
Netzwerk- und Filtersynthese

Grundlagen und Anwendungen

von
Rolf Unbehauen

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 516 Abbildungen, 5 Tabellen
und einer Programmdiskette

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1993

INHALT

| | |
|---|----------|
| Vorwort | XV |
| Teil I: Synthese passiver Netzwerke | 1 |
| 1. Einführung | 1 |
| 1.1. Die Aufgaben der Netzwerksynthese | 1 |
| 1.2. Beschreibung von Netzwerken | 3 |
| 1.3. Normierung | 5 |
| 2. Die Charakterisierung von Zweipolen | 7 |
| 2.1. Die Zweipolfunktion | 7 |
| 2.2. Eigenschaften von Zweipolfunktionen | 12 |
| 2.3. Wichtige Sonderfälle von Zweipolfunktionen | 15 |
| 2.3.1. LC-Zweipolfunktionen | 16 |
| 2.3.2. RL-Zweipolfunktionen | 18 |
| 2.3.3. RC-Zweipolfunktionen | 20 |
| 2.4. Sätze über Zweipolfunktionen | 22 |
| 2.5. Weitere Sätze über rationale Funktionen | 25 |
| 3. Realisierung von Zweipolfunktionen | 32 |
| 3.1. Die Synthese verlustfreier Zweipole | 32 |
| 3.1.1. Partialbruchnetzwerke | 32 |
| 3.1.2. Kettennetzwerke | 34 |
| 3.1.3. Nichtkanonische Realisierungen | 38 |
| 3.1.4. Stabilitätsprüfung durch Reaktanzzweipolsynthese | 39 |
| 3.2. Die Synthese kapazitätsfreier Zweipole | 40 |
| 3.2.1. Partialbruchnetzwerke | 40 |
| 3.2.2. Kettennetzwerke | 42 |
| 3.3. Die Synthese induktivitätsfreier Zweipole | 43 |
| 3.3.1. Partialbruchnetzwerke | 43 |
| 3.3.2. Kettennetzwerke | 44 |
| 3.4. Vorbemerkungen zur Synthese allgemeiner Zweipole | 44 |
| 3.5. Zweipolfunktionen ersten und zweiten Grades | 47 |
| 3.5.1. Realisierung von Zweipolfunktionen ersten Grades | 47 |

| | |
|--|-----|
| 3.5.2. Realisierung von Zweipolfunktionen zweiten Grades durch Reaktanz- und Widerstandsreduktion..... | 48 |
| 3.5.3. Allgemeine Zweipolfunktionen zweiten Grades | 50 |
| 3.6. Das Verfahren von O. Brune | 51 |
| 3.7. Erweiterung des Brune-Verfahrens..... | 57 |
| 3.7.1. Die Entwicklungsstellen | 57 |
| 3.7.2. Entwicklungsstelle auf dem Rand des ersten Quadranten..... | 59 |
| 3.7.3. Entwicklungsstelle im Innern des ersten Quadranten | 62 |
| 3.7.4. Schlußbemerkung | 68 |
| 3.8. Realisierung einer Zweipolfunktion durch ein Reaktanzzweitor und einen Ohmwiderstand..... | 69 |
| 3.8.1. Entwicklungsstellen erster Art | 70 |
| 3.8.2. Entwicklungsstellen zweiter Art | 70 |
| 3.8.3. Entwicklungsstellen dritter Art | 72 |
| 3.8.4. Realisierungen | 73 |
| 3.8.5. Zusätzliche Bemerkungen..... | 75 |
| 3.8.6. Verhalten der Entwicklungsstellen bei der Durchführung eines Entwicklungszyklus..... | 75 |
| 3.9. Das Verfahren von R. Bott und R. J. Duffin..... | 77 |
| 3.9.1. Vorbemerkungen..... | 77 |
| 3.9.2. Der Entwicklungsprozeß | 78 |
| 3.9.3. Die Verwirklichung | 80 |
| 3.9.4. Verbesserung der Netzwerke..... | 81 |
| 3.10. Abschließende Bemerkungen | 82 |
| 4. Die Charakterisierung von Zweitoren | 83 |
| 4.1. Eigenschaften der Impedanz- und der Admittanzmatrix | 83 |
| 4.1.1. Allgemeine Bedingungen, positive Matrizen..... | 83 |
| 4.1.2. Sonderfälle..... | 87 |
| 4.2. Übertragungsfunktionen..... | 90 |
| 4.3. Reaktanzzweitore | 91 |
| 4.4. Induktivitätsfreie Zweitore..... | 95 |
| 4.5. Kopplungsfreie Zweitore | 98 |
| 4.5.1. Kettenzweitore..... | 98 |
| 4.5.2. Die Fialkow-Gerst-Bedingungen | 99 |
| 5. Die Synthese von Reaktanzzweitoren | 104 |
| 5.1. Die Realisierung der Kettenmatrix..... | 105 |
| 5.2. Die Realisierung der Übertragungsfunktion bei Einbettung des Reaktanzzweitores zwischen Ohmwiderständen..... | 114 |
| 5.3. Die Realisierung der Übertragungsfunktion bei Abschluß des Reaktanzzweitores mit einem Ohmwiderstand..... | 122 |
| 5.4. Synthese eines zwischen Ohmwiderständen eingebetteten Reaktanzzweitores bei Vorgabe einer charakteristischen Funktion | 125 |

