

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Hochfrequenztechnik“

von Frank Gustrau

ISBN (Buch): 978-3-446-45950-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-46094-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446459502>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>15</b>
1.1	Hochfrequenzanwendungen .....	15
1.2	Frequenzbereiche .....	18
1.3	Hochfrequenztechnische Erscheinungen.....	19
1.3.1	Elektrisch kurze Leitungen .....	20
1.3.2	Leitungen mit einer Länge in der Größenordnung der Wellenlänge .....	22
1.3.3	Antennen und Abstrahlung elektromagnetischer Wellen .....	22
1.4	Ausblick auf die folgenden Kapitel .....	23
<b>2</b>	<b>Elektromagnetische Felder und Wellen</b> .....	<b>25</b>
2.1	Physikalische und mathematische Grundlagen.....	25
2.1.1	Elektrostatische Feldgrößen.....	25
2.1.1.1	Elektrische Feldstärke und Spannung.....	25
2.1.1.2	Polarisation und relative Dielektrizitätszahl .....	29
2.1.1.3	Verhalten bei Wechselstrom .....	30
2.1.1.4	Dielektrische Verschiebungsdichte .....	31
2.1.1.5	Elektrische Feldenergie und Kapazität .....	31
2.1.2	Stationäre elektrische Strömungsfelder und magnetische Felder .....	32
2.1.2.1	Stromdichte, Leistungsdichte und Widerstand .....	32
2.1.2.2	Magnetische Feldstärke und magnetisches Vektorpotential.....	34
2.1.2.3	Magnetische Feldenergie und Induktivität .....	36
2.1.2.4	Lorentz-Kraft .....	36
2.1.3	Vektoranalytische Operatoren .....	37
2.1.3.1	Divergenz .....	37
2.1.3.2	Rotation .....	37
2.2	Maxwellsche Gleichungen .....	38
2.2.1	Differentialform für allgemeine Zeitabhängigkeit .....	38
2.2.2	Differentialform für harmonische Zeitabhängigkeit.....	39
2.2.3	Integralform .....	40
2.2.4	Materialgleichungen .....	42
2.2.5	Verhalten an Materialgrenzen .....	44

2.3	Einteilung elektromagnetischer Feldprobleme .....	46
2.3.1	Statische Felder .....	46
2.3.2	Quasistatische Felder .....	46
2.3.3	Schnell veränderliche Felder .....	47
2.4	Skineffekt .....	47
2.5	Elektromagnetische Wellen .....	50
2.5.1	Wellengleichung und ebene Wellen .....	50
2.5.2	Polarisation .....	54
2.5.2.1	Lineare Polarisation .....	55
2.5.2.2	Zirkulare Polarisation .....	55
2.5.2.3	Elliptische Polarisation .....	55
2.5.3	Reflexion und Brechung an ebenen Grenzflächen .....	56
2.5.3.1	Senkrechter Einfall .....	57
2.5.3.2	Schräger Einfall .....	59
2.5.4	Kugelwellen .....	64
2.6	Zusammenfassung .....	65
2.7	Übungsaufgaben .....	66

### **3** Leitungstheorie und Signale auf Leitungen ..... 68

3.1	Leitungstheorie .....	68
3.1.1	Ersatzschaltbild eines kurzen Leitungsstücks .....	68
3.1.2	Telegraphengleichung .....	70
3.1.3	Spannungs- und Stromwellen auf Leitungen .....	72
3.1.4	Einseitig abgeschlossene Leitung .....	75
3.1.5	Eingangsimpedanz einer abgeschlossenen Leitung .....	77
3.1.6	Verlustlose Leitungen .....	79
3.1.7	Leitungen mit geringen Verlusten .....	81
3.1.8	Verschiedene Leitungsabschlüsse einer verlustlosen Leitung .....	82
3.1.8.1	Angepasste Leitung .....	83
3.1.8.2	Kurzgeschlossene Leitung .....	84
3.1.8.3	Leerlaufende Leitung .....	86
3.1.8.4	Allgemeiner Abschluss .....	88
3.1.9	Verlustlose Leitungen als Impedanztransformatoren .....	89
3.1.9.1	Der $\lambda/4$ -Transformator .....	89
3.1.9.2	Der $\lambda/2$ -Transformator .....	89
3.1.10	Reflexionsfaktor einer verlustlosen Leitung .....	90
3.1.11	Smith-Chart-Diagramm .....	93
3.2	Zeitsignale auf Leitungen .....	98

3.2.1	Sprungförmige Signale.....	98
3.2.1.1	Angepasste Quelle und angepasster Abschluss .....	98
3.2.1.2	Angepasste Quelle und fehlangepasster (resistiver) Abschluss ....	100
3.2.1.3	Angepasste Quelle und fehlangepasster (reaktiver) Abschluss ....	102
3.2.1.4	Fehlanpassung an Quelle und Last .....	104
3.2.2	Rechteckförmige Signale .....	107
3.3	Augendiagramm .....	108
3.4	Zusammenfassung .....	111
3.5	Übungsaufgaben .....	112

**4 Wellenleiter.....114**

4.1	Überblick über technisch bedeutsame Leitungstypen .....	114
4.2	Koaxialleitungen .....	116
4.2.1	Induktivitätsbelag und Leitungswellenwiderstand .....	117
4.2.2	Dämpfung bei schwachen Verlusten.....	119
4.2.2.1	Metallische Verluste .....	120
4.2.2.2	Dielektrische Verluste .....	120
4.2.3	Nutzbarer Frequenzbereich .....	121
4.2.4	Anwendungsgebiete.....	123
4.3	Mikrostreifenleitungen ( <i>Microstrip</i> ) .....	123
4.3.1	Wellenwiderstand und effektive Permittivitätszahl .....	124
4.3.2	Dispersion und nutzbarer Frequenzbereich .....	127
4.3.3	Anwendungsgebiete.....	128
4.4	Streifenleitung ( <i>Stripline</i> ) .....	128
4.4.1	Leitungswellenwiderstand .....	129
4.4.2	Nutzbarer Frequenzbereich .....	129
4.4.3	Anwendungsgebiete.....	130
4.5	Rechteckhohlleiter .....	130
4.5.1	Allgemeine Überlegungen.....	131
4.5.2	Die $H_{10}$ -Grundwelle.....	134
4.5.3	Höhere Wellentypen .....	137
4.5.4	Einsatzgebiete von Hohlleitern .....	138
4.5.5	Anregung von Hohlleiterwellen .....	139
4.5.6	Hohlraumresonatoren .....	140
4.6	Zweidrahtleitung .....	142
4.6.1	Leitungswellenwiderstand .....	143
4.6.2	Anwendungsgebiete.....	143
4.7	Dreileitersysteme .....	144

