

HANSER



Leseprobe

zu

Hochfrequenztechnik

von Frank Gustrau

Print-ISBN: 978-3-446-47685-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-47922-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476851>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Das vorliegende Lehrbuch bietet Studierenden einen praxisnahen Einstieg in das Gebiet der Hochfrequenztechnik und der physikalischen Aspekte der Funkkommunikation. Drahtlose Techniken in den Bereichen Kommunikation (Datennetze, Mobiltelefonie), Identifikation (RFID), Navigation (GPS) und Ortung (Radar) sind heute allgegenwärtig. Im Bereich der Funkanwendungen werden seit jeher vergleichsweise hohe Trägerfrequenzen verwendet, denn dies ermöglicht eine gute Ausnutzung des elektromagnetischen Spektrums und den Aufbau effizienter Antennen. Kostengünstige Herstellungsprozesse und die Anwendung rechnergestützter 3D-Entwurfswerkzeuge erschließen der Funktechnik immer neue Anwendungsgebiete bei steigenden Bandbreiten.

Im Bereich der Schaltungstechnik führen die Verwendung höherer Datenraten in Schaltungen und die damit verbundenen hochfrequenten Signalanteile zu neuen Anforderungen beim Schaltungsentwurf. Leitungen bedürfen plötzlich einer eingehenden Betrachtung, Verkoppelungen zwischen benachbarten Komponenten treten deutlicher hervor und es kommt zu ungewollter Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen. Beim Entwurf haben verteilte Strukturen zunehmend Vorteile gegenüber den klassischen konzentrierten Bauelementen. Auch Digitaltechniker kommen somit mit den Begriffen „Leitungswellenwiderstand“ und „Antenne“ in Berührung.

Vielfältige Funkanwendungen und hochdatenratige Kommunikation tauchen heute auch in technischen Produkten auf, die ehemals dem Maschinenbau zuzuordnen waren, wie zum Beispiel dem Automobil. Hochfrequenztechnik ist daher – in ihren Grundlagen – heute keine Spezialdisziplin mehr, sondern eine Basisdisziplin für alle Ingenieurinnen und Ingenieure der Fachrichtungen Elektro-, Informations- und Kommunikationstechnik sowie der angrenzenden Fachrichtungen Mechatronik, Fahrzeugelektronik und Bereiche der Biomedizintechnik.

Bei der gegebenen Breite des Faches Hochfrequenztechnik muss natürlich für die Darstellung in diesem Buch eine sinnvolle Beschränkung des Stoffes vorgenommen werden. Was die Hochfrequenztechnik zuallererst gegenüber der klassischen Elektrotechnik auszeichnet, ist der Umstand, dass die Abmessungen der Strukturen nicht mehr klein im Verhältnis zur Wellenlänge sind. Die damit einhergehenden Wellenausbreitungsvorgänge führen zu den typischen Hochfrequenzphänomenen. Dreh- und Angelpunkt des Buches sind daher die Wellenausbreitungsvorgänge, ihre Beschreibung, ihre Konsequenzen und ihre Nutzbarmachung in passiven Schaltungen und Antennenstrukturen.

Aktive elektronische Schaltungen und der gesamte Bereich der Hochfrequenzelektronik, wie der Entwurf von Verstärkern, Mischern und Oszillatoren, werden in diesem Buch weitestgehend ausgespart. Um dieses Themengebiet detailliert zu behandeln, müsste ein Zugang über die Grundlagen der Elektronik und Halbleiterbauteile gewählt werden.

Numerische Feldsimulationen haben mittlerweile einen festen Platz im Entwicklungsprozess von Hochfrequenz-Komponenten und Antennen. Daher wurden zahlreiche Beispiele in diesem Buch mit Unterstützung moderner Hochfrequenz-Schaltungs- und Feldsimulatoren berechnet. Im Einzelnen wurden folgende Programmpakete eingesetzt:

- *ADS (Advanced Design System)* der Firma *Keysight Technologies*
- *CST Studio Suite* der Firma *CST*
- *EMPIRE* der Firma *IMST GmbH*
- *PathWave EM Design (EMPro)* der Firma *Keysight Technologies*.

Der Markt für diese Softwareprodukte entwickelt sich rasch, so dass dem Leser bei der Auswahl eines für ihn geeigneten Simulators eine eigene Recherche empfohlen wird. Am Ende jedes Kapitels befinden sich Übungsaufgaben. Die Lösungen stellt der Autor auf der folgenden Website des Verlages zur Verfügung:

<https://plus.hanser-fachbuch.de/>

Die freundliche Aufnahme dieses Lehrbuches durch die Leserschaft hat mittlerweile eine vierte Auflage mit fachlichen Erweiterungen möglich gemacht. So wurden in dieser Auflage u. a. die Themen Radarrückstreuquerschnitt, Schlitzantenne, Hornantenne und Substrate-integrated-waveguide-Leitung ergänzt und anhand zusätzlicher Beispiele illustriert.

Das im Buch verfolgte Konzept physikalisch-technische Grundlagen zu kombinieren mit der numerischen Simulationen hat sich in Lehrveranstaltungen bewährt und befähigt die Studierenden ihren Lernerfolg einerseits praxisorientiert umzusetzen und zugleich kritisch zu reflektieren.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen und bei den Studierenden, die durch ihre Anregungen – sei es durch ihre Fragen in Lehrveranstaltungen, sei es durch das Probelesen einzelner Kapitel – zu diesem Buch beigetragen haben.

