

Springer-Lehrbuch

---



Michael H.W. Hoffmann

# Hochfrequenztechnik

Ein systemtheoretischer Zugang

Mit 299 Abbildungen



Springer

Prof. Dr. Michael H.W. Hoffmann  
Universität Ulm  
Abt. Mikrowellentechnik  
Albert-Einstein-Allee 41  
89069 Ulm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Hoffmann, Michael:**

Hochfrequenztechnik: ein systemtheoretischer Zugang / Michael H.W. Hoffmann  
Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London;  
Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer 1997  
(Springer-Lehrbuch)

ISBN 978-3-540-61667-2      ISBN 978-3-642-59089-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-59089-4

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts-gesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1997

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einband-Entwurf: Meta design, Berlin

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage des Autors

SPIN: 10548474    62/3021 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

Meiner lieben Frau  
Petra  
gewidmet

# Vorwort

Hochfrequenztechnik ist eines der Gebiete der Elektrotechnik, das auf Grund des wirtschaftlichen Wachstums in Mobilfunk, Satellitenfunk und anderen Anwendungen für den angehenden Ingenieur der Elektrotechnik interessante Berufsperspektiven anbietet. Für den bereits im Berufsleben stehenden Ingenieur wächst der Bedarf, hochfrequenztechnische Methoden auch in Teilgebieten der Elektrotechnik einzusetzen, die auf einen ersten Blick wenig mit den klassischen Anwendungsgebieten der Hochfrequenztechnik zu tun haben. So läßt sich beispielsweise ein schnelles Rechnernetzwerk nur noch optimieren, wenn Phänomene der Wellenausbreitung auf Leitungen berücksichtigt werden.

Die Hochfrequenztechnik stand jedoch lange Zeit in dem Ruf, eine ausgesprochene Spezialistensache zu sein. Der Grund dafür war, daß noch bis in die sechziger Jahre in der Ausbildung zur Hochfrequenztechnik eine große Lücke zwischen der praktischen Anwendung durch den Ingenieur und dem Fortschritt der theoretischen Entwicklung klaffte, welche eine Domäne der Physik war.

In den letzten Jahren hat sich jedoch ein Wandel vollzogen. So hat sich die mathematische Ausbildung der Ingenieure entscheidend verbessert. Dank des Fortschrittes in den theoretischen Grundlagen der Hochfrequenztechnik können heute viele Zusammenhänge, welche früher nur dem Feldtheoretiker erklärlich waren, auch ohne den Einsatz feldtheoretischer Methoden verständlich dargestellt werden.

Das vorliegende Buch entstand aus dem Wunsch, diese Fortschritte einer größeren Leserschaft zugänglich zu machen. Aufbau und Stoffauswahl tragen dem Umstand Rechnung, daß sich nicht jeder Ingenieur der Elektrotechnik auch auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik spezialisieren möchte. Daher wird hier der Versuch unternommen, mit systemtheoretischen Methoden denjenigen Stoff aufzubereiten, mit dem praktisch jeder Ingenieur in Berührung kommt, der sich in der einen oder anderen Weise mit der Übertragung von Information durch Systeme der Hochfrequenztechnik auseinandersetzen hat. Dies beinhaltet insbesondere die Behandlung einfachster Wellentypen auf bestimmten Leitungen, die Eigenschaften von passiven und aktiven Wellen- $N$ -Toren, wie etwa Filtern und linearen Verstärkern der HF-Technik, Rauscheigenschaften von HF-Systemen und von Mischern und Frequenzumsetzern.

Da es die Absicht dieses Buches ist, dem Leser den systemtheoretischen Zugang zur Hochfrequenztechnik näherzubringen, wird darauf verzichtet, eine möglichst große Vielfalt von Schaltungen zusammenzustellen. Aus dem gleichen Grund werden auch feldtheoretische Methoden nicht weiter abgehandelt. Für eine

Vertiefung in diesen interessanten Teilgebieten der Hochfrequenztechnik soll auf die Literatur verwiesen werden.