---

4.7.1	Gleich- und Gegentaktwellen .....	144
4.7.2	Leitungswellenwiderstände und Ausbreitungskonstanten .....	146
4.7.3	Leitungsabschluss .....	149
4.8	Übungsaufgaben .....	149
<b>5</b>	<b>Streuparameter .....</b>	<b>151</b>
5.1	Mehrtorgleichungen in Matrixform .....	151
5.2	Definition von Wellengrößen .....	152
5.3	Streuparameter und Leistung .....	154
5.4	Spezielle Eigenschaften von Schaltungen .....	157
5.4.1	Anpassung .....	157
5.4.2	Leistungsanpassung .....	158
5.4.3	Reziprozität (Übertragungssymmetrie) .....	159
5.4.4	Symmetrie .....	160
5.4.5	Verlustlosigkeit bei Passivität .....	160
5.4.6	Rückwirkungsfreiheit .....	161
5.4.7	Besondere Bedingungen bei Dreitoren .....	161
5.5	Berechnung von Streumatrizen .....	161
5.5.1	Reflexionsfaktoren .....	162
5.5.2	Transmissionsfaktoren .....	162
5.5.3	Umnormierung einer Streumatrix auf andere Torwiderstände .....	165
5.6	Signalflussmethode .....	166
5.7	Messung von Streuparametern .....	172
5.8	Übungsaufgaben .....	175
<b>6</b>	<b>Hochfrequenzbauelemente und -schaltungen .....</b>	<b>178</b>
6.1	Ersatzschaltbilder konzentrierter Bauelemente .....	178
6.1.1	Widerstände .....	178
6.1.2	Kondensatoren .....	180
6.1.3	Spulen .....	182
6.2	Leitungsresonatoren .....	183
6.2.1	$\lambda/2$ -Resonator .....	184
6.2.2	$\lambda/4$ -Resonator .....	185
6.3	Anpassschaltungen .....	187
6.3.1	LC-Anpassnetzwerke .....	188
6.3.2	Anpassung mit Leitungen .....	190
6.3.2.1	$\lambda/4$ -Transformator .....	190
6.3.2.2	Stichleitung und <i>Butterfly-Stub</i> s .....	192

6.4	Filter .....	194
6.4.1	Klassischer LC-Filterentwurf mit Induktivitäten und Kapazitäten .....	194
6.4.2	Entwurf von Butterworth-Filtern .....	196
6.4.2.1	Filter mit Tiefpassverhalten .....	196
6.4.2.2	Filter mit Hochpassverhalten .....	199
6.4.2.3	Filter mit Bandpassverhalten .....	201
6.5	Leitungsfiler .....	203
6.5.1	Seitengekoppelte Filter ( <i>Edge-coupled-line</i> -Filter) .....	204
6.5.2	Seitengekoppelte Filter ( <i>Hairpin</i> -Filter) .....	208
6.5.3	<i>Stepped-impedance</i> -Filter .....	209
6.5.4	Metallisch geschirmte Filter (Gehäuseresonanzen) .....	210
6.5.5	Hohlleitungsfiler .....	211
6.6	Zirkulatoren .....	212
6.7	Leistungsteiler .....	214
6.7.1	Wilkinson-Leistungsteiler .....	214
6.7.2	Leistungsteiler mit ungleicher Leistungsaufteilung .....	216
6.8	Branchline-Koppler .....	217
6.8.1	Konventioneller 3-dB-Koppler .....	217
6.8.2	Ungleiche Leistungsaufteilung und Impedanztransformation .....	220
6.9	<i>Rat-Race</i> -Koppler .....	222
6.10	Richtkoppler .....	223
6.11	Symmetrierglieder .....	225
6.12	Elektronische Schaltungen .....	227
6.12.1	Mischer .....	229
6.12.2	Verstärker und Oszillatoren .....	231
6.13	Moderne HF-Entwurfswerkzeuge .....	233
6.13.1	HF-Schaltungssimulatoren .....	233
6.13.2	Elektromagnetische 3D-Feldsimulation .....	233
6.14	Übungsaufgaben .....	237

**7 Antennen .....239**

7.1	Grundbegriffe und Kenngrößen .....	239
7.1.1	Antennen als Wellentypwandler .....	239
7.1.2	Nahfeld und Fernfeld .....	240
7.1.3	Isotroper Kugelstrahler .....	241
7.1.4	Kenngrößen für das Strahlungsfeld einer Antenne .....	242
7.1.5	Anpassung und Bandbreite .....	247
7.2	Praktische Antennenbauformen .....	248

7.3	Mathematische Behandlung des Hertzschen Dipols .....	251
7.4	Drahtantennen .....	255
7.4.1	Halbwellendipol .....	256
7.4.2	Monopol .....	258
7.4.3	Verkürzung von Monopolantennen .....	259
7.5	Planare Antennen .....	260
7.5.1	Rechteckige <i>Patch</i> -Antenne .....	261
7.5.1.1	Abstrahlung eines <i>Patch</i> -Elementes .....	261
7.5.1.2	Resonanzfrequenz und <i>Patch</i> -Abmessungen .....	262
7.5.1.3	Speisung von <i>Patch</i> -Antennen .....	263
7.5.2	<i>Patch</i> -Antennen mit zirkularer Polarisation .....	266
7.5.3	Planare Dipol- und <i>Inverted-F</i> -Antennen .....	268
7.6	Gruppenantennen .....	270
7.6.1	Einzelcharakteristik und Gruppenfaktor .....	270
7.6.2	Phasengesteuerte Antennen .....	274
7.6.3	Strahlformung .....	279
7.7	Weitere Antennenkonzepte .....	282
7.8	Übungsaufgaben .....	283

