

Frieder Strauß

Grundkurs Hochfrequenztechnik

Frieder Strauß

Grundkurs Hochfrequenztechnik

Eine Einführung

Mit 148 Abbildungen und 13 Tabellen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschweißfolie besteht aus Polyäthylen und damit aus organischen Grundstoffen, die weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung Schadstoffe freisetzen.

1. Auflage 2012

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

Lektorat: Reinhard Dapper | Walburga Himmel

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.
Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Umschlagbild: Frieder Strauß
Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1242-1

Vorwort

„Diese Vorlesung hat irgendwie etwas Mystisches“ meinte kürzlich einer meiner Studenten. Ich konnte den jungen Mann gut verstehen, denn ich erinnerte mich zurück an meine eigene Studienzeit und die ersten Berührungspunkte mit der Hochfrequenztechnik. Strom und Spannung waren auf einmal abgeschafft. Stattdessen gab es *Wellengrößen* mit der seltsamen Dimension Wurzel aus Watt, die wenig phantasievoll mit \underline{a} und \underline{b} bezeichnet wurden, und unter denen man sich nichts vorstellen konnte. Aus einem Leerlauf wurde ein Kurzschluss, nur weil ein Stückchen Leitung im Spiel war. Dann wurde unter dem Namen *Rechteck-Hohlleiter* ein neuer Leitungstyp vorgestellt, den man eher in der Materialsammlung eines Gas-Wasser-Installateurs als bei einem Elektriker gesucht hätte. Elektrische Signale würden durch dieses blanke Rohr ungehindert hindurchgehen, hieß es und noch dazu fast verlustlos. Vier Semester Grundstudium in Elektrotechnik erschienene glatt für die Katz¹. Später kam noch ein Diagramm mit eigentümlich ineinander greifenden Kreisen hinzu, mit dem man die tollsten Dinge berechnen konnte. Ein stets präsenter hoher Anteil an Feldtheorie machte die Mystik komplett.

Ziel des vorliegenden Buches ist es, behutsam an diese Besonderheiten heranzuführen, dabei den Blick auf die Ursprünge nicht zu verlieren und sich auf das Wesentliche zu beschränken. Ich werde immer wieder deutlich machen, dass Strom und Spannung als unverzichtbare physikalische Größen weiterhin existieren, zugleich aber durch Einführung der Wellengrößen dem Leser eine völlig neue Perspektive auf elektrische Schaltungen eröffnen.

Das Buch wendet sich an Studierende in Bachelor-Studiengängen der Elektrotechnik, Informationstechnik oder Mechatronik sowie an Autodidakten und Wiedereinsteiger. Dementsprechend wird der mathematische Anspruch vergleichsweise niedrig gehalten. Die Feldtheorie nimmt keinen allzu großen Raum ein, ganz ohne *MAXWELL*¹ geht es aber in der Hochfrequenztechnik nicht.

Auf Anregung des Lektorats wurde das Werk mit einem umfangreichen Grundlagenkapitel ausgestattet. Von der komplexen Wechselstromrechnung über die Dezibel-Maße bis zu Spezialbegriffen bei nichtlinearen Verzerrungen sind hier die Voraussetzungen für das Verständnis des eigentlichen Stoffs zusammengestellt. Dieses Kapitel ist auch zum Nachschlagen gedacht.

Dank gilt meinem Kollegen Prof. Dr.-Ing. Peter Leiß, der das Kapitel 2 einer kritischen Prüfung unterzogen hat, ferner meinem Kollegen Prof. Dr.-Ing. Falk Reisdorf, der mir ein perfekt ausgearbeitetes Skript seiner Vorlesung [7] zur Verfügung stellte. Ich danke meiner Frau (Dipl.-Ing. (Univ.) Jutta Strauß), die das komplette Manuskript akribisch nach Schreibfehlern durchforstet hat, sowie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Oldach, der es verstand, die babylonische Zeichensatzverwirrung aufzulösen.

Bingen am Rhein, im August 2011

Frieder Strauß

¹ Um 1860 stellte der englische Physiker JAMES CLERK MAXWELL ein kompliziertes System partieller Differentialgleichungen vor [6]. Sie bilden die Grundlage der Elektrodynamik, also der elektromagnetischen Feldtheorie.

