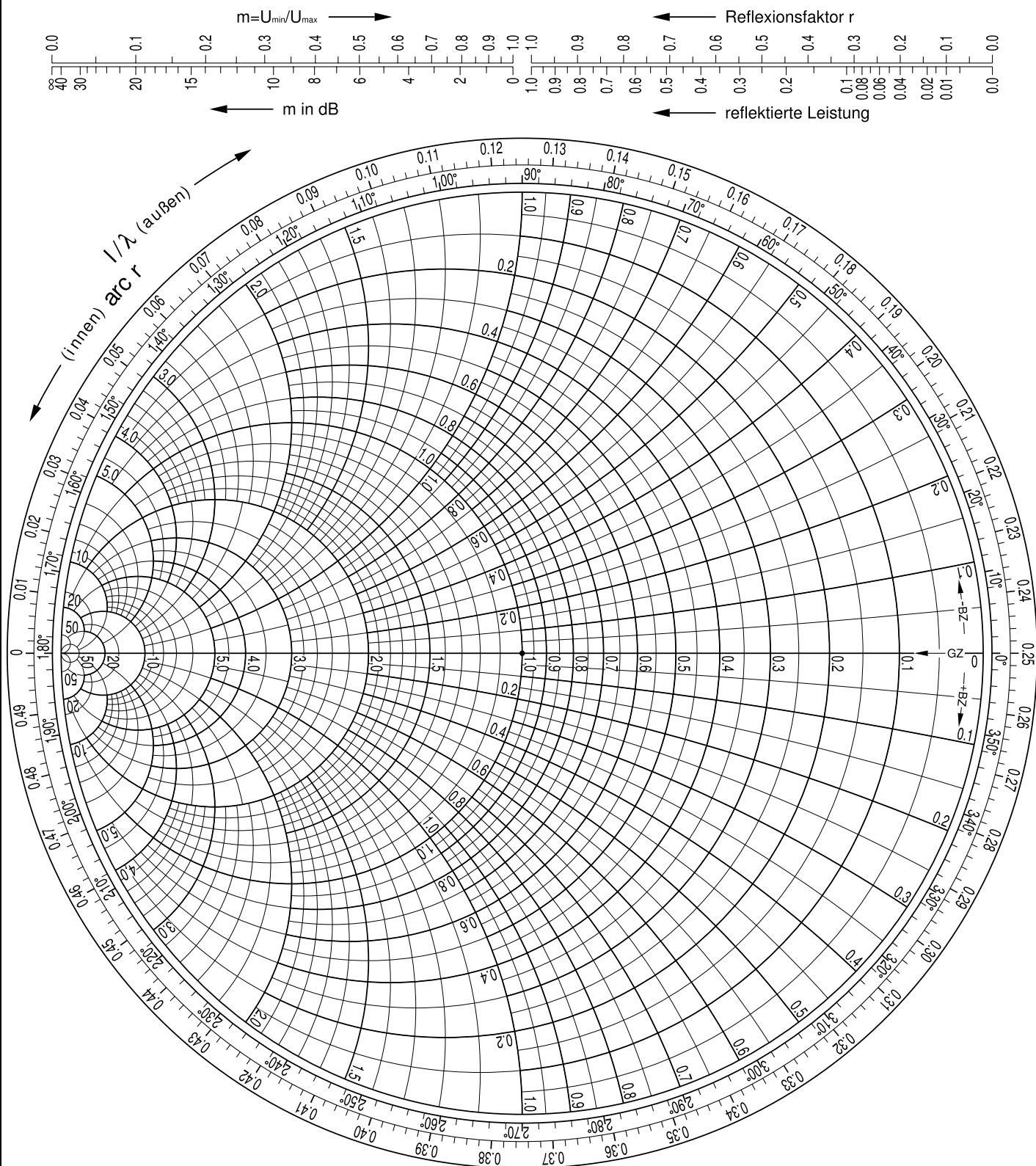
Smith-Diagramm

GHF F'21
 29. März 2021
 Seite 35 von 42

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'21

29. März 2021

Seite 36 von 42

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

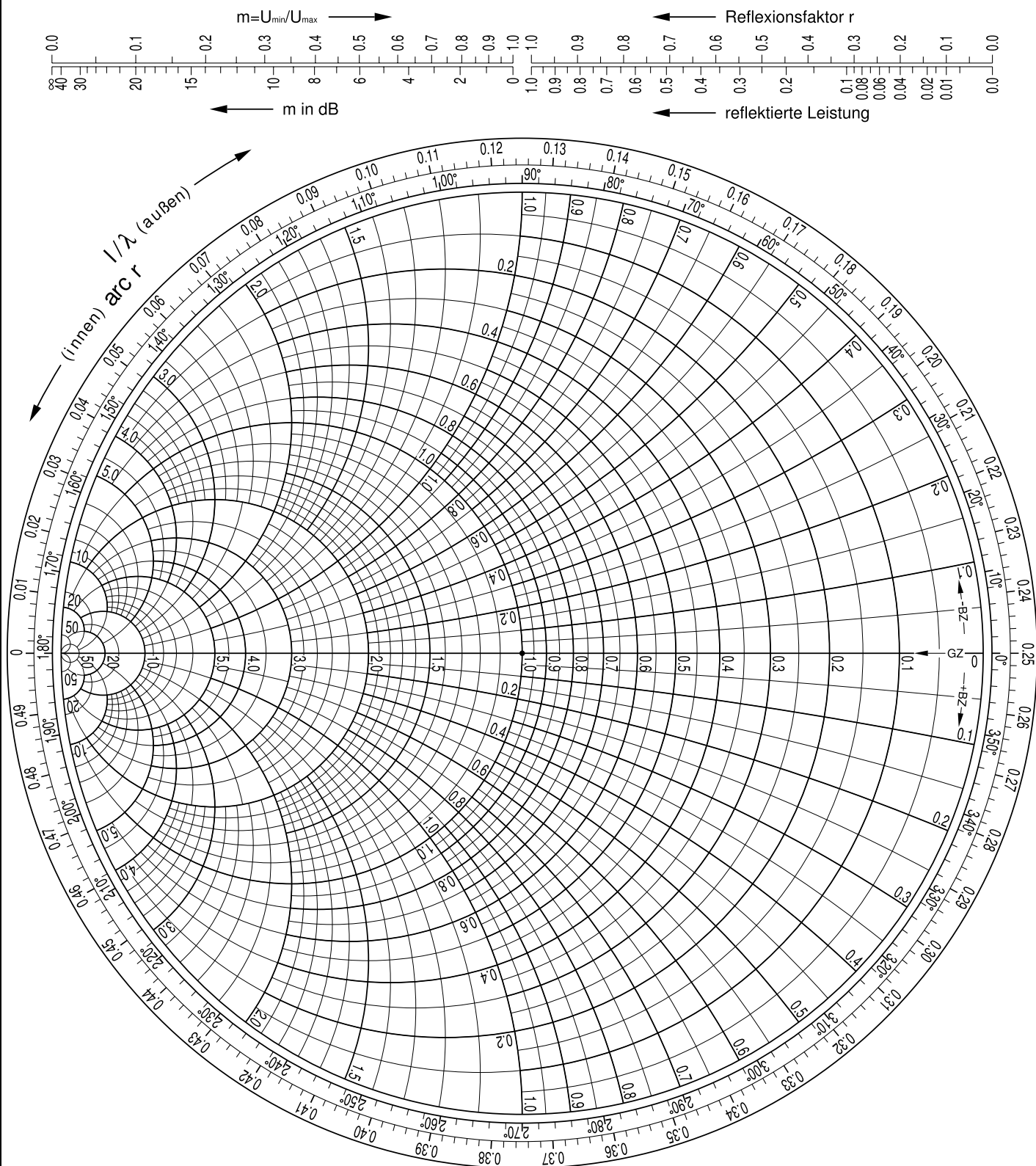
Smith-Diagramm

GHF F'21
 29. März 2021
 Seite 37 von 42

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'21

29. März 2021

Seite 38 von 42

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik

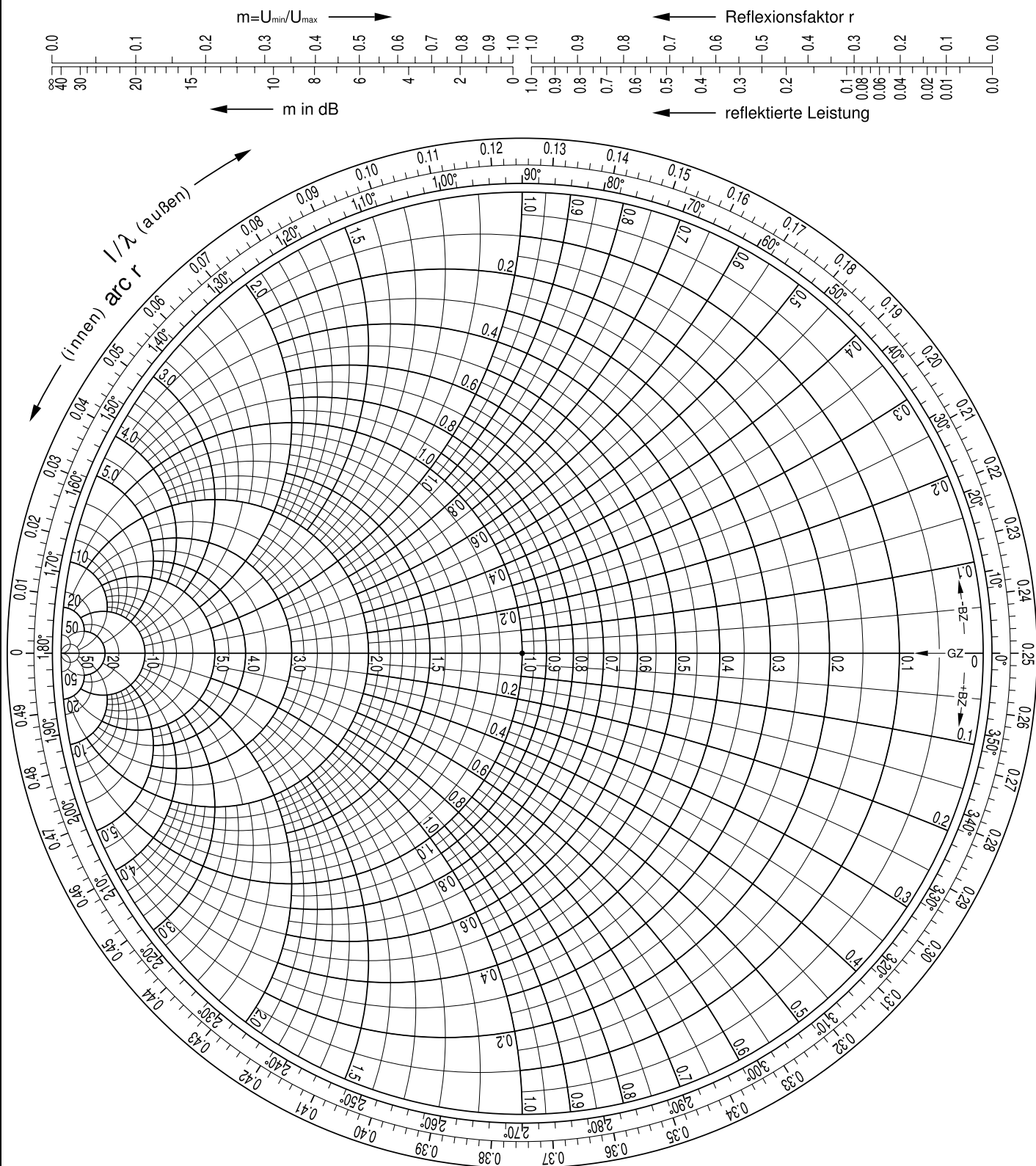
Smith-Diagramm

GHF F'21
