

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Signale im Kommunikationsprozeß	1
1.2	Signalverarbeitung als Disziplin	2
1.3	Modellierung von Signalen	3
1.3.1	Meßtechnische Erfassung von Signalen	3
1.3.2	Beispiel: Sprachsignal	4
1.3.3	Mathematische Signalmodelle	6
	Gültigkeitsbereich	6
	Deterministische, stochastische und unscharfe Modelle	7
	Signal und System. Parametrische Signalmodelle . . .	8
1.4	Klassen von Signalen. Notation	10
1.4.1	Einteilung	10
1.4.2	Notation	12
1.4.3	Dimensionen. Maße und Pegel	12
1.5	Aufbau des Buches	13
2	Beschreibung von Signalen im Zeitbereich	15
2.1	Signaloperationen	15
2.1.1	Operationen auf Signalmengen	15
	Allgemeines	15
	Signalsräume, Skalarprodukt und Norm	16
	Interpretation der Norm	17
2.1.2	Abtastung	18
	Modellvorstellung	18
	Zur Anwendung der Delta-Distribution	19
	DİRAC-Impuls und Impulsfläche	21
2.1.3	Faltung	22
	Systemreaktion linearer zeitinvarianter Systeme	22
	Regeln der Faltungsoperation	22
	Signalverschiebung	23
	Diskrete Faltung	23
	Systemreaktion bei harmonischer Anregung	24
2.2	Reihendarstellungen von Signalen	25

2.2.1	Signalinterpolation und -approximation	25
	Begriffe	25
	LAGRANGESche Interpolation	26
2.2.2	Reihenentwicklung nach orthogonalen Funktionen . .	27
	Ansatz	27
	Approximationsfehler	28
	Energiebeziehung	29
	Anwendung auf zeitdiskrete Signale	30
	Verallgemeinerung	30
2.2.3	Samplingreihe und Signalrekonstruktion	31
	Interpolation bei äquidistanten Abtastwerten	31
	Spaltfunktion als Aufbaufunktion	32
	Das Abtasttheorem	33
	Tiefpaß-Rekonstruktion	35
2.2.4	Eigenschaften der Samplingreihe	36
	Samplingreihe als Faltungsprodukt	36
	Samplingreihe als Orthogonalreihe	38
	Folgerung: Energie zeitdiskreter Signale	39
	Samplingreihe für periodische Signale	39
	Folgerung: Energie zeitdiskreter periodischer Signale .	42
2.3	Statistische Signalbeschreibung	44
2.3.1	Verteilungs- und Dichtefunktion. Mittelwerte	44
	Verteilungs- und Dichtefunktion	44
	Stationarität	46
	Meßtechnische Interpretation	47
	Erwartungs- und Mittelwerte. Ergodizität	48
	GAUSS- oder Normalverteilung	52
2.3.2	Korrelations- und Autokorrelationsfunktion	54
	Korrelationsfunktion	54
	Autokorrelationsfunktion	56
	AKF einer Cosinus- bzw. Sinusfunktion	57
	Korrelationsfunktion zeitdiskreter Signale	58
	Korrelationsfunktion von Energiesignalen	58
	Systemreaktion linearer zeitinvarianter Systeme	59
2.3.3	Nulldurchgangs-Analyse	60
	Nulldurchgangs-Dichte	60
	Zusammenhang zur Dichtefunktion	61
	Nulldurchgangs-Histogramm	62
	Praktische Ausführung	62
3	Beschreibung von Signalen im Frequenzbereich	63
3.1	Einführung	63
3.1.1	Entstehung und Bedeutung der Spektralanalyse	63
3.1.2	Aufbau des Kapitels	65
3.2	FOURIER-Analyse periodischer Funktionen	66