Inhalt

Vorwort	V
Inhalt	VII
1 Einführung.....	1
1.1 Begriffsklärung.....	1
1.2 Historisches	4
1.3 Anwendungen	5
2 Handwerkszeug	7
2.1 Differentialgleichungen.....	7
2.1.1 Grundsätzliches	7
2.1.2 Lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	8
2.1.3 Beispiele	10
2.2 Die komplexe Wechselstromrechnung.....	17
2.3 Logarithmische Übertragungs- und Pegelmaße	23
2.3.1 Das Übertragungsmaß dB	23
2.3.2 Dämpfungsmaße.....	27
2.3.3 Die wichtigsten Pegelmaße	30
2.3.4 Beispiele	33
2.4 Zweitortheorie	34
2.4.1 Einführung.....	34
2.4.2 Die Impedanzmatrix	35
2.4.3 Die Admittanzmatrix	38
2.4.4 Die Kettenmatrix	40
2.4.4 Weitere Darstellungen.....	43
2.4.5 Umrechnungsformeln	44
2.5 Unerwünschte Effekte der Kommunikationstechnik.....	45
2.5.1 Rauschen in elektronischen Schaltungen	45
2.5.2 Lineare Verzerrungen.....	51
2.5.3 Nichtlineare Verzerrungen	52
3 Leitungstheorie.....	57
3.1 Die homogene Doppelleitung.....	57
3.2 Berechnungen.....	58
3.2.1 Die Leitungsgleichungen.....	58
3.2.2 Stationäre Lösung.....	61

3.2.3 Die Wellenimpedanz	63
3.2.4 Übergang in den Zeitbereich	65
3.2.5 Die Wellenlänge	65
3.2.6 Die Ausbreitungsgeschwindigkeit.....	66
3.3 Die beschaltete Leitung	66
3.3.1 Der Reflexionsfaktor	66
3.3.2 Transformationseigenschaften.....	69
3.4 Die verlustlose Leitung.....	71
3.4.1 Definition und Konsequenzen	71
3.4.2 Der Verkürzungsfaktor.....	72
3.4.3 Transformationseigenschaften.....	72
3.4.4 Stehwellenverhältnis und Anpassfaktor	73
3.4.5 Spezialfall verlustlose $\lambda/4$ -Leitung	75
3.5 Das SMITH-Diagramm	75
3.5.1 Einführung.....	75
3.5.2 Linien konstanten Realteils der Impedanz.....	76
3.5.3 Linien konstanten Imaginärteils der Impedanz.....	79
3.5.4 Herleitung durch konforme Abbildung	81
3.5.5 Das komplette Diagramm	82
3.5.6 Leitungstransformationen.....	85
3.5.7 Darstellung der Admittanz.....	88
3.5.8 Stehwellenverhältnis und Anpassfaktor	89
3.5.9 Kombinierte Transformations- und Netzwerkoperationen.....	91
3.5.10 Anpassung mit Hilfe des SMITH-Diagramms	94
3.5.11 Darstellung von Ortskurven	100
3.5.12 Zusammenfassung	100
3.6 Realisierungen	101
3.6.1 Die Koaxialleitung.....	101
3.6.2 Die symmetrische Leitung	112
3.6.3 Die Mikro-Streifenleitung	114
3.6.3 Der Rechteck-Hohlleiter.....	115
4 n-Tore	117
4.1 Einführung.....	117
4.1.1 Die Wellengrößen.....	117
4.1.2 Die reale Wellenquelle	119
4.1.3 Gegenüberstellung der realen Quellen	121

4.1.4 Die Impedanz in der Wellendarstellung	124
4.1.5 Das System Quelle-Leitung-Last.....	125
4.2 s-Parameter und Streumatrizen.....	126
4.2.1 Ausgangspunkt	126
4.2.2 Beispiele	128
4.2.3 Die Kettenschaltung	132
4.2.4 Zusammenhang zwischen Streumatrix und Kettenmatrix	133
4.2.5 Dreitore.....	136
4.2.6 Aktive, passive und verlustlose n-Tore	137
4.2.7 Beispiele	139
4.2.8 Symmetrieeigenschaften.....	141
4.3 Realisierungen	141
4.3.1 Passive Eintore	141
4.3.2 Aktive Eintore	142
4.3.3 Die Leitung.....	143
4.3.4 Der Phasenschieber	143
4.3.5 Das Dämpfungsglied	143
4.3.6 Das Anpassglied	146
4.3.7 Die Richtungsleitung.....	149
4.3.8 Der Zirkulator.....	149
4.3.9 Die Reflexionsfaktor-Messbrücke.....	152
4.3.10 Der Duplexer	156
4.3.10 Die Leitungsverzweigung.....	158
4.3.11 Der Power-Splitter.....	160
4.3.12 Der Richtkoppler	162
4.3.13 Die Doppel-T-Verzweigung.....	164
5 Mikrowellennetze	167
5.1 Definition	167
5.2 Analyse durch lineare Gleichungssysteme	168
5.3 Graphentheoretische Methoden.....	169
5.3.1 Ausgangspunkt	169
5.3.2 Darstellung von Zweitor, Quelle und Last	170
5.3.3 Modifikationen von Signalflussgraphen.....	172
5.3.4 Graphentransmissionsfaktor und MASON-Regel	175
6 Signalausbreitung im freien Raum	181
6.1 Elektromagnetische Wellen.....	181

6.2 Antennen	183
Symbole.....	187
Literaturverzeichnis.....	191
Stichwortverzeichnis	193