

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
I Grundlagen, Filterung und Spektralanalyse	1
1 Einleitung	3
Literaturverzeichnis	7
2 Diskrete Signale und Systeme	9
2.1 Elementare diskrete Signale	10
2.2 Eigenschaften diskreter Systeme	12
2.3 Eigenschaften diskreter Signale und Systeme im Frequenz- bereich	16
2.4 Das Abtasttheorem	21
2.4.1 Zusammenhang zwischen den Spektren diskreter und kontinuierlicher Zeitsignale	21
2.4.2 Alternative Formulierung des Abtasttheorems: Spektrum eines abgetasteten Signals	24
2.4.3 Deutung des Abtasttheorems anhand der Interpo- lationsformel für bandbegrenzte Signale	26
2.5 Komplexe diskrete Zeitsignale	28
2.5.1 Äquivalente Tiefpass-Darstellung reeller Band- passsignale	28
2.5.2 Spektren komplexer Zeitsignale	32
2.5.3 Komplexe Faltung	35
2.6 Zeitdiskrete stochastische Prozesse	37
2.7 Spektraldarstellung diskreter stochastischer Prozesse . . .	44

2.7.1	Definition der spektralen Leistungsdichte	44
2.7.2	Einfluss eines linearen Systems	46
2.8	Basisbanddarstellung stationärer Bandpassprozesse	48
	Literaturverzeichnis	53
3	Die Z-Transformation	55
3.1	Definition der Z-Transformation	55
3.2	Existenz der Z-Transformierten	58
3.3	Inverse Z-Transformation	63
3.4	Eigenschaften der Z-Transformation	66
3.5	Die Systemfunktion	69
3.5.1	Herleitung der Z-Übertragungsfunktion	69
3.5.2	Amplitudengang, Phasengang und Gruppenlaufzeit diskreter Systeme	72
3.5.3	Stabilitätskriterium im z -Bereich	76
	Literaturverzeichnis	79
4	Rekursive Filter	81
4.1	Kanonische rekursive Filterstrukturen	82
4.2	Entwurf selektiver rekursiver Filter	86
4.2.1	Transformation kontinuierlicher in diskrete Systeme	86
4.2.2	Grundlagen zum Entwurf kontinuierlicher Systeme	92
4.2.3	Standardentwürfe im s' -Bereich	95
4.2.4	Entwurfsbeispiele für rekursive Filter	99
4.3	Spezielle Formen rekursiver Filter	102
4.3.1	Komplexwertige rekursive Filter	102
4.3.2	Allpässe	108
4.3.3	Digitale Integrierer	111
4.4	Quantisierungseinflüsse	113
4.4.1	Darstellung von Festkommazahlen	114
4.4.2	Quantisierung der Filterkoeffizienten	116
4.4.3	Stochastisches Modell des Quantisierungsrauschens	119
4.4.4	Quantisierungsrauschen in rekursiven Filtern . . .	123
4.4.5	Spektralformung des Quantisierungsrauschens . . .	126
4.4.6	Grenzyklen	131
4.4.7	Skalierung	140
	Literaturverzeichnis	146

5	Nichtrekursive Filter	149
5.1	Systeme mit endlicher Impulsantwort: FIR-Filter	150
5.2	Systeme mit linearer Phase	156
5.2.1	Komplexwertige linearphasige Systeme	156
5.2.2	Die vier Grundtypen reellwertiger linearphasiger Filter	159
5.3	Entwurf linearphasiger FIR-Filter	164
5.3.1	Grundformen idealisierter selektiver Filter	164
5.3.2	Approximation im Sinne minimalen Fehlerqua- drats: Fourier-Approximation	170
5.3.3	Filterentwurf durch Fensterbewertung der idealen Impulsantwort	173
5.3.4	Tschebyscheff-Approximation im Sperrbereich: Dolph-Tschebyscheff-Entwurf	181
5.3.5	Tschebyscheff-Approximation im Durchlass- und Sperrbereich: Remez-Entwurf	185
5.4	Entwurf spezieller nichtrekursiver Systeme	189
5.4.1	Zeitdiskrete Differenzierer	189
5.4.2	Zeitdiskrete Hilbert-Transformatoren	193
5.4.3	Interpolationsfilter	196
5.5	Filter zur Signalglättung	201
5.5.1	Savitzky-Golay Filter zur Glättung	210
5.5.2	Median Filter	217
5.5.3	LULU Filter	223
5.5.4	Savitzky-Golay Filter zur Differentiation	229
5.6	Multiraten-Systeme	238
5.6.1	Reduktion der Abtastrate	238
5.6.2	Erhöhung der Abtastrate	243
5.6.3	Realisierung von Dezimator und Expander	246
5.6.4	Polyphasendarstellung von Signalen	254
5.7	Komplexwertige Systeme	262
5.7.1	Komplexwertige Systeme zur Erzeugung analyti- scher Zeitsignale	262
5.7.2	Äquivalente Tiefpasssysteme für digitale Band- passfilter	267
	Literaturverzeichnis	271