<b>8</b>	<b>Funkwellen .....</b>	<b>284</b>
8.1	Wellenausbreitungseffekte .....	284
8.1.1	Reflexion und Brechung .....	284
8.1.2	Absorption .....	285
8.1.3	Beugung .....	285
8.1.4	Streuung .....	287
8.1.5	Doppler-Effekt .....	288
8.2	Einfache Ausbreitungsszenarien .....	291
8.2.1	Freiraumausbreitung .....	291
8.2.2	Dämpfung von Wellen in Luft .....	293
8.2.3	Ausbreitung über ebenem Grund (Zweiwegeausbreitung) .....	294
8.2.4	Richtfunkstrecken .....	297
8.2.5	Geschichtete Medien .....	299
8.3	Komplexe Umgebungen .....	301
8.3.1	Mehrwegeausbreitung .....	301
8.3.2	<i>Clutter Factor</i> -Modell .....	304
8.3.3	Okumura-Hata-Modell .....	305
8.3.4	Physikalische Modelle und numerische Feldberechnung .....	306
8.4	Zusammenfassung .....	309
8.5	Übungsaufgaben .....	310

<b>A</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>311</b>
	A.1 Koordinatensysteme .....	311
	A.1.1 Kartesisches Koordinatensystem .....	312
	A.1.2 Zylinderkoordinatensystem .....	313
	A.1.3 Kugelkoordinatensystem .....	314
	A.2 Logarithmische Darstellung von technischen Größen .....	315
	A.2.1 Dimensionslose Größen .....	315
	A.2.2 Relative und absolute Pegel .....	316
	A.2.3 Pegelplan einer Übertragungsstrecke .....	316
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>318</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>323</b>
	<b>Index</b> .....	<b>327</b>





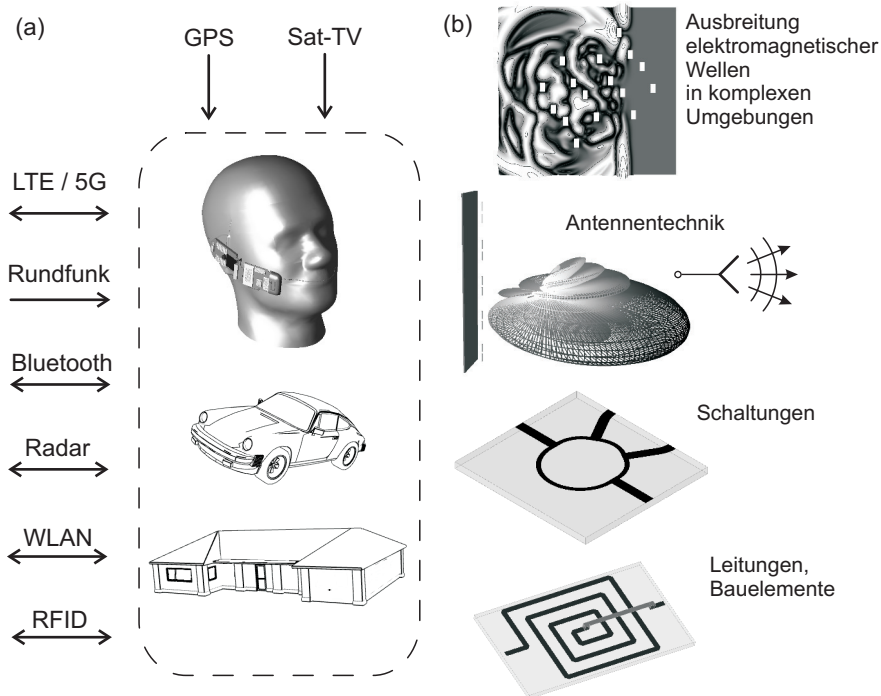
# 1

## Einleitung

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über typische hochfrequenztechnische Anwendungen und Frequenzbereiche. Mit einem anschaulichen Beispiel zur Wellenausbreitung wollen wir uns motivieren, tiefer in die Theorie einzusteigen. Ein Überblick über die nachfolgenden Kapitel bietet dem Leser Orientierung und gestattet den gezielten Zugriff auf ausgewählte Themen.

### ■ 1.1 Hochfrequenzanwendungen

Jeder Einzelne nutzt heute bereits – ob unterwegs oder in seinem Zuhause – eine zunehmende Zahl von drahtlosen Techniken. Bild 1.1a zeigt eine Auswahl an drahtlosen Kommunikations-, Navigations-, Identifikations- und Ortungsanwendungen.



**Bild 1.1** (a) Auswahl an Funkanwendungen und (b) HF-Komponenten und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Die Zahl der technischen Anwendungen, die hochfrequenztechnische Komponenten und Systeme beinhalten, steigt auch in Zukunft weiter an. Um diese Systeme zu entwickeln und in Betrieb zu nehmen, bedarf es unter anderem breiter Kenntnisse des Hochfrequenzverhaltens von konzentrierten Bauelementen (z.B. Kapazitäten, Induktivitäten, Leitungen, Transistoren), Schaltungen (z.B. Filter, Verstärker), Komponenten (z.B. Antennen) und physikalischer Aspekte wie der elektromagnetischen Wellenausbreitung (Bild 1.1b).

In Tabelle 1.1 sind einige typische Hochfrequenz-Funkanwendungen und ihre zugehörigen Frequenzbereiche aufgeführt. Die Anwendungen umfassen unter anderem terrestrische Sprach- und Datenkommunikation, also den zellularen Mobilfunk und die drahtlosen Kommunikationsnetze, sowie Verteildienste (Rundfunk) sowohl terrestrisch als auch satellitenbasiert. Drahtlose Identifikationssysteme (RFID) in ISM-Bändern freuen sich im Warenverkehr und der Logistik wachsender Bedeutung. Im Bereich der Navigation ist das GPS-System hervorzuheben, welches mittlerweile in einer Vielzahl von Kraftfahrzeugen verbaut oder in mobilen Geräten im Einsatz ist. Im Automobilbereich finden wir als weitere HF-Anwendung Radarsysteme für die Umfeldüberwachung und als Sensoren für Fahrerassistenzsysteme.

