

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Signale im Kommunikationsprozess	1
1.2 Signalverarbeitung als Disziplin	2
1.3 Elementare Beschreibung von Signalen	4
1.3.1 Klassen von Signalen	4
1.3.2 Notation	6
1.3.3 Dimensionen. Maße und Pegel	6
1.3.4 Beispiel: Sprachsignal	7
1.4 Signale als Realisierungen stochastischer Prozesse	8
1.4.1 Vorbemerkung zur mathematischen Modellierung	8
1.4.2 Stochastische Prozesse	10
1.4.3 Ebenen der Determiniertheit	13
1.4.4 Signal und System. Parametrische Signalmodelle	14
1.5 Strukturmodellierung von Signalen	15
1.6 Aufbau des Buches	18
1.7 Hinweise auf weiterführende Literatur	20
Literatur	21
2 Beschreibung von Signalen im Zeitbereich	23
2.1 Signaloperationen	23
2.1.1 Operationen auf Signalmengen	23
Allgemeines	23
Signalräume, Skalarprodukt und Norm	24
Interpretation der Norm. Energie- und Leistungssignale	25
2.1.2 Abtastung	26
Modellvorstellung	26
Der DIRAC-Impuls als Distribution	29
Impulsfläche und weitere Besonderheiten	30
2.1.3 Faltung	32
Linearität zeitkontinuierlicher Systeme	32
Systemreaktion linearer zeitinvarianter Systeme	34

Regeln der Faltungsoperation	36
Signalverschiebung	37
Systemreaktion bei harmonischer Anregung	37
Diskrete Faltung	38
2.2 Reihendarstellungen von Signalen	39
2.2.1 Signalinterpolation und -approximation	39
2.2.2 Reihenentwicklung nach orthogonalen Funktionen	40
Ansatz	40
Approximationsfehler (reelle Aufbaufunktionen)	43
Approximationsfehler (komplexe Aufbaufunktionen) ..	44
Energiebeziehung	45
Anwendung auf zeitdiskrete Signale	46
2.2.3 LAGRANGESche Interpolation	47
Einführendes Beispiel	47
Interpolationsformel	48
Orthogonalität	49
2.2.4 Samplingreihe und Signalrekonstruktion	50
LAGRANGESche Interpolation bei äquidistanten	
Abtastwerten	50
Spaltfunktion als Aufbaufunktion	51
Abtastbedingung	52
Tiefpass-Rekonstruktion	54
2.2.5 Eigenschaften der Samplingreihe	55
Samplingreihe als Orthogonale Reihe	55
Folgerung: Energie zeitdiskreter Signale	56
Samplingreihe als Faltungsprodukt	57
Samplingreihe für periodische Signale	58
Folgerung: Energie zeitdiskreter periodischer Signale ..	62
2.3 Statistische Signalbeschreibung	64
2.3.1 Verteilungs- und Dichtefunktionen	64
Eindimensionale Zufallsgrößen	64
Mehrdimensionale Zufallsgrößen	66
Stochastische Prozesse	67
Stationäre stochastische Prozesse	68
2.3.2 Mittelwerte, Ergodizität	69
Mittelwerte von Zufallsgrößen	69
Mittelwerte von Prozessen	72
Zeitliche Mittelwerte von Realisierungen	72
Ergodizität	73
Messtechnische Aspekte ergodischer Prozesse	74
2.3.3 Korrelationsrechnung	77
Abhängigkeit von Zufallsgrößen	77
Kovarianz- und Autokorrelationsfunktion	79
AKF einzelner Signale (Realisierungen)	81
AKF einer Cosinus- bzw. Sinusfunktion	83

