

TU WIEN

WELLENAUSBREITUNG

VU-389.064

Prüfungen

Beispiele

Angaben

Wir können die Unterlagen von denen wir gelernt haben nicht ändern,
aber wir können der Nachwelt bessere hinterlassen.

Lizenz:

GNU GPLv3

1. April 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Maxwell Theorie	5
3	Die homogene ebene Welle (HEW)	5
4	Reflexion an glatten Grenzflächen, die Parallelplattenleitung	5
	Dämpfungsbelag der Parallelplattenleitung 1.	5
	Parallelplattenleiter 2.	6
	Polarisationsfilter 3.	7
	Übergang von Vakuum nach Glas 4.	8
	Stehende Welle 5.	10
	Lichtquelle über Aquarium 6.	11
	Schwingkreis mit verteiltem Kondensator 7.	11
5	Die Oberflächenwelle	12
6	Rechteckhohlleiter und Resonatoren	12
	Rechteckhohlleiter 8.	12
	Rechteckhohlleiter mit Kunststoffeinsatz 1 9.	14
	Rechteckhohlleiter mit Kunststoffeinsatz 2 10.	15
	Hohlraumresonator 11.	16
	Möbius-Resonator 12.	17
	Geschlitzter Rechteckhohlleiter 13.	18
	Toastscheibe in Mikrowellenherd 14.	19
7	Koaxialleitungen	21
	Koaxialkabel 15.	21
	Vergleich Koaxialkabel - Rechteckhohlleiter 16.	23
	TEM Leitung als Zweitor 17.	24
	HGÜ für Solarstrom aus der Sahara 18.	25
8	Dielektrische Wellenleiter	26
	Dielektrische Platte 19.	26

Dielektrischer Stab zwischen Metallplatten 20.	27
Übergang von Parallelplattenleitung zu dielektrischem Wellenleiter 21.	28
9 Streifenleitung	29
Mikrostreifenleitung 22.	29
10 Wellen und Hindernisse	32
11 Antennen	32
Drahtloser Temperatursensor 23.	32
Richtdiagramm und Gewinn einer Antenne 24.	33
Darstellung der Richtcharakteristik 25.	33
Richtdiagramm einer Antennengruppe 26.	35
Militärisches Radar 27.	35
12 Wellen im freien Raum	36
Flughafenradar 28.	36
Schiffsradar 29.	37
Richtfunkstrecke 30.	38
Richtfunkstrecke mit Hilfsspiegel 31.	38
Satellitenfunk 32.	40
Pegelplan 33.	41
Mars Odyssey 34.	41
13 Mehrwegeausbreitung	42
Kanalmessung 35.	42
Zeitinvariante Zweiwegeausbreitung 36.	43
Mobilfunksystem 37.	44

Werter Student!

Diese Unterlagen werden dir **kostenlos** zur Verfügung gestellt, damit sie dir im Studium behilflich sind. Sie wurden von vielen Studierenden zusammengetragen, digitalisiert und aufgearbeitet. Ohne der Arbeit der Studierenden wären diese Unterlagen nicht entstanden und du müsstest dir jetzt alles selber zusammensuchen und von schlecht eingescannten oder abfotografierten Seiten lernen. Zu den Beispielen gibt es verschiedene Lösungen, welche du dir auch erst mühsamst raussuchen und überprüfen müsstest. Die Zeit die du in deine Suche und Recherche investierst wäre für nachfolgende Studenten verloren. Diese Unterlagen leben von der Gemeinschaft die sie betreuen. Hilf auch du mit und erweitere diese Unterlagen mit deinem Wissen, damit sie auch von nachfolgenden Studierenden genutzt werden können. Geh dazu bitte auf <https://github.com/Painkilla/VO-389.064-Wellenausbreitung/issues> und schau dir in der TODO Liste an was du beitragen möchtest. Selbst das Ausbessern von Tippfehlern oder Rechtschreibung ist ein wertvoller Beitrag für das Projekt. Nütze auch die Möglichkeit zur Einsichtnahme von Prüfungen zu gehen und die Angaben Anderen zur Verfügung zu stellen, damit die Qualität der Unterlagen stetig besser wird. \LaTeX und Git sind nicht schwer zu lernen und haben auch einen Mehrwert für das Studium und das spätere Berufsleben. Sämtliche Seminar oder Bachelorarbeiten sind mit \LaTeX zu schreiben. Git ist ideal um gemeinsam an einem Projekt zu arbeiten und es voran zu bringen. Als Student kann man auf GitHub übrigens kostenlos unbegrenzt private Projekte hosten.

Mit dem Befehl:

```
$ git clone recursive https://github.com/Painkilla/VO-389.064-Wellenausbreitung.
```

erstellst du eine lokale Kopie des Repositoriums. Du kannst dann die Dateien mit einem \LaTeX -Editor deiner Wahl bearbeiten und dir das Ergebnis ansehen. Bist du auf GitHub registriert, kannst du einen Fork (englisch für Ableger) erstellen und mit den Befehlen:

```
$ git commit -m "Dein Kommentar zu den Änderungen"
```

```
$ git push
```

werden deine Ergänzungen auf deinen Ableger am Server gesendet. Damit deine Ergänzungen auch in das zentrale Repository gelangen und allen

Studierenden zur Verfügung stehen, musst du nur noch einen Pull-Request erstellen.

1 Einleitung

2 Maxwell Theorie

3 Die homogene ebene Welle (HEW)

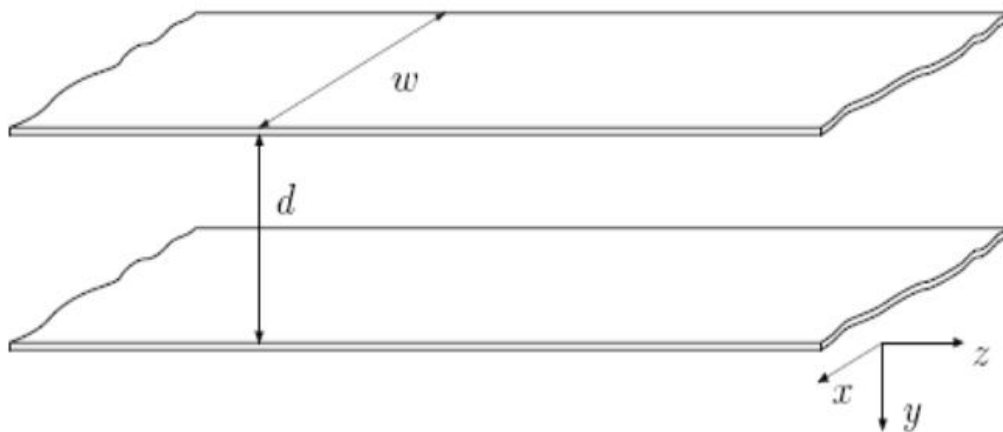
4 Reflexion an glatten Grenzflächen, die Parallelplattenleitung

Dämpfungsbelag der Parallelplattenleitung 1.

Es soll die Ausbreitungsfähigkeit des TEM Modus in z-Richtung auf dem abgebildeten Parallelplattenleiter (mit $\varepsilon_r = 1$) untersucht werden.

Tabelle 1: Variationen

Variable	w	d	f
Einheit	mm	mm	Hz
Datum			
A	12	1	5
B	10	1	4



1. Berechnen Sie die Komponenten der gefragten Moden, finden Sie einen Ansatz der die Wellengleichung erfüllt, ermitteln Sie die Separations-

bedingungen und passen Sie an den Rand an! Verwenden Sie dabei die Näherung $w \gg d$. Welche Komponenten verschwinden? (5 P.)

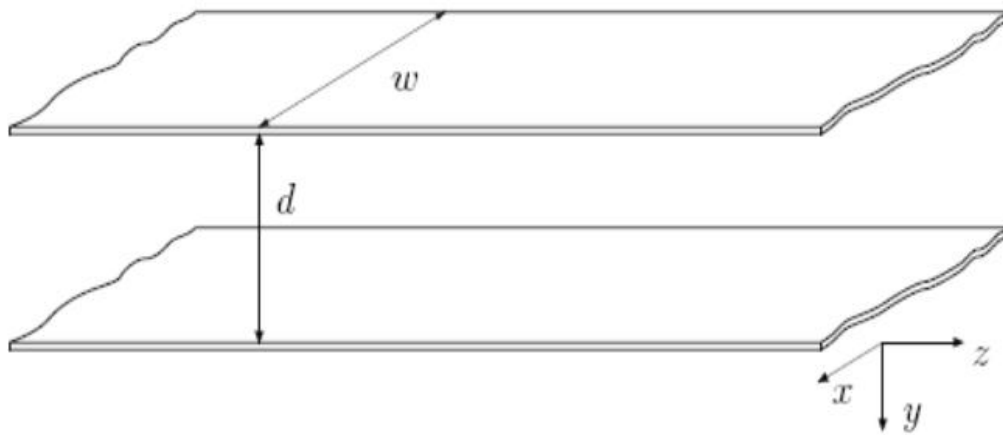
2. Berechnen Sie den Mediumswiderstand, den Leitungswellenwiderstand und die Grenzfrequenz des gefragten Modus für w, d ! Geben Sie alle zur Berechnung notwendigen Schritte an! (6 P.)
3. Berechnen Sie mittels der Power Loss Method den Dämpfungskoeffizienten für den gefragten Modus in dB/m . Das Metall sei durch $\sigma_{Cu} = 5,7 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ charakterisiert, die Frequenz sei f . (9 P.)
4. Zeichnen Sie die tatsächlichen Feldbilder ohne Verwendung der Näherung $w \gg d$ in zwei Ansichten! Welche Wellentypen sind prinzipiell auf dieser Leitung ausbreitungsfähig? (5 P.)

Parallelplattenleiter 2.

Es soll die Ausbreitungsfähigkeit von Moden m auf dem abgebildeten Parallelplattenleiter (mit $w \gg d, \varepsilon_r = 1$) untersucht werden.

Tabelle 2: Variationen

Variable	m
Einheit	1
Datum	
A	TE_n
20131210	TM_n
20130625	TEM, TE_m, TM_m



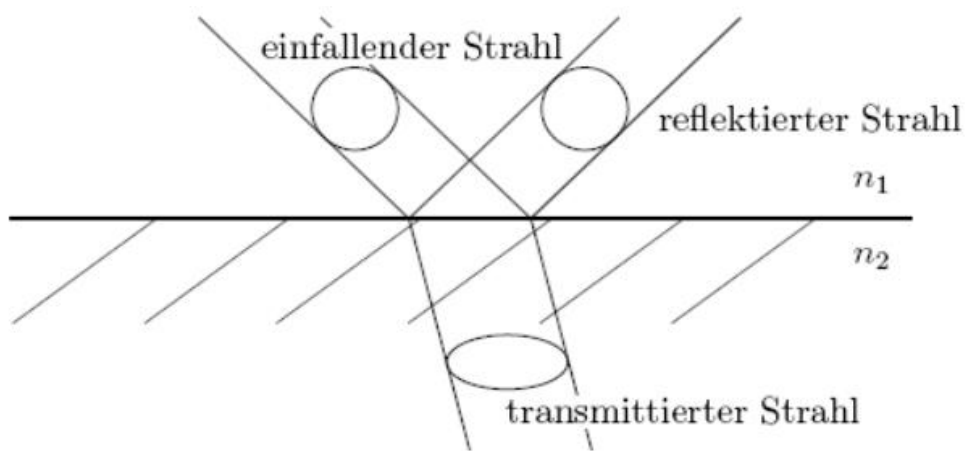
1. Finden Sie einen Ansatz für die gefragten Moden, der die Wellengleichung erfüllt und überprüfen Sie dies. Berechnen Sie alle weiteren Komponenten. Ermitteln Sie die Separationsbedingungen und passen Sie an den Rand an. Welche Komponenten verschwinden? (10 P.)
2. Berechnen Sie den Mediumswiderstand ν , den Feldwellenwiderstand $Z_{W,n}$ und die Grenzfrequenz $f_{G,n}$ aller gefragten Moden! (10 P.)
3. Die Leitung soll von 15 bis 18 GHz im Monomodebetrieb eingesetzt werden. Dimensionieren Sie d so, dass die Grenze für Monomodebetrieb 15% über bzw. unter angegebenen Bereich liegt. (7 P.)
4. Welche Moden sind bei der doppelten Betriebsfrequenz ausbreitungsfähig? (3 P.)
5. Zeichnen Sie ein Dispersionsdiagramm für die untersten 5 Moden. (5 P.)