**Tabelle 1.1** Typische drahtlose Hochfrequenzanwendungen und zugehörige Frequenzbereiche

Anwendung	Bezeichnung	Frequenzbereich
<b>Zellularer Mobilfunk</b>		
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> (Mobilfunkstandard der 2. Generation)	900 MHz / 1800 MHz
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> (Mobilfunkstandard der 3. Generation)	2100 MHz
LTE	<i>Long Term Evolution</i> (Mobilfunkstandard der 4. Generation)	800 MHz / 1800 MHz / 2600 MHz
5G	Mobilfunkstandard der 5. Generation ( (*)Weitere Frequenzbereiche geplant)	700 MHz / 3400... 3800 MHz / 28 GHz(*)
Tetra	Digitaler Bündelfunk, BOS-Funk	400 MHz
<b>Drahtlose Netze</b>		
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>	2,45 GHz; 5 GHz
Bluetooth	Nahbereichsfunk	2,45 GHz
<b>Navigation</b>		
GPS	<i>Global Positioning System</i>	1,2 GHz; 1,575 GHz
<b>Identifikation</b>		
RFID	<i>Radiofrequency Identification</i>	13,56 MHz / 868 MHz / 2,45 GHz / 5 GHz
<b>Rundfunk</b>		
UKW-Rundfunk	Analoge Radiosender	87,5... 108 MHz
DAB	<i>Digital Audio Broadcasting</i>	200 MHz
DVB-T2	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>	470... 690 MHz
Satelliten-Rundfunk	Satelliten-Rundfunk	10,7... 12,75 GHz
<b>Radar</b>		
Nahbereichsradar	Nahbereichsradar	24 GHz
ACC	<i>Adaptive Cruise Control</i> , Abstandserfassung	77 GHz

Die unterschiedlichen Anwendungsbereiche entwickeln sich rasant. Exemplarisch schauen wir auf die Entwicklung im Bereich des Mobilfunks. In der Entstehungsphase der mobilen Telefonie stand die Sprachkommunikation im Vordergrund. Die analogen Endgeräte waren unhandlich und teuer. Mit der zweiten Generation (2G/GSM) zog in den 1990er Jahren die Digitaltechnik in den Mobilfunk ein. Die Endgeräte wurden kompakter und für breite Massen erschwinglich. Neben der Sprachkommunikation etablierte sich ein Textdienst (SMS). Mit der dritten Generation (3G/UMTS) vollzog sich nach der Jahrtausendwende die Entwicklung zur mobilen Breitbandanwendung mit der Möglichkeit multimediale Inhalte (Foto, Video, Musik) und das Internet mobil zu nutzen. Unter dem Einfluss der neuen technischen Möglichkeiten wandelten sich die Bedienkonzepte der Endgeräte (Touchscreen statt Tastatur) und die Ausstattung der Geräte wurde komplexer (zum Beispiel eingebaute Kameras).

Beim Mobilfunkstandard der vierten Generation (4G/LTE-Advanced<sup>1</sup>) ab ca. 2010 wurde der mobile Breitbandzugang weiterentwickelt, die Datenraten wurden erhöht und die Kapazität (Anzahl der gleichzeitig aktiven Teilnehmer im Netz) gesteigert. Günstige Geräte und Tarife führten zum mobilen Breitbandzugang für jedermann. Neben dem schnellen mobilen Breitbandzugang wurden durch eine Erweiterung des LTE-Standards (NB-IoT<sup>2</sup>) auch Anwendungen im Bereich Industrie 4.0 bzw. Internet der Dinge einbezogen. Die Datenraten in diesem Anwendungsfeld sind vergleichsweise niedrig, dafür sind die Anforderungen an die Zuverlässigkeit sehr hoch.

Um für die steigenden Anforderungen gerüstet zu sein, und weitere Anwendungsfelder für den Mobilfunk zu erschließen, etabliert sich gerade ein Mobilfunkstandard der fünften Generation (5G) [AlDu18] [Dahl18]. Insgesamt werden hierbei drei Anwendungsszenarien adressiert:

- Verbesserungen in mobilen Breitbandanwendungen (eMBB = *enhanced Mobile Broadband*): Höhere Datenraten und verringerte Verzögerungsraten unter anderem für VR<sup>3</sup>- und AR<sup>4</sup>-Anwendungen.
- Kommunikation zwischen einer hohen Zahl günstiger und energieeffizienter Geräte für industrielle Anwendungen (mMTC = *massive Machine Type Communications*).
- Anwendungen mit geringen Latenzzeiten und hoher Zuverlässigkeit für zum Beispiel Autonomes Fahren (URLLC = *Ultra Reliable Low Latency Communications*).

Unter anderem im Bereich der Funkschnittstelle wurden wesentliche Änderungen vorgenommen, um die Anforderungen in den unterschiedlichen Anwendungsszenarien erfüllen zu können. Alle bisherigen Standards arbeiteten im Frequenzbereich unter 3 GHz (Tabelle 1.1). Die Funkschnittstelle des Mobilfunks der fünften Generation (5G NR = *5G New Radio*) unterscheidet den Frequenzbereich FR1 (*Frequency Range 1*) unterhalb von 6 GHz und den Frequenzbereich FR2 (*Frequency Range 2*) oberhalb 24,25 GHz. Die niedrigen Frequenzen (z.B. 700 MHz) eignen sich für eine gute Netzabdeckung in der Fläche und die Versorgung in kritischen Gebäudebereichen (z.B. Keller). Der neu hinzugekommene Millimeterwellenbereich (z.B. 28 GHz) erlaubt sehr hohe Datenraten und eine sehr hohe Kapazität in kleinen räumlichen Bereichen. Mehrantennenkonzepte mit Strahlformung können bei den hohen Frequenzen mit Hilfe sehr kompakter Antennensysteme realisiert werden. Im Rahmen dieses

<sup>1</sup> LTE-Advanced wird aus Gründen der Sprachökonomie auch oft einfach als LTE abgekürzt. Gemeint ist in jedem Fall der Mobilfunk der vierten Generation bzw. Weiterentwicklungen innerhalb dieser Generation.