Das Buch ist so aufgebaut, daß möglichst wenig spezielles Wissen aus anderen Fachgebieten vorausgesetzt wird. Daher werden die benötigten mathematischen Verfahren teils kurz und ergebnisorientiert wiederholt, teils ausführlicher hergeleitet. Bei einem ersten Durcharbeiten des Buches können diese Herleitungen übergangen werden. Sie sollten aber bei einer zweiten, dringend empfohlenen Durchsicht nachgearbeitet werden. Mathematische Zusammenhänge, die über das empfehlenswerte Grundwissen hinausgehen, und Formelsammlungen werden in Anhängen dargestellt.

Basis aller Ausführungen dieses Buches ist die Tatsache, daß Information in hochfrequenztechnischen Systemen mit Hilfe von Wellen transportiert wird. Auch wenn der Wellencharakter dieses Mechanismus nicht immer offensichtlich ist, kann doch mit Hilfe der darauf beruhenden Beschreibungsmethode mittels Amplituden komplexer (skalärer) Wellen ein außerordentlich wirksamer und dennoch einfacher Formalismus zur Behandlung von Systemen der Hochfrequenztechnik hergeleitet werden. Die Herleitung dieses Formalismus und von darauf basierenden Arbeitstechniken ist der wesentliche Inhalt der ersten zehn Kapitel dieses Buches. Die Kapitel 11 bis 17 befassen sich mit Anwendungen auf Systeme und Subsysteme. Daher wird empfohlen, vor einer Durchsicht dieser Kapitel wenigstens die Kapitel 5 bis 10 durchzuarbeiten.

In dieses Lehrbuch ist eine Reihe kritischer Beiträge von Studenten, Mitarbeitern und Kollegen eingeflossen, denen ich an dieser Stelle ausdrücklich danken möchte. Namentlich sollen hier insbesondere die Herren Dipl.-Ing. Thomas Michael, Dipl.-Ing. Jörg Gustrau und Gewert Liszkowski (†) erwähnt werden.

Meinen ganz besonderen Dank möchte ich aber meiner lieben Frau Petra aussprechen, die auf viele gemeinsame Stunden verzichten mußte und mir dennoch immer mit viel Verständnis familiären Rückhalt gegeben hat.

Ulm, im Frühjahr 1997

Michael H.W. Hoffmann

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Historischer Vorspann	1
1.2	Themenstellung der Hochfrequenztechnik	2
1.3	Frequenzbereiche und Wellenlängen	3
<b>2</b>	<b>Mathematische Hilfsmittel der HF-Technik (I): Fourier-Reihen und Integral-Transformationen</b>	<b>5</b>
2.1	Fourierreihen	5
2.2	Trigonometrische Approximation nichtperiodischer Funktionen	8
2.3	Fouriertransformation	10
2.4	Laplacetransformation	15
2.5	Zusammenfassung	18
2.6	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	19
<b>3</b>	<b>Wellen auf Leitungen</b>	<b>20</b>
3.1	Ein einfaches Leitungersatzschaltbild	20
3.2	Die eindimensionale Wellengleichung	23
3.3	Harmonische Wellen	25
3.4	Lösung der Telegraphengleichung für verlustarme Leitungen	27
3.5	Beispiele typischer Leitungen	30
3.5.1	Die Koaxialleitung	30
3.5.2	Die Mikrostreifenleitung	31
3.6	Zur Gültigkeit des Leitungersatzschaltbildes	33
3.7	Normierte Wellen	34
3.8	Zusammenfassung	40
3.9	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	41
<b>4</b>	<b>Leitung und Last</b>	<b>42</b>
4.1	Die Leitung endlicher Länge	42
4.2	Der komplexe Reflexionsfaktor	45
4.3	Impedanztransformation durch Leitungen	48
4.4	Stehende Wellen	50