| | |
|---|-----|
| 5.4.1. Zusammenhang zwischen Eingangsimpedanz und charakteristischer Funktion | 126 |
| 5.4.2. Praktische Bestimmung der Eingangsimpedanz aus der charakteristischen Funktion..... | 127 |
| 5.5. Synthese eines mit einem Ohmwiderstand abgeschlossenen Reaktanzzweiters bei Vorgabe des Betrags der Übertragungsfunktion..... | 129 |
| 5.6. Kopplungsfreie Realisierungen..... | 133 |
| 6. Die Synthese von RC-Zweitoren..... | 136 |
| 6.1. Die vorgeschriebenen Funktionen..... | 137 |
| 6.2. Realisierung von Übertragungsfunktionen ohne positiv reelle Übertragungsnullstellen..... | 140 |
| 6.2.1. Vorbereitungen..... | 140 |
| 6.2.2. Das Realisierungsverfahren..... | 143 |
| 6.3. Realisierung von Übertragungsfunktionen mit positiv reellen Übertragungsnullstellen..... | 147 |
| 6.4. Die entsprechende Synthese von Reaktanzzweitoren..... | 148 |
| 6.4.1. Vorbemerkungen..... | 148 |
| 6.4.2. Das Realisierungsverfahren..... | 150 |
| 6.5. Realisierung von Übertragungsfunktionen mit negativ reellen Nullstellen durch Kettennetzwerke..... | 153 |
| 6.6. Ein weiteres Verfahren zur Realisierung von Übertragungsfunktionen ohne positiv reelle Übertragungsnullstellen nach Guillemin..... | 161 |
| 6.7. Die Realisierung von Mindestphasenübertragungsfunktionen nach Dasher..... | 163 |
| 6.7.1. Der Entwicklungsprozeß..... | 164 |
| 6.7.2. Die Dasher-Bedingung..... | 172 |
| 6.7.3. Die Realisierung..... | 174 |
| 6.7.4. Realisierung eines Paares von Admittanzmatrix- oder Impedanzmatrixelementen zweiten Grades..... | 180 |
| 7. Die Realisierung allgemeiner Übertragungsfunktionen..... | 183 |
| 7.1. Die Realisierung mit Hilfe symmetrischer Kreuzglieder..... | 183 |
| 7.1.1. Der Fall dualer Impedanzen..... | 185 |
| 7.1.2. Die Darlington-Netzwerke..... | 187 |
| 7.2. Die Realisierung von Allpaßübertragungsfunktionen..... | 188 |
| 7.2.1. Mindestphasenübertragungsfunktionen und Allpaßübertragungsfunktionen.... | 188 |
| 7.2.2. Allpaßrealisierung..... | 190 |
| 7.2.3. Die Allpaßübertragungsfunktion ersten Grades..... | 191 |
| 7.2.4. Die Allpaßübertragungsfunktion zweiten Grades..... | 191 |
| 7.3. Die Realisierung von Mindestphasenübertragungsfunktionen durch überbrückte T-Glieder..... | 199 |
| 7.3.1. Analyse eines überbrückten T-Gliedes..... | 199 |
| 7.3.2. Realisierung einer allgemeinen Mindestphasenübertragungsfunktion..... | 201 |
| 7.3.3. Ein Beispiel..... | 205 |