Dortmund, im Sommer 2023

Frank Gustrau

Inhalt

1	Einleitung	15
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
2	Elektromagnetische Felder und Wellen	25
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	Maxwell'sche 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	Skinneffekt	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 Viertelwellenlängentransformator	89
3.1.9.2	Der Halbwellenlängentransformator	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.....	117
4.2.1	Induktivitätsbelag und Leitungswellenwiderstand.....	118
4.2.2	Dämpfung bei schwachen Verlusten.....	120
4.2.2.1	Metallische Verluste.....	120
4.2.2.2	Dielektrische Verluste.....	121
4.2.3	Nutzbarer Frequenzbereich.....	122
4.2.4	Anwendungsgebiete.....	124
4.3	Paralleldrahtleitung.....	124
4.3.1	Leitungswellenwiderstand.....	124
4.3.2	Anwendungsgebiete.....	125
4.4	Mikrostreifenleitungen (Microstrip).....	126
4.4.1	Wellenwiderstand und effektive Permittivitätszahl.....	126
4.4.2	Dispersion und nutzbarer Frequenzbereich.....	129
4.4.3	Anwendungsgebiete.....	130
4.5	Streifenleitung (Stripline).....	130
4.5.1	Leitungswellenwiderstand.....	131
4.5.2	Nutzbarer Frequenzbereich.....	131
4.5.3	Anwendungsgebiete.....	132
4.6	Rechteckhohlleiter.....	132
4.6.1	Allgemeine Überlegungen.....	133
4.6.2	Die Grundwelle.....	136
4.6.3	Höhere Wellentypen.....	140
4.6.4	Einsatzgebiete von Hohlleitern.....	142
4.6.5	Anregung von Hohlleiterwellen.....	142
4.6.6	Hohlraumresonatoren.....	143

4.7	SIW-Leitungen (Substrate-integrated waveguide)	145
4.7.1	Aufbau und Kenngrößen	146
4.7.2	Leitungsübergang Microstrip-SIW	147
4.8	Dreileitersysteme	150
4.8.1	Gleich- und Gegentaktwellen	150
4.8.2	Leitungswellenwiderstände und Ausbreitungskonstanten	152
4.8.3	Leitungsabschluss	155
4.9	Übungsaufgaben	155

5 Streuparameter 157

5.1	Mehrtorgleichungen in Matrixform	157
5.2	Definition von Wellengrößen	158
5.3	Streuparameter und Leistung	160
5.4	Spezielle Eigenschaften von Schaltungen	163
5.4.1	Anpassung	163
5.4.2	Leistungsanpassung	164
5.4.3	Reziprozität (Übertragungssymmetrie)	165
5.4.4	Symmetrie	166
5.4.5	Verlustlosigkeit bei Passivität	166
5.4.6	Rückwirkungsfreiheit	167
5.4.7	Besondere Bedingungen bei Dreitoren	167
5.5	Berechnung von Streumatrizen	167
5.5.1	Reflexionsfaktoren	168
5.5.2	Transmissionsfaktoren	168
5.5.3	Umnormierung einer Streumatrix auf andere Torwiderstände	171
5.6	Signalflussmethode	172
5.7	Messung von Streuparametern	178
5.8	Übungsaufgaben	182

6 Hochfrequenzbauelemente und -schaltungen 185

6.1	Konzentrierte Bauelemente	185
6.1.1	Widerstände	185
6.1.2	Kondensatoren	187
6.1.3	Spulen	189
6.2	Leitungsresonatoren	190
6.2.1	Halbwellenlängenresonator	190
6.2.2	Viertelwellenlängenresonator	192
6.3	Anpassschaltungen	194

6.3.1	LC-Anpassnetzwerke	194
6.3.2	Anpassung mit Leitungen	197
6.3.2.1	Viertelwellenlängentransformator	197
6.3.2.2	Stichleitung und Butterfly-Stubs	198
6.4	Filter mit konzentrierten Bauelementen	200
6.4.1	Klassischer LC-Filterentwurf mit Induktivitäten und Kapazitäten	201
6.4.2	Entwurf von Butterworth-Filtern	203
6.4.2.1	Filter mit Tiefpassverhalten	203
6.4.2.2	Filter mit Hochpassverhalten	206
6.4.2.3	Filter mit Bandpassverhalten	207
6.5	Leitungsfiler	210
6.5.1	Seitengekoppelte Filter (Edge-coupled-line-Filter)	211
6.5.2	Seitengekoppelte Filter (Hairpin-Filter)	215
6.5.3	Stepped-impedance-Filter	216
6.5.4	Metallisch geschirmte Filter (Gehäuseresonanzen)	217
6.5.5	Hohlleiterfilter	218
6.6	Zirkulatoren	219
6.7	Leistungsteiler	221
6.7.1	Wilkinson-Leistungsteiler	221
6.7.2	Leistungsteiler mit ungleicher Leistungsaufteilung	222
6.8	Branchline-Koppler	225
6.8.1	Konventioneller 3dB-Koppler	225
6.8.2	Ungleiche Leistungsaufteilung und Impedanztransformation	225
6.9	Rat-race-Koppler	229
6.10	Richtkoppler	229
6.11	Symmetrierglieder	233
6.12	Elektronische Schaltungen	234
6.12.1	Mischer	236
6.12.2	Verstärker und Oszillatoren	239
6.13	Moderne HF-Entwurfswerkzeuge	240
6.13.1	HF-Schaltungssimulatoren	240
6.13.2	Elektromagnetische 3D-Feldsimulation	241
6.14	Übungsaufgaben	244