<sup>2</sup> *Narrow Band Internet of Things*

<sup>3</sup> *Virtual Reality*

<sup>4</sup> *Augmented Reality*

Buches werden wir die *physikalisch-technischen* Grundlagen zum Verständnis der *hochfrequenztechnischen Aspekte* der unterschiedlichen Funktechniken legen und zum Beispiel auf die Antennentechnik und Wellenausbreitung auf Leitungen, in Schaltungen und in komplexen räumlichen Umgebungen eingehen.

Das Themengebiet der Hochfrequenztechnik spielt jedoch nicht nur bei der Funktechnik eine entscheidende Rolle. Durch die zunehmende Verarbeitungsgeschwindigkeit digitaler Schaltungen tauchen hierbei hochfrequente Signalanteile auf, die dazu führen, dass auch bei schnellen Digitalschaltungen Entwurfsmethoden der Hochfrequenztechnik Anwendung finden.

Zudem reicht die Hochfrequenztechnik durch ihre Nähe zur elektromagnetischen Feldtheorie in den Bereich der Elektromagnetischen Verträglichkeit<sup>5</sup> hinein. Einerseits basieren die hier angewendeten Messaufbauten mit Leitungen und Antennen direkt auf hochfrequenztechnischen Prinzipien. Andererseits ist bei Nichteinhalten von vorgegebenen Grenzwerten im Allgemeinen eine detaillierte Analyse der Situation erforderlich, um Verbesserungen zu erzielen. Die Einbeziehung hochfrequenztechnischer Aspekte bringt dabei oft wesentliche Fortschritte.

## ■ 1.2 Frequenzbereiche

Das elektromagnetische Spektrum ist zur besseren Orientierung in eine Reihe von Frequenzbändern unterteilt. In verschiedenen Staaten und geographischen Regionen haben sich dabei unterschiedliche Bezeichnungssysteme herausgebildet, die oft parallel verwendet werden. In Tabelle 1.2 ist eine übliche Einteilung des Frequenzbereiches von 3 kHz bis 300 GHz in acht Frequenzdekaden nach einer Empfehlung der ITU (International Telecommunications Union) [ITU00] dargestellt.

**Tabelle 1.2** Bezeichnung der Frequenzbereiche nach ITU

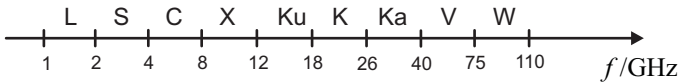
Frequenzbereich	Internationale Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
3...30 kHz	VLF – <i>Very Low Frequency</i>	Längstwellen
30...300 kHz	LF – <i>Low Frequency</i>	Langwellen
300 kHz...3 MHz	MF – <i>Medium Frequency</i>	Mittelwellen
3...30 MHz	HF – <i>High Frequency</i>	Kurzwellen
30...300 MHz	VHF – <i>Very High Frequency</i>	Ultrakurzwellen
300 MHz...3 GHz	UHF – <i>Ultra High Frequency</i>	Dezimeterwellen
3...30 GHz	SHF – <i>Super High Frequency</i>	Zentimeterwellen
30...300 GHz	EHF – <i>Extremely High Frequency</i>	Millimeterwellen

Bild 1.2a zeigt die nach dem IEEE-Standard [IEEE02] (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) gebräuchliche Bezeichnung unterschiedlicher Frequenzbänder. Diese Bandbezeichnungen sind ebenfalls sehr weit verbreitet. Nachteilig ist die unsystematische Verwendung der

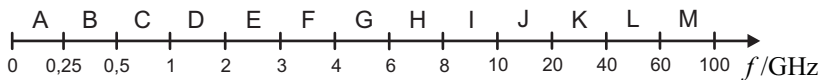
<sup>5</sup> Die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beschäftigt sich mit der Vermeidung von störenden Wechselwirkungen zwischen technischen Geräten. Hierbei werden Geräte in standardisierten Messaufbauten auf die Einhaltung von technischen Grenzwerten hin überprüft.

Buchstaben und Bandbereiche, die in der historisch gewachsenen Struktur begründet liegt. Eine neuere Bezeichnungweise gemäß NATO zeigt Bild 1.2b [Macn10] [Mein92]. Die Zuordnung der Buchstaben zu den Frequenzbereichen erfolgt hier systematischer. Allerdings sind die Bandbezeichnungen in der Praxis weniger gebräuchlich.

(a) Bezeichnung der Frequenzbänder nach IEEE Std. 521-2002



(b) Bezeichnung der Frequenzbänder nach NATO



**Bild 1.2** Bezeichnung der Frequenzbänder nach (a) IEEE und (b) NATO

Der störungsarme Betrieb von Funkanwendungen wird durch eine Reihe rechtlicher und regulatorischer Maßnahmen sichergestellt. Die knappe Ressource „Frequenz“ wird dabei minutiös aufgeteilt und verwaltet [CEPT18] [Bund18b]. Bestimmte Frequenzbereiche des Spektrums sind für spezielle kommerzielle, medizinische und wissenschaftliche Anwendungen vorgesehen.

Die für diese speziellen Anwendungen reservierten Frequenzbereiche werden als ISM-Frequenzbänder (*Industrial, Scientific, Medical*) bezeichnet und sind in Tabelle 1.3 aufgelistet [Bund03]. Ein typisches Beispiel ist der Frequenzbereich bei 2,45 GHz, in dem Mikrowellenherde und WLAN-Systeme betrieben werden. Ein weiteres Frequenzband für nichtöffentliche Funkanwendungen geringer Reichweite für Datenübertragungen liegt im Bereich von 863 bis 870 MHz [Bund18a].

**Tabelle 1.3** Ausgewählte ISM-Frequenzbänder

13,553...13,567 MHz	26,957...27,283 MHz
40,66...40,70 MHz	433,05...434,79 MHz
2,4...2,5 GHz	5,725...5,875 GHz
24...24,25 GHz	61...61,5 GHz
122...123 GHz	244...246 GHz

## ■ 1.3 Hochfrequenztechnische Erscheinungen

Wir wollen nun anhand zweier Beispiele das Augenmerk auf das Thema Hochfrequenztechnik richten. Die Beispiele behandeln Spannungswellen auf Leitungen und Abstrahlung elektromagnetischer Wellen durch Antennen.

