

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Signale und Übertragungssysteme</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Systemtheoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1	Begriffe und Beziehungen aus der Systemtheorie . . . . .	3
1.1.1	Deterministische Signale . . . . .	3
1.1.2	Stochastische Signale . . . . .	6
1.1.3	Übungen . . . . .	9
1.2	Hilberttransformation . . . . .	24
1.2.1	Eigenschaften . . . . .	25
1.2.2	Übungen . . . . .	26
1.3	Darstellung reeller Bandpaßsignale im äquivalenten Tiefpaßbereich	36
1.3.1	Analytische Signale und komplexe Einhüllende . . . . .	36
1.3.2	Übungen . . . . .	38
1.4	Äquivalente Tiefpaß-Darstellung stationärer Bandpaß-Rauschprozesse	47
1.4.1	Komplexe Autokorrelationsfunktion, Leistungsdichtespektrum	47
1.4.2	Übungen . . . . .	49
<b>2</b>	<b>Kanalmodellierung</b>	<b>57</b>
2.1	AWGN-Kanal . . . . .	57
2.2	Kanäle mit linearen Verzerrungen . . . . .	60
2.2.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	60
2.2.2	Übungen . . . . .	62
2.3	Mobilfunkkanäle . . . . .	69

2.3.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	69
2.3.2	Übungen . . . . .	74
2.4	Diskrete Kanäle . . . . .	86
2.4.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	86
2.4.2	Übungen . . . . .	91
<b>II</b>	<b>Analoge Modulation</b>	<b>101</b>
<b>3</b>	<b>Darstellung analoger Modulationsverfahren</b>	<b>103</b>
3.1	Beschreibung im Zeitbereich . . . . .	103
3.1.1	Tiefpaß-Darstellung analoger Kommunikationssysteme . . .	103
3.1.2	Definition analoger Modulationsformen . . . . .	106
3.1.3	Übungen . . . . .	108
3.2	Spektraleigenschaften analoger Modulationssignale . . . . .	117
3.2.1	Lineare Modulationsformen . . . . .	117
3.2.2	Nichtlineare Modulationsformen . . . . .	118
3.2.3	Übungen . . . . .	119
3.3	Demodulation . . . . .	129
3.3.1	Übersicht kohärenter und inkohärenter Demodulationsverfahren . . . . .	129
3.3.2	Übungen . . . . .	132
<b>4</b>	<b>Einflüsse von Übertragungskanälen</b>	<b>141</b>
4.1	Lineare Kanalverzerrungen . . . . .	141
4.1.1	Lineare Modulationsformen . . . . .	142
4.1.2	Nichtlineare Modulationsformen . . . . .	144
4.1.3	Übungen . . . . .	145
4.2	Additives Rauschen . . . . .	152
4.2.1	Rauschspektren am Empfängereingang . . . . .	152
4.2.2	Signal-Störverhältnis nach der Demodulation . . . . .	154
4.2.3	Übungen . . . . .	156

Inhaltsverzeichnis	VII
<b>III Digitale Übertragung</b>	<b>165</b>
<b>5 Grundelemente der Datentübertragung</b>	<b>167</b>
5.1 Nyquistbedingungen, Impulsformung . . . . .	167
5.1.1 Intersymbolinterferenz . . . . .	170
5.1.2 Spektrum eines Datensignals . . . . .	171
5.1.3 Übungen . . . . .	172
5.2 Einfluß von Rauschen, Matched Filter . . . . .	182
5.2.1 Matched Filter . . . . .	184
5.2.2 Bitfehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	185
5.2.3 Übungen . . . . .	186
5.3 Partial-Response-Übertragung . . . . .	192
5.3.1 Partial-Response-Codierung . . . . .	192
5.3.2 Partial-Response-Vorcodierung . . . . .	193
5.3.3 Übungen . . . . .	195
<b>6 Digitale Modulation</b>	<b>205</b>
6.1 Lineare Modulationsformen . . . . .	205
6.1.1 Offset-QPSK . . . . .	207
6.1.2 Differentielles PSK . . . . .	208
6.1.3 Übungen . . . . .	209
6.2 Continuous-Phase-Modulation . . . . .	215
6.2.1 Frequency Shift Keying (FSK) . . . . .	215
6.2.2 MSK und GMSK . . . . .	216
6.2.3 REC- und RC-Signale . . . . .	217
6.2.4 Übungen . . . . .	218
6.3 Spektraleigenschaften . . . . .	227
6.3.1 Lineare Modulationsformen . . . . .	227
6.3.2 Continuous-Phase-Signale . . . . .	227
6.3.3 Übungen . . . . .	228
6.4 Demodulationsverfahren . . . . .	233
6.4.1 Trägerregelung zur kohärenten Demodulation . . . . .	233
6.4.2 Kohärenter MSK-Demodulator . . . . .	235