7 Antennen246

7.1	Grundbegriffe und Kenngrößen	246
7.1.1	Antennen als Wellentypwandler	246
7.1.2	Nahfeld und Fernfeld	247

7.1.3	Isotroper Kugelstrahler	248
7.1.4	Kenngößen für das Strahlungsfeld einer Antenne	249
7.1.5	Anpassung und Bandbreite	255
7.2	Praktische Antennenbauformen	256
7.3	Mathematische Behandlung des Hertz'schen Dipols	259
7.4	Drahtantennen	263
7.4.1	Halbwellendipol	263
7.4.2	Monopol	266
7.4.3	Verkürzung von Monopolantennen	267
7.5	Schlitzantennen	268
7.6	Aperturstrahler und Hornantennen	271
7.6.1	Aperturstrahler	271
7.6.2	Hornantennen	273
7.7	Planare Antennen	275
7.7.1	Rechteckige Patch-Antenne	276
7.7.1.1	Abstrahlung eines Patch-Elementes	276
7.7.1.2	Resonanzfrequenz und Patch-Abmessungen	277
7.7.1.3	Speisung von Patch-Antennen	278
7.7.2	Patch-Antennen mit zirkularer Polarisation	281
7.7.3	Planare Dipol- und Inverted-F-Antennen	283
7.8	Gruppenantennen	285
7.8.1	Einzelcharakteristik und Gruppenfaktor	285
7.8.2	Phasengesteuerte Antennen	289
7.8.2.1	Lineare Anordnung der Antennenelemente	289
7.8.2.2	Flächige Anordnung der Antennenelemente	293
7.8.3	Beamforming	295
7.9	Weitere Antennenkonzepte	300
7.10	Übungsaufgaben	301
8	Funkwellen	302
8.1	Wellenausbreitungseffekte	302
8.1.1	Reflexion und Brechung	302
8.1.2	Absorption	303
8.1.3	Beugung	304
8.1.4	Streuung	305
8.2	Einfache Ausbreitungsszenarien	307
8.2.1	Freiraumausbreitung	307
8.2.2	Dämpfung von Wellen in Luft	309

8.2.3	Reflexion an Streuzielen (Radarrückstreuquerschnitt)	310
8.2.4	Doppler-Effekt	319
8.2.5	Ausbreitung über ebenem Grund (Zweiwegeausbreitung)	319
8.2.6	Richtfunkstrecken	322
8.2.7	Geschichtete Medien	324
8.3	Komplexe Umgebungen	327
8.3.1	Mehrwegeausbreitung	327
8.3.2	Clutter-Factor-Modell	329
8.3.3	Okumura-Hata-Model	330
8.3.4	Physikalische Modelle und numerische Feldberechnung	332
8.4	Zusammenfassung	334
8.5	Übungsaufgaben	335
A	Anhang	337
A.1	Koordinatensysteme	337
A.1.1	Kartesisches Koordinatensystem	338
A.1.2	Zylinderkoordinatensystem	339
A.1.3	Kugelkoordinatensystem	340
A.2	Kenngößen von Schwingkreisen	341
A.2.1	Serienschwingkreis	341
A.2.2	Parallelschwingkreis	346
A.3	Logarithmische Darstellung von technischen Größen	351
A.3.1	Dimensionslose Größen	351
A.3.2	Relative und absolute Pegel	352
A.3.3	Pegelplan einer Übertragungsstrecke	352
	Formelzeichen und Abkürzungen	354
	Literatur	359
	Index	364

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.

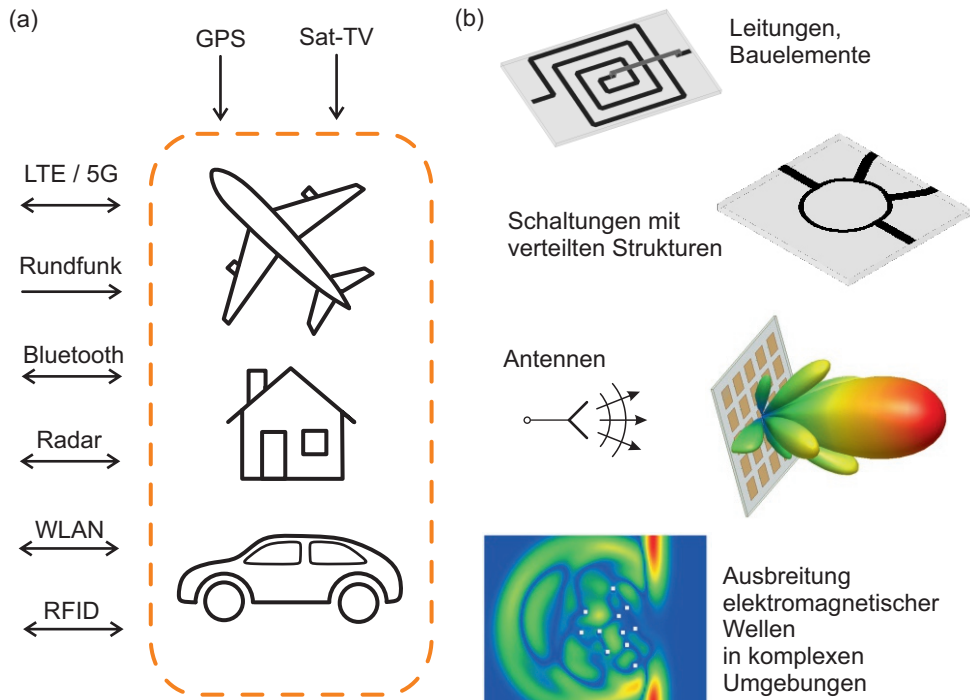


Bild 1.1 (a) Auswahl an Funkanwendungen in unterschiedlichen Umgebungen und (b) HF-Komponenten und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

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
Zellularer Mobilfunk		
GSM	Global System for Mobile Communications (Mobilfunkstandard der 2. Generation)	900 MHz / 1800 MHz
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Mobilfunkstandard der 3. Generation)	2100 MHz
LTE	Long Term Evolution (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
Drahtlose Netze		
WLAN	Wireless Local Area Network	2,45 GHz; 5 GHz
Bluetooth	Nahbereichsfunk	2,45 GHz
Navigation		
GPS	Global Positioning System	1,2 GHz; 1,575 GHz
Identifikation		
RFID	Radiofrequency Identification	13,56 MHz / 868 MHz / 2,45 GHz / 5 GHz
Rundfunk		
UKW-Rundfunk	Analoge Radiosender	87,5... 108 MHz
DAB	Digital Audio Broadcasting	200 MHz
DVB-T2	Digital Video Broadcasting – Terrestrial	470... 690 MHz
Satelliten-Rundfunk	Satelliten-Rundfunk	10,7... 12,75 GHz
Radar		
Nahbereichsradar	Nahbereichsradar	24 GHz
ACC	Adaptive Cruise Control, 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-Advanced¹) 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-IoT²) 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 Energieeffizienz und 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 VR³- und AR⁴-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

¹ 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.

