

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Beschreibung von Signalen im Zeitbereich</b>	<b>23</b>
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 Orthogonalreihe .....	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
<b>3</b>	<b>Beschreibung von Signalen im Frequenzbereich . . . . .</b>	<b>99</b>
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 Überswingverhaltens . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Einführung in Digitalfilter . . . . .</b>	<b>219</b>
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	Signalfussdiagramme 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-Filtern 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
<b>5</b>	<b>Analyse nichtstationärer Signale . . . . .</b>	<b>259</b>
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
<b>6</b>	<b>Analytische Signale . . . . .</b>	<b>319</b>
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 Hüllkurven . . . . .	332
6.3.4	Abtasttheorem für Bandpass-Signale . . . . .	334
	Bandpass- und Tiefpass-Signal . . . . .	334
	Samplingreihe . . . . .	336
	Gewinnung der Quadratursignale . . . . .	336
	Literatur . . . . .	337
<b>7</b>	<b>Modellierung von Signalen . . . . .</b>	<b>339</b>
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
<b>Index</b>	.....	<b>381</b>



<http://www.springer.com/978-3-662-45322-3>

Intelligente Signalverarbeitung 1

Signalanalyse

Hoffmann, R.; Wolff, M.

2014, XX, 387 S. 50 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-45322-3