6.4.3	Lineares Modell für nichtlineare CPM-Signale . . . . .	236
6.4.4	Inkohärente Demodulation . . . . .	238
6.4.5	Übungen . . . . .	240
6.5	Symbol- und Bitfehlerwahrscheinlichkeiten . . . . .	253
6.5.1	Gray-Codierung, Symbol- und Bitfehler . . . . .	253
6.5.2	AWGN-Kanal . . . . .	256
6.5.3	Schwundkanäle . . . . .	261
6.5.4	Übungen . . . . .	263
<b>7</b>	<b>Entzerrung</b>	<b>273</b>
7.1	Entzerrerstrukturen . . . . .	273
7.1.1	Symboltakt-Entzerrer . . . . .	274
7.1.2	Entzerrer mit Doppelabtastung . . . . .	278
7.1.3	Entzerrer mit quantisierter Rückführung . . . . .	281
7.1.4	Übungen . . . . .	284
7.2	Adaptive Entzerrereinstellung . . . . .	293
7.2.1	LMS-Algorithmus . . . . .	293
7.2.2	Konvergenz des LMS-Algorithmus . . . . .	296
7.2.3	Übungen . . . . .	297
7.3	Maximum-Likelihood-Schätzung von Datenfolgen . . . . .	304
7.3.1	Forney-Empfänger . . . . .	304
7.3.2	Viterbi-Algorithmus . . . . .	307
7.3.3	Fehlerverhalten des Viterbi-Entzerrers . . . . .	312
7.3.4	Übungen . . . . .	316
7.4	Kanalschätzung . . . . .	321
7.4.1	Least-Squares-Lösung . . . . .	321
7.4.2	GSM-Kanalschätzung . . . . .	323
7.4.3	Turbo-Kanalschätzung . . . . .	325
7.4.4	Übungen . . . . .	326
<b>8</b>	<b>Kanalcodierung</b>	<b>331</b>
8.1	Einführung . . . . .	331
8.2	Streifzug durch die Informationstheorie . . . . .	332

Inhaltsverzeichnis	IX
8.2.1 Informationsgehalt und Transinformation . . . . .	332
8.2.2 Berechnung der Kanalkapazität . . . . .	334
8.2.3 Übungen . . . . .	339
8.3 Grundlegendes zur Kanalcodierung . . . . .	351
8.3.1 Restklassenarithmetik . . . . .	351
8.3.2 Distanzeigenschaften von Codes . . . . .	355
8.3.3 Decodierprinzipien . . . . .	356
8.3.4 Leistungsfähigkeit von Codes . . . . .	358
8.3.5 Übungen . . . . .	361
8.4 Lineare Blockcodes . . . . .	374
8.4.1 Matrixbeschreibung von Blockcodes . . . . .	374
8.4.2 Nebenklassenzerlegung und Syndromdecodierung . . . . .	376
8.4.3 Beispiele linearer Blockcodes . . . . .	377
8.4.4 Übungen . . . . .	380
8.5 Zyklische Codes . . . . .	385
8.5.1 Beschreibung mit Generatorpolynom . . . . .	385
8.5.2 Beschreibung mit Prüfpolynom . . . . .	387
8.5.3 Bestimmung des Syndroms . . . . .	388
8.5.4 Cyclic Redundancy Check-Codes (CRC-Codes) . . . . .	389
8.5.5 Spektraltransformation auf Galoisfeldern . . . . .	390
8.5.6 Reed-Solomon-Codes . . . . .	391
8.5.7 BCH-Codes . . . . .	393
8.5.8 Decodierung von BCH- und RS-Codes . . . . .	395
8.5.9 Übungen . . . . .	397
8.6 Faltungscodes . . . . .	406
8.6.1 Aufbau des Faltungscodierers . . . . .	407
8.6.2 Graphische Beschreibung von Faltungscodes . . . . .	410
8.6.3 Punktieren von $1/n$ -rätigen Faltungscodes . . . . .	411
8.6.4 Optimale Decodierung mit Viterbi-Algorithmus . . . . .	413
8.6.5 Distanzeigenschaften und Leistungsfähigkeit . . . . .	416
8.6.6 Übungen . . . . .	418