### 1.3.1 Elektrisch kurze Leitungen

Zunächst einmal betrachten wir die einfache Schaltung in Bild 1.3a aus einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand, die über eine (elektrisch kurze) Leitung mit einem Lastwiderstand verbunden ist. Elektrisch kurz bedeutet hierbei, dass die Leitungslänge  $\ell$  deutlich kürzer als die Wellenlänge  $\lambda$  ist.

Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  aus.

$$c_0 = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.1)$$

Die entsprechende (Freiraum-)Wellenlänge bei einer Frequenz  $f$  ist dann:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \gg \ell \quad . \quad (1.2)$$

Bei einer Frequenz von  $f = 1$  MHz ergibt sich zum Beispiel eine Wellenlänge  $\lambda \approx 300$  m. Eine Leitung von  $\ell = 1$  m wäre dann als *elektrisch kurz* anzusehen. Wir nehmen weiterhin der Einfachheit<sup>6</sup> halber an, dass der Lastwiderstand  $R_A$  dem Innenwiderstand  $R_I$  der Quelle entspricht.

Alternativ können wir das Kriterium *elektrisch kurz* auch über die Laufzeit  $\tau$  eines Signals über die Leitung formulieren. Breiten sich elektromagnetische Vorgänge mit der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  aus, so benötigt ein Signal vom Anfang bis zum Ende der Leitung die Laufzeit  $\tau$ :

$$\tau = \frac{\text{Strecke}}{\text{Geschwindigkeit}} = \frac{\ell}{c_0} \ll T = \frac{1}{f} \Leftrightarrow \frac{c_0}{f} \gg \ell \quad . \quad (1.3)$$

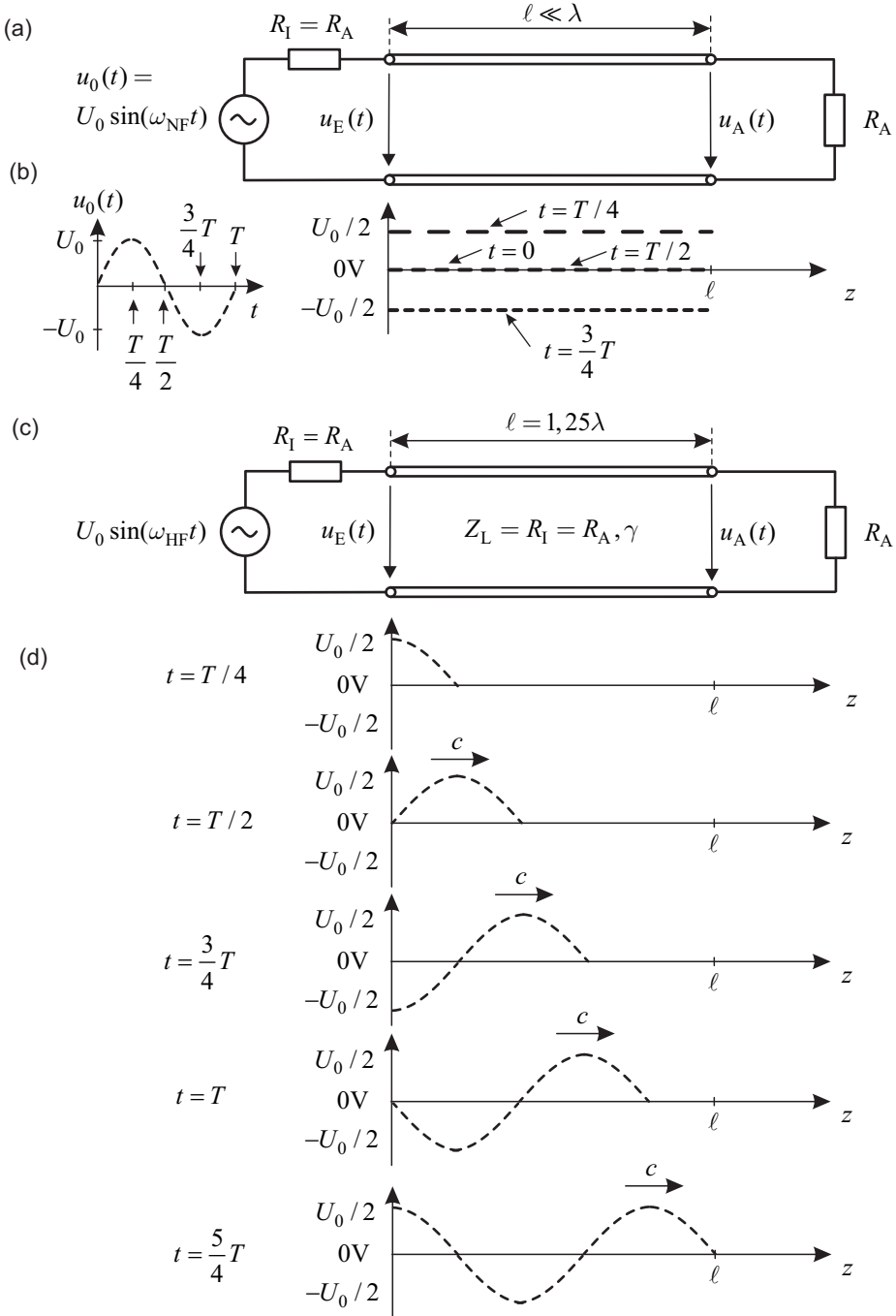
Ist diese Zeit  $\tau$  deutlich kleiner als die Periodendauer  $T$  des Sinussignals, so stellen sich die Signaländerungen der Quelle mit *kaum merklicher Verzögerung* zwischen Anfang und Ende der Leitung ein. Es ist also quasi so, als trete die Signaländerung der Quelle überall gleichzeitig ein. Signallaufzeiten längs der Leitung sind vernachlässigbar. Durch kurzes Umstellen erkennen wir, dass die beiden Formulierungen  $\ell \ll \lambda$  und  $\tau \ll T$  gleichwertig sind.