| | |
|---|------------|
| 7.4. Die Realisierung von Mindestphasenübertragungsfunktionen durch Kettennetzwerke nach dem Verfahren von Ho | 206 |
| 7.5. Realisierung Allgemeiner Übertragungsfunktionen mit Hilfe von Reaktanzzweitoren | 214 |
| 8. Praxis der Reaktanzfiltersynthese | 220 |
| 8.1. Vorteil der Widerstandseinbettung verlustloser Filter | 220 |
| 8.2. Synthese kopplungsfreier Reaktanzfilter | 223 |
| 8.2.1. Die verschiedenen Arten von Abspaltzyklen | 224 |
| 8.2.2. Das Problem der Abspaltreihenfolge | 232 |
| 8.3. Parametrische Filter | 235 |
| 8.4. Transformation der Abschlußimpedanz | 236 |
| 8.5. Numerische Aspekte | 243 |
| 8.6. Beispiel: Synthese eines parametrischen Bandpasses | 246 |
| 8.6.1. Erzeugung von Filtern mit speziellen Eigenschaften durch Teilabsaltungen .. | 250 |
| 9. Synthese nichtreziproker passiver Netzwerke | 260 |
| 9.1. Die verallgemeinerte Richards-Transformation | 261 |
| 9.2. Entwicklungszyklen für kanonische Realisierungen | 263 |
| 9.3. Übertragerfreie Zyklen | 268 |
| 9.4. Realisierung von Entwicklungsstellen dritter Art | 272 |
| 9.5. Duale Transformation der Admittanz | 272 |
| 9.6. Realisierung von Übertragungsfunktionen durch nichtreziproke passive Zweitore | 273 |
| 10. Synthese von Reaktanzzweitoren mit frequenzabhängigem Abschluß | 280 |
| 10.1. Vorbereitungen | 280 |
| 10.2. Das Syntheseverfahren | 282 |
| Teil II: Synthese aktiver RC-Netzwerke | 287 |
| 1. Vorbereitungen | 287 |
| 1.1. Empfindlichkeitsanalyse | 288 |
| 1.1.1. Nützliche Formeln zur Berechnung von Empfindlichkeiten | 288 |
| 1.1.2. Multiparameter-Empfindlichkeit | 291 |
| 1.1.3. Allgemeine Beziehungen zwischen Empfindlichkeiten | 294 |
| 1.2. Das En bloc-Realisierungskonzept | 296 |
| 1.3. Die Kaskadenrealisierung | 300 |
| 1.4. Die aktiven Elemente | 302 |