	Kreuzkorrelationsfunktion	84
	Systemreaktion linearer zeitinvarianter Systeme	86
	Korrelationsfunktion von Energiesignalen	88
2.3.4	GAUSS- oder Normalverteilung	90
	Eindimensionale Normalverteilung	90
	Mehrdimensionale Normalverteilung	92
	Normalverteilte stochastische Prozesse	94
2.3.5	Nulldurchgangs-Analyse	95
	Nulldurchgangs-Dichte	95
	Zusammenhang zur Dichtefunktion	96
	Nulldurchgangs-Histogramm	97
	Praktische Ausführung	97
Literatur		98
3	Beschreibung von Signalen im Frequenzbereich	99
3.1	Einführung	99
	3.1.1 Entstehung und Bedeutung der Spektralanalyse	99
	3.1.2 Aufbau des Kapitels	101
3.2	FOURIER-Analyse periodischer Funktionen	102
	3.2.1 Reelle FOURIER-Reihe	102
	3.2.2 Komplexe FOURIER-Reihe	105
	3.2.3 Betrags- und Phasenspektrum. Beispiele	107
	Betrags- und Phasenspektrum	107
	Beispiel 1: Rechteckimpulsfolge	110
	Beispiel 2: Kammfunktion	112
	3.2.4 Autokorrelationsfunktion einer FOURIER-Reihe	113
	3.2.5 Anwendung auf abgetastete periodische Funktionen (DFT)	115
	Transformationsgleichungen	115
	Weitere Eigenschaften der DFT	118
	Beispiel 1: Rechteckimpulsfolge	120
	Beispiel 2: Vokalspektren	123
	3.2.6 Anwendung auf bandbegrenzte periodische Funktionen	125
	Periodische Signale mit bandbegrenztem Spektrum	125
	Beweis des Abtasttheorems für periodische Signale	126
	Modifikation für geradzahlige Werte von N	127
	3.2.7 Schnelle FOURIER-Transformation (FFT)	128
	Historische Vorbemerkung	128
	Ansatz der FFT	129
	DIT- und DIF-Algorithmus	131
	3.2.8 Praktische Anwendung der DFT/FFT	134
	Folgen der endlichen Abtastwertezahl. Fensterung	134
	Lattenzauneffekt	135
	Zero padding	137
3.3	FOURIER-Analyse nichtperiodischer Funktionen	139

3.3.1	Die FOURIER-Transformation	139
	Transformationsgleichungen	139
	FOURIER-Integrierbarkeit. LAPLACE-Transformation	141
	Nutzung der Symmetrieeigenschaft	143
3.3.2	Spektrale Amplitudendichte. Beispiele	144
	Betrags- und Phasenspektrum	144
	Beispiel 1: Rechteckimpuls und idealer Tiefpass	146
	Beispiel 2: DIRAC-Impuls	149
	Beispiel 3: Cosinusfunktion. Verallgemeinerung	149
	Beispiel 4: Kammfunktion	150
	Beispiel 5: Sprungfunktion	151
	Anwendung auf Testsignale	152
3.3.3	Anwendung auf abgetastete nichtperiodische Funktionen (DTFT)	153
	Transformationsgleichungen	153
	Frequenznormierung	154
	Betrags- und Phasenspektrum	155
	Beispiel 1: Rechteckimpuls	156
	Beispiel 2: Sprungfunktion	157
	Übergang zur z -Transformation	159
3.3.4	Anwendung auf bandbegrenzte nichtperiodische Funktionen	160
	Signale mit bandbegrenztem Spektrum	160
	Folgerungen aus der Abtastung	161
	Beweis des Abtasttheorems	162
3.4	Zusammenhänge und Sätze	164
3.4.1	Zusammenfassende Übersicht	164
3.4.2	Zusammenhänge zwischen den Transformationen	165
	Nichtperiodische Signale	165
	Periodische Signale	167
	Periodische Fortsetzung im Zeitbereich	168
	Beispiel. Abtasttheorem im Frequenzbereich	174
	Periodische Fortsetzung von Abtastfolgen	176
	Zusammenfassung	176
3.4.3	Sätze	177
	Übersicht	177
	Verschiebungssatz	178
	Faltungssatz	178
3.4.4	Anwendungen des Faltungssatzes	182
	Systemreaktion im Frequenzbereich	182
	Faltung zweier Spaltfunktionen	183
	FOURIER-Transformierte abgetasteter Signale	183
	Fensterfunktionen	185
3.4.5	GIBBSSches Phänomen	188
	Verhalten einer FOURIER-Reihe an Sprungstellen	188

