

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
I Grundlagen, Filterung und Spektralanalyse	1
1 Einleitung	3
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 Frequenzbereich	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 Interpolationsformel für bandbegrenzte Signale	26
2.5 Komplexe diskrete Zeitsignale	28
2.5.1 Äquivalente Tiefpass-Darstellung reeller Bandpasssignale	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
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
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	Grenzzyklen	131
4.4.7	Skalierung	140
5	Nichtrekursive Filter	147
5.1	Systeme mit endlicher Impulsantwort: FIR-Filter	148
5.2	Systeme mit linearer Phase	154
5.2.1	Komplexwertige linearphasige Systeme	154

5.2.2	Die vier Grundtypen reellwertiger linearphasiger Filter	157
5.3	Entwurf linearphasiger FIR-Filter	162
5.3.1	Grundformen idealisierter selektiver Filter	162
5.3.2	Approximation im Sinne minimalen Fehlerquadrats: Fourier-Approximation	168
5.3.3	Filterentwurf durch Fensterbewertung der idealen Impulsantwort	171
5.3.4	Tschebyscheff-Approximation im Sperrbereich: Dolph-Tschebyscheff-Entwurf	179
5.3.5	Tschebyscheff-Approximation im Durchlass- und Sperrbereich: Remez-Entwurf	183
5.4	Entwurf spezieller nichtrekursiver Systeme	187
5.4.1	Zeitdiskrete Differenzierer	187
5.4.2	Zeitdiskrete Hilbert-Transformatoren	191
5.4.3	Interpolationsfilter	194
5.5	Komplexwertige Systeme	198
5.5.1	Komplexwertige Systeme zur Erzeugung analytischer Zeitsignale	199
5.5.2	Äquivalente Tiefpasssysteme für digitale Bandpassfilter	204
6	Adaptive Filter	209
6.1	Theoretische Lösung: Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers	210
6.1.1	Herleitung der MMSE-Lösung	210
6.1.2	Orthogonalitätsprinzip	213
6.1.3	Beispiel: Das Wiener-Filter	214
6.2	Least-Mean-Squares-Algorithmus (LMS)	216
6.2.1	Herleitung der Iterationsgleichungen	216
6.2.2	Konvergenz des LMS-Algorithmus	219
6.3	Varianten gradientenbasierter Algorithmen	224
6.3.1	Normalized-Least-Mean-Squares-Algorithmus (NLMS)	224
6.3.2	Die Methode der Affinen Projektion	225
6.4	Recursive-Least-Squares-Algorithmus (RLS)	228
6.4.1	Iterative Schätzung und Inversion der Autokorrelationsmatrix	228
6.4.2	Herleitung des RLS-Algorithmus	230

6.5	Experimentelle Untersuchungen adaptiver Filter	232
6.5.1	Akustische Echokompensation	232
6.5.2	Simulationsbeispiele	233
7	Die diskrete Fourier- Transformation (DFT)	237
7.1	Definition der DFT	238
7.2	Eigenschaften der DFT	242
7.3	Zusammenhänge zwischen der DFT und anderen Trans- formationen	250
7.4	Die schnelle Fourier-Transformation (FFT)	253
7.4.1	Reduktion im Zeitbereich	253
7.4.2	Reduktion im Frequenzbereich	259
7.4.3	Alternative Formen der FFT	263
7.4.4	Inverse FFT	265
7.5	Diskrete Fourier-Transformation reeller Folgen	266
7.5.1	Simultane Transformation zweier Folgen	267
7.5.2	Transformation einer Folge der Länge $2N$ durch eine N -Punkte-FFT	268
7.6	Der Goertzel-Algorithmus	272
8	Anwendungen der FFT	
	zur Filterung und Spektralanalyse	275
8.1	Schnelle Faltung	276
8.1.1	Overlap-Add-Verfahren	276
8.1.2	Overlap-Save-Verfahren	285
8.2	Spektralanalyse periodischer Signale	289
8.2.1	Abtastung eines zeitkontinuierlichen periodischen Signals	289
8.2.2	Diskrete Fourier-Transformation einer komplexen Exponentialfolge	290
8.2.3	Der Leck-Effekt	292
8.3	Anwendung von Fensterfunktionen im Zeitbereich	294
8.3.1	Allgemeine Interpretation des Leck-Effektes	294
8.3.2	Hann-Fenster als Beispiel für die prinzipielle Wir- kungsweise einer Fensterung im Zeitbereich	297
8.3.3	Weitere gebräuchliche Fensterfunktionen	300
8.3.4	Gleichmäßige Approximation im Sperrbereich: Dolph-Tschebyscheff-Fenster	302
8.3.5	Übersicht über die verschiedenen Fensterfunktionen	305