| | |
|---|-----|
| 1.4.1. Verstärker und Verstärkergrundbausteine | 303 |
| 1.4.2. Der Negativimpedanzkonverter | 311 |
| 1.4.3. Der Gyrator | 313 |
| 1.4.4. Immittanzkonverter | 315 |
| 1.4.5. Der Zirkulator | 318 |
| 1.5. Positive und negative Rückkopplung | 320 |
| 1.6. Grundbausteine für Signalfußdiagramme | 327 |
| 2. En bloc-Konzepte | 329 |
| 2.1. Synthese mit Hilfe von Negativimpedanzkonvertern | 329 |
| 2.1.1. Realisierung von Übertragungsfunktionen nach LINVILL | 329 |
| 2.1.2. Das Verfahren von YANAGISAWA zur Realisierung von Übertragungsfunktionen | 331 |
| 2.1.3. Die Realisierung von Immittanzen nach SIPRESS | 332 |
| 2.2. Synthese mit Hilfe von Verstärkern | 336 |
| 2.2.1. Die Netzwerkstrukturen nach KUH und HAKIM | 336 |
| 2.2.2. Eine Netzwerkstruktur mit einem einzigen Operationsverstärker | 339 |
| 2.2.3. Realisierung von Übertragungsfunktionen mittels Differenzenverstärkern | 342 |
| 2.2.4. Realisierung von Immittanzen | 344 |
| 2.2.5. Das Syntheseverfahren von LOVERING | 345 |
| 2.2.6. Zustandsraumrealisierungen | 348 |
| 2.3. Simulation von Induktivitäten | 351 |
| 2.4. Simulation von Induktivitätsnetzwerken | 356 |
| 2.5. Impedanztransformation von RLC-Zweitoren | 357 |
| 2.6. Leapfrogrealisierungen | 362 |
| 2.6.1. Das allgemeine Konzept | 362 |
| 2.6.2. Einfache Filterrealisierungen | 365 |
| 2.6.3. Einsparung von Operationsverstärkern | 371 |
| 2.6.4. Allgemeine Filterrealisierungen | 373 |
| 2.6.5. Maximierung des Dynamikbereichs allgemeiner Kettenstrukturen | 375 |
| 3. Biquadratische Blöcke | 376 |
| 3.1. Ein biquadratisches Netzwerk mit einem Operationsverstärker | 377 |
| 3.1.1. Der Realisierungsprozeß | 377 |
| 3.1.2. Realisierung eines Paares imaginärer Übertragungsnullstellen | 380 |
| 3.1.3. Praktische Beispiele | 381 |
| 3.1.4. Realisierung einer Bandpaßübertragungsfunktion | 383 |
| 3.2. Ein biquadratisches Netzwerk mit einem Verstärker endlicher Verstärkung | 385 |
| 3.2.1. Der Realisierungsprozeß | 385 |
| 3.2.2. Komplexe Übertragungsnullstellen | 387 |
| 3.2.3. Reelle Übertragungsnullstellen | 390 |
| 3.2.4. Ergänzungen | 393 |
| 3.3. Mehrverstärkerblöcke zweiter Ordnung | 395 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.1. Eine Netzwerkstruktur mit drei Operationsverstärkern und einer Rückführung..... | 396 |
| 3.3.2. Eine Netzwerkstruktur mit vier Operationsverstärkern und einer Rückführung..... | 398 |
| 3.3.3. Eine Netzwerkstruktur mit vier Operationsverstärkern und zwei Rückführungen..... | 402 |
| 3.3.4. Eine weitere Struktur mit vier Summationsknoten und zwei Rückführungen .. | 406 |
| 3.3.5. Eine Struktur mit drei Summationsknoten und einer Rückführung..... | 408 |
| 3.4. Gyrator-RC-Netzwerke zweiter Ordnung..... | 412 |
| 3.4.1. Gyrator-RC-Kettennetzwerk..... | 414 |
| 3.4.2. RC-Gyrator-Parallelnetzwerke | 421 |
| Teil III: Synthese von Netzwerken mit verteilten Elementen..... | 425 |
| 1. Synthese von Netzwerken mit verlustlosen verteilten Elementen..... | 425 |
| 1.1. Das Einheitselement..... | 426 |
| 1.2. Netzwerke aus Einheitselementen | 428 |
| 1.3. Synthese von Zweitoren mit verteilten Elementen..... | 430 |
| 1.4. Realisierung des Brune-Gliedes mittels verteilter Elemente | 436 |
| 1.4.1. Die Parallelschleife (Ikeno-loop)..... | 438 |
| 1.4.2. Die Reihenschleife..... | 442 |
| 1.4.3. Zweitore mit gekoppelten Leitungen..... | 443 |
| 1.4.4. Die Realisierbarkeitsbedingungen..... | 448 |
| 1.5. Entwurfsbeispiel und Ergänzungen..... | 449 |
| 1.6. Beschreibung der Netzwerke mittels Wellengrößen..... | 455 |
| 1.6.1. Beschreibung der Netzwerkelemente..... | 455 |
| 1.6.2. Beschreibung der Verbindungen..... | 459 |
| 1.6.3. Wellenbeschreibung von Netzwerken | 464 |
| 1.6.4. Die Übertragungsfunktion | 465 |
| 2. Synthese von Netzwerken aus RC-Leitungselementen | 467 |
| 2.1. Das homogene RC-Leitungselement | 467 |
| 2.2. Frequenz- und Impedanztransformationen | 469 |
| 2.2.1. Abbildungen der p -Ebene und Skalierungen der Impedanzen..... | 469 |
| 2.2.2. Transformationen des homogenen RC-Leitungselements..... | 471 |
| 2.3. Synthese in den transformierten Bereichen..... | 474 |
| 2.3.1. Synthese von Zweipolen aus homogenen RC-Leitungselementen..... | 474 |
| 2.3.2. Synthese von Zweitoren aus homogenen RC-Leitungselementen..... | 476 |
| 2.3.3. Entwurf aktiver Zweitore aus homogenen RC-Leitungselementen..... | 478 |
| 2.3.4. Erweiterung der Dasher-Netzwerke | 480 |
| 2.3.5. Ein Beispiel..... | 487 |

