

# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil A: Signale und Systeme .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Determinierte Signale in linearen zeitinvarianten Systemen .....</b>	<b>3</b>
1.1 Elementarsignale .....	3
1.2 Analyse eines elektrischen Systems mittels Elementarfunktionen .....	7
1.3 Zum Begriff des Systems .....	11
1.4 Lineare zeitinvariante Systeme .....	12
1.5 Das Faltungsintegral .....	13
1.6 Beispiel zur Berechnung des Faltungsintegrals .....	16
1.7 Faltungsalgebra .....	18
1.8 Dirac-Impuls .....	21
1.8.1 Gewicht und Linearkombination von Dirac-Impulsen ..	22
1.8.2 Siebeigenschaft des Dirac-Impulses .....	23
1.8.3 Dirac-Impuls mit Dehnungsfaktor .....	24
1.8.4 Verschiebung des Dirac-Impulses .....	25
1.8.5 Integration des Dirac-Impulses .....	26
1.9 Integration und Differentiation von Signalen .....	27
1.10 Kausale und stabile Systeme .....	29
1.11 Zusammenfassung .....	30
1.12 Aufgaben .....	30
<b>2. Laplace-Transformation .....</b>	<b>35</b>
2.1 Eigenfunktionen von LTI-Systemen .....	35
2.2 Beispiele zur Laplace-Transformation .....	36
2.3 Pole und Nullstellen in der komplexen $p$ -Ebene .....	40
2.4 Lösung von Differentialgleichungen mittels $\mathcal{L}$ -Transformation ..	43
2.5 Stabilitätsanalyse von Systemen .....	48
2.6 Systemanalyse und -synthese mittels $\mathcal{L}$ -Transformation .....	49
2.7 Zusammenfassung .....	53
2.8 Anhang: Tabellen zur Laplace-Transformation .....	54
2.9 Aufgaben .....	54

<b>3. Fourier-Beschreibung von Signalen und Systemen</b> .....	57
3.1 Periodische Eigenfunktionen .....	57
3.2 Fourier-Reihenanalyse .....	58
3.3 Das Fourier-Integral .....	66
3.4 Beispiel: Fourier-Transformation des Exponentialimpulses .....	69
3.5 Symmetrien im Signal und im Fourier-Spektrum .....	70
3.6 Theoreme zur Fourier-Transformation .....	73
3.6.1 Superpositionssatz .....	73
3.6.2 Ähnlichkeitssatz .....	74
3.6.3 Verschiebungssatz .....	75
3.6.4 Differentiation .....	76
3.6.5 Symmetrie der Fourier-Transformation .....	77
3.6.6 Faltung und Multiplikation .....	78
3.7 Beispiele zur Anwendung der Theoreme .....	79
3.7.1 Die Fourier-Transformierte des rect-Impulses .....	79
3.7.2 Die Fourier-Transformierte des Dreieckimpulses .....	81
3.7.3 Berechnung des Faltungsproduktes der si-Funktion mit sich selbst .....	81
3.8 Transformation singulärer Signalfunktionen .....	81
3.8.1 Transformation von Dirac-Impulsen .....	81
3.8.2 Transformation der Dirac-Impulsfolge .....	84
3.8.3 Transformation der Sprungfunktion .....	86
3.9 Hilbert-Transformation .....	89
3.10 Kurzzeit-Fourier-Transformation .....	92
3.11 Fourier- und Laplace-Transformation .....	93
3.12 Zusammenfassung .....	96
3.13 Anhang .....	96
3.13.1 Transformation der Dirac-Impulsfolge .....	96
3.13.2 Mehrfache Faltung des Rechteckimpulses .....	98
3.13.3 Tabellen zur Fourier-Transformation .....	100
3.14 Aufgaben .....	102
<b>4. Diskrete Signale und Systeme</b> .....	109
4.1 Abtastung im Zeitbereich .....	110
4.2 Abtastung im Frequenzbereich .....	116
4.3 Zeitdiskrete Signale und Systeme .....	119
4.3.1 Diskrete Faltung .....	119
4.3.2 Zeitdiskrete Elementarsignale .....	121
4.3.3 Lineare verschiebungsinvariante Systeme .....	122
4.3.4 Beispiel zur diskreten Faltung .....	124
4.3.5 Fourier-Transformation zeitdiskreter Signale .....	126
4.3.6 Die diskrete Fourier-Transformation .....	130
4.3.7 Schnelle Fourier-Transformation und schnelle Faltung .....	132
4.3.8 Dezimation und Interpolation .....	134
4.3.9 z-Transformation .....	140

