

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Determinierte Signale in linearen zeitinvarianten Systemen</b>	1
1.1 Elementarsignale	1
1.2 Zum Begriff des Systems	5
1.3 Lineare zeitinvariante Systeme	6
1.4 Das Faltungsintegral	7
1.5 Beispiel zur Berechnung des Faltungsintegrals	10
1.6 Faltungsalgebra	13
1.7 Dirac-Impuls	16
1.7.1 Gewicht und Linearkombination von Dirac-Impulsen	16
1.7.2 Siebeigenschaft des Dirac-Impulses	17
1.7.3 Dirac-Impuls mit Dehnungsfaktor	19
1.7.4 Verschiebung des Dirac-Impulses	19
1.7.5 Integration des Dirac-Impulses	20
1.8 Integration und Differentiation von Signalen	21
1.9 Kausale und stabile Systeme	23
1.10 Zusammenfassung	24
1.11 Aufgaben	24
<b>2. Fourier-Transformation</b>	29
2.1 Eigenfunktionen von LTI-Systemen	29
2.2 Das Fourier-Integral	30
2.3 Beispiel Fourier-Transformation des Exponentialimpulses	33
2.4 Symmetrien im Signal und im Fourier-Spektrum	36
2.5 Theoreme zur Fourier-Transformation	39
2.5.1 Superpositionssatz	39
2.5.2 Ähnlichkeitssatz	41
2.5.3 Verschiebungssatz	42
2.5.4 Differentiation	42
2.5.5 Symmetrie der Fourier-Transformation	43
2.5.6 Faltung und Multiplikation	44
2.6 Beispiele zur Anwendung der Theoreme	44
2.6.1 Die Fourier-Transformierte des rect-Impulses	44
2.6.2 Die Fourier-Transformierte des Dreieckimpulses	46

2.6.3	Berechnung des Faltungsproduktes der si-Funktion mit sich selbst .....	47
2.7	Transformation singulärer Signalfunktionen .....	47
2.7.1	Transformation von Dirac-Impulsen .....	47
2.7.2	Transformation der Dirac-Impulsfolge .....	49
2.7.3	Transformation der Sprungfunktion .....	51
2.8	Hilbert-Transformation .....	54
2.9	Kurzzeit-Fourier-Transformation .....	56
2.10	Fourier- und Laplace-Transformation .....	58
2.11	Zusammenfassung .....	61
2.12	Anhang .....	62
2.12.1	Tabellen zur Fourier-Transformation .....	62
2.12.2	Transformation der Dirac-Impulsfolge .....	64
2.12.3	Mehrrechteckige Faltung des Rechteckimpulses .....	66
2.13	Aufgaben .....	67
<b>3.</b>	<b>Diskrete Signale und Systeme .....</b>	<b>73</b>
3.1	Abtastung im Zeitbereich .....	74
3.2	Abtastung im Frequenzbereich .....	79
3.3	Zeitdiskrete Signale und Systeme .....	84
3.3.1	Diskrete Faltung .....	84
3.3.2	Zeitdiskrete Elementarsignale .....	86
3.3.3	Lineare verschiebungsinvariante Systeme .....	88
3.3.4	Beispiel zur diskreten Faltung .....	88
3.3.5	Fourier-Transformation zeitdiskreter Signale .....	90
3.3.6	Beispiel 1: Spektrum des zeitdiskreten Exponentialimpulses .....	92
3.3.7	Beispiel 2: Übertragungsaufgabe .....	92
3.3.8	Die diskrete Fourier-Transformation .....	94
3.3.9	Dezimation und Interpolation .....	97
3.3.10	$z$ -Transformation .....	102
3.4	Zusammenfassung .....	104
3.5	Anhang .....	106
3.6	Aufgaben .....	108
<b>4.</b>	<b>Korrelationsfunktionen determinierter Signale .....</b>	<b>115</b>
4.1	Energie und Leistung von Signalen .....	115
4.2	Impulskorrelationsfunktion für Energiesignale .....	116
4.3	Korrelationsprodukt und Faltungsprodukt .....	118
4.4	Fourier-Transformation der Impulskorrelationsfunktionen .....	121
4.5	Impulskorrelationsfunktionen und LTI-Systeme .....	124
4.6	Impulskorrelationsfunktionen zeitdiskreter Signale .....	126
4.7	Zusammenfassung .....	128
4.8	Aufgaben .....	129