4.5	Zusammenfassung	54
4.6	Aufgaben und Fragen zum Verständnis	54
<b>5</b>	<b>Wellenquellen</b>	<b>55</b>
5.1	Spannungs- und Stromquellen als Wellenquellen	55
5.2	Wellenquellen als Spannungs- und Stromquellen	61
5.3	Anpassung	62
5.4	Der Wirkungsgrad der Quelle	66
5.5	Zusammenfassung	69
5.6	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	69
<b>6</b>	<b>Mathematische Hilfsmittel der HF-Technik (II): Geraden und Kreise in der komplexen Ebene</b>	<b>70</b>
6.1	Kurven in der komplexen Ebene	70
6.1.1	Kurvendarstellungen	70
6.1.2	Geraden	72
6.1.3	Kreise	74
6.2	Die Bilineartransformation	75
6.3	Das Smith-Diagramm	77
6.3.1	Das Reflexionsfaktordiagramm für normierte Impedanzen	77
6.3.2	Das Reflexionsfaktordiagramm für normierte Admittanzen	81
6.3.3	Das gemeinsame Reflexionsfaktordiagramm für normierte Impedanzen und normierte Admittanzen	81
6.4	Zusammenfassung	83
6.5	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	83
<b>7</b>	<b>Anwendungen der Smith-Chart</b>	<b>84</b>
7.1	Impedanztransformationen mit Hilfe eines Bauelementes	84
7.2	Impedanztransformation mit Hilfe zweier Bauelemente	92
7.3	Frequenzgangdarstellung im Smith-Diagramm	97
7.4	Bestimmung von Stehwellenverhältnis und Anpaßfaktor	99
7.5	Zusammenfassung	100
7.6	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	101
<b>8</b>	<b>Beschreibung von <math>N</math>-Toren durch normierte Wellen</b>	<b>102</b>
8.1	$N$ -Tore als Grundlage einer Systemtheorie der Hochfrequenztechnik	102
8.2	Wellen- $N$ -Tore	102
8.3	Lineare zeitinvariante Wellen- $N$ -Tore	106
8.3.1	Streumatrizen	106
8.3.2	Leistungsbeziehungen	110

8.3.3	Transmissionsmatrizen	115
8.3.4	Mischkettenmatrizen	118
8.4	Zusammenfassung	119
8.5	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	119
<b>9</b>	<b>Mathematische Hilfsmittel der HF-Technik (III): Signalfluß-Diagramme</b>	<b>120</b>
9.1	Signalflußgraphen	120
9.2	Die Masonregel	126
9.3	Umformung und Reduktion von Signalflußgraphen	130
9.4	Zur Erstellung von Signalflußgraphen	131
9.5	Zusammenfassung	136
9.6	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	136
<b>10</b>	<b>Übertragungsfunktionen, Gewinne und Laufzeiten</b>	<b>137</b>
10.1	Übertragungsfunktionen	137
10.1.1	Die systemtheoretische Definition	137
10.1.2	Die Cauersche Betriebsübertragungsfunktion	138
10.1.3	Die idealisierte Übertragungsfunktion	139
10.1.4	Kritik an den vorangegangenen Definitionen	142
10.1.5	Auf der Basis von normierten Wellen definierte Übertragungsfunktionen	144
10.1.6	Übertragungsfunktionen von Kettenschaltungen aus Zweitoren	149
10.1.7	Verallgemeinerung auf beliebige $N$ -Tore	152
10.2	Gewinne und Verluste	153
10.2.1	Definitionen	153
10.2.2	Logarithmische Maße	156
10.2.3	Kritischer Vergleich der Gewinndefinitionen	157
10.2.4	Gewinne von Kettenschaltungen	159
10.3	Lineare Verzerrungen	160
10.3.1	Amplituden- und Phasengang	160
10.3.2	Die Phasenlaufzeit	161
10.3.3	Bandpaßsignale	162
10.3.4	Die Gruppenlaufzeit	164
10.3.5	Verzögerung der Impulsantwort	169
10.4	Zusammenfassung	169
10.5	Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	170
<b>11</b>	<b>Filter-Prototypen</b>	<b>171</b>
11.1	Einführende Beispiele	171
11.1.1	Ein RL-Tiefpaß	171