4.4	Zusammenfassung .....	150
4.5	Anhang: Tabellen zu Transformationen .....	151
4.6	Aufgaben .....	154
<b>5.</b>	<b>Systemtheorie der Tiefpass- und Bandpasssysteme .....</b>	<b>163</b>
5.1	Das verzerrungsfreie System .....	163
5.2	Tiefpasssysteme .....	165
5.2.1	Der ideale Tiefpass .....	165
5.2.2	Tiefpasssysteme mit nichtidealener Übertragungsfunktion .....	171
5.3	Zeitdiskrete Tiefpasssysteme .....	176
5.4	Bandpasssysteme und Bandpasssignale .....	178
5.4.1	Der ideale Bandpass .....	178
5.4.2	Bandpasssystem und äquivalentes Tiefpasssystem .....	179
5.4.3	Komplexe Signaldarstellung .....	182
5.4.4	Übertragung von Bandpasssignalen über Bandpasssysteme .....	184
5.4.5	Übertragung des eingeschalteten $\cos$ -Signals über den idealen Bandpass .....	185
5.4.6	Realisierung von Bandpasssystemen durch Tiefpasssysteme .....	186
5.4.7	Phasen- und Gruppenlaufzeit .....	192
5.4.8	Zeitdiskrete Bandpass- und Hochpasssysteme .....	194
5.5	Zusammenfassung .....	195
5.6	Anhang: Integration von $\text{si}(\pi x)$ .....	197
5.7	Aufgaben .....	197
<b>6.</b>	<b>Korrelationsfunktionen determinierter Signale .....</b>	<b>203</b>
6.1	Energie und Leistung von Signalen .....	203
6.2	Impulskorrelationsfunktion für Energiesignale .....	204
6.3	Korrelationsprodukt und Faltungsprodukt .....	206
6.4	Fourier-Transformation der Impulskorrelationsfunktionen .....	208
6.5	Impulskorrelationsfunktionen und LTI-Systeme .....	212
6.6	Korrelationsfunktionen von Bandpasssignalen .....	214
6.7	Impulskorrelationsfunktionen zeitdiskreter Signale .....	214
6.8	Zusammenfassung .....	217
6.9	Aufgaben .....	217
<b>7.</b>	<b>Statistische Signalbeschreibung .....</b>	<b>223</b>
7.1	Beschreibung von Zufallssignalen durch Mittelwerte .....	223
7.1.1	Der Zufallsprozess .....	223
7.1.2	Stationarität und Ergodizität .....	226
7.1.3	Mittelwerte 1. Ordnung .....	228
7.1.4	Autokorrelationsfunktion stationärer Prozesse .....	229
7.1.5	Kreuzkorrelationsfunktion stationärer Prozesse .....	231