Polarisationsfilter 3.

Ein Lichtstrahl der Sonne (unpolarisiert, aber TM, TE gleich stark) fällt zu später Stunde ϑ_e auf einen See ($n_2 = 1,33$). An der glatten Wasseroberfläche wird er reflektiert. Zwei Fotografen fotografieren diese Landschaft. Der zweite verwendet ein ideales Polarisationsfilter um die Reflexion der Sonne im Wasser zu unterdrücken.

Tabelle 3: Variationen

Variable	ϑ_e
Einheit	$^\circ$
Datum	
A	80
20130513	75



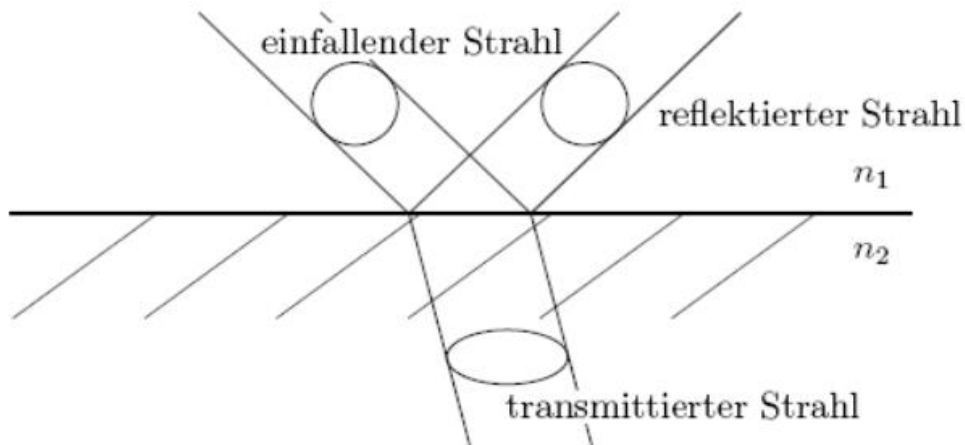
1. Wie groß ist die (gesamte) reflektierte Lichtleistung im Verhältnis zur eingestrahnten (in dB)? Zeichnen Sie alle verwendeten Winkel ein. (7 P.)
2. Wie gut kann das ideal eingesetzte Polarisationsfilter des zweiten Fotografen die Reflexion im Vergleich zum ersten Fotografen unterdrücken (in dB)? (8 P.)

Übergang von Vakuum nach Glas 4.

Eine zirkular polarisierte Welle mit einem Querschnitt von A , einer Elliptizität von E und einer Gesamtleistung von P wird unter dem Winkel ϑ_e auf eine Grenzfläche zwischen Vakuum($n_1 = 1$) und Glas n_2 eingestrahlt.

Tabelle 4: Variationen

Variable	A	P	n_2	E	ϑ_e
Einheit	mm^2	mW	1	dB	$^\circ$
Datum					
A	2	1	1,5	0	ϑ_B
B	4	2	1,4	0	ϑ_B
C	5	4	1,6	0	ϑ_B
D	5	3	1,6	0	ϑ_B
20160310	6	8	1,7	3	65



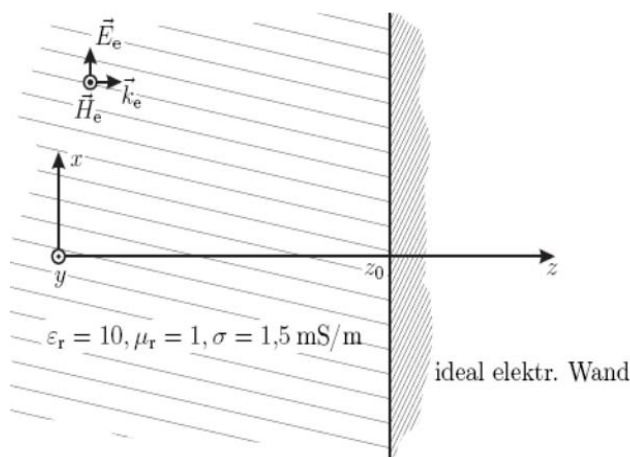
1. Berechnen Sie Einfallswinkel Θ_e , Reflexionswinkel Θ_r und Austrittswinkel Θ_t und zeichnen Sie diese in die Skizze ein! (5 P.)
2. Berechnen Sie die TE und TM-Anteile (E und H) der reflektierten und der transmittierten Welle! (12 P.)
3. Berechnen Sie die Querschnittsfläche des transmittierten Strahls! (3 P.)
4. Berechnen Sie die Elliptizität der reflektierten und der transmittierten Welle in dB ! (3 P.)
5. Berechnen Sie die Leistungen $P_{TE,t}$ und $P_{TM,t}$ der transmittierten Wellen! (8 P.)

Stehende Welle 5.

Eine sich im verlustbehafteten Medium (z.B.: trockener Erdboden) ausbreitende ebene Welle mit der Frequenz f wird von einer auf die Ausbreitungsrichtung senkrecht stehenden metallischen Wand mit unendlicher Leitfähigkeit reflektiert (siehe Abbildung). Die Amplitude der einfallenden Welle bei $z = 0$ beträgt E_0 .

Tabelle 5: Variationen

Variable	f	E_0	z_0
Einheit	Hz	V/m	1
Datum			
A	$22M$	10	5
A	$20M$	5	8

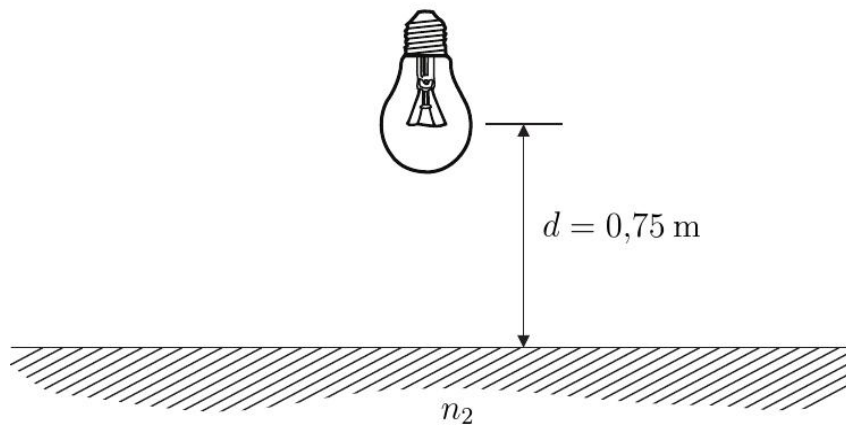


1. Wie groß ist die Phasengeschwindigkeit v_p ? (1 P.)
2. Setzen Sie die einfallende Welle an (E_e und H_e) und berechnen Sie die Wellenzahl k_e . Wie groß ist die Dämpfung in dB/m ? (5 P.)
3. Berechnen Sie die komplexe Amplitude und den zeitlichen Verlauf der einfallenden Welle am Ort der metallischen Wand z_0 ! (2 P.)
4. Finden Sie einen Ansatz für die reflektierte Welle (E_r und H_r)! Wie muss der zeitliche Verlauf der reflektierten Welle aussehen, damit die Randbedingungen erfüllt sind? (6 P.)

5. Berechnen Sie die Hüllkurve des Gesamtfeldes! (6 P.)

Lichtquelle über Aquarium 6.

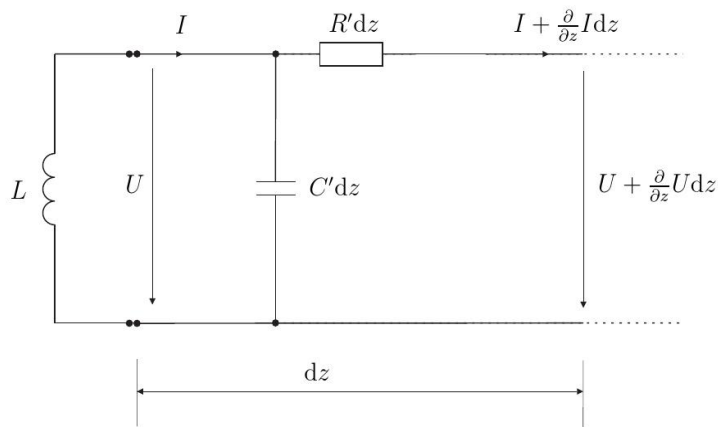
Eine 53 W Glühbirne befindet sich in einer Höhe von 0,75 m über der Wasseroberfläche eines Aquariums. Nehmen Sie im folgenden an, dass die gesamte elektrische Leistung in Licht umgewandelt wird, isotrop ausgestrahlt wird und dass das Licht einer Glühbirne unpolarisiert ist. Das Wasser habe einen Brechungsindex $n_2 = 1,33$.



1. Wie groß ist der Betrag des Poyntingvektors direkt oberhalb der Wasseroberfläche, senkrecht unter der Lampe? (8 P.)
2. Wie groß ist der Betrag des Poyntingvektors direkt unterhalb der Wasseroberfläche, senkrecht unter der Lampe? (8 P.)
3. Erklären Sie den Zusammenhang zwischen den beiden Werten! (4 P.)

Schwingkreis mit verteiltem Kondensator 7.

Gegeben ist ein unendlich ausgedehnter verteilter verlustbehafteter Kondensator. Dieser wird an einer Spule mit der Induktivität L angeschlossen um einen Schwingkreis zu bilden.



1. Stellen Sie für den Kondensator aus dem Ersatzschaltbild die beschreibenden Differentialgleichungen auf und geben Sie eine Lösung für $U(z)$ und $I(z)$ an. (6 P.)
2. Berechnen Sie das Parallelersatzschaltbild des Kondensators. (6 P.)
3. Geben Sie die Resonanzfrequenz des Schwingkreises an. (3 P.)

5 Die Oberflächenwelle

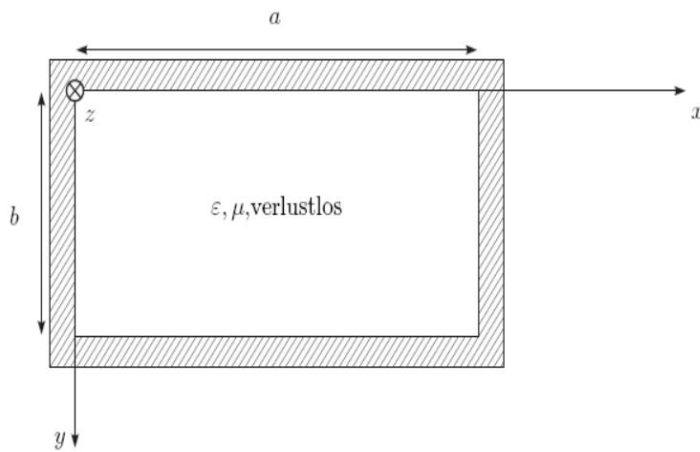
6 Rechteckhohlleiter und Resonatoren

Rechteckhohlleiter 8.

Untersuchen Sie die Ausbreitung einer TE_{10} / $TE_{m,n}$ Welle in z-Richtung im skizzierten Rechteckhohlleiter.