<b>5. Systemtheorie der Tiefpass- und Bandpasssysteme</b> . . . . .	133
5.1 Das verzerrungsfreie System . . . . .	133
5.2 Tiefpasssysteme . . . . .	135
5.2.1 Der ideale Tiefpass . . . . .	135
5.2.2 Tiefpasssysteme mit nichtidealener Übertragungsfunktion . . . . .	141
5.3 Zeitdiskrete Tiefpasssysteme . . . . .	148
5.4 Bandpasssysteme und Bandpasssignale . . . . .	150
5.4.1 Der ideale Bandpass . . . . .	150
5.4.2 Bandpasssystem und äquivalentes Tiefpasssystem . . . . .	150
5.4.3 Komplexe Signaldarstellung . . . . .	153
5.4.4 Übertragung von Bandpasssignalen über Bandpasssysteme . . . . .	155
5.4.5 Übertragung des eingeschalteten cos-Signals über den idealen Bandpass . . . . .	156
5.4.6 Realisierung von Bandpasssystemen durch Tiefpasssysteme . . . . .	158
5.4.7 Phasen- und Gruppenlaufzeit . . . . .	164
5.4.8 Zeitdiskrete Bandpass- und Hochpasssysteme . . . . .	166
5.5 Zusammenfassung . . . . .	167
5.6 Anhang . . . . .	168
5.7 Aufgaben . . . . .	169
<b>6. Statistische Signalbeschreibung</b> . . . . .	173
6.1 Beschreibung von Zufallssignalen durch Mittelwerte . . . . .	173
6.1.1 Der Zufallsprozess . . . . .	173
6.1.2 Stationarität und Ergodizität . . . . .	176
6.1.3 Mittelwerte 1. Ordnung . . . . .	178
6.1.4 Autokorrelationsfunktion stationärer Prozesse . . . . .	179
6.1.5 Kreuzkorrelationsfunktion stationärer Prozesse . . . . .	181
6.2 Zufallssignale in LTI-Systemen . . . . .	182
6.2.1 Linearer Mittelwert . . . . .	183
6.2.2 Quadratischer Mittelwert und Autokorrelationsfunktion . . . . .	183
6.2.3 Leistungsdichtespektrum . . . . .	185
6.2.4 Weißes Rauschen . . . . .	186
6.2.5 Korrelationsfilter-Empfang gestörter Signale . . . . .	188
6.3 Verteilungsfunktionen . . . . .	193
6.3.1 Verteilungsfunktion und Wahrscheinlichkeit . . . . .	193
6.3.2 Verteilungsdichtefunktion . . . . .	195
6.3.3 Verbundverteilungsfunktion . . . . .	198
6.3.4 Statistische Unabhängigkeit . . . . .	200
6.4 Gauß-Verteilungen . . . . .	202
6.4.1 Verteilungsdichtefunktion der Summe von Zufallsgrößen . . . . .	202

6.4.2	Gauß-Verteilung . . . . .	204
6.4.3	Gauß-Prozess und LTI-Systeme . . . . .	205
6.4.4	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Korrelationsfilter- Empfang gestörter Binärsignale . . . . .	207
6.5	Zeitdiskrete Zufallssignale . . . . .	212
6.5.1	Abtastung von Zufallssignalen . . . . .	212
6.5.2	Der zeitdiskrete Zufallsprozess . . . . .	212
6.5.3	Zeitmittelwerte . . . . .	214
6.5.4	Zeitdiskrete Zufallssignale in LSI-Systemen . . . . .	215
6.5.5	Beispiel: Filterung von zeitdiskretem weißen Rauschen . . . . .	216
6.6	Zusammenfassung . . . . .	218
6.7	Anhang . . . . .	219
6.7.1	Kennlinientransformationen von Amplitudenwerten . .	219
6.7.2	Gauß-Verbundverteilung . . . . .	224
6.7.3	Fehlerfunktion . . . . .	226
6.8	Aufgaben . . . . .	229
7.	<b>Binärübertragung</b> . . . . .	235
7.1	Allgemeine und digitale Übertragungssysteme . . . . .	237
7.2	Binärübertragung mit Tiefpasssignalen . . . . .	238
7.2.1	Übertragung von Binärsignalfolgen . . . . .	238
7.2.2	Das 1. Nyquist-Kriterium . . . . .	242
7.2.3	Bipolare Übertragung . . . . .	245
7.2.4	Korrelative Codierung . . . . .	248
7.2.5	Übertragung mit zwei Trägersignalformen . . . . .	249
7.2.6	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Übertragung mit zwei orthogonalen Signalen . . . . .	252
7.2.7	Mehrpegelübertragung . . . . .	256
7.2.8	Adaptive Kanalentzerrung . . . . .	260
7.3	Binärübertragung mit Bandpasssignalen . . . . .	261
7.3.1	Übertragungsarten . . . . .	261
7.3.2	Korrelationsfunktionen von Bandpasssignalen . . . . .	262
7.3.3	Empfang von Bandpasssignalen im Tiefpassbereich .	265
7.3.4	Inkohärenter Empfang von Bandpasssignalen . . . . .	266
7.3.5	Fehlerwahrscheinlichkeit bei inkohärentem Empfang von Bandpassträgersignalen . . . . .	269
7.3.6	Bandpassrauschen und Rayleigh-Verteilung . . . . .	272
7.3.7	Phasenumtastung und Quadraturmodulation . . . . .	274
7.3.8	Synchronisation . . . . .	285
7.4	Pulscodemodulation (PCM) . . . . .	288
7.4.1	Verfahren der Pulscodemodulation . . . . .	289
7.4.2	Quantisierungsrauschen . . . . .	291
7.4.3	Übertragungsfehler in PCM-Systemen . . . . .	293
7.4.4	PCM-Codierung mit Gedächtnis . . . . .	296