Eine Leitung ist *elektrisch kurz*, falls die Leitungslänge  $\ell$  deutlich kleiner als die Wellenlänge  $\lambda$  bei der Betriebsfrequenz ist bzw. falls die Laufzeit  $\tau$  eines sinusförmigen Signals längs der Leitung deutlich kleiner als die Periodendauer  $T$  ist.

Wir betrachten nun Bild 1.3b und variieren die Spannung der idealen Spannungsquelle sinusförmig. Die Sinusschwingung beginnt mit dem Wert Null, erreicht nach einem Viertel der Periodendauer  $T$  den maximalen Wert, durchläuft nach der halben Periode erneut die Null und erreicht über einen minimalen Wert nach der Periodendauer  $T$  den Ausgangswert der Spannung. Dieser Durchlauf wiederholt sich periodisch. Aufgrund der vernachlässigbaren Signalverzögerung  $\tau$  ist das *Signal längs der Leitung räumlich konstant*. Es entspricht aufgrund der Spannungsteilerregel gerade dem halben Wert der Spannungsquelle. Eingangs- und Ausgangsspannung sind – zumindest näherungsweise – identisch:

$$u_E(t) \approx u_A(t) \quad (1.4)$$

<sup>6</sup> Die genauen Zusammenhänge werden wir uns in Kapitel 3 über die Leitungstheorie erarbeiten.



**Bild 1.3** Schaltung aus Quelle mit Innenwiderstand, Leitung und Lastwiderstand: elektrisch kurze Leitung in (a) und (b) bzw. elektrisch lange Leitung mit Wellenausbreitung in (c) und (d)



### 1.3.2 Leitungen mit einer Länge in der Größenordnung der Wellenlänge ( $\ell > \lambda/10$ )

Als Nächstes erhöhen wir die Frequenz deutlich, so dass die Leitung nicht mehr elektrisch kurz ist. Wir wählen eine Frequenz  $f$ , so dass die Leitungslänge gerade eben fünf Viertel einer Wellenlänge entspricht:  $\ell = 5/4 \cdot \lambda = 1,25\lambda$  (Bild 1.3c). Nun kann die Laufzeit  $\tau$  gegenüber der Periodendauer  $T$  nicht mehr vernachlässigt werden. Bei Anregung mit einem sinusförmigen Signal erkennen wir die Wellenausbreitung längs der Leitung in Bild 1.3d. In dem Beispiel vergehen fünf Viertel Periodendauern, bevor das Signal das Ende der Leitung erreicht.

Ist die Leitung *nicht* als elektrisch kurz anzusehen, so zeigt die Spannung längs der Leitung keinen konstanten Verlauf mehr: In dem sinusförmigen Verlauf ist die Wellennatur der elektromagnetischen Erscheinungen zu erkennen. In der Praxis geht man davon aus, dass ab einer Leitungslänge von einem Zehntel der Wellenlänge ( $\ell > \lambda/10$ ) der Effekt bedeutsam ist.

Auch die Spannung  $u_A(t)$  am Leitungsabschluss ist nun nicht mehr gleich der Spannung  $u_E(t)$  am Leitungseingang. Zwischen beiden besteht eine Phasendifferenz.

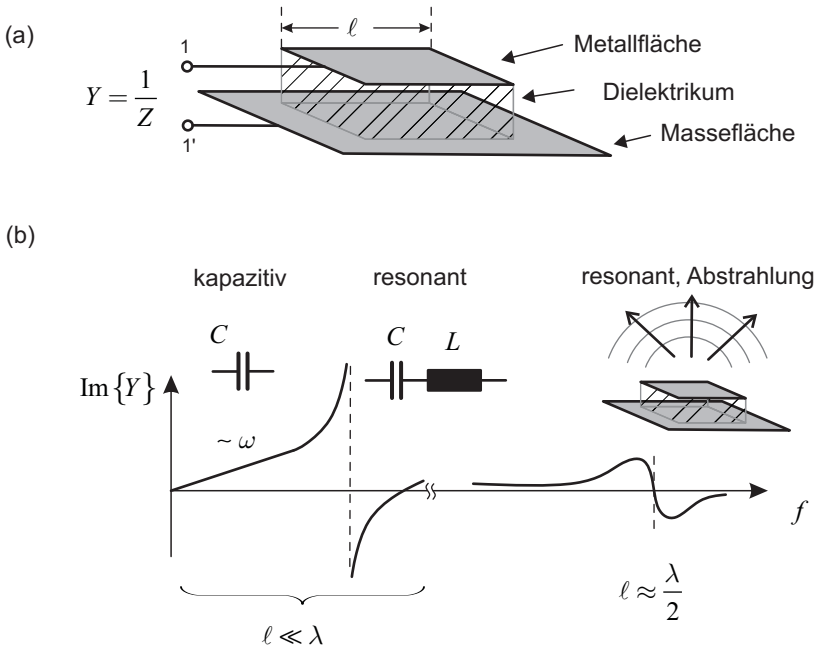
Zur vollständigen Beschreibung der Leitungseinflüsse muss die Leitung neben ihrer Länge  $\ell$  durch zwei *zusätzliche Kenngrößen* charakterisiert werden: den *Leitungswellenwiderstand*  $Z_L$  und die *Ausbreitungskonstante*  $\gamma$ . Im Schaltungsentwurf sind diese mit zu berücksichtigen!

Sind Leitungswellenwiderstand und Abschlusswiderstand nicht gleich, so wird die Welle am Ende reflektiert. Diese Zusammenhänge werden im Kapitel 3 über die Leitungstheorie detailliert untersucht.

### 1.3.3 Antennen und Abstrahlung elektromagnetischer Wellen

Als zweites Beispiel betrachten wir die geometrisch einfache Struktur in Bild 1.4a. Eine metallische Fläche mit der Kantenlänge befindet sich über einer durchgehenden metallischen Massefläche. Zwischen den beiden Metallflächen befindet sich ein Isolationsmaterial (Dielektrikum). Über zwei Klemmen kann die Struktur gespeist werden.