² Narrow Band Internet of Things

³ Virtual Reality

⁴ 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 Verträglichkeit⁵ 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

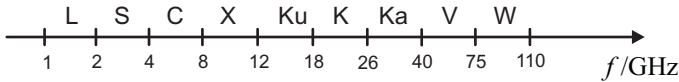
Frequenzbereich	Internationale Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
3...30 kHz	VLF – Very Low Frequency	Längstwellen
30...300 kHz	LF – Low Frequency	Langwellen
300 kHz...3 MHz	MF – Medium Frequency	Mittelwellen
3...30 MHz	HF – High Frequency	Kurzwellen
30...300 MHz	VHF – Very High Frequency	Ultrakurzwellen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

⁵ 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 Bezeichnungsweise 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

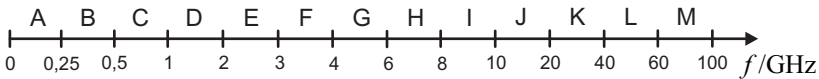


Bild 1.2 Bezeichnung der Frequenzbänder nach (a) IEEE und (b) NATO

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. Der Begriff *elektrisch kurz* bedeutet hierbei, dass die Leitungslänge ℓ deutlich kürzer als die Wellenlänge λ ist ($\ell \ll \lambda$).

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 von $\lambda \approx 300$ m. Eine Leitung der Länge $\ell = 1$ m wäre dann als *elektrisch kurz* anzusehen. Wir nehmen weiterhin der Einfachheit⁶ 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 τ 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 τ :

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

Ist die Laufzeit τ 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 ℓ deutlich kleiner als die Wellenlänge λ bei der Betriebsfrequenz ist bzw. falls die Laufzeit τ 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 τ ist das *Signal längs der Leitung räumlich konstant*. Es entspricht aufgrund der Spannungsteilerregel gerade dem halben Wert der Spannungsquelle. Eingangs- und Ausgangsspannung sind – zumindest in sehr guter Näherung – identisch:

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

⁶ Die genauen Zusammenhänge werden wir uns in Kapitel 3 über die Leitungstheorie erarbeiten.

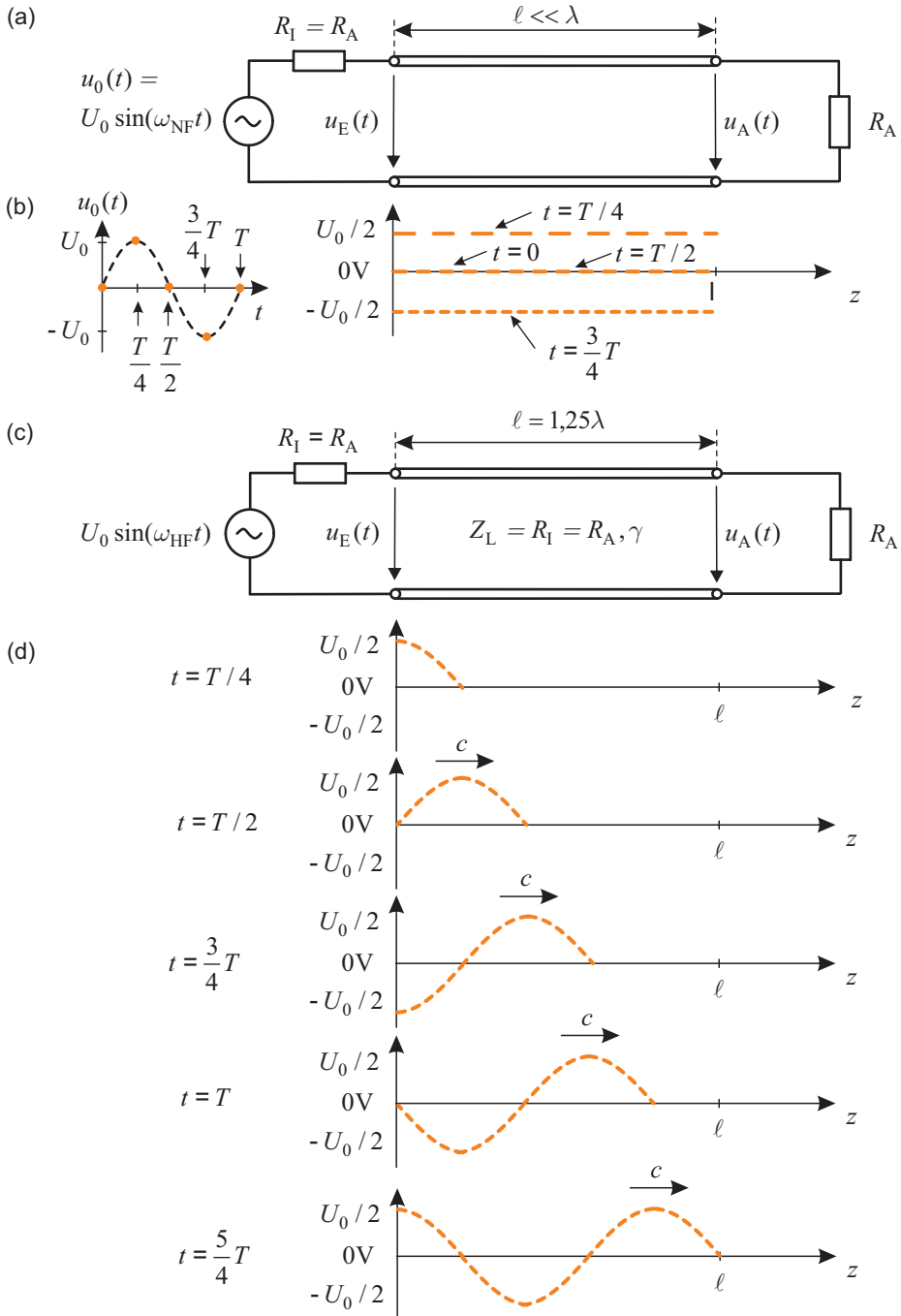


Bild 1.3 Schaltung aus Quelle mit Innenwiderstand, Leitung und Lastwiderstand: elektrisch kurze Leitung in (a) und (b) bzw. elektrisch lange Leitung mit Wellenausbreitung in (c) und (d)