8.4	Spektraltransformation reeller Bandpasssignale	309
8.4.1	Abtasttheorem für Bandpasssignale	309
8.4.2	Spektraltransformation der komplexen Einhüllenden	314
9	Traditionelle Spektralschätzung	319
9.1	Schätzung von Autokorrelationsfolgen	321
9.2	Berechnung von Autokorrelationsfolgen mit FFT	329
9.3	Das Periodogramm	336
9.3.1	Zusammenhang zwischen Periodogramm und AKF-Schätzung	337
9.3.2	Erwartungstreue des Periodogramms	339
9.3.3	Varianz des Periodogramms	341
9.4	Konsistente Spektralschätzung	345
9.4.1	Mittelung von Periodogrammen (Bartlett-Methode)	345
9.4.2	Fensterung der Datensegmente (Welch-Methode) .	347
9.4.3	Korrelogramm-Verfahren (Blackman-Tukey- Schätzung)	352
9.5	Vergleich Periodogramm-Korrelogramm	357
10	Parametrische Spektralschätzung	367
10.1	ARMA-Modelle zur Beschreibung von Rauschprozessen .	369
10.2	Markoff-Prozess als autoregressives Modell erster Ordnung	374
10.3	Die Yule-Walker Gleichung	377
10.4	Lineare Prädiktion	380
10.4.1	Ableitung der Wiener-Hopf-Gleichung für ein nichtrekursives Prädiktionsfilter	380
10.4.2	Das Orthogonalitätsprinzip	383
10.4.3	Zusammenhang zwischen linearer Prädiktion und autoregressiver Modellierung	385
10.5	Die Levinson-Durbin Rekursion	387
10.5.1	Ableitung der PARCOR-Koeffizienten	388
10.5.2	Rekursive Berechnung der Prädiktionsfehlerleistung	391
10.5.3	Rekursionsformel zur Berechnung der Prädiktor- koeffizienten (Levinson-Durbin Rekursion)	393
10.6	Die Lattice-Struktur	396
10.6.1	Ableitung des Analysefilters in Lattice-Form . . .	396
10.6.2	Rekursive Synthesefilter in Lattice-Struktur	400

10.6.3	Minimalphasigkeit des Analysefilters – Stabilität des Synthesefilters	401
10.6.4	Orthogonalität des Rückwärts-Prädiktorfehlers . .	405
10.6.5	Übersicht über die verschiedenen Beschreibungs- formen für autoregressive Prozesse	410
10.7	Lösung der Yule-Walker Gleichung	411
10.7.1	Yule-Walker- oder Autokorrelationsansatz	412
10.7.2	Kovarianzmethode	415
10.7.3	Burg-Algorithmus	417
10.8	Beispiele zur parametrischen Spektralschätzung	421
10.8.1	Erprobung anhand synthetischer Testsignale . . .	421
10.8.2	Anwendungen zur Sprachcodierung	424
11	Eigenwertbasierte Spektralanalyse	433
11.1	Harmonische Analyse nach Pisarenko	434
11.1.1	Modellierung gestörter Sinussignale	436
11.1.2	Die Parameter der Sinussignale	438
11.2	MUSIC-Spektralschätzung	440
11.2.1	Trennung von Signal- und Störraum	442
11.2.2	Das MUSIC-Pseudospektrum	446
11.2.3	Beispiele zum MUSIC-Verfahren	447
11.3	ESPRIT-Spektralschätzung	450
11.3.1	Spektralparameter nach dem ESPRIT-Verfahren .	454
11.3.2	Beispiele zum ESPRIT-Verfahren	455
II	Matlab-Übungen	463
12.	Einleitung	465
13.	Aufgaben	467
13.1	Diskrete Signale und Systeme (Kap. 2)	467
13.2	Rekursive Filter (Kap. 4)	484
13.3	Nichtrekursive Filter (Kap. 5)	490
13.4	Die diskrete Fourier-Transformation (Kap. 7)	494
13.5	Anwendungen der FFT zur Filterung und Spektralanalyse (Kap. 8)	496
13.6	Traditionelle Spektralschätzung (Kap. 9)	499
13.7	Parametrische Spektralschätzung (Kap. 10)	502

14. Lösungen	507
14.1 Diskrete Signale und Systeme (Kap. 2)	507
14.2 Rekursive Filter (Kap. 4)	527
14.3 Nichtrekursive Filter (Kap. 5)	531
14.4 Die diskrete Fourier-Transformation (Kap. 7)	539
14.5 Anwendungen der FFT zur Filterung und Spektralanalyse (Kap. 8)	543
14.6 Traditionelle Spektralschätzung (Kap. 9)	554
14.7 Parametrische Spektralschätzung (Kap. 10)	559
 Literaturverzeichnis	 571
 Sachverzeichnis	 581