7.2	Zufallssignale in LTI-Systemen . . . . .	233
7.2.1	Linearer Mittelwert . . . . .	233
7.2.2	Quadratischer Mittelwert und Autokorrelationsfunktion . . . . .	233
7.2.3	Leistungsdichtespektrum . . . . .	235
7.2.4	Weißes Rauschen . . . . .	236
7.2.5	Korrelationsfilter-Empfang gestörter Signale . . . . .	238
7.3	Verteilungsfunktionen . . . . .	243
7.3.1	Verteilungsfunktion und Wahrscheinlichkeit . . . . .	243
7.3.2	Verteilungsdichtefunktion . . . . .	245
7.3.3	Verbundverteilungsfunktion . . . . .	248
7.3.4	Statistische Unabhängigkeit . . . . .	250
7.4	Gauß-Verteilungen . . . . .	252
7.4.1	Verteilungsdichtefunktion der Summe von Zufallsgrößen . . . . .	252
7.4.2	Gauß-Verteilung . . . . .	254
7.4.3	Gauß-Prozess und LTI-Systeme . . . . .	255
7.4.4	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Korrelationsfilter- Empfang gestörter Binärsignale . . . . .	257
7.5	Zeitdiskrete Zufallssignale . . . . .	262
7.5.1	Abtastung von Zufallssignalen . . . . .	262
7.5.2	Der zeitdiskrete Zufallsprozess . . . . .	262
7.5.3	Zeitmittelwerte . . . . .	264
7.5.4	Zeitdiskrete Zufallssignale in LSI-Systemen . . . . .	265
7.5.5	Beispiel: Filterung von zeitdiskretem weißen Rauschen . . . . .	266
7.6	Zusammenfassung . . . . .	269
7.7	Anhang . . . . .	270
7.7.1	Kennlinientransformationen von Amplitudenwerten . . . . .	270
7.7.2	Gauß-Verbundverteilung . . . . .	275
7.7.3	Fehlerfunktion . . . . .	277
7.8	Aufgaben . . . . .	280
<b>Teil B: Informationsübertragung . . . . .</b>		287
8.	<b>Binärübertragung mit Tiefpasssignalen . . . . .</b>	289
8.1	Allgemeine und digitale Übertragungssysteme . . . . .	290
8.2	Übertragung von Binärsignalfolgen . . . . .	292
8.3	Das 1. Nyquist-Kriterium . . . . .	295
8.4	Bipolare Übertragung . . . . .	298
8.5	Korrelative Codierung . . . . .	301
8.6	Übertragung mit zwei Trägersignalformen . . . . .	303
8.7	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Übertragung mit zwei orthogonalen Signalen . . . . .	306
8.8	Mehrpegelübertragung . . . . .	309

8.9	Adaptive Kanalentzerrung . . . . .	313
8.10	Zusammenfassung . . . . .	314
8.11	Aufgaben . . . . .	315
<b>9.</b>	<b>Binärübertragung mit Bandpasssignalen . . . . .</b>	<b>317</b>
9.1	Übertragungsarten bei der Binärübertragung mit Bandpasssignalen . . . . .	318
9.2	Empfang von Bandpasssignalen im Tiefpassbereich . . . . .	319
9.3	Inkohärenter Empfang von Bandpasssignalen . . . . .	323
9.4	Fehlerwahrscheinlichkeit bei inkohärentem Empfang . . . . .	325
9.5	Bandpassrauschen und Rayleigh-Verteilung . . . . .	329
9.6	Phasenumtastung und Quadraturmodulation . . . . .	331
9.7	Synchronisation . . . . .	342
9.8	Zusammenfassung . . . . .	345
9.9	Anhang . . . . .	345
9.9.1	Rice-Verteilung . . . . .	345
9.9.2	Mehrwegeempfang in Mobilfunkkanälen . . . . .	347
9.10	Aufgaben . . . . .	350
<b>10.</b>	<b>Analoge Modulationsverfahren . . . . .</b>	<b>353</b>
10.1	Lineare Modulationsverfahren . . . . .	353
10.1.1	Pulsamplitudenmodulation . . . . .	353
10.1.2	PAM-Übertragung mit Bandpassträgersignalen . . . . .	355
10.1.3	Amplitudenmodulation . . . . .	356
10.1.4	Inkohärenter Empfang in AM-Systemen . . . . .	359
10.1.5	Einseitenband-Amplitudenmodulation . . . . .	361
10.1.6	Störverhalten der linearen Modulationsverfahren . . . . .	364
10.2	Winkelmodulationsverfahren . . . . .	366
10.2.1	Phasen- und Frequenzmodulation . . . . .	366
10.2.2	Spektrum eines FM-Signals . . . . .	368
10.2.3	Empfang von FM-Signalen . . . . .	371
10.2.4	Störverhalten der FM-Übertragung . . . . .	372
10.3	Zusammenfassung . . . . .	377
10.4	Aufgaben . . . . .	377
<b>11.</b>	<b>Multiplexverfahren . . . . .</b>	<b>381</b>
11.1	Multiplex-Übertragung mit Pulsamplitudenmodulation . . . . .	381
11.2	Zeitmultiplex-Übertragung . . . . .	383
11.3	Frequenzmultiplex-Übertragung . . . . .	385
11.4	Codemultiplex-Übertragung . . . . .	387
11.4.1	Direct-Sequence-CDMA . . . . .	388
11.4.2	Walsh-Multiplexsystem . . . . .	392
11.4.3	Asynchrone Multiplexsysteme . . . . .	393
11.4.4	Pseudonoise-Folgen . . . . .	394