11.1.2 Ein RL-Hochpaß	173
11.1.3 Ein RLC-Bandpaß	175
11.1.4 Eine RLC-Bandsperre	178
11.2 Die Filtertheorie als Approximationsaufgabe	181
11.2.1 Toleranzschemata	181
11.2.2 Die Approximationsaufgabe	184
11.2.3 Lösung der Approximationsaufgabe mit rationalen Funktionen	185
11.3 Tiefpaß-Prototypen	189
11.3.1 Potenz- oder Butterworth-Tiefpässe	189
11.3.2 Tschebyscheff-Tiefpässe	194
11.3.3 Tiefpässe mit inverser Tschebyscheff-Charakteristik	200
11.3.4 Cauer-Tiefpässe	205
11.3.5 Bessel-Tiefpässe	210
11.3.6 Tiefpaßprototypen mit Nullstellen-Transformation	216
11.3.7 Tiefpaßprototypen mit Polstellen-Transformation	218
11.4 Transformation von Filter-Prototypen	221
11.4.1 Hochpaß-Tiefpaß-Transformation	221
11.4.2 Bandpaß-Tiefpaß-Transformation	224
11.4.2.1 Symmetrierung der Durchlaßgrenzen	226
11.4.2.2 Symmetrierung der Sperrgrenzen	230
11.4.3 Bandsperren-Tiefpaß-Transformation	233
11.5 Allpässe	237
11.5.1 Rationale Allpaß-Übertragungsfunktionen	237
11.5.2 Abtrennung von Allpässen aus allgemeinen rationalen Übertragungsfunktionen	241
11.5.3 Gruppenlaufzeitentzerrung	242
11.6 Zusammenfassung	244
11.7 Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	245
<b>12 Synthese verlustarmer Filter</b>	<b>246</b>
12.1 Bauelemente	246
12.1.1 Idealisierte Kapazitäten	246
12.1.2 Idealisierte Induktivitäten	248
12.1.3 Reale Kapazitäten und Induktivitäten	250
12.1.4 Übertrager	252
12.1.5 Idealisierte Leitungsbaulemente	256
12.1.6 Leitungsbaulemente in realen Schaltungen	261
12.2 Betriebsparameter	262
12.3 Syntheselgorithmen	263
12.3.1 Tiefpässe	264
12.3.1.1 Abbau von Polen im Unendlichen	264
12.3.1.2 Abbau von Polen im Endlichen	273
12.3.2 Hochpässe, Bandpässe und Bandsperren	281

12.3.3 Dimensionierung von Filtern mit Hilfe von Formelsammlungen	284
12.3.3.1 Tiefpaß-Normierungen	285
12.3.3.2 Potenz-Tiefpässe	286
12.3.3.3 Tschebyscheff-Tiefpässe	287
12.4 Filter mit Impedanz- und Admittanzinvertern	289
12.4.1 Invertertheorie	289
12.4.2 Inverterschaltungen mit konzentrierten Bauelementen	293
12.4.3 Inverterschaltungen mit Leitungen	295
12.4.4 Idealisierte Inverter in Filterschaltungen	299
12.4.5 Filterschaltungen mit realen Invertern	299
12.5 Filter mit kommensurablen Leitungen	305
12.6 Zusammenfassung	313
12.7 Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	314
<b>13 Leistungsverteilung</b>	<b>315</b>
13.1 Verlustlose Leitungsverzweigungen	315
13.2 Zirkulatoren	317
13.3 Leistungsverteilung mit Übertragern	318
13.4 Leistungsteiler vom Wilkinson-Typ	321
13.4.1 Der Original-Wilkinson-Teiler	321
13.4.2 Modifizierte Wilkinson-Teiler	323
13.5 Koppler	329
13.5.1 Vorüberlegungen	329
13.5.2 Koppler aus Leitungsverzweigungen	333
13.5.2.1 Viertorkoppler aus Zweigleitungen	333
13.5.2.2 Ein 90°-Hybrid	335
13.5.2.3 Der Rat-Race-Koppler	336
13.5.2.4 Zweigleitungskoppler mit optimiertem Frequenzverhalten	338
13.5.3 Koppler mit Feldverkopplung	339
13.5.4 Die Gabelschaltung	345
13.6 Übersprechen	345
13.7 Zusammenfassung	348
13.8 Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	349
<b>14 Lineare Verstärker</b>	<b>351</b>
14.1 Grundlegendes und Definitionen	351
14.2 Maximal verfügbarer Gewinn und Stabilität	354
14.3 Stabilitätskreise	357
14.3.1 Kreise als geometrische Grenzorte für Stabilität	357
14.3.2 Stabilitätsabschätzungen	359
14.3.3 Der Stabilitätsfaktor	364
14.4 Kreise konstanten effektiven Leistungsgewinns	367

