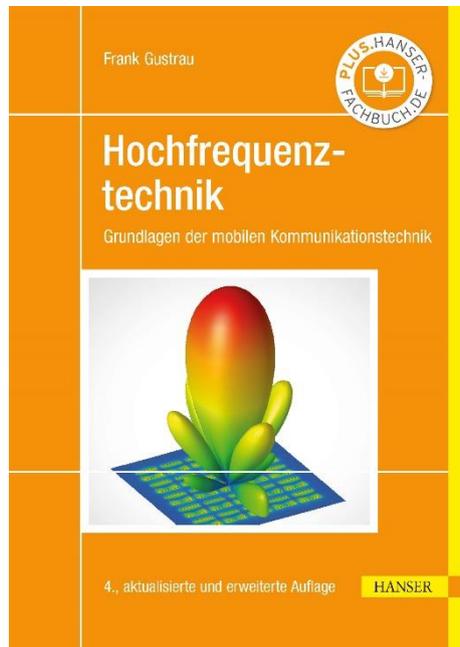


# HANSER



## 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

<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	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
<b>3</b>	<b>Leitungstheorie und Signale auf Leitungen .....</b>	<b>68</b>
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
<b>4</b>	<b>Wellenleiter.....</b>	<b>114</b>
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 Antennen .....246**

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
<b>8</b>	<b>Funkwellen .....</b>	<b>302</b>
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
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>337</b>
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
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>354</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>359</b>
	<b>Index .....</b>	<b>364</b>



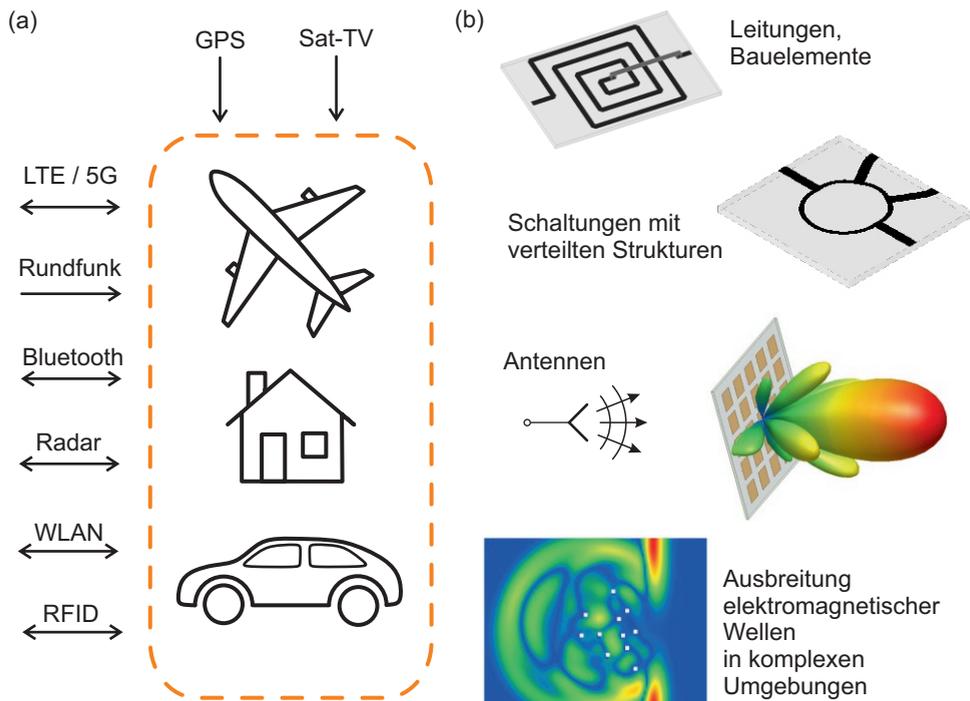
# 1

## 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 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
<b>Zellularer Mobilfunk</b>		
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
<b>Drahtlose Netze</b>		
WLAN	Wireless Local Area Network	2,45 GHz; 5 GHz
Bluetooth	Nahbereichsfunk	2,45 GHz
<b>Navigation</b>		
GPS	Global Positioning System	1,2 GHz; 1,575 GHz
<b>Identifikation</b>		
RFID	Radiofrequency Identification	13,56 MHz / 868 MHz / 2,45 GHz / 5 GHz
<b>Rundfunk</b>		
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
<b>Radar</b>		
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-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 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 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