1.3.2 Leitungen mit einer Länge in der Größenordnung der Wellenlänge

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 τ 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 ℓ durch zwei *zusätzliche Kenngrößen* charakterisiert werden: den *Leitungswellenwiderstand* Z_L und die *Ausbreitungskonstante* γ . 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).

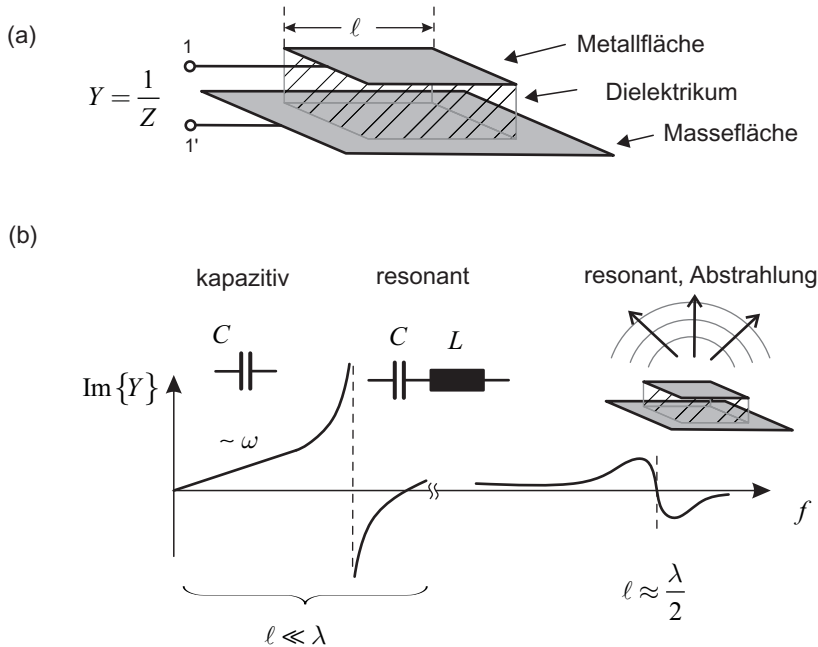


Bild 1.4 Verhalten einer geometrisch einfachen Struktur bei niedrigen und hohen Frequenzen: (a) Aufbau der Struktur und (b) Frequenzverlauf des Imaginärteiles der Admittanz

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass bei hohen Frequenzen auch geometrisch einfache Formen ein komplexes Verhalten zeigen können. Das Verhalten ist mit den Methoden der Netzwerktheorie 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 Ingenieurinnen und Ingenieure entscheidend, 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 Qualität 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.

Index

- $\lambda/2$ -Resonator, 190, 211
- $\lambda/2$ -Transformator, 89
- $\lambda/4$ -Resonator, 192
- $\lambda/4$ -Transformator, 89, 95, 198, 229
- 1-dB-Kompressionspunkt, 238
- 3D-EM-Simulation, 241
- 5G-Patch-Antenne, 293

- Abfallzeit, 109
- Abklingkonstante
 - Parallelschwingkreis, 349
 - Serienschwingkreis, 345
- Absoluter Pegel, 352
- Absorption, 253, 303
- Abstrahlung vom Leitungsende, 271
- Adjunkte, 171
- Admittanzmatrix, 158
- ADS, 242
- Aktive HF-Schaltungen, 234
- Aluminium, 34
- Ampere'sches Gesetz, 40
- Angle of Arrival, 298
- Anisotrope Materialien, 30
- Anpasserschaltung, 89, 96, 178, 194, 239
- Anpassung, 78, 83, 88, 92, 98, 163, 352
- Anpassungsfaktor, 88
- Anstiegszeit, 109
- Antenne, 246
- Antennenhöhe, 322
- Antennenwirkfläche, 253
- Antennenwirkungsgrad, 254
- Aperturstrahler, 271
- Arbeit, 27
- Asymmetrische Spannung, 152
- Augendiagramm, 110
- Ausbreitungskonstante, 71
- Autotransformation, 90, 325
- Azimutwinkel, 313

- Balun, 181, 233

- Bandbreite, 163
 - Anpasserschaltung, 197
 - Antenne, 255
 - Filter, 208
 - Monopol, 267
 - Parallelschwingkreis, 347
 - Serienschwingkreis, 343
- Bandpass, 201, 207
- Bandsperre, 201
- Basisstationsantenne, 290
- Beamforming, 295
- Bessel-Filter, 201
- Beugung, 304
- Bezugswiderstand, 159
- Bikonische Antenne, 256
- Binomialbelegung, 295
- Bistatisches Radar, 310
- Branchline-Koppler, 225, 283
- Break-point-Entfernung, 321
- Brechung, 59, 302
- Brechungsindex, 59
- Brewster-Winkel, 61
- Butterfly stubs, 200
- Butterworth-Filter, 201

- Cauer-Filter, 201
- Clutter-Factor-Modell, 329
- Combiner, 225, 229
- Common mode, 152, 182
- Coulomb-Kraft, 26
- Crosstalk, 154
- CST Studio Suite, 242
- Cut-off-Frequenz, 117, 122, 130, 131, 146