<b>IV</b>	<b>Konzepte zur Mobilfunkübertragung</b>	<b>433</b>
<b>9</b>	<b>Verkettete Codes</b>	<b>435</b>
9.1	Einführung . . . . .	435
9.1.1	Motivation . . . . .	435
9.1.2	Vorbetrachtungen . . . . .	437
9.1.3	<i>Interleaving</i> . . . . .	438
9.1.4	Übungen . . . . .	441
9.2	Serielle Codeverkettung . . . . .	444
9.2.1	Einführung . . . . .	444
9.2.2	Distanzeigenschaften seriell verketteter Codes . . . . .	445
9.2.3	Beispiele seriell verketteter Codes . . . . .	449
9.2.4	Übungen . . . . .	451
9.3	Parallele Codeverkettung (Turbo-Codes) . . . . .	462
9.3.1	Einführung . . . . .	462
9.3.2	Distanzeigenschaften parallel verketteter Codes . . . . .	463
9.3.3	Beispiele parallel verketteter Codes . . . . .	464
9.3.4	Übungen . . . . .	467
9.4	Decodierung verketteter Codes . . . . .	472
9.4.1	Zuverlässigkeitsinformation und $L$ -Algebra . . . . .	475
9.4.2	Allgemeiner Ansatz zur <i>Soft-Output</i> -Decodierung . . . . .	478
9.4.3	BCJR-Algorithmus am Beispiel von Faltungscodes . . . . .	481
9.4.4	Iterative Decodierung verketteter Codes . . . . .	486
9.4.5	Übungen . . . . .	489
<b>10</b>	<b>Das Mehrträgerverfahren OFDM</b>	<b>505</b>
10.1	Einführung . . . . .	505
10.2	Grundprinzip des OFDM-Verfahrens . . . . .	506
10.2.1	Herleitung der DFT-Struktur . . . . .	506
10.2.2	Das Guardintervall . . . . .	509
10.2.3	Übergang auf den analogen Kanal . . . . .	511
10.2.4	Übungen . . . . .	512
10.3	OFDM-Kanalschätzung . . . . .	519

10.3.1	Rauschreduktionsalgorithmus . . . . .	519
10.3.2	Vorentzerrer zur Kompression der Impulsantwort . . . . .	521
10.3.3	Übungen . . . . .	522
<b>11</b>	<b>Codemultiplex</b>	<b>531</b>
11.1	Einführung . . . . .	531
11.2	Grundlagen . . . . .	533
11.2.1	Prinzip der spektralen Spreizung . . . . .	533
11.2.2	Spreizungssequenzen . . . . .	535
11.2.3	Übungen . . . . .	539
11.3	CDMA für frequenzselektive Kanäle . . . . .	548
11.3.1	SC-CDMA . . . . .	548
11.3.2	OFDM-CDMA . . . . .	551
11.3.3	Übungen . . . . .	554
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>563</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>572</b>