| | |
|--|-----|
| Teil IV: Digitalfilter und SC-Filter | 489 |
| 1. Allgemeine Grundlagen..... | 489 |
| 1.1. Beschreibung diskontinuierlicher Signale und Netzwerke..... | 490 |
| 1.2. Beschreibung im Frequenzbereich..... | 494 |
| 1.2.1. Die z-Transformation..... | 495 |
| 1.2.2. Systemtheoretische Konzepte..... | 496 |
| 1.2.3. Duale Darstellungen diskontinuierlicher Netzwerke..... | 498 |
| 1.2.4. Der Frequenzgang..... | 499 |
| 1.3. Wichtige Sonderfälle von Frequenzgängen..... | 500 |
| 1.4. Signalabtastung..... | 503 |
| 1.5. Nachbildung von Frequenzgängen durch diskontinuierliche Systeme..... | 504 |
| 2. Synthese von Digitalfiltern..... | 506 |
| 2.1. Nichtrekursive Digitalfilter..... | 506 |
| 2.2. Konventionelle rekursive Digitalfilter..... | 508 |
| 2.2.1. Direktformen..... | 508 |
| 2.2.2. Parallel- und Kaskadenform..... | 510 |
| 2.2.3. Abzweigstrukturen..... | 511 |
| 2.2.4. Beseitigung verzögerungsfreier Schleifen..... | 515 |
| 2.3. Wellendigitalfilter..... | 517 |
| 2.3.1. Einführendes Beispiel..... | 518 |
| 2.3.2. Allgemeine Vorgehensweise..... | 520 |
| 2.3.3. Adaptoren..... | 522 |
| 2.3.4. Zusammenfassung und Beispiele..... | 525 |
| 2.3.5. Synthese von Digitalfiltern mit Givens-Rotoren..... | 527 |
| 2.4. Zustandsraumfilter..... | 534 |
| 2.5. Kreuzgliedstrukturen..... | 539 |
| 2.5.1. Darstellung von Allpaß- und Allpolübertragungsfunktionen..... | 539 |
| 2.5.2. Darstellung allgemeiner Übertragungsfunktionen..... | 543 |
| 2.6. Orthogonale Filterstrukturen..... | 546 |
| 2.6.1. Orthogonalität..... | 546 |
| 2.6.2. Orthogonale Entwicklung nach Schur-Funktionen und Realisierung..... | 548 |
| 2.6.3. Orthonormale Entwicklung und Realisierung..... | 550 |
| 2.6.4. Orthonormale Entwicklung nach Walsh-Funktionen..... | 553 |
| 2.6.5. Eigenschaften orthonormaler Filterstrukturen..... | 557 |
| 2.6.6. Ein Beispiel..... | 559 |
| 2.7. Parallelanordnung von Allpässen ersten Grades..... | 560 |
| 2.8. Realisierung von Tiefpässen und Hochpässen mittels zweier Allpässe..... | 564 |
| 2.9. Quantisierungseffekte..... | 569 |
| 2.9.1. Quantisierungsfehler..... | 569 |
| 2.9.2. Koeffizientenquantisierung..... | 570 |