- Dachkapazität, 268
- Dämpfung, 73
 - Funkwellen, 309
 - Leitung, 73
 - Schwingkreis, 349
- Dämpfungskonstante, 72, 82, 120

- dB, 351
 dBi, 250
 dBm, 352
 Dekade, 308
 Device under test, 179
 Dielektrikum, 29
 Dielektrische Verschiebungsdichte, 31
 Dielektrischer Plattenleiter, 130
 Dielektrizitätskonstante, 26
 Differential mode, 152, 182
 Differentialoperator, 338
 Differentialquotient, 70
 Differenzenquotient, 70
 Diffusionsgleichung, 48
 Diplexer, 235
 Dipol, 256
 – Basisstationsantenne, 290
 – Halbwellendipol, 263
 – Hertz'scher Dipol, 259
 – Planarer Dipol, 283
 Dispersion, 43, 129
 Divergenz, 37, 338
 Diversity, 300
 Dolph-Tschebyscheff-Belegung, 295
 Dopplereffekt, 319
 Downtilt, 291
 Drahtantenne, 263
 Dreileitersystem, 150
 Dreitor, 167
 Durchflutungsgesetz, 40, 67, 69, 117, 186
 DUT, 179

E-Ebene, 250, 260
E-Welle, 136
 Edge-coupled-line-Filter, 211
 Effektive relative Dielektrizitätszahl, 126
 Eindringtiefe, 48
 Einfügedämpfung, 162, 201
 Einfallsebene, 59
 Eingangsimpedanz
 – Antenne, 255
 – Verlustbehaftete Leitung, 78
 – Verlustlose Leitung, 81
 Einheitsmatrix, 166
 Einheitsvektor, 338–340
 Einpolige Darstellung, 161
 Einzelstrahlercharakteristik, 285

 EIRP, 254
 Electrical downtilt, 291
 Elektrisch kurze Leitung, 20
 Elektrische Energiedichte, 31
 Elektrische Feldstärke, 26
 Elektrische Flussdichte, 31
 Elektrische Leitfähigkeit, 33
 Elektrische Stromdichte, 33
 Elektrische Wand, 266
 Elektrischer Fluss, 31
 Elementarladung, 26
 Elevationswinkel, 313
 Elliptische Polarisation, 55
 EM-Simulation, 241
 Empfangsantenne, 246
 EMPIRE, 242
 Empirische Modelle, 329
 EMPro, 242
 Energie, 32, 36
 Energiedichte
 – Elektrische, 31
 – Magnetische, 36
 Energiegeschwindigkeit, 138
 Entartete Moden, 140
 Ersatzschaltbild, 187
 – einer Leitung, 69
 Ersatzserienwiderstand, 187
 Euler'sche Formel, 80
 Evaneszente Welle, 62
 Even-mode, 153, 212, 231
 Eye diagram, 110

 Fading, 328
 Faltdipol, 256
 Faraday'sches Gesetz, 41
 Fast fading, 328
 Feldlinienbild, 27
 Feldsimulation, 241
 Feldstärke
 – Elektrische, 26
 – Magnetische, 35
 Feldwellenwiderstand, 53, 57, 120, 138, 262
 Fernfeld, 64, 247
 Fernfeldbedingung, 248
 Filter, 200
 Filterordnung, 201
 Fluss

- Elektrischer, 31
- Magnetischer, 35
- Flussdichte
- Elektrische, 31
- Magnetische, 35
- Fraunhofer-Zone, 247
- Freiraumausbreitung, 307
- Frequenzweiche, 235
- Fresnel-Ellipsoid, 323
- Fresnel-Zone, 247
- Friis-Gleichung, 307
- Fußpunktimpedanz, 255
- Funkfelddämpfung, 352
- Funkwellen, 302

- Galliumarsenid, 126
- Gauß'sches Gesetz
- des elektrischen Feldes, 41
- des magnetischen Feldes, 42
- Gebäudedämpfung, 333
- Gegentaktmode, 152, 182
- Gehäuseresonanz, 217
- Geschichtetes Medium, 324
- Geschirmte Paralleldrahtleitung, 150
- Geschwindigkeit, 138
- Gewinn, 254
- Gitterdiagramm, 104
- Gleichtaktmode, 152, 182
- Gold, 34, 50
- Gradient, 28, 338
- Green'sche Funktion, 248
- Grenzfrequenz, 122
- Grenzwinkel der Totalreflexion, 62
- Grundübertragungsdämpfung, 308
- Grundwelle im Hohlleiter, 135
- Gruppenantenne, 285
- Gruppenfaktor, 285
- Gruppengeschwindigkeit, 138
- Gruppenlaufzeit, 201
- Güte
- Kondensator, 188
- Lastgüte, 343, 348
- Parallelresonanzkreis, 347
- Serienresonanzkreis, 342
- Spule, 189

- H*-Ebene, 250
- H*-Welle, 136
- H_{10} -Welle, 133
- Hairpin-Filter, 215
- Halbwellendipol, 263
- Halbwellenlängenresonator, 190
- Halbwellenlängentransformator, 89
- Halbwertsbreite, 252
- Hauptkeule, 250
- Hauptstrahlrichtung, 250
- Helixantenne, 268
- Hertz'scher Dipol, 259
- Hochpass, 195, 201, 206
- Höhere Wellentypen, 122, 140
- Hohlleiterfilter, 218
- Hohlleiterwellenlänge, 135
- Hohlraumresonator, 143, 217
- Homogene ebene Welle, 51, 67, 133, 302
- Lokale, 65
- Homogenität, 43
- Horizontale Polarisation, 55
- Hornantenne, 258, 273
- Huygens'sches Prinzip, 289, 305
- Hybridmatrix, 158
- Hybridschaltungen, 126, 236
- Hyperbolische Funktionen, 80