 29. März 2021
 Seite 39 von 42

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'21

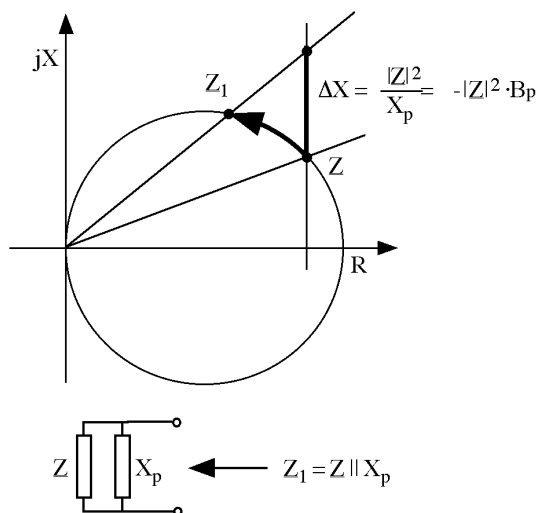
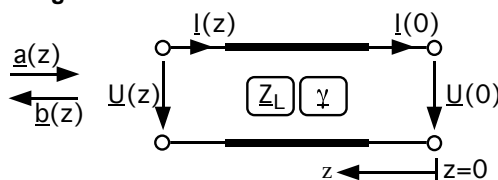
29. März 2021

Seite 40 von 42

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 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

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

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

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

Konstanten

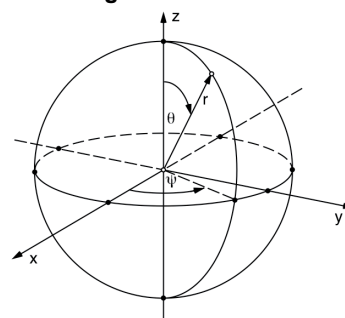
$$Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \, \Omega$$

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

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

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

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

KugelkoordinatenAzimuth: ψ Elevation: θ

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

$$\text{Oberfläche: } F = 4\pi r^2$$

Name:

Grundlagen der Hochfrequenztechnik
Formelblatt Zweitorparameter

GHF F'21
29. März 2021
Seite 42 von 42

	[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}