Tabelle 6: Variationen

Variable	a	b	ε_r	μ_r	f	P
Einheit	mm	mm	1	1	Hz	dBW
Datum						
A	22,86	10,16	1	1	$10G$	56
B	22,86	10,16	1	1	$10G$	57
C	40	20	4	1	$10G$	57
20130513	19,05	8,47	1	1	$16G$	53



1. Finden Sie einen geeigneten Ansatz für die Komponenten des gewünschten Modus in Ausbreitungsrichtung, der die Wellengleichung erfüllt. Ermitteln Sie die Separationsbedingungen und passen Sie an den Rand an. (7 P.)
2. Leiten Sie daraus die restlichen Feldkomponenten her. Welche verschwinden? (3 P.)
3. Der Hohlleiter wird im X-Band eingesetzt und hat die Abmessungen bzw. Kenndaten a , b , ε_r , μ_r . Er wird bei der Frequenz f betrieben. Berechnen Sie die maximale elektrische Feldstärke bei einer übertragenen Leistung von P . (12 P.)
4. Berechnen Sie die Hohlleiterwellenlängen, die Grenzwellenlängen und die Grenzfrequenzen aller gefragter Moden als Funktion von m und n !

Ist ein TEM Modus ausbreitungsfähig? Wieso? Wenn ja, welche Grenzwellenlänge bzw. Feldwellenwiderstand hat er? (3 P.)

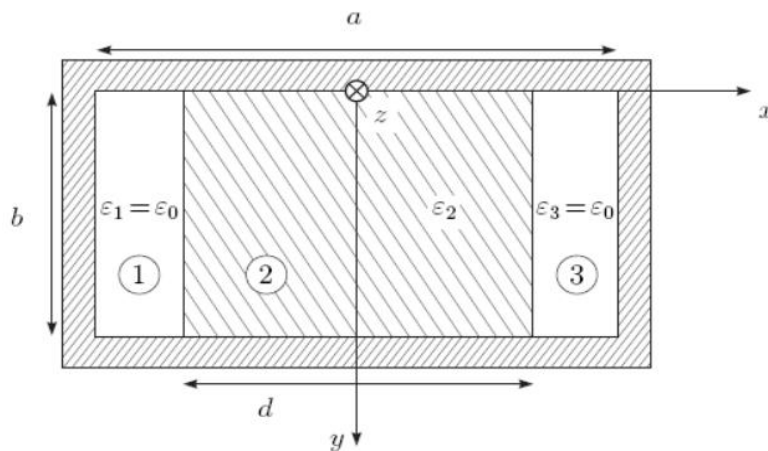
5. Ist die Verwendung dieses Hohlleiters bei einer Durchschlagsfeldstärke von 15 kV/cm (Luft) möglich? Wenn es nicht möglich ist, wie kann man dies ermöglichen? (3 P.)
6. Berechnen und skizzieren Sie das Dispersionsdiagramm für die TE_{10} , TE_{11} , TE_{20} Moden für a , b , ε_r , μ_r . Achten Sie auf die Beschriftung! Geben Sie die Grenzfrequenzen an! In welchem Frequenzbereich ist nur ein einziger Modus ausbreitungsfähig? Welcher? (5 P.)
7. Ist die Verwendung dieses Hohlleiters bei einer Durchschlagsfeldstärke von 15 kV/cm (Luft) möglich? Wenn dies nicht möglich ist oder wäre, wie könnte man dies dennoch ermöglichen? (3 P.)

Rechteckhohlleiter mit Kunststoffeinsatz 1 9.

Untersuchen Sie die Ausbreitungseigenschaften des Grundmodus, dessen Feldverteilung der TE_{10} Welle im leeren Hohlleiter ähnlich ist, im unten abgebildeten Hohlleiter mit Kunststoffeinsatz.

Tabelle 7: Variationen

Variable	ε_1	ε_2	ε_3	μ_1	μ_2	μ_3
Einheit	1	1	1	1	1	1
Datum						
A	ε_0	$\varepsilon_{r,2}$	ε_0	μ_0	μ_0	μ_0
20160310	ε_0	ε_0	ε_0	μ_1	μ_0	μ_1



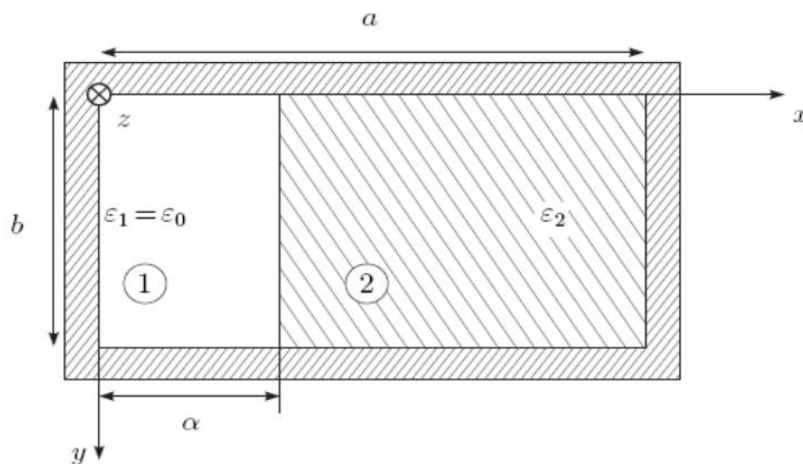
1. Finden Sie einen geeigneten Ansatz für die Komponenten $H_{z,1}$, $H_{z,2}$ und $H_{z,3}$, der die Wellengleichung erfüllt!
Finden Sie einen geeigneten Ansatz für die Komponenten $H_{z,i}$ und $E_{z,i}$, mit $i = 1, 2, 3$ für Raum i , der die Wellengleichung erfüllt! (8 P.)
2. Leiten Sie daraus die restlichen Feldkomponenten her! (4 P.)
3. Gewinnen Sie aus den Stetigkeitsbedingungen an der Grenzfläche zwischen Luft und Dielektrikum die charakteristische Gleichung für die Ausbreitungskonstante! (8 P.)
4. Skizzieren Sie das Felddbild längs und quer zur Ausbreitungsrichtung! (5 P.)

Rechteckhohlleiter mit Kunststoffeinsatz 2 10.

Untersuchen Sie die Ausbreitungseigenschaften des Grundmodus, dessen Feldverteilung der TE_{10} Welle im leeren Hohlleiter ähnlich ist, im unten abgebildeten Hohlleiter mit Kunststoffeinsatz.

Tabelle 8: Variationen

Variable	ε_1	ε_2	μ_1	μ_2
Einheit	1	1	1	1
Datum				
20130625	ε_0	$\varepsilon_{r,2}$	μ_0	μ_0



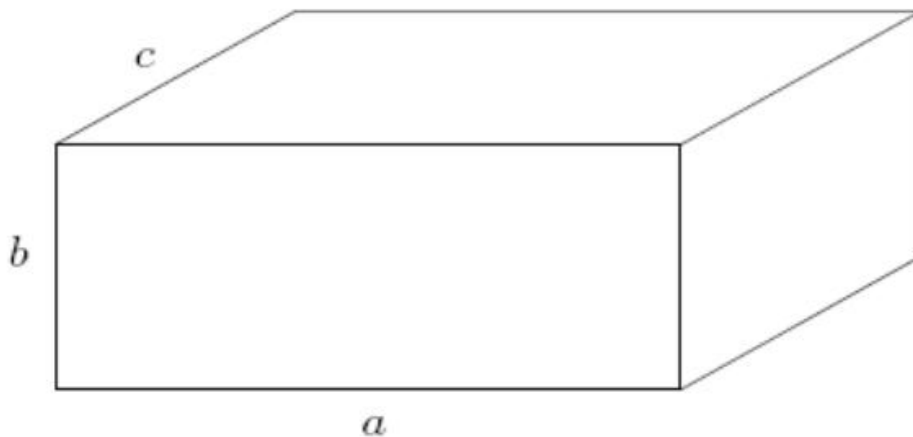
1. Finden Sie einen geeigneten Ansatz für die Komponenten $H_{z,i}$ und $E_{z,i}$, mit $i = 1, 2$ für Raum i , der die Wellengleichung erfüllt! (8 P.)
2. Leiten Sie daraus die restlichen Feldkomponenten her! (4 P.)
3. Gewinnen Sie aus den Stetigkeitsbedingungen an der Grenzfläche zwischen Luft und Dielektrikum die charakteristische Gleichung für die Ausbreitungskonstante! (8 P.)
4. Skizzieren Sie das Feldbild längs und quer zur Ausbreitungsrichtung! (5 P.)

Hohlraumresonator 11.

Berechnen Sie den Grundmodus TE_{101} eines luftgefüllten ($\epsilon_r = 1$) Hohlraumresonators.

Tabelle 9: Variationen

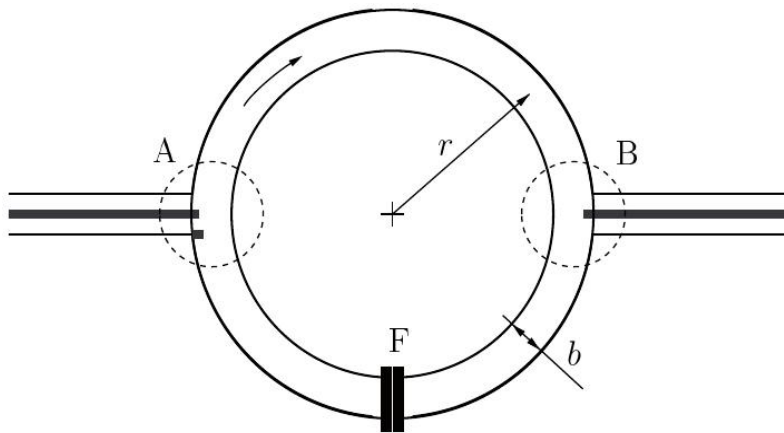
Variable	a	b	c	R_M	ϵ_r
Einheit	cm	cm	cm	mΩ	1
Datum					
A	3	2	3	27	2,8
B	4	2	4	20	1,8
C	4	2	4	20	2,5



1. Berechnen Sie die Resonanzfrequenz! (4 P.)
2. Berechnen Sie die unbelastete Güte! Vereinfachen Sie die Formel unter der Berücksichtigung $a = c$! Setzen Sie dann Zahlenwerte ein! (4 P.)
3. Berechnen Sie die Resonanzfrequenz und die unbelastete Güte, wenn der Hohlraumresonator mit einem verlustlosen Dielektrikum ε_r gefüllt ist! (2 P.)

Möbius-Resonator 12.

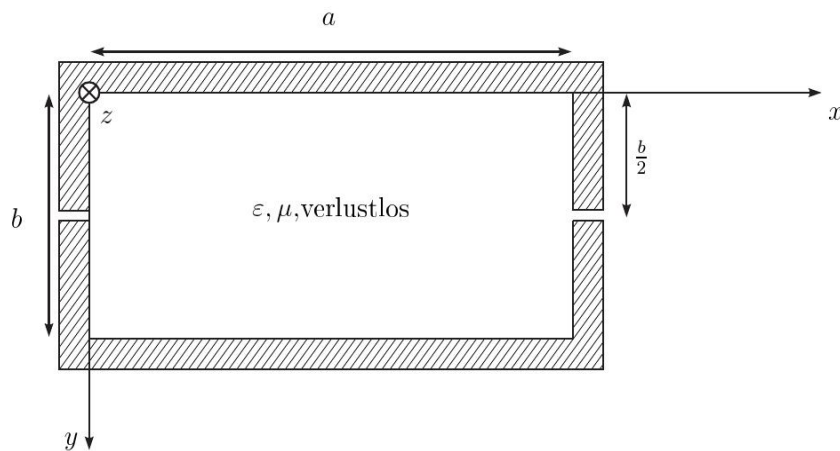
Ein flexibler luftgefüllter Rechteckhohlleiter mit den Abmessungen a und $b = 1 \text{ cm}$ ($a > b$) wird zu einem ringförmigen Resonator gebogen und die beiden als Flansch ausgeführten Enden werden an der Stelle F verschraubt. Der Resonator wird bei Bereich A mittels einer kurzen Feldsonde erregt, die durch ihre Konstruktion im Uhrzeigersinn umlaufende Welle bevorzugt. Im Bereich B kann mittels einer zweiten Feldsonde ein Signal aus dem Resonator ausgekoppelt werden. Die Feldsonden werden von Koaxialkabeln gespeist. Die gewünschte erste Resonanzfrequenz des Resonators liegt bei $f_{Res} = 10 \text{ GHz}$. Vernachlässigen Sie bei Ihren Berechnungen die Störungen des Feldbildes im Resonator durch Feldsonden.