14.4.1 Gewinnkreise in der Reflexionsfaktorebene der Last	367
14.4.2 Kreise konstanten Gewinns in der Ebene des Eingangsreflexionsfaktors	371
14.5 Obere Gewinnschranken	373
14.6 Rückkopplung	380
14.6.1 Rückwirkung	380
14.6.2 Rückgekoppelte Zweitore	382
14.6.3 Neutralisation	386
14.7 Gütemaße	391
14.8 Zusammenfassung	393
14.9 Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	394
<b>15 Gleichrichter, Mischer und Frequenzumsetzer</b>	<b>396</b>
15.1 Gleichrichter	396
15.1.1 Das Grundprinzip	396
15.1.2 Baugruppen mit nichtlinearem Verhalten	398
15.1.3 Die Halbleiterdiode als Gleichrichter	399
15.1.4 Eine einfache Gleichrichterschaltung mit Diode	402
15.1.5 Das Verfahren der harmonischen Balance	406
15.1.6 Gleichrichterverhalten bei zeitvarianter Amplitude des HF-Signals	409
15.1.7 Vollweg-Gleichrichter	412
15.2 Mischer und Frequenzumsetzer	415
15.2.1 Wozu benötigt man Frequenzumsetzer?	415
15.2.2 Klassifikationen	415
15.2.3 Multiplikative Frequenzumsetzer und Modulatoren	418
15.2.4 Das Spiegelfrequenzproblem	423
15.2.5 Multiplikative Modulatoren	426
15.2.6 Phasendetektion	427
15.2.7 Die Halbleiterdiode als Mischer	428
15.2.8 Frequenzumsetzer mit Mischerdioden	432
15.2.8.1 Frequenzumsetzer mit Eintaktmischer	432
15.2.8.2 Frequenzumsetzer mit einfachem Gegentaktmischer	438
15.2.8.3 Frequenzumsetzer mit Ringmischer	443
15.2.8.4 Frequenzumsetzer bei Mikrowellenfrequenzen	446
15.3 Zusammenfassung	447
15.4 Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	447
<b>16 Mathematische Hilfsmittel der HF-Technik (IV): Wahrscheinlichkeitstheorie</b>	<b>449</b>
16.1 Statistische Wahrscheinlichkeitstheorie	449
16.1.1 Einleitende Gedanken	449
16.1.2 Zufällige Ereignisse und Ergebnisse	449