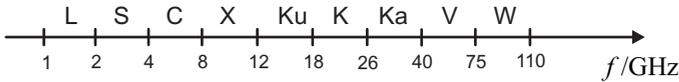
Frequenzbereich	Internationale Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
3...30 kHz	VLF – Very Low Frequency	Längstwellen
30...300 kHz	LF – Low Frequency	Langwellen
300 kHz...3 MHz	MF – Medium Frequency	Mittelwellen
3...30 MHz	HF – High Frequency	Kurzwellen
30...300 MHz	VHF – Very High Frequency	Ultrakurzwellen
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

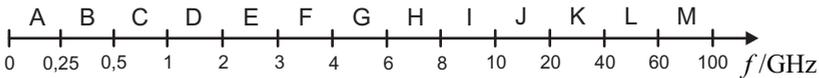
<sup>5</sup> Die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beschäftigt sich mit der Vermeidung von störenden Wechselwirkungen zwischen technischen Geräten. Hierbei werden Geräte in standardisierten Messaufbauten auf die Einhaltung von technischen Grenzwerten hin überprüft.

Buchstaben und Bandbereiche, die in der historisch gewachsenen Struktur begründet liegt. Eine neuere 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  $\ell$  deutlich kürzer als die Wellenlänge  $\lambda$  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 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  $\tau$ :

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

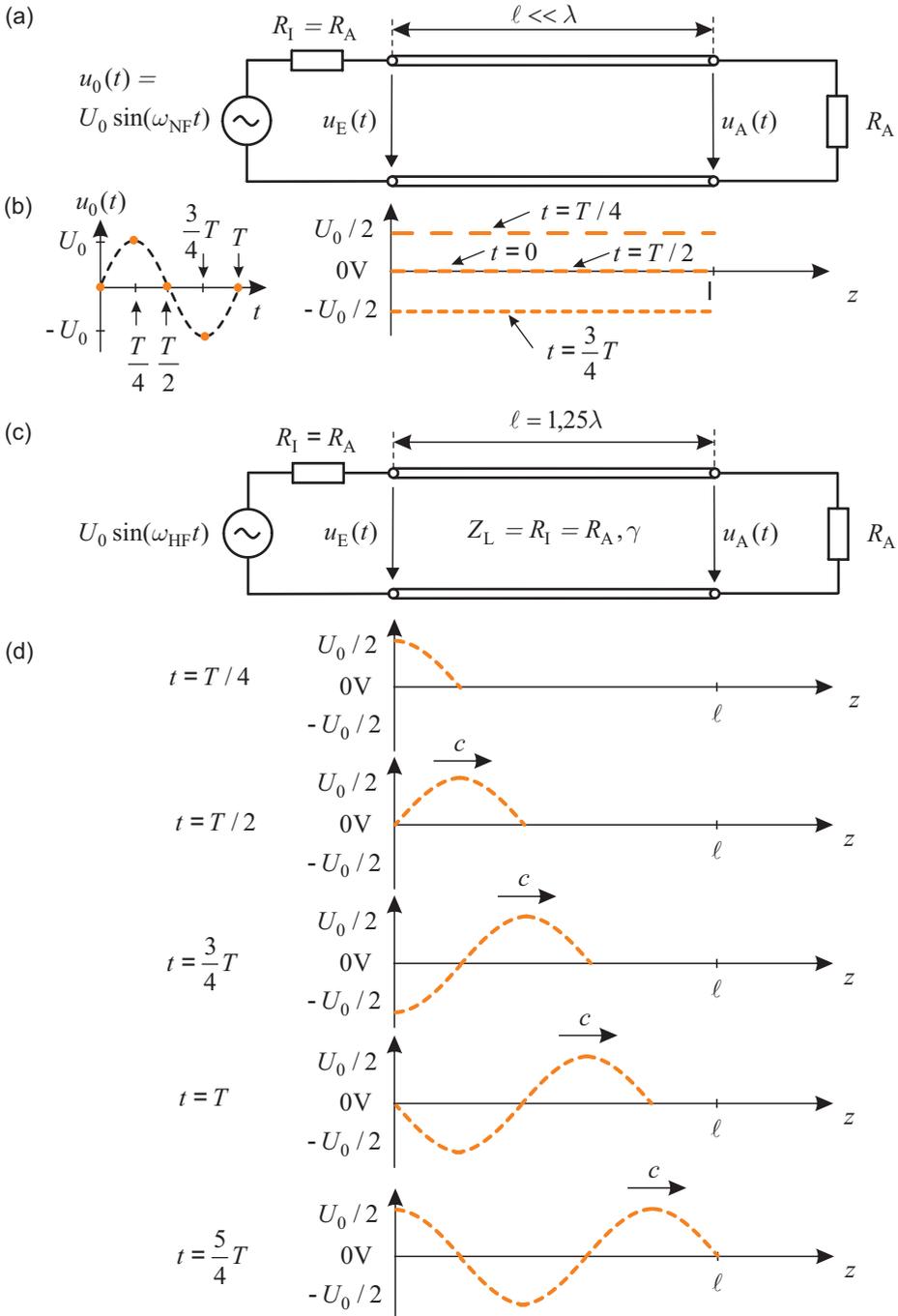
Ist die Laufzeit  $\tau$  deutlich kleiner als die Periodendauer  $T$  des Sinussignals, so stellen sich die Signaländerungen der Quelle mit *kaum merklicher Verzögerung* zwischen Anfang und Ende der Leitung ein. Es ist also quasi so, als trete die Signaländerung der Quelle überall gleichzeitig ein. *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 in sehr guter Näherung – identisch:

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

<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

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.

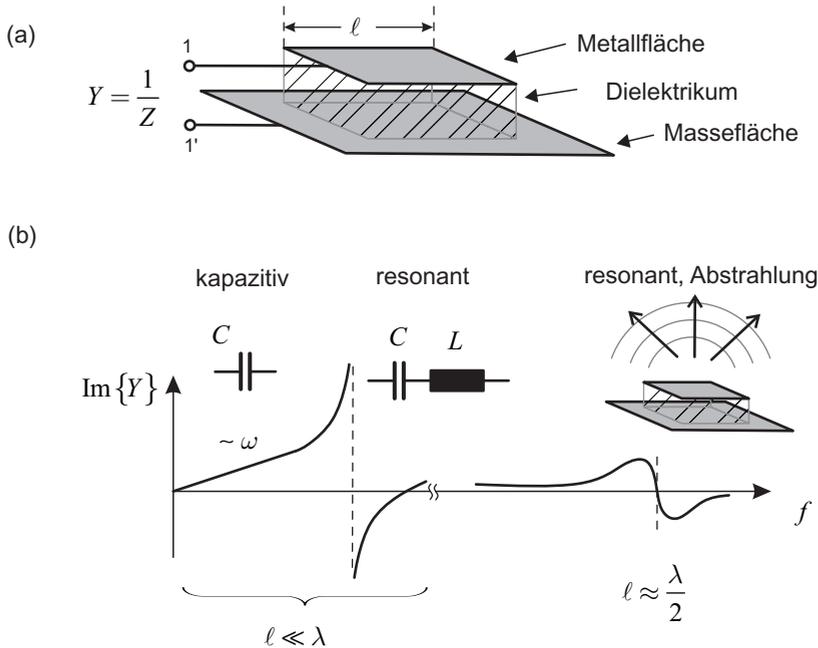
Zur vollständigen Beschreibung der Leitungseinflüsse muss die Leitung neben ihrer Länge  $\ell$  durch zwei *zusätzliche Kenngrößen* charakterisiert werden: den *Leitungswellenwiderstand*  $Z_L$  und die *Ausbreitungskonstante*  $\gamma$ . Im Schaltungsentwurf sind diese mit zu berücksichtigen!

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 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*<sub>10</sub>-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  
 TE<sub>11</sub>-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