1. Dimensionieren Sie den fehlenden Parameter des Hohlleiters so, dass dieser bei der gewünschten Resonanzfrequenz 2% über der unteren Bandkante im Mono-Mode-Betrieb arbeitet. (3 P.)
2. Berechnen Sie den kürzest möglichen mittleren Radius r des Hohlleiterresonators für die angegebene Resonanzfrequenz. (5 P.)
3. Bei gleich bleibenden mechanischen Parametern wird nun der Resonator in einen Möbius-Resonator umgebaut: Dazu wird der Flansch an der Stelle F geöffnet, ein Ende des Wellenleiters um 180° um die Längsachse gedreht, und anschließend wieder verschraubt. Geben Sie einen allgemeinen Formelausdruck für die Resonanzfrequenz an und berechnen Sie die ersten 3 Resonanzfrequenzen dieses Resonators! (12 P.)

Geschlitzter Rechteckhohlleiter 13.

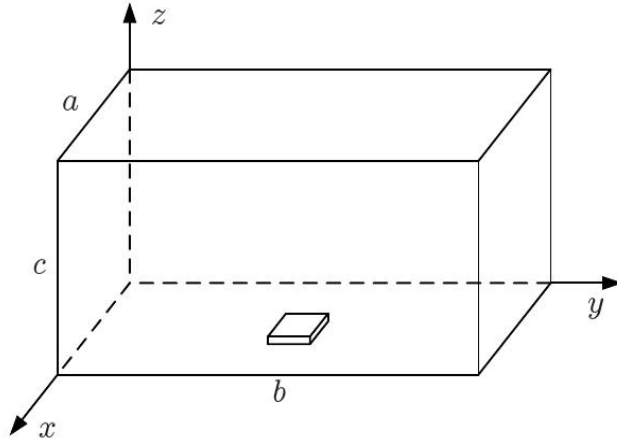
Untersuchen Sie die Wellenausbreitung in z-Richtung im skizzierten geschlitzten Rechteckhohlleiter. Der Schlitz sei sehr schmal und die Wand des Hohlleiters sehr dünn- daher sind kapazitive Effekte im Schlitz zu vernachlässigen.



1. Betrachten Sie vorerst $TM_{m,n}$ -Moden! Finden Sie einen geeigneten Ansatz für die Komponenten in Ausbreitungsrichtung, der die Wellengleichung erfüllt. Ermitteln Sie die Separationsbedingungen. (5 P.)
2. Leiten Sie daraus die restlichen Feldkomponenten her und passen Sie an den Rand an! Welche Bedingungen für die Modenindizes m und n bestehen? (7 P.)
3. Welche Moden (TEM, TE, TM) sind auf diesem Wellenleiter überhaupt ausbreitungsfähig? In welchem Frequenzbereich wird der Wellenleiter im Monomodebetrieb betrieben, wenn die konkreten Angaben des Wellenleiters wie folgt lauten: $a = 7 \text{ cm}$, $b = 4,5 \text{ cm}$, $\varepsilon_r = 3$, $\mu_r = 1$. (3 P.)
4. Betrachten Sie alle Moden außer TE -Moden! Berechnen und skizzieren Sie für den zuvor spezifizierten Wellenleiter das Dispersionsdiagramm für die untersten 6 Moden. Achten Sie auf die Beschriftung! Geben Sie die Grenzfrequenzen an! (5 P.)

Toastscheibe in Mikrowellenherd 14.

Eine quaderförmige Toastbrottscheibe mit quadratischer Grundfläche mit der Seitenlänge $t = 12 \text{ cm}$ und der Höhe $h = 1 \text{ cm}$ soll in einem Mikrowellenherd aufgetaut werden, die bei $3,45 \text{ GHz}$ als TE_{204} -Resonator betrieben wird. Die Garkammer ist aus Edelstahl mit einer Leitfähigkeit $\sigma = 1,4 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ gefertigt und hat die Abmessungen $a = 30 \text{ cm}$ und $b = 40 \text{ cm}$. Die Toastscheibe wird in die Mitte der Garkammer gelegt.



1. Berechnen Sie die Höhe der Garkammer c ! (3 P.)
2. Berechnen Sie die Verluste in den Wänden des Mikrowellenherds, wenn die Amplitude $A = 1 \text{ A/m}$ beträgt. Die Feldbilder in einem quaderförmigen Resonator für den TE_{mnp} -Fall lauten: (5 P.)

$$H_x = -\frac{A}{k_c^2} \frac{p\pi}{c} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \quad (6.0.1)$$

$$H_y = -\frac{A}{k_c^2} \frac{p\pi}{c} \frac{m\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \quad (6.0.2)$$

$$H_z = A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \quad (6.0.3)$$

$$E_x = \frac{j\omega\mu A}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \quad (6.0.4)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu A}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \quad (6.0.5)$$

$$k_c^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (6.0.6)$$

3. Berechnen Sie die Leistungsaufnahmedichte in der Toastscheibe, wobei die Toastscheibe durch die komplexe Dielektrizitätskonstante $\delta = \varepsilon_0(1 - j)$ charakterisiert ist. (3 P.)
4. Berechnen Sie qualitativ die Temperaturverteilung in der Toastscheibe, wenn Sie davon ausgehen, dass sich die Temperatur über den dünnen Höhe der Scheibe instantan ausgleicht und daher konstant ist. Setzen

Sei dabei die Temperatur als proportional zur lokalen Leistungsaufnahmedichte an und vernachlässigen Sie Wärmestrahlung und weitere Wärmeleitung. Skizzieren Sie den Temperaturverlauf in der Toastscheibe in zwei durch das Zentrum der Scheibe verlaufenden Schichten parallel zur xz - und yz -Ebene. (5 P.)

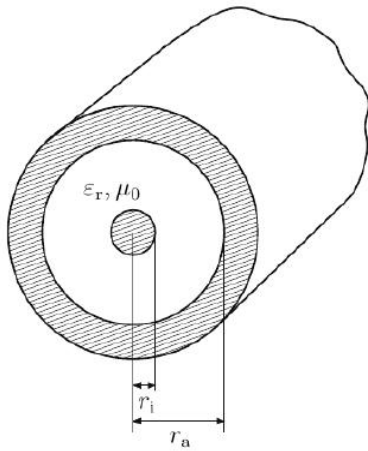
5. Welche Leistung wird in Summe in der Toastscheibe umgesetzt? Wie groß ist der Wirkungsgrad der Mikrowellengarkammer bei dieser Anwendung, wobei der Wirkungsgrad das Verhältnis aus im Toast aufgenommener zu der Garkammer zugeführter Leistung darstellt? (4 P.)
6. Zusatzfrage: Wie und wo muss die Toastscheibe für optimalen Wirkungsgrad positioniert werden, ohne dabei zusätzliche Hilfsmittel zu verwenden? (3 P.)

7 Koaxialleitungen

Koaxialkabel 15.

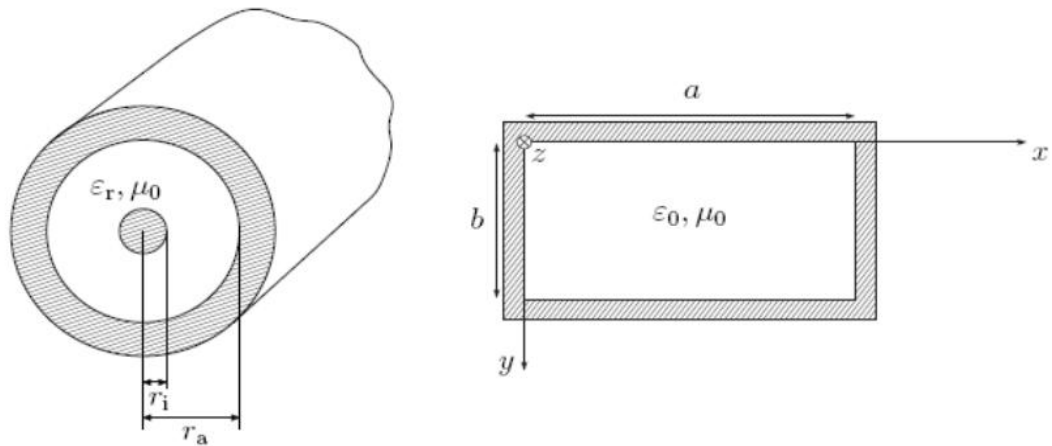
Tabelle 10: Variationen

Variable	Z_L	r_a	ε_r	f
Einheit	Ω	mm	1	Hz
Datum				
A	50	7,3	2,35	8G
20131024	60	14	1	5G



1. Bestimmen Sie einen geeigneten Innenradius r_i des abgebildeten Koaxialkabels für Z_L . Der Außenradius sei r_a , das verwendete Dielektrikum habe ε_r . (7 P.)
2. Berechnen Sie die ohmschen Verluste α_R des Kabels für eine Leitfähigkeit des Innen- bzw. Außenleiters von $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ bei f in dB/m . (7 P.)
3. Berechnen Sie die dielektrischen Verluste α_G des Kabels für ein Dielektrikum mit $\tan(\delta) = 0,001$ in dB/m . (6 P.)
4. Ein Ende der Koaxialleitung wird mit Hilfe einer kreisförmigen Scheibe aus Graphit abgeschlossen. Die Scheibe habe ein $R_{\square} = 120\pi \Omega$. Welchen ohmschen Widerstand hat die kreisförmige Scheibe für eine einfallende TEM Welle? (5 P.)
5. Wie groß ist der Reflexionsfaktor am Ende der Koaxialleitung auf Grund des Abschlusswiderstandes der kreisförmigen Scheibe? In welchem Frequenzbereich gilt dieser Reflexionsfaktor? (5 P.)

Vergleich Koaxialkabel - Rechteckhohlleiter 16.



1. Bestimmen Sie einen geeigneten Innenradius r_i des abgebildeten Koaxialkabels für $Z_L = 50 \, \Omega$. Der Außenradius sei $r_a = 6,3 \, \text{mm}$, das verwendete Dielektrikum habe $\epsilon_r = 2,25$. (6 P.)
2. Berechnen Sie die ohmschen Verluste α_R des Kabels für eine Leitfähigkeit des Innen- bzw. Außenleiters von $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \, \text{S/m}$ bei $10 \, \text{GHz}$ in dB/m . (6 P.)
3. Berechnen Sie die dielektrischen Verluste α_G des Kabels für ein Dielektrikum mit $\tan(\delta) = 0,001$ in dB/m . (6 P.)
4. Berechnen Sie mittels der Power-Loss-Method den Dämpfungskoeffizienten des abgebildeten Rechteckhohlleiters mit den Abmessungen $a = 22,86 \, \text{mm}$ und $b = 10,16 \, \text{mm}$ bei $10 \, \text{GHz}$ (Grundmodus TE_{10}) in dB/m . Erklären Sie dabei Ihre Vorgehensweise. Das Metall sei durch $\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \, \text{S/m}$ charakterisiert. Bei der gesuchten Ausbreitung in

z-Richtung lauten die Feldkomponenten: (12 P.)

$$E_x = 0 \quad (7.0.1)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{\pi} aA \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-jk_z z} \quad (7.0.2)$$

$$E_z = 0 \quad (7.0.3)$$

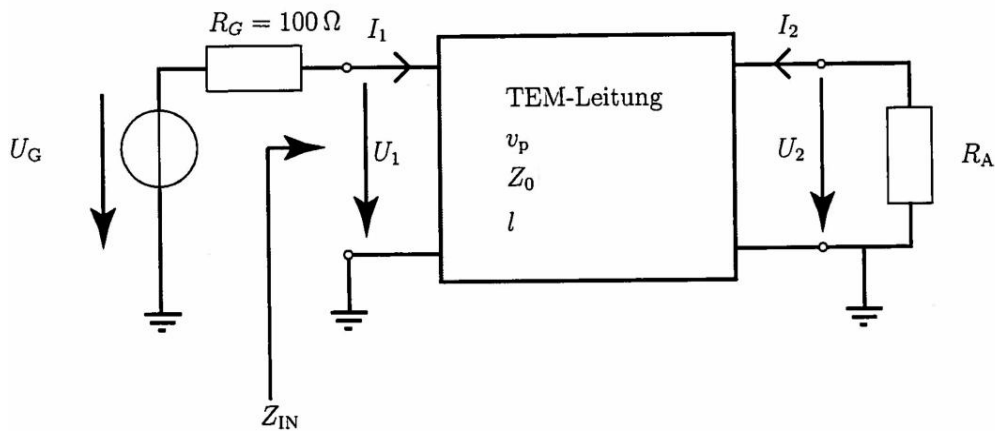
$$H_x = \frac{jk_z}{\pi} aA \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-jk_z z} \quad (7.0.4)$$

$$H_y = 0 \quad (7.0.5)$$

$$H_z = A \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-jk_z z} \quad (7.0.6)$$

TEM Leitung als Zweitor 17.