Der geometrische Aufbau erinnert an einen Plattenkondensator, bei dem sich ein homogenes elektrisches Feld zwischen den Metallflächen einstellt. Folglich erhalten wir bei niedrigen Frequenzen (die geometrischen Abmessungen liegen deutlich unter der Wellenlänge) auch ein kapazitives Verhalten mit  $Y = j\omega C$  (Bild 1.4b). Mit steigender Frequenz ergibt sich aufgrund der unvermeidbaren Induktivität der Zuleitungen ein resonantes Verhalten. Bei hohen Frequenzen taucht nun ein gänzlich neues Phänomen auf. Wenn die Kantenlänge in den Bereich einer halben Wellenlänge kommt, wird elektromagnetische Energie abgestrahlt. Die Struktur kann nun als Antenne (*Patch-Antenne*) verwendet werden (siehe Kapitel 7).



**Bild 1.4** Verhalten einer geometrisch einfachen Struktur bei niedrigen und hohen Frequenzen: (a) Aufbau der Struktur und (b) Frequenzverlauf des Imaginärteiles der Admittanz

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass bei hohen Frequenzen auch geometrisch einfache Formen ein komplexes Verhalten zeigen können. Das Verhalten ist mit den Methoden der Netzwerkktheorie nicht mehr zu beschreiben und erfordert den Einsatz feldtheoretischer Verfahren.

## ■ 1.4 Ausblick auf die folgenden Kapitel

Um die Funktionsweise passiver hochfrequenter Schaltungen zu verstehen, benötigen wir zunächst grundlegende Kenntnisse im Bereich der elektromagnetischen Feldtheorie und Wellenausbreitung. Die hier auftauchende mathematisch aufwendige Beschreibung in Kapitel 2 sollte den Leser jedoch nicht entmutigen, da sie in erster Linie bei Herleitungen benötigt wird. In der praktischen Arbeit werden die mathematischen Aufgaben von modernen Schaltungs- und Feldsimulationsprogrammen übernommen. Dennoch ist es für Ingenieure wichtig, auch diese mathematischen Grundlagen des Faches zu kennen. Nicht zuletzt, um gegenüber kommerziellen Softwareprodukten nicht die Integrität zu verlieren und die Ergebnisse in Hinsicht auf ihre Plausibilität und Genauigkeit bewerten zu können.

Leitungen sind ein wesentliches, allgegenwärtiges Element in hochfrequenten Schaltungen. Die im Grunde sehr einfache Leitungsstruktur zeigt erstaunlich vielfältige Einsatzmöglichkeiten. In Kapitel 3 werden wir Spannungs- und Stromwellen auf Leitungen kennenlernen und hieraus die zur Beschreibung notwendigen Zusammenhänge detailliert herleiten. Die elementaren Rechnungen lassen sich leicht nachvollziehen und legen so ein sicheres Fundament für

den immer wiederkehrenden Umgang mit Leitungen. Eine kurze Einführung in das Smith-Diagramm als klassisches Darstellungsinstrument in der Hochfrequenztechnik schließt die Betrachtung harmonischer Signale ab. Im letzten Abschnitt des Kapitels übertragen wir die gefundenen Zusammenhänge auf sprung- und impulsförmige Signale, um das Verhalten von Leitungen auch bei den in der Digitaltechnik wichtigen Signalen zu verstehen.

Nach den grundsätzlichen Leitungsbeschreibungen im vorhergehenden Kapitel werden in Kapitel 4 nun technisch bedeutsame Leitungstypen wie die Koaxialleitung, planare Leitungsstrukturen und Hohlleiter vorgestellt. Das Kapitel geht auch auf die für den Schaltungsentwurf von Filtern und Kopplern wichtigen Begriffe der Gleich- und Gegentaktsignale auf Leitungen ein.

In Kapitel 5 führen wir die Streuparameter ein, die verwendet werden, um das Verhalten hochfrequenter Schaltungen zu beschreiben. Streuparameter verknüpfen Wellengrößen an den Toren von HF-Schaltungen. Das Kapitel schließt somit inhaltlich an die Wellenphänomene aus Kapitel 3 an. Der Vorteil von Streuparametern gegenüber den bei niedrigen Frequenzen bevorzugten Impedanz- und Admittanzmatrizen liegt in der auch bei hohen Frequenzen direkten Messbarkeit mit Netzwerkanalysatoren.

Mit dem bisher erworbenen grundlegenden Wissen sind wir in der Lage, den Beschreibungen von wichtigen passiven Grundschaltungen der Hochfrequenztechnik in Kapitel 6 zu folgen. Wir werden sehen, dass sich durch überlegte Verschaltung von Leitungen Anpassschaltungen, Filter, Leistungsteiler und Koppler realisieren lassen. Von ausführlichen Herleitungen werden wir hier weitgehend absehen, vielmehr lernen wir wichtige Entwurfsverfahren kennen und vollziehen diese an Beispielen und Aufgaben nach. Die Beispiele werden mit Schaltungs- und Feldsimulatoren durchgespielt und zeigen so den Umgang mit diesen Werkzeugen auf. In einem kurzen Abschnitt geben wir einen Ausblick auf elektronische Schaltungen, die in diesem Buch nicht im Detail behandelt werden, deren grundlegende Begriffe aber kurz dargestellt werden.

Bei der Funkkommunikation stellt die Antenne das Verbindungsglied zwischen den Wellen im freien Raum und den leitungsgebundenen Signalen in einer Schaltung dar. In Kapitel 7 werden zunächst technisch wichtige Kenngrößen zur Beschreibung des Strahlungsverhaltens von Antennen vorgestellt. Zur Vertiefung des physikalischen Verständnisses leiten wir die Funktionsweise eines elementaren Antennenelements mathematisch detailliert her. Im Folgenden werden wichtige praktische Einzel- und Gruppenstrukturen von Antennen betrachtet und Entwurfsregeln an Beispielen erprobt.

Bei der Bewertung von Funksystemen reicht es nicht aus, die Antennen isoliert zu betrachten, vielmehr müssen auch die Einflüsse der Umgebung auf die Wellenausbreitung zwischen den Antennen mit einbezogen werden. Kapitel 8 stellt dazu grundlegende Ausbreitungsphänomene und deren Auswirkung auf die Nachrichtenübertragung vor. Das Buch schließt mit einem kurzen Ausblick auf empirische und physikalische Modelle für die Funkfelddämpfung.