3.2.1	Reelle FOURIER-Reihe	66
3.2.2	Komplexe FOURIER-Reihe	68
3.2.3	Betrags- und Phasenspektrum. Beispiele	69
	Betrags- und Phasenspektrum	69
	Beispiel 1: Rechteckimpulsfolge	70
	Beispiel 2: Kammfunktion	72
3.2.4	Autokorrelationsfunktion einer FOURIER-Reihe	73
3.2.5	Anwendung auf abgetastete periodische Funktionen (DFT)	75
	Transformationsgleichungen	75
	Eigenschaften der DFT	77
	Beispiel 1: Rechteckimpulsfolge	78
	Beispiel 2: Vokalspektren	81
	Folgerungen aus nicht periodensynchroner Abtastung	81
3.2.6	Anwendung auf bandbegrenzte periodische Funktionen	84
	Periodische, bandbegrenzte Signale	84
	Beweis des Abtasttheorems für periodische Signale	84
	Modifikation für beliebige Werte von N	85
3.2.7	Schnelle FOURIER-Transformation	87
	Ansatz	87
	DIT- und DIF-Algorithmus	88
3.3	FOURIER-Analyse nichtperiodischer Funktionen	91
3.3.1	Das FOURIER-Integral	91
	Transformationsgleichungen	91
	Berechnungsverfahren	92
	FOURIER-Integrierbarkeit. LAPLACE-Transformation	94
3.3.2	Spektrale Amplitudendichte. Beispiele	95
	Betrags- und Phasenspektrum	95
	Beispiel 1: Rechteck- und DIRAC-Impuls	97
	Beispiel 2: Cosinusfunktion. Verallgemeinerung	98
	Beispiel 3: Sprungfunktion	99
	Beispiel 4: Kammfunktion	100
	Anwendung auf Testsignale	101
3.3.3	Anwendung auf abgetastete nichtperiodische Funktionen (DTFT)	102
	Transformationsgleichungen	102
	Frequenznormierung	103
	Betrags- und Phasenspektrum	104
	Beispiel 1: Rechteckimpuls	105
	Beispiel 2: Sprungfunktion	106
	Übergang zur z -Transformation	107
3.3.4	Anwendung auf bandbegrenzte nichtperiodische Funktionen	109
	Signale mit bandbegrenztem Spektrum	109

	Folgerungen aus der Abtastung	110
	Beweis des Abtasttheorems	110
3.4	Zusammenhänge und Sätze	112
3.4.1	Übersicht	112
3.4.2	Zusammenhänge zwischen den Transformationen . . .	114
	Nichtperiodische Signale	114
	Periodische Signale	116
	Periodische Fortsetzung im Zeitbereich	117
	Beispiel. Abtasttheorem im Frequenzbereich	122
	Periodische Fortsetzung von Abtastfolgen	124
	Zusammenfassung	124
3.4.3	Sätze	125
	Übersicht	125
	Verschiebungssatz	125
	Faltungssatz	126
3.4.4	Anwendungen des Faltungssatzes	128
	Systemreaktion im Frequenzbereich	128
	Faltung zweier Spaltfunktionen	131
	FOURIER-Transformierte abgetasteter Signale	131
	Fensterfunktionen	132
3.4.5	PARSEVALSche Gleichung	136
3.4.6	GIBBSsches Phänomen	138
	Verhalten einer FOURIER-Reihe an Sprungstellen . . .	138
	Berechnung der Approximationsfunktion	139
	Berechnung des Überschwingverhaltens	141
4	Einführung in Digitalfilter	143
4.1	Grundlagen	143
4.1.1	z -Transformation	143
	Digitalfilter und z -Transformation	143
	Abbildung der komplexen Frequenzebene	144
	z -Transformation als LAURENT-Reihe	145
	Ein- und zweiseitige z -Transformation	145
4.1.2	Berechnung von z -Transformierten	146
	Berechnung mit Hilfe von Summenformeln	146
	Fortsetzung von DTFT-Transformierten	146
4.1.3	Grundstrukturen von Digitalfiltern	148
	Normal- oder Direktformen	148
	IIR- und FIR-Filter	150
	AR-, MA- und ARMA-Filter	152
	Biquadsektionen	153
4.2	Filterentwurf	153
4.2.1	Grundlagen	153
	Aufgabe des Filterentwurfs	153
	Toleranzschemata. ČEBYŠEV-Polynome	154