In einem Schaltplan wird eine TEM-Leitung als Zweitor modelliert. Die Leitung wird dabei durch die Phasengeschwindigkeit v_p , die Leitungswellenimpedanz Z_0 und die Länge l beschrieben.



1. Berechnen Sie den Induktivitätsbelag L' und den Kapazitätsbelag C' der Leitung für eine Phasengeschwindigkeit $v_p = 173,088 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ und einen Leitungswellenwiderstand von 50Ω . Nehmen Sie die TEM-Leitung dafür als verlustlos an. (3 P.)
2. Berechnen Sie die relative Permittivität des Dielektrikums für eine relative Permeabilität gleich 1. (2 P.)

3. Nehmen Sie an, dass der Zusammenhang zwischen Spannung und Strom an den beiden Toren durch folgende Matrix beschrieben werden kann:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \sinh(\gamma l)/Z_0 & \cosh(\gamma l) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad (7.0.7)$$

$$\gamma = j \left(\frac{\omega}{v_p} \right) \quad (7.0.8)$$

Bestimmen Sie einen allgemeinen Ausdruck für Z_{IN} ! (5 P.)

4. Wie muss die Kabellänge l gewählt werden, damit gilt $Z_{IN} = Z_0^2/R_A$? (10 P.)

Hinweis: $\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$, $\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$

HGÜ für Solarstrom aus der Sahara 18.

Ein Solarpark in der Sahara mit einer Gesamtleistung von P soll mittels Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) an Süditalien angebunden werden. Die Distanz zwischen den Umrichterstationen beträgt l . Der Umrichter in der Sahara hat eine Speiseimpedanz von Z_S und gibt im Leerlauf eine Ausgangsspannung von U_L an ein koaxiales Kabel mit PVC Dielektrikum (relative Permittivität ε_r , Durchschlagsfeldstärke $E_D = 35 \text{ kV/mm}$) ab. Außen- und Innenleiter des Kabels sind aus Aluminium mit einer Leitfähigkeit $\sigma = 37 \cdot 10^6 \text{ S/m}$.

Tabelle 11: Variationen

Variable	P	l	Z_S	U_L	ε_r
Einheit	MW	km	Ω	kV	1
Datum					
20130724	2700	2200	5	950	3,8
20130625	3000	1850	7	1200	3,2

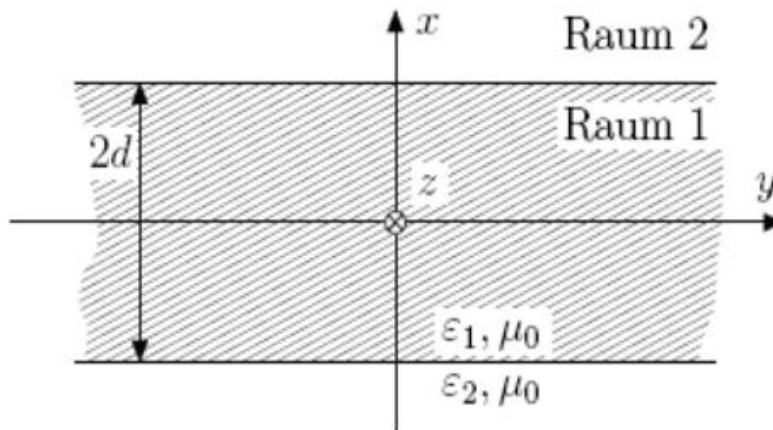
1. Welche Innen- und Außenleiterradii sind für das Kabel vorzusehen, wenn dieses für 130% der Nennspannung auszulegen ist und die Leitungsimpedanz für minimalen Materialverbrauch zu dimensionieren ist? Geben Sie auch die verwendete Impedanz der Leitung an! (5 P.)

2. Welche Widerstände stellen Innen- bzw. Außenleiter des Koaxialkabels dar, wenn der Innenleiter massiv ausgeführt ist und der Außenleiter die gleiche Masse aufweist wie der Innenleiter? Welche Verluste ergeben sich in Kabel und speisender Umrichterstation? (5 P.)
3. Welche Lastimpedanz stellt die Umrichterstation in Italien dar? Die Leitung wird nach Revisionsarbeiten zum Zeitpunkt $t = 0$ in Betrieb genommen. Welche Spannung ergibt sich jeweils an den Umrichterstationen in der Sahara bzw. in Italien für die Zeitpunkte $t = 0$, $t = 2,1 \cdot l/c$, $t = \infty$? ($c = c_0/\sqrt{\epsilon_r}$) Für welchen Maximalstrom ist die Umrichterstation in der Sahara abzusichern? (10 P.)

8 Dielektrische Wellenleiter

Dielektrische Platte 19.

Berechnen Sie die Ausbreitungseigenschaften der H_{10} -ähnlichen Grundwelle (siehe Rechteckhohlleiter), die von einer in y- und z- Richtung unbegrenzten und in x-Richtung $2d$ dicken dielektrischen Platte (Raum 1) geführt wird (Raum 2 ist Luft)!

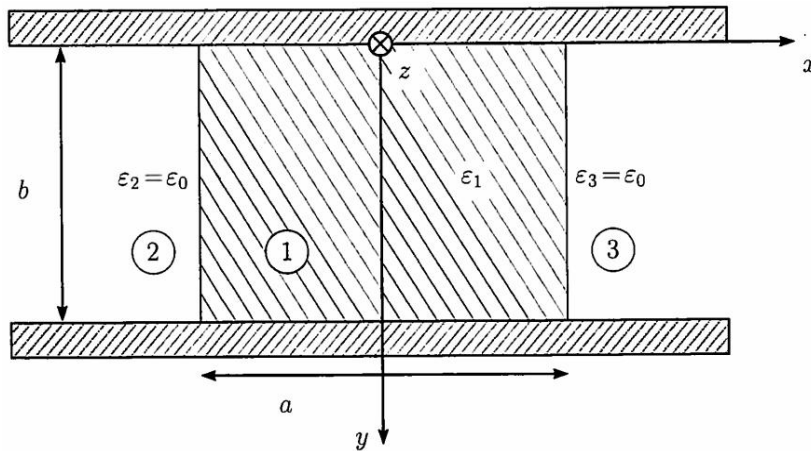


1. Finden Sie einen Ansatz für die Komponenten des elektromagnetischen Feldes in Ausbreitungsrichtung (positive z-Richtung) und geben Sie die Separationsbedingungen an! (10 P.)

2. Finden Sie einen Ansatz für die Komponenten des elektromagnetischen Feldes in Ausbreitungsrichtung (positive z-Richtung) $E_{z,1}$, $E_{z,2}$, $H_{z,1}$ und $H_{z,2}$ der die Wellengleichung erfüllt und geben Sie die Separationsbedingungen an! Nutzen Sie die Symmetrie der Platte und berücksichtigen Sie nur $x > -d$! (10 P.)
3. Bestimmen Sie die restlichen Feldkomponenten! (5 P.)
4. Gewinnen Sie aus den Stetigkeitsbedingungen an der Grenzfläche zwischen Luft und Dielektrikum weitere Beziehungen zur Bestimmung der Ausbreitungskonstanten. Reduzieren Sie die gewonnenen Beziehungen zu einer einzigen transzendenten Gleichung für die Ausbreitungskonstante in x-Richtung ausserhalb der Platte! (10 P.)
5. Gewinnen Sie aus den Stetigkeitsbedingungen an der Grenzfläche zwischen Luft und Dielektrikum weitere Beziehungen zur Bestimmung der Ausbreitungskonstanten. Reduzieren Sie die gewonnenen Beziehungen zu einer einzigen transzendenten Gleichung für die Ausbreitungskonstante in x-Richtung ausserhalb der Platte in Abhängigkeit der Frequenz ω ! (10 P.)
6. Geben Sie die Gleichung für die Grenzfrequenz der Grundwelle an. Die Grenzfrequenz ist durch den Übergang von der geführten Welle zur ungedämpften Abstrahlung in den Raum neben der Platte definiert! (5 P.)

Dielektrischer Stab zwischen Metallplatten 20.

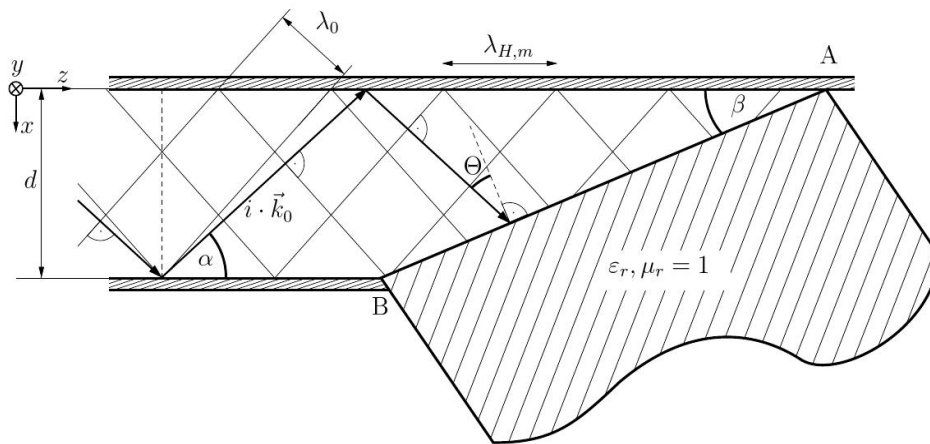
Gegeben sei ein dielektrischer Stab mit der Permittivität ε_1 , der zwischen zwei näherungsweise unendlich ausgedehnten Platten befestigt ist. Untersuchen sie die Ausbreitung eines TE-Modus, dessen Feldverteilung homogen in y ist. $\mu = \mu_0$



1. Finden Sie einen geeigneten Ansatz für die Komponenten $H_{z,i}$ und $E_{z,i}$, mit $i = 1, 2, 3$ für Raum i , der die Wellengleichung erfüllt! (8 P.)
2. Leiten Sie daraus die restlichen Feldkomponenten her! (4 P.)
3. Bestimmen Sie für den Fall von zur y/z -Ebene symmetrischen elektrischen Feldern die charakteristische Gleichung für die Ausbreitungskonstante in z -Richtung! Gewinnen Sie diese aus den Stetigkeitsbedingungen an den Grenzflächen. (8 P.)

Übergang von Parallelplattenleitung zu dielektrischem Wellenleiter 21.