- Idealer elektrischer Leiter, 34
- IFA, 258
- Impedanzbandbreite, 163
- Impedanzmatrix, 157
- Impuls, 107
- Induktionsgesetz, 41
- Induktivität, 36, 84, 102
- Induktivitätsbelag, 70, 118
- Insertion loss, 162
- Inset-Speisung, 278
- Interferenz, 320
- Intermodulationspunkt 3. Ordnung, 238
- Inverted-F-Antenne, 258, 268, 283
- Isotrope Funkfelddämpfung, 308
- Isotroper Kugelstrahler, 248
- Isotropie, 43, 166

- Kalibrierung, 180
- Kapazität, 32, 84, 102
- Kapazitätsbelag, 70
- Kapazitiver Endeffekt, 192, 271, 277

- Kartesisches Koordinatensystem, 338
 Kettenmatrix, 158
 Kirchhoff'sche Regeln, 70
 Knife-Edge-Beugung, 323
 Knotenregel, 71
 Koaxialleitung, 114, 117
 Kondensator, 187
 Konversionsverlust, 239
 Koordinatensysteme, 337
 Koplanarleitung, 115
 Kopplungsfaktor, 154
 Kraft
 – Coulomb, 26
 – Lorentz, 36
 Kreisfrequenz, 52
 Kugelkoordinatensystem, 340
 Kugelwelle, 64, 248
 Kupfer, 34, 50
 Kurzschluss, 101
- Ladung, 25
 Laplace-Operator, 338
 Lastgüte
 – Parallelschwingkreis, 348
 – Serienschwingkreis, 343
 Leerlauf, 101
 Leistung, 162
 Leistungsteiler, 221
 Leitfähigkeit, 33
 Leitung, 68, 170
 – Elektrisch kurze, 20, 79
 – Schwache Verluste, 81
 Leitungsbeläge, 70
 Leitungsfiter, 210
 Leitungskenngröße, 74, 75
 Leitungsstromdichte, 38
 Leitungstheorie, 68
 Leitungswellenwiderstand, 74, 127, 138
 – Koaxialleitung, 120
 – Verlustlose Leitung, 79
 Leitwertbelag, 70, 121
 Leitwertform, 95
 Lichtgeschwindigkeit, 52
 Lineare Polarisierung, 55
 Linearität, 43
 Litzenleiter, 125
- Logarithmisch-periodische Dipolantenne, 256
 Lorentz-Kraft, 36
 Lorenz-Eichung, 260
 LOS-Verbindung, 327
 Low-Noise Amplifier, 235
 LPDA, 256
- Magnetische Energiedichte, 36
 Magnetische Feldstärke, 35
 Magnetische Flussdichte, 35
 Magnetische Induktion, 35
 Magnetischer Fluss, 35
 Magnetisches Vektorpotential, 35, 259
 Makrozelle, 332
 Maschenregel, 70
 Mason-Regel, 173
 Massefläche, 126
 Materialgleichungen, 42
 Maxwell'sche Gleichungen, 38
 Mehrantennensystem, 300
 Mehrwegeausbreitung, 327
 Microstrip, 126
 Mie-Bereich (RCS), 314
 Mikrostreifenleitung, 115, 126, 210
 mil, 126
 MIMO, 300
 MIMO-Radarantenne, 298
 Mischer, 236
 MMIC, 126
 Mobilfunk-Basisstationsantenne, 290
 Modenkonzersion, 153, 182
 Monolithic Microwave Integrated Circuit, 126, 236
 Monopol, 258, 266
 Monostatisches Radar, 310
 Multilayer Board, 132
 Multiplikatives Gesetz, 285
 Muschelantenne, 259
- Nabla-Operator, 37, 338
 Nahfeld, 247
 Nebenkeule, 250
 Nebenzipfeldämpfung, 251
 Neper, 72, 351
 Netzwerkanalysator, 178
 NLOS-Verbindung, 327

Normierungswiderstand, 159
Nullphasenwinkel, 73

Oberflächenladungsdichte, 46
Oberflächenstromdichte, 46
Odd-mode, 153, 212, 231
Öffnungswinkel, 252, 260
Oktave, 308
Okumura-Hata-Modell, 330
Optische Wellenleiter, 117
Ordnung eines Filters, 201
Oszillator, 240

Parabolantenne, 258
Paralleldrahtleitung, 68, 115, 124
Parallelschwingkreis, 346
Parasitärer Durchlassbereich, 215
Pascal'sches Dreieck, 295
Patch-Antenne, 275, 285
PEC, 34
Pegel, 352
Pegelplan, 352
Periodendauer, 52, 74
Permeabilitätskonstante, 35
Pfadverlust, 302
Pfadverlustexponent, 332
Phase, 201
Phasengeschwindigkeit, 73
Phasengesteuerte Antenne, 289
Phasenkonstante, 72
Phasenzentrum, 248
Phasor, 40, 69, 72
Planare Antenne, 275
Planare Filter, 210
Plattenkondensator, 27, 29, 46
Polarisation, 29, 51, 250
– Elliptische, 55
– Lineare, 54
– Zirkulare, 55
Potential, 28
Power amplifier, 235
Poynting-Vektor, 53, 64, 262
Pyramidenhornantenne, 273

