
Wellenausbreitung

Bernhard Rembold

Wellenausbreitung

Grundlagen – Modelle – Messtechnik –
Verfahren

3. Auflage

Bernhard Rembold
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-658-41195-4 ISBN 978-3-658-41196-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-41196-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2015, 2017, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Reinhard Dapper

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Das Buch entstand aus Vorlesungen, die ich ab 1996 am Institut für Hochfrequenztechnik der RWTH Aachen gehalten hatte. Es enthält die Grundlagen zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen für Anwendungen der Hochfrequenztechnik, die „drahtlos“ stattfinden, z. B. Funkkommunikation, Radartechnik, Navigatio und Radiometrie. Über letztere, eine i. Allg. nicht so bekannte Anwendung mit starkem Bezug zur Wellenausbreitung, wird im Anhang ein kurzer Überblick gebracht.

Der Inhalt des Buchs ist für Studenten höheren Semesters gedacht, die bereits Kenntnisse auf den Gebieten der Hochfrequenztechnik und elektromagnetischer Wellen mitbringen. Insbesondere sollten die Grundlagen der Antennentechnik sowie die Leitungstheorie bekannt sein. Als Hilfe zum Verständnis befindet sich im Anhang ein Abschnitt, der die Antenneneigenschaften von der Systemseite her beschreibt, ohne auf die Physik der Abstrahlung oder auf technische Bauformen von Antennen einzugehen. Dort werden die Zusammenhänge zwischen den Feldstärken im Freiraum und den Wellen auf den angeschlossenen Leitungen im Sende- und Empfangsfall sowie die Freiraumübertragung zwischen zwei Antennen hergeleitet, da sie öfters im Buch verwendet werden.

Das Buch soll eine Lücke schließen zwischen den Fachgebieten „Elektromagnetische Wellen/Hochfrequenztechnik“ und „Signalübertragung“. Ziel des Buches ist, dem Leser Kenntnisse über grundsätzliche Eigenschaften der Wellenausbreitung zu vermitteln sowie ihn in die Lage zu versetzen, Probleme in Zusammenhang mit der Wellenausbreitung beurteilen zu können und Lösungen zu finden.

Die im letzten Kapitel behandelten MIMO-Systeme, insbesondere die räumliche Entzerrung von Teilnehmern, könnten für manche Leser aufgrund des mathematischen Hintergrunds recht spröde erscheinen. Deshalb wurden zur Erläuterung der Teilnehmerentkopplung mit einem Ray-Tracer Videos erzeugt, die die verschiedenen Entzerrungsverfahren veranschaulichen. Die Videos können von dem Downloadbereich der Website des Instituts für Hochfrequenztechnik der RWTH Aachen abgerufen werden: <http://www.ihf.rwth-aachen.de>. Sie wurden durch Prof. Dr.-Ing. P. Bosselmann erstellt, dem ich an dieser Stelle herzlich dafür danke.

Die vorliegende dritte Auflage enthält neben Korrekturen und neuen Literaturzitierten Verbesserungen und Erweiterungen zur Pfadsuche bei Raytracern sowie Beispiele, die mit einem neu entwickelten Raytracer berechnet wurden.

Der größte Teil der zitierten Literatur ist in englischer Sprache verfasst. Wichtige Begriffe werden deshalb auch auf englisch genannt.

Aachen
Juni 2023

Bernhard Rembold

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Bezeichnungen, Eigenschaften und Anwendungen technisch genutzter Frequenzen	2
1.2	Wellenausbreitung in verschiedenen Höhen	5
1.3	Frequenzen für Rund- oder Richtstrahlung	6
	Literatur	7
2	Physikalische Eigenschaften von Übertragungsmedien	9
2.1	Grenzflächen: Reflexion und Transmission	9
2.2	Reflexion und Transmission bei geschichteten Medien	14
2.3	Streuung an rauen Oberflächen	26
2.4	Streuung an einer kleinen ebenen Fläche	28
2.5	Beugung an einer Kante	31
2.5.1	Knife-Edge Diffraction (KED)	31
2.5.2	Uniform Asymptotic Theory (UAT)	34
2.6	Wellenausbreitung in der Atmosphäre	37
2.6.1	Dämpfung der Atmosphäre	37
2.6.2	Einfluss der atmosphärischen Dämpfung auf Reichweiten	40
2.6.3	Dielektrische Eigenschaften der Atmosphäre	42
2.6.4	Brechung und Beugung in der Atmosphäre	43
2.7	Wellenausbreitung in der Ionosphäre	46
2.7.1	Aufbau und Bedeutung der Ionosphäre	46
2.7.2	Berechnung der Wellenausbreitung im Plasma	48
2.7.3	Transmission durch die Ionosphäre	51
2.7.4	Reflexion an der Ionosphäre	55
	Literatur	58
3	Mehrwegeausbreitung	59
3.1	Zweiwegeausbreitung	59
3.2	Kanalimpulsantwort und abgeleitete Größen bei Kanalimpulsantwort	63
3.2.1	Impulsantwort des linearen und zeitinvarianten Kanals	63