Zu untersuchen ist der Übergang von einer luftgefüllten Parallelplattenleitung (PPL) zu einem dielektrischen Wellenleiter (DWL), der aus einem dielektrischen Stab mit der Permittivität $\varepsilon_r = 1, 2$ besteht und sonst mit Luft umgeben ist. Sowohl die PPL mit der Breite w , als auch der DWL sind weit in y -Richtung ausgedehnt, so dass die üblichen Näherungen für $w \gg d$ verwendet werden können. Mit \vec{k}_0 ist der Wellenvektor der entsprechenden Freiraumwelle mit der Wellenlänge λ_0 bezeichnet, aus dessen Überlagerung der relevante Modus entsteht; i bezeichnet eine Skalierungskonstante. Randstörungen an den Punkten A und B können vernachlässigt werden.



1. Finden Sie einen Ansatz für jene Moden der PPL, die einen reflexionsfreien Übergang von PPL zu DWL ermöglichen und die Wellengleichung erfüllen. Welche Moden sind dies? Berechnen Sie alle weiteren Komponenten. Ermitteln Sie die Separationsbedingung und passen Sie an den Rand der PPL an. (6 P.)
2. Welche Bedingung müssen die Winkel α , β , sowie Θ erfüllen um einen reflexionsfreien Übergang zu ermöglichen? Von welcher Ordnung ist der in der Skizze angedeutete Modus? (4 P.)
3. Berechnen Sie Θ als Funktion von α und β . (4 P.)
4. Für welche Frequenz f funktioniert der Übergang reflexionsfrei, wenn der Plattenabstand $d = 15 \text{ mm}$ beträgt und der Winkel $\beta = 5^\circ$ beträgt? (6 P.)

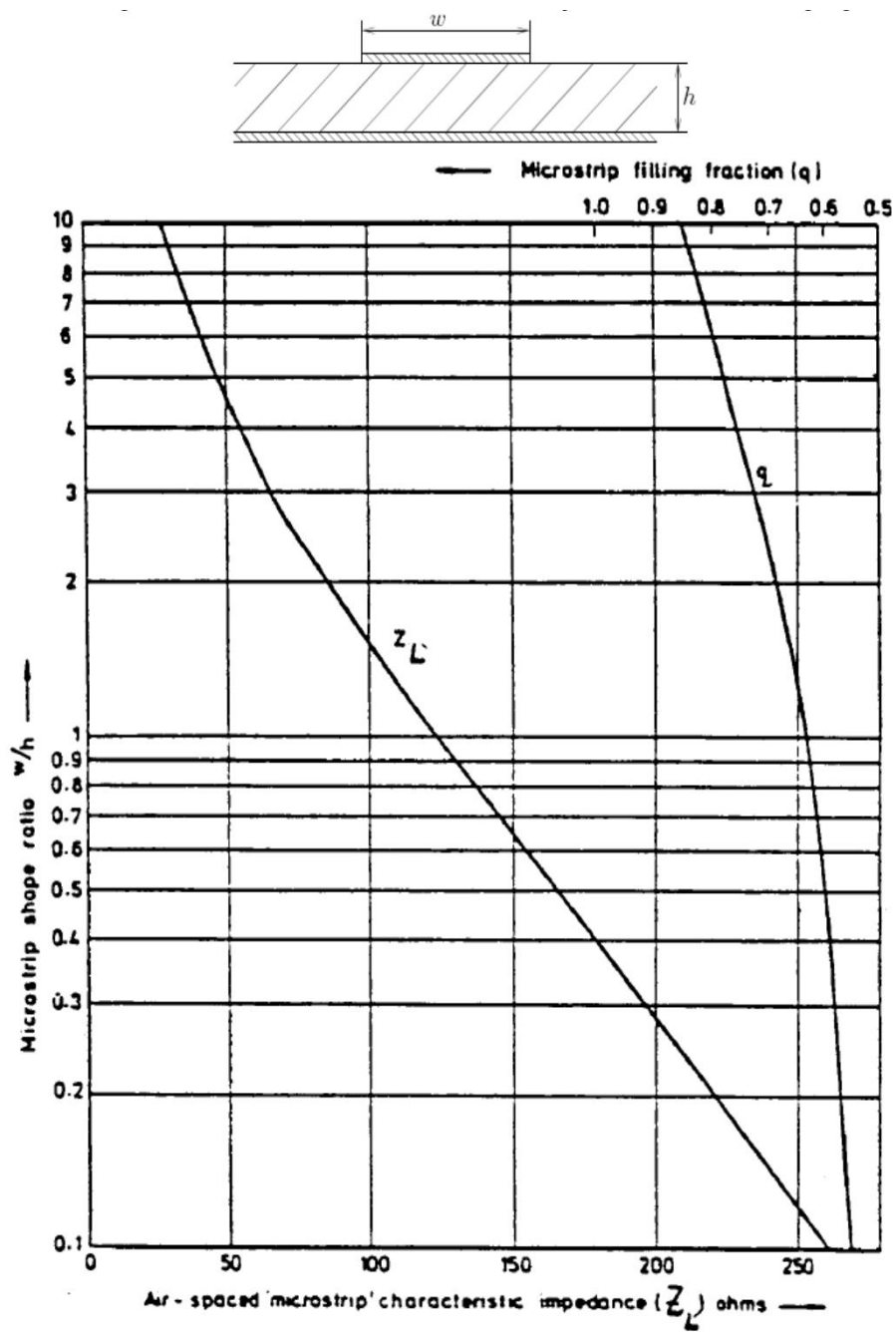
9 Streifenleitung

Mikrostreifenleitung 22.

Dimensionieren Sie eine 50Ω Mikrostreifenleitung bei f mit Hilfe des abgebildeten Nomogramms. Als Trägermaterial ist ein Al_2O_3 -Keramiksustrat ($\epsilon_r = 10$) vorgesehen. Die Höhe des Trägermaterials ist $h = 0,8 \text{ mm}$. Erklären Sie jeden Schritt Ihrer Vorgangsweise!

Variable	f
Einheit	Hz
Datum	
A	$8G$
B	$9G$

Tabelle 12: Variationen



10 Wellen und Hindernisse

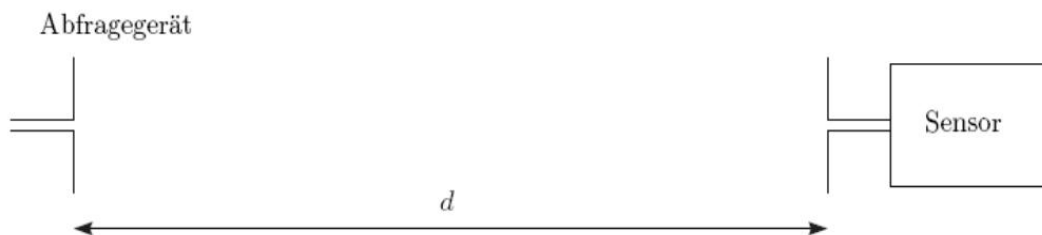
11 Antennen

Drahtloser Temperatursensor 23.

Ein drahtloser Temperatursensor soll aus der Distanz d per Funk auf der Frequenz f mit der Sendeleistung P_S ausgelesen werden. Vereinfachend wird angenommen, dass das Abfragegerät und der Sensor mit optimal ausgerichteten, verlustbehafteten w Hertzschen Dipolen ausgestattet sind. Es wird eine Welle zum Sensor geschickt, die vom Sensor zeitverzögert und um 35 dB geschwächt reflektiert wird. Das Abfragegerät schaltet während der Zeitverzögerung auf Empfang und registriert das Sensorsignal.

Tabelle 13: Variationen

Variable	d	f	P_S	w
Einheit	m	Hz	W	1
Datum				
A	0,5	2,45G	1	1
B	0,7	2,45G	1	1
20131210	12	865M	2	0,75



1. Gilt für diese Anordnung die Annahme, dass sich der Sensor in der Fernzone der Antenne des Abfragegerätes befindet? Nehmen Sie die wirksame Antennenfläche als kreisförmig an! (5 P.)
2. Berechnen Sie die vom Sensor empfangene Leistung! (5 P.)
3. Wie groß ist die Dämpfung der Strecke Abfragegerät – Sensor – Abfragegerät? (5 P.)

4. Zeichnen Sie einen Pegelplan (ohne Rauschen) der Strecke Abfragegerät – Sensor – Abfragegerät. Drücken Sie alle Pegel bzw. Teilstrecken in dBm bzw. in dB aus! (10 P.)

Richtdiagramm und Gewinn einer Antenne 24.

Eine Antenne habe das Richtdiagramm

Tabelle 14: Variationen

Variable	$f(\vartheta, \varphi)$
Einheit	1
Datum	
A	$\cos^{16}(\vartheta)$ für $0 < \vartheta < \pi/2$; 0 sonst
B	$\cos^{8/2}(\vartheta)$ für $0 < \vartheta < \pi/2$; 0 sonst
C	$\cos^{12/4}(\vartheta)$ für $0 < \vartheta < \pi/2$; 0 sonst
20131210	$ \sin(\vartheta) \cos(\varphi) \cos(\varphi/2) $
20131024	$\cos^3(\vartheta)$ für $0 < \vartheta < \pi/2$; 0 sonst
20130314	$\cos^3(\vartheta)$ für $0 < \vartheta < \pi/2$; 0 sonst

1. Skizzieren (und beschriften) Sie das Richtdiagramm in zwei Ansichten! (7 P.)
2. Skizzieren Sie das Richtdiagramm in horizontaler (x/y) und vertikaler (x/z) Ebene! Zeichnen Sie ϑ und φ in den Skizzen und dem Koordinatensystem ein. (7 P.)
3. Berechnen Sie den äquivalenten Raumwinkel und die Direktivität! (8 P.)
4. Berechnen Sie den Gewinn über dem Isotropstrahler und über dem Hertz'schen Dipol! (5 P.)

Darstellung der Richtcharakteristik 25.

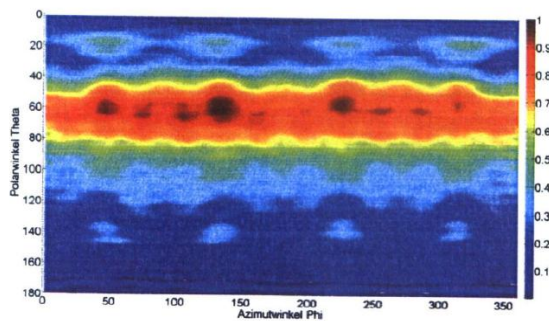
Drei Antennen seien gegeben. Von der ersten Antenne kennen Sie die Richtcharakteristik $f_1(\vartheta, \varphi)$. Von den beiden anderen Antennen A, B wurde die

Richtcharakteristik gemessen und graphisch dargestellt, siehe Punkt 2. Die erste Antenne habe die Richtcharakteristik:

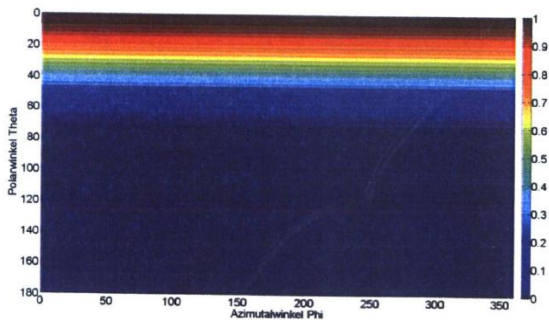
$$f_1(\vartheta, \varphi) = \begin{cases} |\sin(\vartheta) \cos(\varphi)^5| & \text{für } 0 \leq \varphi < \pi/2 \text{ und } 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi \\ |1/2 \sin(\vartheta) \cos(2\varphi)| & \text{sonst} \end{cases} \quad (11.0.1)$$

1. Skizzieren Sie das Richtdiagramm f_1 in horizontaler (x/y) und vertikaler (x/z) Ebene! Zeichnen Sie ϑ und φ in Ihren Skizzen und dem abgebildeten Koordinatensystem ein. (7 P.)
2. Eine verbreitete Möglichkeit Richtcharakteristiken von Antennen darzustellen sind farbkodierte Projektionen (meist Rektangularprojektion). Fertigen Sie ein Polardiagramm an und tragen Sie die beiden vertikalen Schnitte der Richtdiagramme für Azimutwinkel $\varphi = 50^\circ$ der Antennen A und B ein! Skizzieren Sie die Schnitte in den farbkodierten $\vartheta - \varphi$ Diagrammen! (8 P.)