	Berechnung der Approximationsfunktion	189
	Berechnung des Überschwingverhaltens	191
3.4.6	Spektrale Leistung und Energie	193
	Periodische Signale. PARSEVALsche Gleichung	193
	Nichtperiodische Signale. PLANCHERELSche Formel	195
	Verallgemeinerung. Anwendungsbeispiel	196
	Beziehungen mit Korrelationsfunktionen	197
3.5	FOURIER-Analyse von stationären Zufallssignalen	198
3.5.1	Leistungsdichte- und Leistungsspektrum	198
	Übertragungsverhalten linearer zeitinvarianter Systeme	198
	WIENER-CHINČIN-Theorem	201
	Eigenschaften des Leistungsdichtespektrums	202
	Schätzung des Leistungsdichtespektrums	204
	Schätzung des Leistungsspektrums (Periodogramm) . .	207
3.5.2	Rauschsignale	210
	Weißes Rauschen	210
	Weißes Bandpassrauschen	211
	$1/f^n$ -Rauschen	212
	Rosa Bandpassrauschen	214
Literatur		217
4	Einführung in Digitalfilter	219
4.1	Grundlagen	219
4.1.1	Aufgabenstellung	219
	Einführendes Beispiel	219
	Entwicklungsablauf	220
4.1.2	z -Transformation	222
	Abbildung der komplexen Frequenzebene	222
	z -Transformation als LAURENT-Reihe	223
	Ein- und zweiseitige z -Transformation	223
4.1.3	Berechnung von z -Transformierten	224
	Berechnung mit Hilfe von Summenformeln	224
	Fortsetzung von DTFT-Transformierten	225
	Rücktransformation	225
4.2	Entwurf digitaler Filter	227
4.2.1	Definition der Filterparameter	227
	Filtertypen	227
	Tiefpass-Toleranzschema. ČEBYŠEV-Polynome	227
4.2.2	Übertragungsfunktion des Analogfilters	229
	Standard-Tiefpassapproximation	229
	Transformation in andere Filtertypen	231
4.2.3	Übertragungsfunktion des Digitalfilters	231
	Transformation der Übertragungsfunktionen	231
	Beispiel 1: Tiefpass 1. Ordnung	233
	Abbildungseigenschaften der Bilineartransformation .	234

Beispiel 2: Vorgegebenes Toleranzschema	236
Filterentwurf im Zeitbereich	237
Transformation von Partialbruchzerlegungen	239
4.3 Realisierung digitaler Filter	240
4.3.1 Signalflussdiagramme digitaler Filter	240
Darstellung der Übertragungsfunktion	240
Nichtkanonische Direktform	242
Kanonische Direktformen	243
Biquadsektionen	244
4.3.2 Spezielle Filterstrukturen	246
Feedback-Anteil. AR-Filter	246
Feedforward-Anteil. MA-Filter	246
Kombination. ARMA-Filter	247
4.3.3 Realisierung von FIR-Filttern mit Fensterverfahren	248
4.4 Multiraten-Signalverarbeitung	250
4.4.1 Abtastraten-Konvertierung	250
Aufgabenstellung	250
Verringerung um einen ganzzahligen Faktor	252
Erhöhung um einen ganzzahligen Faktor	252
Veränderung um ein rationales Verhältnis	254
4.4.2 Digitale Zweikanal-Filterbank	255
Aufgabenstellung	255
Berechnung der Übertragungsfunktionen	256
Verallgemeinerungen	258
Literatur	258
5 Analyse nichtstationärer Signale	259
5.1 Nichtstationäre Signale	259
5.1.1 Problem	259
Einführendes Beispiel	259
Lokalisation von Aufbaufunktionen	260
5.1.2 Charakterisierung nichtstationärer Signale	262
Realisierungen nichtstationärer Prozesse	262
Momentanfrequenz	263
Beispiel: Gleitsinus	264
5.1.3 Quasistationäre Signale	265
Quasistationarität und Kurzzeit-AKF	265
Kurzzeit-AKF eines Sprachsignals	267
5.2 Kurzzeit-Spektralanalyse	267
5.2.1 Fensterung und Kurzzeitspektrum	267
Zeitfensterung	267
Kurzzeit-FOURIER-Transformation (STFT)	270
Weitere Transformationsgleichungen	272
Eigenschaften	273
5.2.2 Darstellung des Kurzzeitspektrums (Spektrogramm)	278