| | |
|--|---------|
| 2.9.3. Signalquantisierung | 573 |
| 2.9.4. Skalierung | 575 |
| 2.9.5. Anwendungen auf klassische Strukturen | 577 |
| 2.9.6. Koeffizientenempfindlichkeit bei komplexen Parallelstrukturen | 580 |
| 2.9.7. Grenzzyklen | 583 |
| 3. Synthese von SC-Filtern | 586 |
| 3.1. Einführung | 586 |
| 3.2. Analyse aktiver SC-Netzwerke im Zeitbereich | 588 |
| 3.3. SC-Basisnetzwerke | 590 |
| 3.3.1. Der Eulersche Vorwärtsintegrierer | 590 |
| 3.3.2. Der Eulersche Rückwärtsintegrierer | 593 |
| 3.3.3. Ein nichtinvertierender Integrierer | 594 |
| 3.3.4. Der Bilinearintegrierer | 596 |
| 3.3.5. Gedämpfte Integrierer | 598 |
| 3.3.6. Erweiterung auf mehrere Eingänge | 598 |
| 3.3.7. Einfluß von Streukapazitäten | 600 |
| 3.3.8. Ein einfaches Realisierungsverfahren | 601 |
| 3.3.9. Zusammenschaltung von SC-Netzwerken | 602 |
| 3.4. SC-Grundblöcke ersten und zweiten Grades | 603 |
| 3.4.1. SC-Grundblöcke ersten Grades | 603 |
| 3.4.2. SC-Grundblöcke zweiten Grades | 605 |
| 3.5. SC-Nachbildung von LC-Filtern | 611 |
| 3.5.1. Beschreibung von Referenzfiltern durch Signalflußdiagramme | 612 |
| 3.5.2. Umwandlung der Signalflußdiagramme in SC-Netzwerke | 617 |
| 3.5.3. Fehlerdiskussion | 619 |
| 3.5.4. Ein Beispiel | 620 |
| 3.5.5. Exakte Transformation von Polynomtiefpässen | 622 |
| 3.6. Bilineartransformation von LC-Filtern | 628 |
| 3.6.1. Beschreibung von Referenznetzwerken durch Ladungs-Potential-Flußdiagramme | 628 |
| 3.6.2. Transformation der Signalflußdiagramme | 631 |
| 3.6.3. Weitere Strukturen | 637 |
| 3.6.4. Ein einfaches Beispiel | 642 |
| 3.7. SC-Nachbildungen von zweipoligen Netzwerkelementen | 644 |
| Teil V: Approximation – Entwurf | 651 |
| 1. Einführung | 651 |
| 2. Wahl der Vorschrift | 654 |