Antenne A:



Antenne B:

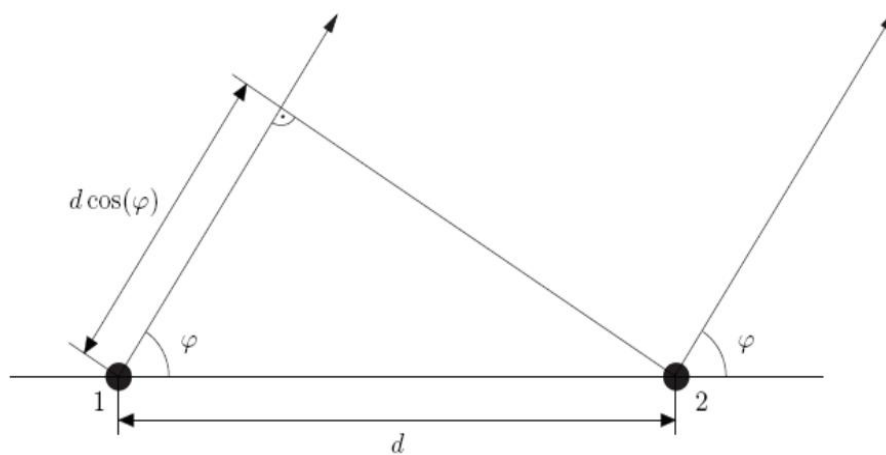


3. Welche der Antennen A und B aus Unterpunkt 2 ist für Abstrahlung in Richtung $\vartheta = 60^\circ$ besser geeignet? (2 P.)

4. Geben Sie für alle drei Antennen aus Unterpunkt 1 und 2 an, ob deren Richtcharakteristiken directional oder omnidirektional sind. (3 P.)

Richtdiagramm einer Antennengruppe 26.

Zwei baugleiche omnidirektionale Antenne im Abstand d , welche entkoppelt angenommen werden, erzeugen in einem sehr grossen Abstand r Feldstärken, welche dem Betrag nach identisch als E_0 angenommen werden können. Berechnen Sie das Richtdiagramm einer derartigen Anordnung in der Zeichenebene (x, y)!



Militärisches Radar 27.

Ein militärisches monostatisches Primär-Radar soll zur Detektion von Flugzeugen bis zu einer Flughöhe von 18000 m verwendet werden. An den Sender mit einer Sendeleistung $P_{S,1} = 53 \text{ dBW}$ bei $f_1 = 22 \text{ GHz}$ ist eine Antenne mit einem Gewinn $G_{S,1} = 37 \text{ dBi}$ angeschlossen. Ein Flugzeug vom Typ B-52 hat einen Radarquerschnitt von $\sigma = 100 \text{ m}^2$. Der Empfänger des Primär-Radars habe eine äquivalente Rauschtemperatur $T_1 = 300 \text{ K}$ und eine Bandbreite $B = 250 \text{ MHz}$.

1. Berechnen Sie die maximale horizontale Reichweite über Grund d_{max} des Radars bei maximaler Flughöhe, wenn ein minimales SNR von 15 dB erreicht werden soll. Fertigen Sie zuerst eine Skizze des Sachverhalts an! (12 P.)

2. Das Tarnkappenflugzeug B-2 hat einen Raderquerschnitt von $0,1 \text{ m}^2$. Welche Sendeleistung ist nötig, um die gleiche Reichweite zur Detektion der B-52 zu erreichen? (3 P.)
3. Statt bei obigem Punkt die Sendeleistung zu erhöhen, könnte man auch eine Antenne mit höherem Gewinn einsetzen. Welcher Gewinn wäre dann nötig? Geben Sie zusätzlich mindestens zwei Gründe an, die gegen eine Radarantenne mit extrem großen Gewinn sprechen. (5 P.)

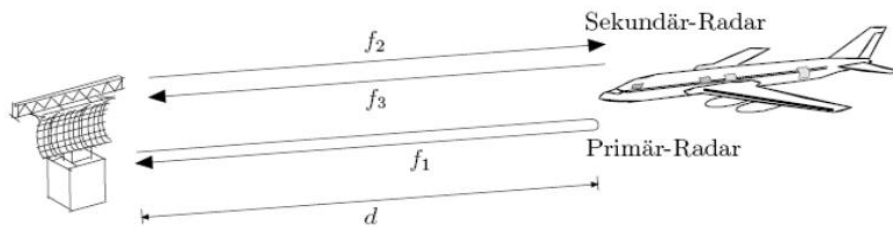
12 Wellen im freien Raum

Flughafenradar 28.

Ein Flughafen setzt ein monostatisches Primär-Radar ein um die Entfernung der Flugzeuge zu messen. An den Sender mit der Sendeleistung $P_{S,1}$ bei f_1 ist eine Antenne mit dem Gewinn $G_{S,1}$ angeschlossen. Ein typisches Flugzeug habe einen Radarquerschnitt von σ_1 . Der Empfänger des Primär-Radars habe eine Rauschtemperatur T_1 und eine Bandbreite B_1 . Wurde ein Flugzeug erkannt, so wird ein so genanntes Sekundär-Radar eingesetzt um es zu identifizieren. Ein zweiter Sender mit einer Sendeleistung $P_{S,2}$ bei der Frequenz f_2 sende über eine Antenne mit einem Gewinn $G_{S,2}$ eine Anfrage an das Flugzeug. Dieses empfängt das Signal mit einer Antenne mit einem Gewinn $G_{E,2}$. Der Empfänger im Flugzeug habe eine Rauschtemperatur von T_2 und eine Bandbreite B_2 . Wird das Signal empfangen, antwortet das Flugzeug auf einer Frequenz f_3 .

Tabelle 15: Variationen

Variable	$P_{S,1}$	$G_{S,1}$	f_1	σ_1	B_1	T_1	$G_{S,2}$	$G_{E,2}$	f_2	B_2	T_2
Einheit	<i>dBW</i>	<i>dB</i>	<i>Hz</i>	m^2	<i>Hz</i>	$^\circ K$	<i>dB</i>	<i>dB</i>	<i>Hz</i>	<i>Hz</i>	$^\circ K$
Datum											
A	44	40	2,8G	100	200M	160	10	3	1,03G	1M	200



1. Berechnen Sie die maximale Reichweite d_{max} des Radars, wenn ein minimales SNR von 13 dB erreicht werden soll. (13 P.)
2. Welche Sendeleistung $P_{S,2}$ ist für das Sekundär-Radar notwendig damit im schlechtesten Fall am Flugzeug noch ein SNR von 20 dB erreicht werden kann? (9 P.)
3. Wieso ist die horizontale Abmessung der Radar-Antenne wie im Bild angedeutet größer als die vertikale Abmessung? (3 P.)

Schiffsradar 29.

Ein Radargerät auf einem Schiff arbeite mit der Betriebsfrequenz f und dem Antennengewinn G_S . In einer Entfernung von d wird ein idealer Retroreflektor mit einem Durchmesser von r geortet.

Tabelle 16: Variationen

Variable	f	G_S	d	r	P_S	P_E
Einheit	Hz	dBi	km	cm	W	dBm
Datum						
A	15	43	2	20	500	-70
B	16	40	1,5	25	400	-80
C	12	36	1,5	20	400	-70
D	14	36	1,5	25	500	-80

1. Wie gross ist der Streuquerschnitt σ des Retroreflektors? (6 P.)
2. Welche Leistung (in dBm) hat das empfangene Echo, wenn die Sendeleistung P_S beträgt? (9 P.)

3. In welcher Entfernung kann der Retroreflektor noch erkannt werden, wenn die minimale Empfangsleistung P_E beträgt? (5 P.)

Richtfunkstrecke 30.

Für eine Richtfunkstrecke mit der Frequenz f steht ein Sender mit einer Sendeleistung von P_S zur Verfügung. Daran angeschlossen ist eine optimal ausgerichtet Antenne mit dem Gewinn G_S . In der Entfernung d steht der Empfänger mit einer Antenne mit dem Gewinn G_E .

Tabelle 17: Variationen

Variable	f	P_S	G_S	G_E	d	h	$f(\theta, \varphi)$
Einheit	Hz	dBm	dB_i	dB_i	km	m	1
Datum							
A	$30G$	13	19,5	15	1	30	$\sin^{24}(\theta) \sin^{24}(\varphi)$ für $0 \leq \varphi \leq \pi$; 0 sonst
B	$25G$	17	19,5	15	1,5	20	$\sin^{18}(\theta) \sin^{18}(\varphi)$ für $0 \leq \varphi \leq \pi$; 0 sonst

1. In welcher Höhe muss die Richtfunkverbindung mindestens montiert werden, wenn ein sich in der Mitte der Strecke Sender-Empfänger ein Haus mit der Höhe h befindet? (5 P.)
2. Berechnen Sie die Leistung am Standort des Empfängers (in dBm)! (6 P.)
3. Bei Bauarbeiten wird die Sendeantenne versehentlich um einen Winkel $\Delta\varphi = 15^\circ$ verdreht. (9 P.) Um welchen Wert in (dB) ändert sich das SNR am Empfänger?

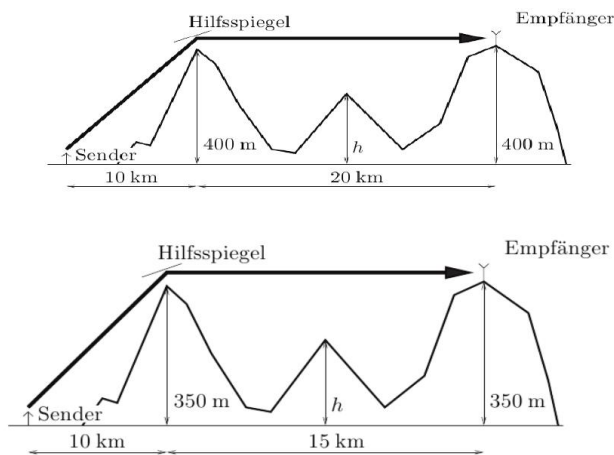
Richtfunkstrecke mit Hilfsspiegel 31.

Wie in der Skizze gezeigt, soll eine Richtfunkstrecke mit der Frequenz f zwischen einem Sender und einem Empfänger in hügeligem Gelände über einen Hilfsspiegel realisiert werden. Der Streuquerschnitt des Hilfsspiegels ist σ_1 , der Empfänger hat die Rauschtemperatur T und die Bandbreite B . Der Abstand zwischen Signalleistung und Rauschleistung muss mindestens SNR betragen. Die Empfangsantenne ist ein Parabolspiegel mit dem Durchmesser

D und einem Flächenwirkungsgrad von w . Horizontaler Abstand zwischen Sender und Berg ist a . Der Abstand zwischen den Bergen beträgt b und die Höhe der Berge ist h

Tabelle 18: Variationen

Variable	f	σ_1	T	B	SNR	D	w	a	b	h
Einheit	Hz	m^2	$^{\circ}K$	Hz	dB	m	1	km	km	m
Datum										
A	$10G$	150	500	$8M$	25	1,5	0,7	10	20	400
B	$12G$	180	400	$8M$	22	1,3	0,8	10	20	400
C	$11G$	220	500	$6M$	18	1,3	1	10	15	350
20131024	$11G$	220	320	$50M$	18	3	0,95	10	25	320
20130513	$11G$	220	400	$8M$	18	2	0,95	10	14	320



1. Welche Höhe h_m darf ein ungefähr in der Mitte zwischen Hilfsspiegel und Empfänger liegender Hügel maximal haben, ohne die Richtfunkstrecke nennenswert zu beeinträchtigen? Erklären Sie Ihre Argumentation! (6 P.)
2. Welche EIRP (in W und in dBW) muss die Sendeanlage erzeugen, damit der erforderliche Signal/Rausch-Abstand am Empfänger erreicht wird? (10 P.)