5.2.3	Beschreibungsmöglichkeiten der Unschärfe	279
	Zeitgesetz der Nachrichtentechnik	279
	Standardabweichung eines GAUSS-Impulses	281
	Klassische Form der Unschärferelation	282
	Unschärferelation der Informationstechnik	284
5.2.4	Folgerungen	285
	Unzulänglichkeiten der STFT	285
	Alternativen zur STFT	286
5.3	Filterbank-Analyse	289
5.3.1	Filterbank-Strukturen	289
	Analyse-Filterbänke	289
	Kennwerte von Filterbank-Kanälen	289
5.3.2	Ausführungen von Analyse-Filterbänken	291
	Konstante absolute Bandbreite	291
	Konstante relative Bandbreite	291
	Frequenzgruppen-Filterbänke	293
5.4	Wavelet-Transformation	294
5.4.1	Aufbaufunktionen und Transformationsgleichungen	294
	Wavelets als Aufbaufunktionen	294
	Transformationsgleichungen	297
	Zeit-Frequenz-Auflösung	298
5.4.2	Praktische Durchführung der WT	300
	Diskrete Wavelet-Transformation (DWT)	300
	Interpretation durch Detailsignale	301
	Zwei-Skalen-Relation und Filterstruktur	303
5.4.3	Erzeugung von Wavelets	308
	Erzeugung über Filterkoeffizienten	308
	Beispiel: DAUBECHIES-Wavelets	309
	Erzeugung aus Verteilungsdichtefunktionen	311
5.4.4	Das Skalogramm	311
	Skalogramme von Testfunktionen	311
	Beispiel	313
Literatur		316
6	Analytische Signale	319
6.1	Spektralanalyse komplexwertiger Signale	319
6.1.1	FOURIER-Transformation komplexwertiger Signale	319
6.1.2	Zuordnungssatz	320
6.2	Analytische Signale. HILBERT-Transformation	322
6.2.1	Folgerungen aus der CAUCHYSchen Integralformel	322
6.2.2	HILBERT-Transformierte	324
	Transformationsgleichung	324
	Berechnung im Frequenzbereich	325
	Besonderheiten kausaler Signale	326
	Anwendung auf zeitdiskrete Signale	328

6.3	Anwendungen	329
6.3.1	Realisierbare Übertragungsfunktionen	329
Zeitkontinuierliche Systeme	329	
Zeitdiskrete Systeme	331	
6.3.2	Berechnung von FOURIER-Transformierten	332
6.3.3	Berechnung von Hülkurven	332
6.3.4	Abtasttheorem für Bandpass-Signale	334
Bandpass- und Tiefpass-Signal	334	
Samplingreihe	336	
Gewinnung der Quadratursignale	336	
Literatur	337	
7	Modellierung von Signalen	339
7.1	Leistungsspektrum und Cepstrum	339
7.1.1	Komplexes Cepstrum	339
Motivation und Begriffsbildung	339	
Das komplexe Cepstrum	341	
7.1.2	Reelles Cepstrum	342
Cepstrum zeitkontinuierlicher Signale	342	
Cepstrum zeitdiskreter Signale	342	
Anwendungsbeispiele	343	
7.1.3	Modellierung stationärer Signale	345
Synthese- und Analysefilter	345	
MA- und AR-Modell	346	
7.2	Optimale Signalverarbeitung	349
7.2.1	Optimalfiltertheorie	349
Aufgabe	349	
WIENER-HOPFSche Integralgleichung	351	
Lösung der Integralgleichung	353	
Anwendung auf zeitdiskrete Signale	355	
7.2.2	Vorhersagefilter (Prädiktoren)	357
Motivation	357	
Prädiktion zeitkontinuierlicher Signale	358	
Prädiktion zeitdiskreter Signale	358	
Anwendung zur Schätzung von Modellparametern	360	
Zusammenhang zum Cepstrum	362	
Prädiktionsfehler. Spektrale Flachheit	362	
7.3	Anwendung der linearen Prädiktion auf nichtstationäre Signale	363
7.3.1	Linear Prediction Coding (LPC)	363
Quasistationärer Ansatz	363	
Einführendes Beispiel	365	
Modellspektrum	367	
Fehler- und Anregungssignal	370	
7.3.2	Anwendungen	371
Überblick	371	

Redundanzarme Signalcodierung	372
7.3.3 Praktische Berechnung der Prädiktorkoeffizienten	374
Kovarianzmethode	374
Autokorrelationsmethode	374
LEVINSON-DURBIN-Rekursion	375
Bedeutung der PARCOR-Koeffizienten	378
Literatur	379
Index	381