16.1.3 Zufallsvariable und die Arbeitshypothese der Statistik	452
16.1.4 Mittelwerte und relative Häufigkeiten	454
16.1.5 Wahrscheinlichkeiten als relative Häufigkeiten	457
16.1.6 Mengenformulierung der Wahrscheinlichkeit	458
16.1.7 Bedingte Wahrscheinlichkeit	461
16.1.8 Wahrscheinlichkeitsverteilung und -dichte	463
16.2 Axiomatische Wahrscheinlichkeitstheorie	468
16.2.1 Die Schwächen der statistischen Wahrscheinlichkeitstheorie	468
16.2.2 Axiome und Definitionen der Kolmogorowschen Theorie	468
16.2.3 Erwartungswerte und Korrelation	474
16.2.4 Transformation von Zufallsvariablen	480
16.2.5 Stochastische Prozesse	489
16.3 Zusammenfassung	494
16.4 Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	495
<b>17 Elektronisches Rauschen</b>	<b>497</b>
17.1 Physikalische Grundlagen und mathematische Modellierung	497
17.1.1 Mathematische Modellierung elektronischen Rauschens	497
17.1.2 Physikalische Ursachen von Rauschprozessen	499
17.1.2.1 Thermisches Rauschen	499
17.1.2.2 Schrotrauschen	501
17.1.2.3 Generations-Rekombinations-Rauschen	502
17.1.2.4 1/f-Rauschen	502
17.1.2.5 Empfangsrauschen	503
17.2 Rauschen in linearen $N$ -Toren	503
17.2.1 Rauschwellen	503
17.2.2 Eintore	504
17.2.3 Zweitore	507
17.2.3.1 Übertragung von Rauschen durch Zweitore	507
17.2.3.2 Rauschquellen in Zweitoren	507
17.2.3.3 Die spektrale Rauschtemperatur eines Zweitores	508
17.2.3.4 Die Rauschtemperatur einer Kettenschaltung aus linearen Zweitoren	512
17.2.3.5 Die Rauschzahl eines Zweitores	513
17.2.3.6 Die Standard-Rauschzahl eines Dämpfungsgliedes mit ohmschen Verlusten	515
17.2.3.7 Das Rauschmaß nach Haus und Adler	516
17.2.3.8 Messung der Rauschzahl	519
17.2.3.9 Minimale Rauschtemperatur und optimaler Generatorreflexionsfaktor	522
17.2.4 Frequenzumsetzer	528
17.2.4.1 Der Zweitor-Umsetzer	528
17.2.4.2 Der Dreitor-Umsetzer	528

17.3 Zusammenfassung	537
17.4 Übungsaufgaben und Fragen zum Verständnis	538
<b>A Fourier– und Laplacetransformation</b>	<b>540</b>
A.1 Fouriertransformation	540
A.1.1 Die Fouriertransformation als Funktionaltransformation	540
A.1.2 Sätze und Korrespondenzen der Fouriertransformation	542
A.2 Die einseitige Laplacetransformation	545
A.2.1 Die Definition der Laplacetransformation	545
A.2.2 Sätze der Laplacetransformation	546
A.2.3 Einige Korrespondenzen der Laplacetransformation	548
<b>B Dimensionierung von Mikrostreifenleitungen</b>	<b>550</b>
<b>C Daten des GaAs-MESFET F135</b>	<b>553</b>
<b>D Hermitesche Formen und unitäre Abbildungen</b>	<b>556</b>
D.1 Formen	556
D.2 Der unitäre Raum	562
<b>E Umrechnungstabelle der Matrizen zur Zweitorbeschreibung</b>	<b>566</b>
<b>F Spezielle Funktionen der Filtertheorie</b>	<b>574</b>
F.1 Tschebyscheff-Polynome	574
F.2 Prototypfunktionen für Cauer-Tiefpässe	577
F.3 Bessel-Polynome	589
<b>G Zweipolfunktionen</b>	<b>593</b>
G.1 Definition und allgemeine Eigenschaften	593
G.2 Reaktanzzweipole	596
G.2.1 Partialbruchzerlegungen	596
G.2.2 Das Fostersche Reaktanztheorem	601
G.2.3 Kettenbruchentwicklungen	602
G.2.4 Ein Stabilitätstheorem	608
<b>Literatur</b>	<b>610</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>616</b>