Quasi-TEM-Welle, 126
Quasistatische Felder, 46
Quellendichte, 37

Quellenfeld, 27

Radar, 16, 297, 310
Radar-Gruppenantenne, 297
Radarrückstreuquerschnitt, 310
Radial stubs, 200
Rat-race-Koppler, 229
Raumladungsdichte, 26
Ray tracing, 329
Rayleigh-Bereich (RCS), 314
RCS, 311
Reaktanz, 84
Rechte-Hand-Regel, 117
Rechteckfunktion, 107
Rechteckhohlleiter, 117, 132
Rechtssystem, 338
Reflexion, 302
Reflexionsdämpfung, 162
Reflexionsfaktor, 90, 160, 347
– Ebene Welle, 57
– S-Parameter Berechnung, 168
– Schräger Einfall, 59
Reihenschwingkreis, 341
Relative Bandbreite, 208
Relative Dielektrizitätszahl, 30
Relative Permeabilitätszahl, 35
Relativer Pegel, 352
Resonanz, 217
Resonanzfrequenz, 188, 277, 346
Resonator, 190
Return loss, 162
Reziprozität, 165, 246, 252
Richtcharakteristik, 249, 262
Richtfaktor, 252
Richtfunk, 322
Richtfunktion, 252
Richtkoppler, 229
Ringverstärkung, 177
Rotation, 37, 338
Rückkopplungsregel, 173
Rückstreuquerschnitt, 311
Rückwärtskoppler, 229
Rückwirkungsfreie Schaltung, 167

Sauerstoff-Resonanz, 309
Schaltungssimulation, 240
Schlaglänge, 115

- Schlitzantenne, 258, 268
 Schräger Einfall, 59
 Schwingkreis, 341
 – Parallelschwingkreis, 346
 – Serienschwingkreis, 341
 Seitengekoppelte Filter, 211
 Sektorantenne, 290
 Sektorhornantenne, 273
 Semi-empirische Modelle, 329
 Sende-Empfangsweiche, 220, 235
 Sendeantenne, 246
 Senkrechter Einfall, 57
 Serienschwingkreis, 341
 Signalflussdiagramm, 173
 Signalflussmethode, 173
 Silber, 34
 Simulation, 241
 SIW-Leitung, 117, 146
 SIW-Resonator, 269
 Skalarfeld, 28
 Skineffekt, 47, 67, 120
 Skintiefe, 48, 120, 186
 Slot-Antenne, 258, 268
 Slow fading, 328
 Smart antenna, 300
 SMD, 127, 185, 236
 Smith-Chart, 93, 194, 195
 Snellius'sches Brechungsgesetz, 59
 Spannung, 28, 102
 Spannungswelle, 75, 83
 Sprungfunktion, 98
 Spule, 36, 189
 Statische Felder, 46
 Stehende Welle, 86
 Stehwellenverhältnis, 88
 Stepped-impedance-Filter, 216
 Sternvierer, 115
 Stetigkeitsbedingungen, 44
 Stichleitung, 200
 Strahlformung, 295
 Strahlungsdiagramm, 249
 Strahlungsleistungsdichte, 248
 Strahlungswiderstand, 262
 Streifenleitung, 115
 Streumatrix, 160
 Streuparameter, 157
 – Berechnung, 168
 Streuung, 305
 Stripline, 115, 130
 Stromdichte, 33, 38
 Stromstärke, 32
 Stromverdrängung, 47
 Stromwelle, 83
 Substrat, 126, 275
 Substrate-integrated waveguide, 117, 146
 – Resonator, 269
 Surface-Mounted Device, 127, 185
 Symmetrie, 166
 Symmetrierglied, 181, 233, 283
 Symmetrische Leitung, 150
 Systemimpedanz, 159

 TE-Welle, 136
 TE₁₁-Mode, 122
 Telegraphengleichung, 71
 TEM-Welle, 54, 68, 122, 130, 324
 Tiefpass, 195, 201
 TM-Welle, 136
 Toleranzschema, 201
 Torbedingung, 157
 Torwiderstand, 159
 Totalreflexion, 62
 Touchstone-SnP-Datenformat, 180
 Transiente Signale, 98
 Transmissionsfaktor, 160
 – Ebene Welle, 57
 – S-Parameter Berechnung, 168
 – Schräger Einfall, 59
 Tripelspiegel, 316
 Triplate, 115, 130
 Tschebyscheff-Filter, 201
 Twisted Pair, 115, 125
 TX-Line, 127

 Übertrager, 233
 Übertragungssymmetrie, 165
 Umnormierung einer Streumatrix, 171
 Unilaterale Schaltung, 167
 Unitaritätsbedingung, 166
 Unsymmetrische Leitung, 150
 Unsymmetrische Spannung, 152

 Vakuum, 30
 Vektorfeld, 27, 33

- Vektorpotential, 35
- Verlustfaktor, 31, 44, 121, 127, 188, 189
- Verlustfreiheit, 166
- Verlustleistung, 33
- Verlustlosigkeit, 79
- Verschiebungsstromdichte, 38
- Verstärker, 239
- Vertikale Polarisierung, 55
- Verzerrung, 201
- Via, 132, 146, 270
- Viertelwellenlängenresonator, 192
- Viertelwellenlängentransformator, 89, 198
- VNA, 178
- Voltage Standing Wave Ratio, 88, 92
- Vorwärtsverstärkung, 177
- VSWR, 88, 92

- Wahre Stromdichte, 38
- Walfish-Ikegami-Modell, 329
- Wechselstromrechnung, 39
- Wellenausbreitung, 47
- Wellenausbreitungseffekte, 302
- Wellenfahrplan, 104
- Wellengleichung, 51, 72
- Wellengrößen, 158

- Wellenlänge, 52, 74
 - Hohlleiter, 137
- Wellenzahl, 51, 137
- Wellenzahlvektor, 52
- Welligkeit, 88
- Widerstand, 33, 185
 - Gleichstrom/HE, 49
- Widerstandsbelag, 70, 121
- Wilkinson-Leistungsteiler, 221
- Winkelreflektor, 312
- Wirbeldichte, 38
- Wirbelfeld, 34
- Wirkleistung, 162
- Wirkungsgrad, 254

- Yagi-Uda-Antenne, 256

- Zeitinvarianz, 43
- Zeitsignale auf Leitungen, 98
- Zirkulare Polarisierung, 55, 283
- Zirkulator, 220, 235
- Zweidrahtleitung, 124
- Zweitor, 157
- Zweiwegeausbreitungsmodell, 319
- Zylinderkoordinatensystem, 339