| | |
|--|-----|
| 3. Lösung der Approximationsprobleme: zeitkontinuierliche Netzwerke..... | 656 |
| 3.1. Formelmäßige Approximation von Amplitudenvorschriften..... | 657 |
| 3.1.1. Butterworth-Tiefpässe | 657 |
| 3.1.2. Tschebyscheff-Tiefpässe | 659 |
| 3.1.3. Cauer-Tiefpässe | 662 |
| 3.1.4. Frequenztransformationen..... | 664 |
| 3.2. Formelmäßige Approximation von Phasenvorschriften..... | 666 |
| 3.3. Tiefpaßübertragungsfunktionen mit vorgeschriebenem Phasenverhalten..... | 670 |
| 3.3.1. Transformation der gesuchten Funktion..... | 671 |
| 3.3.2. Auswertung bei geradem Grad n | 673 |
| 3.3.3. Auswertung bei ungeradem Grad n | 676 |
| 3.4. Die Approximation allgemeiner Amplitudenvorschriften..... | 677 |
| 3.4.1. Direkte Verfahren..... | 677 |
| 3.4.2. Approximation durch Optimierung | 683 |
| 3.5. Die Approximation von Filterforderungen | 685 |
| 3.6. Erfüllung zweiseitiger Toleranzvorschriften für die Dämpfung | 688 |
| 3.7. Die Verlustkompensation | 689 |
| 3.8. Die Approximation von Ortskurvenvorschriften | 692 |
| 3.9. Die Approximation allgemeiner Phasenvorschriften..... | 696 |
| 3.10. Die Approximation von Zweipolforderungen..... | 704 |
| 3.11. Die Approximation von Zeitforderungen..... | 705 |
| 4. Lösung der Approximationsprobleme: zeitdiskrete Netzwerke..... | 708 |
| 4.1. Übertragung der Aufgabe in den p -Bereich..... | 708 |
| 4.2. Direkte Erfüllung von Amplitudenforderungen..... | 711 |
| 4.2.1. Approximation von allgemeinen Amplitudenvorschriften | 711 |
| 4.2.2. Formelmäßige Erfüllung spezieller Amplitudenforderungen..... | 714 |
| 4.2.3. Frequenztransformation von Amplitudencharakteristiken | 715 |
| 4.2.4. Erzeugung einer optimalen Grundcharakteristik..... | 717 |
| 4.3. Approximation von Phasenvorschriften..... | 719 |
| 4.3.1. Verwendung einer speziellen Klasse von Filtern..... | 719 |
| 4.3.2. Verwendung allgemeiner Übertragungsfunktionen | 723 |
| 4.4. Formelmäßige Approximation einer Konstante in einem Frequenzband durch einen Betragsfrequenzgang | 725 |
| 4.4.1. Abbildung der z -Ebene | 725 |
| 4.4.2. Betragsquadratfunktionen mit gleichmäßigem Verhalten..... | 729 |
| 4.4.3. Vorgabe der Pole der Übertragungsfunktion..... | 733 |
| 4.4.4. Approximation in der ζ -Ebene..... | 734 |
| 4.4.5. Sonderfälle von Allpol- und nichtrekursiven Filtern | 738 |
| 4.5. Entwurf nichtrekursiver Filter..... | 739 |
| 4.6. Approximation mittels Modellierungsverfahren | 741 |
| 4.6.1. Vorbereitungen | 741 |
| 4.6.2. Verfahren zur Minimierung indirekter Fehler..... | 746 |

| | |
|---|---------|
| 4.6.3. Minimierung direkter Fehler, Iterationsverfahren | 754 |
| 4.7. Entwurf komplexer Digitalfilter..... | 757 |
| 4.7.1. Vorbereitungen | 757 |
| 4.7.2. Vorschrift für den Amplitudengang..... | 760 |
| 4.7.3. Vorschrift für den Realteil des Frequenzgangs..... | 762 |
| 4.7.4. Weitere Approximationsprobleme | 764 |
| 4.7.5. Beispiele..... | 765 |
| ANHANG Das Filterentwurfsprogramm | 769 |
| Formelzeichen und Abkürzungen..... | 774 |
| Literaturverzeichnis..... | 776 |
| Sachregister | 786 |