6	Adaptive Filter	275
6.1	Theoretische Lösung: Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers	276
6.1.1	Herleitung der MMSE-Lösung	276
6.1.2	Orthogonalitätsprinzip	279
6.1.3	Beispiel: Das Wiener-Filter	280
6.2	Least-Mean-Squares-Algorithmus (LMS)	282
6.2.1	Herleitung der Iterationsgleichungen	282
6.2.2	Konvergenz des LMS-Algorithmus	285
6.3	Varianten gradientenbasierter Algorithmen	289
6.3.1	Normalized-Least-Mean-Squares-Algorithmus (NLMS)	289
6.3.2	Die Methode der Affinen Projektion	291
6.4	Recursive-Least-Squares-Algorithmus (RLS)	293
6.4.1	Iterative Schätzung und Inversion der Autokorrelationsmatrix	293
6.4.2	Herleitung des RLS-Algorithmus	295
6.5	Experimentelle Untersuchungen adaptiver Filter	297
6.5.1	Akustische Echokompensation	297
6.5.2	Simulationsbeispiele	298
	Literaturverzeichnis	301
7	Die diskrete Fourier- Transformation (DFT)	305
7.1	Definition der DFT	306
7.2	Eigenschaften der DFT	310
7.3	Zusammenhänge zwischen der DFT und anderen Transformationen	318
7.4	Die schnelle Fourier-Transformation (FFT)	321
7.4.1	Reduktion im Zeitbereich	321
7.4.2	Reduktion im Frequenzbereich	327
7.4.3	Alternative Formen der FFT	331
7.4.4	Inverse FFT	333
7.5	Diskrete Fourier-Transformation reeller Folgen	334
7.5.1	Simultane Transformation zweier Folgen	335
7.5.2	Transformation einer Folge der Länge $2N$ durch eine N -Punkte-FFT	336
7.6	Der Goertzel-Algorithmus	340
	Literaturverzeichnis	343

8	Anwendungen der FFT	345
	zur Filterung und Spektralanalyse	345
8.1	Schnelle Faltung	346
8.1.1	Overlap-Add-Verfahren	346
8.1.2	Overlap-Save-Verfahren	356
8.2	Spektralanalyse periodischer Signale	359
8.2.1	Abtastung eines zeitkontinuierlichen periodischen Signals	359
8.2.2	Diskrete Fourier-Transformation einer komplexen Exponentialfolge	360
8.2.3	Der Leck-Effekt	362
8.3	Anwendung von Fensterfunktionen im Zeitbereich	364
8.3.1	Allgemeine Interpretation des Leck-Effektes	364
8.3.2	Hann-Fenster als Beispiel für die prinzipielle Wir- kungsweise einer Fensterung im Zeitbereich	367
8.3.3	Weitere gebräuchliche Fensterfunktionen	370
8.3.4	Gleichmäßige Approximation im Sperrbereich: Dolph-Tschebyscheff-Fenster	373
8.3.5	Übersicht über die verschiedenen Fensterfunktionen	374
8.4	Spektraltransformation reeller Bandpasssignale	378
8.4.1	Abtasttheorem für Bandpasssignale	378
8.4.2	Spektraltransformation der komplexen Einhüllenden	383
	Literaturverzeichnis	386
9	Traditionelle Spektralschätzung	389
9.1	Schätzung von Autokorrelationsfolgen	391
9.2	Berechnung von Autokorrelationsfolgen mit FFT	399
9.3	Das Periodogramm	408
9.3.1	Zusammenhang zwischen Periodogramm und AKF-Schätzung	408
9.3.2	Erwartungstreue des Periodogramms	410
9.3.3	Varianz des Periodogramms	413
9.4	Konsistente Spektralschätzung	418
9.4.1	Mittelung von Periodogrammen (Bartlett-Methode)	418
9.4.2	Fensterung der Datensegmente (Welch-Methode)	420
9.4.3	Korrelogramm-Verfahren (Blackman-Tukey- Schätzung)	424
9.5	Vergleich Periodogramm-Korrelogramm	429
	Literaturverzeichnis	435