7.5	Zusammenfassung	298
7.6	Anhang: Rice-Verteilung	299
7.7	Aufgaben	300
<b>8.</b>	<b>Modulation, Multiplex und Codierung</b>	<b>305</b>
8.1	Lineare Modulationsverfahren	306
8.1.1	Pulsamplitudenmodulation	306
8.1.2	PAM-Übertragung mit Bandpasssträgersignalen	308
8.1.3	Amplitudenmodulation	308
8.1.4	Inkohärenter Empfang in AM-Systemen	311
8.1.5	Einseitenband-Amplitudenmodulation	314
8.1.6	Störverhalten der linearen Modulationsverfahren	316
8.2	Winkelmodulationsverfahren	318
8.2.1	Phasen- und Frequenzmodulation	319
8.2.2	Spektrum eines FM-Signals	321
8.2.3	Empfang von FM-Signalen	324
8.2.4	Störverhalten der FM-Übertragung	325
8.3	Multiplex-Übertragung	329
8.3.1	Multiplex-Übertragung mit Pulsamplitudenmodulation	329
8.3.2	Zeitmultiplex-Übertragung	332
8.3.3	Frequenzmultiplex-Übertragung	333
8.3.4	Codemultiplex-Übertragung	335
8.3.5	Raummultiplex-Verfahren, Diversitätsübertragung und MIMO-Systeme	349
8.3.6	Vielfachträger-Modulationsverfahren und OFDM	354
8.4	Begriffe der Informationstheorie	360
8.4.1	Diskrete Nachrichtenquellen	360
8.4.2	Kontinuierliche Nachrichtenquellen	365
8.4.3	Kanalcodierung	366
8.4.4	Codierte Modulation	370
8.4.5	Kanalkapazität	372
8.4.6	Die Kanalkapazität des Gauß-Kanals	373
8.4.7	Die Shannon-Grenze bei digitaler Übertragung	376
8.4.8	Ideale Übertragungssysteme mit Bandbreitedehnung	378
8.5	Zusammenfassung	382
8.6	Anhang	382
8.6.1	Mehrwegeempfang in Mobilfunkkanälen	382
8.6.2	Zur Charakterisierung von MIMO-Kanälen	386
8.7	Aufgaben	388

<b>9. Zusatzübungen</b> .....	395
9.1 Orthogonalentwicklung .....	395
9.2 Signalraum .....	397
9.3 Matched-Filter bei farbigem Rauschen .....	401
9.4 Frequenzumtastung mit nichtkohärentem Empfang .....	403
9.5 Deltamodulation und Differenz-Pulscodemodulation .....	405
9.6 Optimaler Quantisierer .....	406
9.7 Radarempfänger .....	409
9.8 Störverhalten von AM-Systemen .....	412
9.9 Digitale Übertragung mit $M$ orthogonalen Trägersignalen und die Shannon-Grenze .....	414
<b>10. Entwicklung der Nachrichtentechnik</b> .....	423
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	426
<b>Symbolverzeichnis und Abkürzungen</b> .....	435
<b>Sachverzeichnis</b> .....	439