
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 Reaktanzzweitors zwischen Ohmwiderständen.....	114
5.3. Die Realisierung der Übertragungsfunktion bei Abschluß des Reaktanzzweitors mit einem Ohmwiderstand	122
5.4. Synthese eines zwischen Ohmwiderständen eingebetteten Reaktanzzweitors 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 Reaktanzzweitors 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 Ketten- netzwerke nach dem Verfahren von Ho	206
7.5. Realisierung Allgemeiner Übertragungsfunktionen mit Hilfe von Reaktanz- zweitoren.....	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 Teilabspaltungen..	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 Zwei- tore	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 Verstärkergrundausteine	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 Signalflußdiagramme	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 Übertragungsnulstellen	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 Übertragungsnulstellen	387
3.2.3. Reelle Übertragungsnulstellen	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-Leitungselement.....	471
2.3. Synthese in den transformierten Bereichen	474
2.3.1. Synthese von Zweitoren 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