	Standard-Tiefpaßapproximation	155
	Transformation in andere Filtertypen	157
4.2.2	IIR-Filterentwurf im Frequenzbereich	157
	Bilineartransformation	157
	Transformation der Partialbruchzerlegungen	159
	Beispiele	159
4.2.3	IIR-Filterentwurf im Zeitbereich	163
	Methode der invarianten Impulsantwort	163
	Methode der invarianten Sprungantwort	163
4.2.4	FIR-Filterentwurf mit Fensterverfahren	164
	Algorithmus	164
	Diskussion	166
5	Analyse nichtstationärer Signale	167
5.1	Nichtstationäre Signale	167
5.1.1	Problem	167
	Einführendes Beispiel	167
	Ursache	168
5.1.2	Charakterisierung nichtstationärer Signale	170
	Definition	170
	Momentanfrequenz	171
	Beispiel: Gleitsinus	171
5.1.3	Quasistationäre Signale	174
	Quasistationarität und Kurzzeit-AKF	174
	Kurzzeit-AKF eines Sprachsignals	174
5.2	Kurzzeit-Spektralanalyse	176
5.2.1	Fensterung und Kurzzeitspektrum	176
	Zeitfensterung	176
	Kurzzeit-FOURIER-Transformation (STFT)	177
	Aufbaufunktionen der STFT	179
	Weitere Transformationsgleichungen	180
	Eigenschaften	180
5.2.2	Beschreibungsmöglichkeiten der Unschärfe	186
	Zeitgesetz der Nachrichtentechnik	186
	Standardabweichung eines GAUSS-Impulses	188
	Unschärferelation	188
	Folgerungen für die STFT	190
5.2.3	Das Spektrogramm	191
	Darstellungsmöglichkeiten	191
	Spektrogramm eines Sprachsignals	192
5.3	Filterbank-Analyse	194
5.3.1	Filterbank-Strukturen	194
	Zweikanal-Digitalfilterbank	194
	Verallgemeinerungen und Modifikationen	197
5.3.2	Eigenschaften von Analyse-Filterbänken	197

	Kanalaufteilung	197
	Ausgangssignal eines Filterkanals	199
	Effektivwertbildung	202
5.4	Wavelet-Transformation	203
5.4.1	Basisfunktionen und Definition	203
	Wavelets als Basisfunktionen	203
	Transformationsgleichungen der WT	204
	Zeit-Frequenz-Auflösung	205
5.4.2	Praktische Durchführung der WT	207
	Diskrete Wavelet-Transformation (DWT)	207
	MRA-Interpretation	209
	Zwei-Skalen-Relation und Filterstruktur	211
	Weiterführende Hinweise	212
5.4.3	Erzeugung von Wavelets	215
	Erzeugung über Filterkoeffizienten	215
	Beispiel: DAUBECHIES-Wavelets	216
	Erzeugung aus Verteilungsdichtefunktionen	217
5.4.4	Das Scalogramm. Beispiele	219
6	Spezialgebiete im Kurzbericht	223
6.1	HILBERT-Transformation	223
6.1.1	Definition und Berechnungsmöglichkeiten	223
	Motivation	223
	Folgerungen aus der CAUCHYschen Integralformel	224
	HILBERT-Transformierte. Analytisches Signal	225
	Berechnung im Frequenzbereich	226
6.1.2	Zuordnungssatz	228
	Zerlegung einer Funktion	228
	Besonderheiten kausaler und analytischer Signale	228
6.1.3	Anwendungen	231
	Realisierbare Übertragungsfaktoren	231
	Berechnung von FOURIER-Transformierten	232
	Berechnung von Hüllkurven	233
	Abtasttheorem für Bandpaßsignale	235
6.1.4	Diskrete HILBERT-Transformation	235
	Kausale zeitdiskrete Signale	235
	Realisierbare Übertragungsfaktoren	236
6.2	Leistungsspektrum und Cepstrum	237
6.2.1	Das Leistungsspektrum	237
	Technische Leistungsdichte	237
	Leistungsdichtespektrum	238
6.2.2	WIENER-CHINČIN-Theorem	238
	Energiedichtespektrum und Impuls-AKF	238
	Leistungsdichtespektrum und AKF	239
	Kreuzleistungsspektrum und KKF	241