3.2.2	Kanal-Übertragungsfunktion	64
3.2.3	Laufzeitspreizung	66
3.2.4	Dopplerfrequenz	68
3.2.5	Dopplerspektrum	71
3.2.6	Fading	72
3.2.7	Verteilungsfunktionen der Empfangsspannung	75
	Literatur	79
4	Modellierung von Funkkanälen	81
4.1	Empirische Kanalmodelle	82
4.1.1	ITU-Empfehlungen	82
4.1.2	Feldstärkevorhersage nach Okumura	83
4.1.3	Feldstärkevorhersage nach Hata/Okumura	84
4.1.4	Inhouse Modell: Cost 259 Multi-Wall-Modell	85
4.1.5	VHF-UHF: mobile-to-mobile	86
4.2	Deterministische Kanalmodelle	87
4.2.1	Grundlagen	87
4.2.2	Erstellung des Szenarienmodells	88
4.2.3	Ermittlung der Ausbreitungspfade zwischen Sender und Empfänger	91
4.2.4	Berechnung der Übertragung und Auswertung	95
4.2.5	Interpolation und Wichtung	98
4.3	Raytracer RAY	102
4.3.1	Pfadsuche	103
4.3.2	Berechnung der Feldstärke	104
4.3.3	Beispiele	104
	Literatur	110
5	Messverfahren für den Übertragungskanal	113
5.1	Schmalbandmessung	113
5.2	Breitbandmessung	114
5.2.1	Periodic Pulse Sounding	114
5.2.2	Chirp- und Multisinus-Signale	115
5.2.3	Pulskompressionsverfahren	116
5.2.4	Korrelationsempfänger für Pulskompressionsverfahren	118
	Literatur	122
6	Bestimmung der Richtung einfallender Wellen durch Peilung	125
6.1	Klassische Peilverfahren	126
6.1.1	Schmalbandige Einkanalpeiler	126
6.1.2	Schmalbandige Mehrkanalpeiler	132
6.1.3	Breitbandige Ein- und Mehrkanalpeiler	132
6.1.4	Interferometer	133

6.2	Peilung mit Gruppenantennen	134
6.2.1	Systemmodell	134
6.2.2	Peilung durch Maximierung von SNR	137
6.2.3	Peilung durch Korrelation	139
6.2.4	MUSIC-Algorithmus	141
6.2.5	ESPRIT-Algorithmus	145
	Literatur	149
7	Mehrantennensysteme im Mobilfunk	151
7.1	Klassische Antennendiversität	151
7.1.1	Leistungsgewinn bei gleicher Wahrscheinlichkeit	152
7.1.2	Wahrscheinlichkeitsverbesserung bei gleichem Empfangspegel	154
7.2	Räumliche Entzerrung (MIMO)	155
7.2.1	Zero-Forcing (ZF)	157
7.2.2	Minimum-Mean-Squared-Error-Estimation (MMSE)	159
7.2.3	Matched-Filter (MF)	163
7.2.4	Räumliche Vorverzerrung	164
7.3	Korrelation der Antennencharakteristiken	167
7.4	Kalibrierung von MIMO-Systemen	172
7.5	Video-Demonstration der räumlichen Entzerrung	177
	Literatur	181
8	Anhang	183
8.1	Antennen im System	183
8.1.1	Abstrahlung von einer Antenne	183
8.1.2	Empfang durch eine Antenne	187
8.1.3	Übertragungsfaktor zwischen zwei Antennen	191
8.2	Mikrowellenradiometrie	192
8.2.1	Prinzip	192
8.2.2	Abschätzung der maximalen Reichweite	193
8.3	Reflexion und Transmission in Vektoralgebra	196
8.4	Wiener Filter	197
8.5	Matrixalgebra	199
	Literatur	201
	Stichwortverzeichnis	203

Über den Autor

Bernhard Rembold Geboren 1943. 1962–1968 Studium der Elektrotechnik an der RWTH Aachen und TU Darmstadt. 1968–1975 wiss. Mitarbeiter am Institut der Hochfrequenztechnik der TU Darmstadt. Promotion 1974 bei Prof. Dr.-Ing. habil. O. Zinke. 1975–1996 AEG-Telefunken und Nachfolgeorganisationen, zunächst Laborleiter Vorentwicklung Millimeterwellen-Technik Ulm, 1984–1996 Entwicklungsleiter in verschiedenen Geschäftsfeldern der Hochfrequenztechnik in Ulm und Berlin mit den Schwerpunkten Hochleistungssender, Mobilfunk und Funkaufklärung. 1996–2008 Univ.-Professor und Leiter des Instituts für Hochfrequenztechnik der RWTH Aachen.