10 Parametrische Spektralschätzung	437
10.1 ARMA-Modelle zur Beschreibung von Rauschprozessen . . .	439
10.2 Markoff-Prozess als autoregressives Modell erster Ordnung	443
10.3 Die Yule-Walker Gleichung	447
10.4 Lineare Prädiktion	449
10.4.1 Ableitung der Wiener-Hopf-Gleichung für ein nichtrekursives Prädiktionsfilter	449
10.4.2 Das Orthogonalitätsprinzip	453
10.4.3 Zusammenhang zwischen linearer Prädiktion und autoregressiver Modellierung	454
10.5 Die Levinson-Durbin Rekursion	457
10.5.1 Ableitung der PARCOR-Koeffizienten	458
10.5.2 Rekursive Berechnung der Prädiktionsfehlerleistung	461
10.5.3 Rekursionsformel zur Berechnung der Prädiktor- koeffizienten (Levinson-Durbin Rekursion)	463
10.6 Die Lattice-Struktur	466
10.6.1 Ableitung des Analysefilters in Lattice-Form . . .	466
10.6.2 Rekursive Synthesefilter in Lattice-Struktur . . .	470
10.6.3 Minimalphasigkeit des Analysefilters – Stabilität des Synthesefilters	471
10.6.4 Orthogonalität des Rückwärts-Prädiktorfehlers . .	475
10.6.5 Übersicht über die verschiedenen Beschreibungs- formen für autoregressive Prozesse	480
10.7 Lösung der Yule-Walker Gleichung	481
10.7.1 Yule-Walker- oder Autokorrelationsansatz	482
10.7.2 Kovarianzmethode	485
10.7.3 Burg-Algorithmus	487
10.8 Beispiele zur parametrischen Spektralschätzung	491
10.8.1 Erprobung anhand synthetischer Testsignale . . .	491
10.8.2 Anwendungen zur Sprachcodierung	494
Literaturverzeichnis	501
11 Eigenwertbasierte Spektralanalyse	505
11.1 Harmonische Analyse nach Pisarenko	506
11.1.1 Modellierung gestörter Sinussignale	508
11.1.2 Die Parameter der Sinussignale	510
11.2 MUSIC-Spektralschätzung	512
11.2.1 Trennung von Signal- und Störraum	514

11.2.2 Das MUSIC-Pseudospektrum	518
11.2.3 Beispiele zum MUSIC-Verfahren	519
11.3 ESPRIT-Spektralschätzung	522
11.3.1 Spektralparameter nach dem ESPRIT-Verfahren	526
11.3.2 Beispiele zum ESPRIT-Verfahren	527
Literaturverzeichnis	534

II Matlab-Übungen 535

12. Einleitung 537

13. Aufgaben 539

13.1 Diskrete Signale und Systeme (Kap. 2)	539
13.2 Rekursive Filter (Kap. 4)	556
13.3 Nichtrekursive Filter (Kap. 5)	562
13.4 Die diskrete Fourier-Transformation (Kap. 7)	566
13.5 Anwendungen der FFT zur Filterung und Spektralanalyse (Kap. 8)	568
13.6 Traditionelle Spektralschätzung (Kap. 9)	571
13.7 Parametrische Spektralschätzung (Kap. 10)	574

14. Lösungen 579

14.1 Diskrete Signale und Systeme (Kap. 2)	579
14.2 Rekursive Filter (Kap. 4)	599
14.3 Nichtrekursive Filter (Kap. 5)	603
14.4 Die diskrete Fourier-Transformation (Kap. 7)	612
14.5 Anwendungen der FFT zur Filterung und Spektralanalyse (Kap. 8)	615
14.6 Traditionelle Spektralschätzung (Kap. 9)	626
14.7 Parametrische Spektralschätzung (Kap. 10)	631

Sachverzeichnis 643