11.4.5 Familie der Gold-Folgen .....	396
11.4.6 Frequenzsprungverfahren .....	398
11.4.7 Optimierung von DS-CDMA-Empfängern .....	399
11.5 Raummultiplex-Verfahren, Diversitätsübertragung und MIMO-Systeme .....	401
11.6 Vielfachträger-Modulationsverfahren und OFDM .....	405
11.7 Zusammenfassung .....	411
11.8 Aufgaben .....	412
<b>12. Codierung .....</b>	<b>415</b>
12.1 Verfahren der Pulscodemodulation (PCM) .....	415
12.1.1 Quantisierungsrauschen .....	418
12.1.2 Übertragungsfehler in PCM-Systemen .....	420
12.2 Quellencodierung .....	422
12.2.1 Diskrete Nachrichtenquellen .....	423
12.2.2 Kontinuierliche Nachrichtenquellen .....	428
12.2.3 Rate-Distortion-Funktion für korrelierte Prozesse .....	430
12.2.4 Prädiktionscodierung .....	433
12.2.5 Transformationscodierung .....	437
12.3 Kanalcodierung .....	441
12.4 Codierte Modulation .....	445
12.5 Zusammenfassung .....	448
12.6 Aufgaben .....	448
<b>13. Grenzen der Informationsübertragung .....</b>	<b>451</b>
13.1 Kanalkapazität .....	451
13.2 Die Kanalkapazität des Gauß-Kanals .....	452
13.3 Die Shannon-Grenze bei digitaler Übertragung .....	454
13.4 Ideale Übertragungssysteme mit Bandbreiteverzehr .....	457
13.4.1 Amplitudenmodulationsverfahren .....	458
13.4.2 Frequenzmodulationsverfahren .....	459
13.4.3 Pulscodemodulation .....	459
13.5 Zusammenfassung .....	461
13.6 Anhang: Übertragungsgrenzen von MIMO-Kanälen .....	461
13.7 Aufgaben .....	463
<b>14. Zusatzübungen .....</b>	<b>465</b>
14.1 Orthogonale Entwicklung .....	465
14.2 Signalraum .....	467
14.3 Matched-Filter bei farbigem Rauschen .....	471
14.4 Frequenzumtastung mit nichtkohärentem Empfang .....	473
14.5 Deltamodulation und Differenz-Pulscodemodulation .....	475
14.6 Optimaler Quantisierer .....	476
14.7 Leitungstheorie .....	479
14.8 Störverhalten von AM-Systemen .....	484

14.9 Digitale Übertragung mit $M$ orthogonalen Trägersignalen und die Shannon-Grenze .....	487
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>494</b>
<b>Symbolverzeichnis und Abkürzungen .....</b>	<b>503</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>507</b>