6.2.3	Anwendungsbeispiele	242
	Übertragungsverhalten linearer zeitinvarianter Systeme	242
	AKF des weißen Rauschens	243
	AKF des Bandpaßrauschens	243
6.2.4	Cepstrum	244
	Motivation und Begriffsbildung	244
	Komplexes und reelles Cepstrum	246
	Cepstrum zeitdiskreter Signale	247
	Anwendungsbeispiele	248
6.2.5	Modellierung stationärer Signale	250
	Synthese- und Analysefilter	250
	MA- und AR-Modell	251
6.3	Optimale Signalverarbeitung	254
6.3.1	Optimalfiltertheorie	254
	Aufgabe	254
	WIENER-HOPFSche Integralgleichung	256
	Lösung der Integralgleichung	257
	Anwendung auf zeitdiskrete Signale	259
6.3.2	Vorhersagefilter (Prädiktoren)	261
	Motivation	261
	Prädiktion zeitkontinuierlicher Signale	262
	Prädiktion zeitdiskreter Signale	262
	Anwendung zur Schätzung von Modellparametern	264
	Zusammenhang zum Cepstrum	266
	Prädiktionsfehler, Spektrale Flachheit	266
6.4	Anwendung der linearen Prädiktion auf nichtstationäre Signale	267
6.4.1	Linear Prediction Coding (LPC)	267
	Quasistationärer Ansatz	267
	Einführendes Beispiel	269
	Modellspektrum	271
	Fehler- und Anregungssignal	274
6.4.2	Anwendungen	274
	Überblick	274
	Redundanzarme Signalcodierung	275
6.4.3	Praktische Berechnung der Prädiktorkoeffizienten	277
	Kovarianzmethode	277
	Autokorrelationsmethode	278
	LEVINSON-DURBIN-Rekursion	279
	Bedeutung der PARCOR-Koeffizienten	281
7	Grundlagen der Klassifikation	283
7.1	Grundbegriffe	283
7.1.1	Klasseneinteilung einer Signalmenge	283
7.1.2	Merkmalvektor und Merkmalraum	284
	Merkmalvektoren	284

	Merkmalraum. Abstandsfunktion	284
	MINKOWSKI-Norm	286
	Beispiel	288
7.1.3	Klasseneinteilung des Merkmalraums	291
	Kompaktheitshypothese	291
	Partitionierung des Merkmalraums. Lernstichprobe . .	291
	Kompliziertheit, Separierbarkeit	292
7.1.4	Elemente von Klassifikatoren	294
	Bezeichnungen. Blockschaltbild	294
	Entscheidungsfindung	295
	Modellwissen	296
7.1.5	Beurteilung von Klassifikatoren	296
	Teststichprobe. Verwechslungsmatrix	296
	Kostenmatrix. Risiko	297
	Erweiterte Verwechslungsmatrix. Equal Error Rate . .	298
7.2	Der Abstandsklassifikator	299
7.2.1	Ansatz	299
7.2.2	Vereinfachung der Unterscheidungsfunktion	300
7.2.3	Beispiel	301
7.2.4	Verallgemeinerungen	304
	Linear-Klassifikator	304
	Zweiklassenproblem. Neuronenmodell	304
7.3	Statistische Klassifikatoren	306
7.3.1	Ansatz	306
	Statistische Problembeschreibung	306
	Entscheidungsregeln	307
	Fehlerwahrscheinlichkeit	308
7.3.2	BAYES-Klassifikator mit normalverteilten Merkmal- vektoren	310
	Approximation der Dichtefunktion	310
	Unterscheidungsfunktion	310
	Beispiel	311
	Übereinstimmende Kovarianzmatrizen	314
	BAYESScher Abstandsklassifikator	315
	MAHALANOBIS-Abstandsklassifikator	315
7.3.3	Anwendung weiterer Verteilungsfunktionen	316
7.3.4	Klassifikator mit minimalem Risiko	316
	Kostenfunktion. Risiko	316
	Minimierung des Risikos. BOK-AK	318
	Symmetrische Kostenfunktion. BOK-SK	319
7.4	Verallgemeinerungen	320
7.4.1	Allgemeines Entscheidungsproblem	320
7.4.2	Mehrstufige Entscheidungsprobleme	321
7.4.3	Mehrkrterielle Entscheidungsprobleme	321