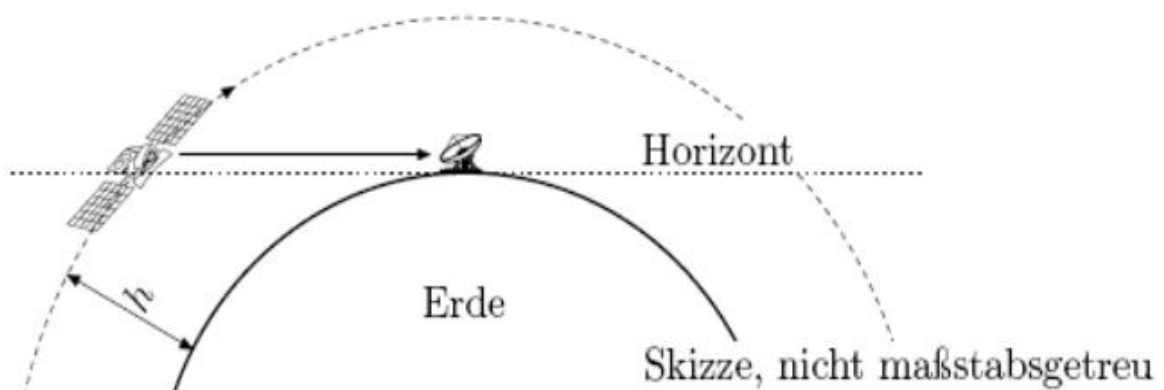
3. Welche Sendeleistung (in W und in dBW) ist nötig, wenn die Sendeanlage eine baugleiche Parabolantenne verwendet wie der Empfänger? (4 P.)

Satellitenfunk 32.

Der Satellit MOST fliegt in der erdnahen Umlaufbahn auf der Höhe h um die Erde (Erdradius $r = 6370 \text{ km}$). Er sendet auf der Frequenz f mit der Sendeleistung P_S bei der Bandbreite B und seine Antenne hat den Gewinn G_S . Zwischen Sender und Antenne befinden sich ein Kabel mit den Verlusten L_S . Die Bodenstation in Wien verwendet einen Parabolspiegel mit dem Gewinn G_E der dem Satelliten bei seinem Überflug folgt und der Empfänger hat die Rauschtemperatur T . Nehmen Sie eine zusätzliche Dämpfung (Wetter, Atmosphäre, Polarisationsverlusten, mechanischer Toleranzen,...) von L_E an.

Tabelle 19: Variationen

Variable	h	f	P_S	G_S	B	L_S	G_E	T	L_E
Einheit	km	Hz	W	dBi	Hz	dB	dBi	$^{\circ}K$	dB
Datum									
A	820	$2,232G$	0,5	0	$78k$	2	35	115	13



1. Berechnen Sie das SNR (in dB) für den Fall, dass sich der Satellit genau am Horizont befindet. (13 P.)

- Um wieviel dB verbessert sich das SNR wenn sich der Satellit genau über Wien befindet? (7 P.)

Pegelplan 33.

Über ein Mobilfunksystem sind folgende Parameter bekannt: Betriebsfrequenz f , Bandbreite B 5MHz, Zusatzrauschen des Empfängers L_E 5 dB, minimal erforderliches SNR am Demodulator des Empfängers SNR 13 dB, Gewinn der Empfangsantenne G_E 8 dBi, Gewinn der Sendeantenne G_S 16 dBi. Bezugstemperatur $T_0 = 290$ K. Vernachlässigen Sie Verluste in Kabeln.

Tabelle 20: Variationen

Variable	f	B	L_E	SNR	G_E	G_S	T_0
Einheit	Hz	Hz	dB	dB	dBi	dBi	$^{\circ}K$
Datum							
A	2,1G	5M	5	13	-8	16	290

- Erstellen Sie einen tabellarischen Pegelplan in dB ! (5 P.)
- Ermitteln Sie die Ausbreitungsdämpfung und die entsprechende Entfernung für eine Sendeleistung von 0 dBm ! (5 P.)
- Zeichnen Sie einen Pegelplan (Handskizze, muss nicht masstäblich sein)! (5 P.)

Mars Odyssey 34.

Um für die Marssonde „Phoenix“ geeignete Landeplätze zu erkunden, wurden 2005 mit der den Mars umkreisenden Raumsonde „Odyssey“ Radar-Bilder der Marsoberfläche erzeugt. Die Messungen wurden bi-statisch bei einer Frequenz von 401 MHz durchgeführt: Als Sendestation fungierte das Stanford Research Institute in Kalifornien mit einer Parabolantenne mit 46 m Durchmesser, einem Wirkungsgrad $w = 54\%$ und einer Sendeleistung $P_S = 3$ kW . Die Raumsonde „Odyssey“ überfliegt den Mars in einer Flughöhe von $h = 400$ km und ist mit einer Empfangsantenne mit einem Gewinn von 4,8 dBi ausgerüstet, die Empfängerrauschtemperatur beträgt $T = 400$ $^{\circ}K$, wobei ein Emp-

fangsfilter mit 28 kHz Bandbreite eingesetzt wird. In der betrachteten Zeit betrug die Distanz Mars-Erde etwa $70 \cdot 10^9\text{ m}$.

1. Skizzieren Sie den Sachverhalt auf dem Mars und tragen Sie alle relevanten Daten ein! Nehmen Sie dabei an, dass sich Erde, Ödyssey und Mars auf einer Linie befinden. (3 P.)
2. Berechnen Sie die Strahlungsleistungsdichte T_e auf der Marsoberfläche die durch den Sender in Kalifornien erzeugt wird. (5 P.)
3. Berechnen Sie die differentielle Empfangsleistung dPr bei der Sonde, die durch ein Flächenelement dA des Marsboden mit dem flächenbezogenen Streuquerschnitt $\hat{\sigma} = 4 \cdot 10^6$ entsteht. (7 P.)
4. Wie groß ist die Fläche an Marsboden die zu Empfangsleistung beiträgt, damit sich ein SNR von 13 dB ergibt? (5 P.)

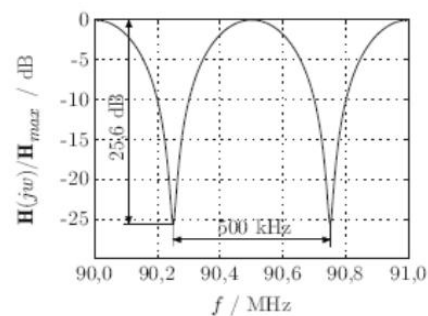
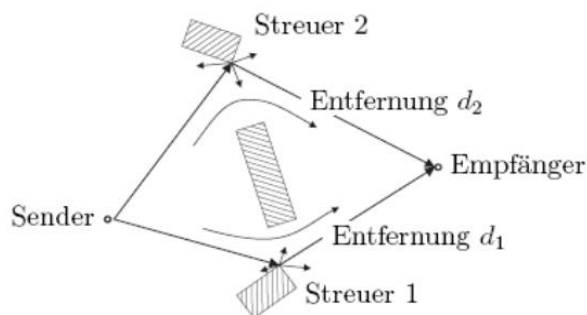
13 Mehrwegeausbreitung

Kanalmessung 35.

Bei einer Kanalmessung des skizzierten NLOS (Non-Line-Of-Sight) Szenarios sendet der Sender mit einer konstanten frequenzunabhängigen Amplitude A . Es wird die angegebene normierte Übertragungsfunktion ermittelt. Die Entfernung beträgt d_1 .

Tabelle 21: Variationen

Variable	d_1
Einheit	km
Datum	
A	1, 2
B	2, 2



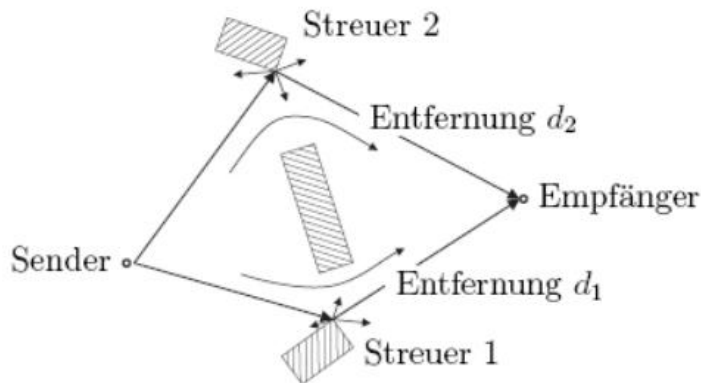
1. Wie groß ist die Entfernung d_2 ? (7 P.)
2. Um welchen Faktor (in dB) unterscheiden sich die empfangenen Leistungen aus Richtung Streuer 1 und Streuer 2? (8 P.)

Zeitinvariante Zweiwegeausbreitung 36.

Zwei gleich starke Strahlen, die von einer omnidirektionalen Sendeantenne (Isotropstrahler) ausgehen, werden an der Empfangsantenne superponiert. Der Weg des zweiten Strahles d_2 ist um p länger als d_1 . Die Feldstärke des ersten Strahles am Empfänger sei E_0 . Anmerkung: Nehmen Sie die Streuer als ideal reflektierend an!

Tabelle 22: Variationen

Variable	d_1	p	f_u	f_o
Einheit	km	1	Hz	Hz
Datum				
A	1,5	1,2	900M	905M
B	1,8	1,25	850M	855M



1. Berechnen Sie die Laufzeiten beider Strahlen! (2 P.)
2. Wie groß ist die Feldstärke des zweiten Strahles (relativ zum ersten Strahl) am Empfänger? (2 P.)
3. Berechnen Sie die Gesamtfeldstärke am Empfänger! (10 P.)
4. Berechnen und zeichnen Sie (in dB , bezogen auf E_0) den Verlauf des Betrages der Gesamtfeldstärke am Empfänger als Funktion der Frequenz im Bereich von f_u bis f_o an! (11 P.)

Mobilfunksystem 37.

Über ein Mobilfunksystem sind folgende Parameter bekannt: Betriebsfrequenz f , Bandbreite B , Zusatzrauschen des Empfängers L_E , minimal erforderliches SNR am Demodulator des Empfängers SNR , Gewinn der Empfangsantenne G_E . Die Sendeantenne ist eine typische Sektorantenne mit h , b Breite und hat einen Gewinn von G_S . Bezugstemperatur T_0 . Vernachlässigen Sie Verluste in Kabeln.

Tabelle 23: Variationen

Variable	f	B	L_E	SNR	G_E	h	b	G_S	T_0	P_S
Einheit	Hz	Hz	dB	dB	dB_i	m	cm	dB_i	$^{\circ}K$	dBm
Datum										
A	$1,9G$	$5M$	$4,5$	13	-10	$1,2$	20	11	290	13
B	$1,8G$	$200k$	6	13	-8	$1,5$	30	13	290	17
20151210	$5,9G$	$50M$	4	15	-3	1	20	14	290	32
20130314	$0,85G$	$200k$	5	13	-6	1	20	13	290	46

1. In welcher Entfernung beginnt das Fernfeld dieser Sendeantenne? (5 P.)
2. Erstellen Sie einen tabellarischen Pegelplan in dB ! (5 P.)
3. Ermitteln Sie die maximal erlaubte Ausbreitungsdämpfung und die entsprechende Entfernung für eine Sendeleistung von P_S . Geben Sie alle auftretenden Größen in logarithmischen Maßen (dB , dBm , . . .) an. (10 P.)
4. Zeichnen Sie einen Pegelplan (Handskizze, muss nicht masstäblich sein)! (5 P.)