8	Modellanpassung, Adaption und Lernen	323
8.1	Modellanpassung	323
8.1.1	Beispiele	323
8.1.2	Wissenserwerb, Lernen und Adaption	324
	Referenzwissen	324
	Lernen und Adaption	325
	Systematisierung der Lernverfahren	325
8.2	Ausgewählte Lernalgorithmen	328
8.2.1	Serieller Perzeptron-Lernalgorithmus	328
	Aufgabe und Algorithmus	328
	Konvergenzbeweis	330
	Beispiel	331
8.2.2	Gradientenverfahren	333
	Prinzip	333
	Adaline	334
	Beispiel	336
8.2.3	Regressionsverfahren	336
	Einführendes Beispiel	336
	Regressionsansatz	339
	Optimalität des Regressionsklassifikators	340
	Analytisches Lösungsverfahren	341
	Algorithmisches Lösungsverfahren	342
	Regel von ROBBINS und MONRO	343
	Hinweis zur Merkmalstransformation $\tilde{f}$	343
8.3	Clustering und Vektorquantisierung	345
8.3.1	Cluster-Analyse	345
	Prinzip und Anwendungsgebiete	345
	Einteilungskriterien	346
	Iterative Top-down-Clustering	347
	Iterative Bottom-up-Clustering	347
8.3.2	Vektorquantisierung	350
9	Spezielle Klassifikatoren	353
9.1	Neuronale Netze	353
9.1.1	Grundbegriffe	353
	Einführendes Beispiel	353
	Neuronentypen	355
	Netzwerktopologien	359
9.1.2	Einsatzmöglichkeiten	361
9.1.3	Mehrschichtiges Perzeptron	362
	Aufbau und Anwendung	362
	Lernen mit Fehler-Rückverfolgung	363
	Beispiele	366
9.2	Unscharfe Klassifikatoren	370
9.2.1	Zugehörigkeit	370

9.2.2	Das Konzept unscharfer Mengen	371
	Scharfe und unscharfe Mengen	371
	Zugehörigkeitsfunktionen	371
	Rechenregeln für unscharfe Mengen	373
9.2.3	Modellierung von Zugehörigkeitsfunktionen	374
	Modellierung durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen	374
	Modellierung durch Potentialfunktionen	375
9.2.4	Verknüpfung von Zugehörigkeitsfunktionen	376
	Aufgaben	376
	Disjunktive und konjunktive Verknüpfungen	378
	Aggregation von Zugehörigkeitsfunktionen	379
9.3	Klassifikatoren für Folgen	381
9.3.1	Grundlagen	381
	Erkennung strukturierter Objekte	381
	Darstellung von Folgen durch Graphen	382
	Endlicher Automat als Quellenmodell	383
	Mehrstufige Entscheidungsprozesse	384
	Prinzip der dynamischen Programmierung	386
	Blockschaltbild eines Erkennungssystems	389
9.3.2	Abstandsklassifikation von Folgen	390
	Ansatz	390
	Dynamische Zeitanpassung	390
9.3.3	Statistische Modellierung von Folgen	393
	MARKOV-Modelle	393
	Stochastischer MEALY-Automat (HMM)	396
9.3.4	Maximum-Likelihood-Klassifikation von Folgen	399
	Emissionswahrscheinlichkeit einer Folge	399
	VITERBI-Algorithmus	400
	Forward-Algorithmus	401
	Lernen der Modellparameter	401
	Anwendung von HMM	402
9.3.5	BAYES-Klassifikation von Folgen	403
	Methode	403
	Perplexität	403
	Literaturverzeichnis	405
	Register	413