

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Grundlagen der angewandten Informationstheorie

<b>1</b>	<b>Einführung und Grundbegriffe . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1	Was versteht man unter Informationstheorie? . . . . .	3
1.2	Fundamentale Fragen der Informationstheorie . . . . .	8
1.3	Shannons Informationsmaß . . . . .	10
1.3.1	Mathematische Informationsmaße . . . . .	10
1.3.2	Wechselseitige Information . . . . .	11
1.3.3	Entropie einer Zufallsvariablen . . . . .	13
1.3.4	Mittlere wechselseitige Information . . . . .	17
1.3.5	Kettenregel der Entropie . . . . .	23
1.3.6	Kullback-Leibler-Distanz . . . . .	24
1.3.7	Zusammenfassung der wichtigsten Definitionen und Sätze . . . . .	24
1.4	Fundamentale Sätze . . . . .	25
1.4.1	Fano-Ungleichung . . . . .	25
1.4.2	Hauptsatz der Datenverarbeitung . . . . .	28
<b>2</b>	<b>Verlustlose Quellencodierung . . . . .</b>	<b>31</b>
2.1	Gedächtnisfreie Quellen . . . . .	31
2.1.1	Typische Sequenzen und asymptotische Äquipartitionseigenschaft . . . . .	32
2.1.2	Simultan Typische Sequenzen . . . . .	35
2.1.3	Shannons Quellencodiertheorem . . . . .	38
2.1.4	Präfixfreie Quellencodierung . . . . .	39
2.1.5	Huffman-Algorithmus . . . . .	43
2.1.6	Arithmetische Quellencodierung . . . . .	47
2.2	Gedächtnisbehaftete Quellen . . . . .	49
2.2.1	Markoff-Quellen . . . . .	49
2.2.2	Willems-Algorithmus . . . . .	55

---

<b>3</b>	<b>Kanalcodierung</b>	59
3.1	Wertdiskrete Kanalmodelle	59
3.1.1	Übertragungssystem mit Kanalcodierung und -decodierung	59
3.1.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten	61
3.1.3	Decodierprinzipien	63
3.1.4	Zufallscodes	65
3.1.5	Diskreter gedächtnisfreier Kanal (DMC)	66
3.1.6	Kanalkapazität	67
3.1.7	Shannons Kanalcodiertheorem	68
3.1.8	Beispiele zur Berechnung der Kanalkapazität	71
3.1.9	Bhattacharyya-Schranke	79
3.1.10	Gallager-Schranke	81
3.1.11	Gallager-Schranke für Zufallscodierung	82
3.2	Wertkontinuierliche Kanalmodelle	84
3.2.1	Differentielle Entropie	85
3.2.2	Wechselseitige Information	87
3.2.3	Zeitdiskreter Gauß-Kanal	88
3.2.4	Water-Filling-Methode	92
3.2.5	Bandbegrenzter Gauß-Kanal	93
<b>4</b>	<b>Verlustbehaftete Quellencodierung und gemeinsame Quellen- &amp; Kanalcodierung</b>	99
4.1	Rate-Distortion-Theorie	99
4.1.1	Verzerrung und Verzerrungsmaße	100
4.1.2	Shannons Rate-Distortion-Theorem	101
4.2	Gemeinsame Quellen- und Kanalcodierung	106
4.2.1	Herleitung der Rate-Distortion-Schranke	106
4.2.2	Informationstheoretische Grenzen für eine fehlerbehaftete Übertragung	107
4.2.3	Praktische Aspekte der gemeinsamen Quellen- und Kanalcodierung	109
<b>5</b>	<b>Mehrnutzer-Informationstheorie</b>	111
5.1	Vielfachzugriffskanal	111
5.2	Rundfunkkanal	119
5.3	Relaykanal	124
5.4	Interferenzkanal	129
5.5	Duplexkanal	132
<b>6</b>	<b>Netzwerkcodierung</b>	135
6.1	Prinzip der Netzwerkcodierung	135
6.2	Netzwerkcodierung zur Erhöhung des Datendurchsatzes	137

---

6.3	Netzwerkkodierung zur Erhöhung der Zuverlässigkeit . . . . .	140
6.4	Netzwerkkodierung zur Verbesserung der Datensicherheit . . . . .	141
7	<b>Kryptologie . . . . .</b>	143
7.1	Grundbegriffe der Kryptologie . . . . .	143
7.2	Shannons Theorie zur Geheimhaltung . . . . .	145
7.3	Chiffriersysteme mit öffentlichem Schlüssel . . . . .	150
7.3.1	Zwei Ergebnisse aus der Zahlentheorie . . . . .	151
7.3.2	RSA-Chiffrierverfahren . . . . .	152
7.3.3	RSA-Authentifizierungsverfahren . . . . .	153

## Teil II Grundlagen der Kanalcodierung

8	<b>Einführung und Grundbegriffe . . . . .</b>	157
9	<b>Blockcodes . . . . .</b>	161
9.1	Grundlegende Eigenschaften von Blockcodes . . . . .	161
9.1.1	Definition von Blockcodes . . . . .	161
9.1.2	Redundanz, Fehlererkennung, Fehlerkorrektur und Coderate	162
9.1.3	Systematische Codes . . . . .	164
9.1.4	Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht . . . . .	166
9.1.5	Minimaldistanz . . . . .	167
9.1.6	Eigenschaften von Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht . . . . .	167
9.1.7	Längenänderungen . . . . .	168
9.2	Lineare Blockcodes . . . . .	170
9.2.1	Definition von linearen Blockcodes . . . . .	170
9.2.2	Minimaldistanz bei linearen Codes . . . . .	170
9.2.3	Hamming-Codes . . . . .	171
9.2.4	Schranken für die Minimaldistanz . . . . .	172
9.3	Decodierung von Blockcodes . . . . .	175
9.3.1	Decodierkugeln . . . . .	175
9.3.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten . . . . .	177
9.3.3	Decodierprinzipien . . . . .	177
9.3.4	„Hard-input“-Decodierung . . . . .	181
9.3.5	„Soft-input“-Decodierung . . . . .	182
9.3.6	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur . . . . .	183
9.3.7	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „hard-input“-Decodierung	186
9.3.8	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für uncodierte Übertragung . . .	188
9.3.9	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „soft-input“-Decodierung .	190
9.3.10	Codiergewinn . . . . .	192
9.3.11	Block-Produktcodes . . . . .	192

9.4	Matrixbeschreibung von linearen Blockcodes . . . . .	194
9.4.1	Generatormatrix . . . . .	194
9.4.2	Prüfmatrix . . . . .	195
9.4.3	Duale Codes . . . . .	197
9.4.4	Syndrom und Syndromdecodierung . . . . .	198
9.4.5	Low-Density Parity-Check-Codes (LDPC-Codes) . . . . .	200
9.4.6	Tornado-Codes und Fountain-Codes . . . . .	205
9.4.7	Repeat-Accumulate-Codes (RA-Codes) . . . . .	209
9.5	Zyklische Blockcodes . . . . .	210
9.5.1	Definition von zyklischen Blockcodes . . . . .	210
9.5.2	Polynomdarstellung . . . . .	212
9.5.3	Generatorpolynom und Prüfpolynom . . . . .	212
9.5.4	Golay-Code . . . . .	217
9.5.5	CRC-Codes . . . . .	217
9.6	Primkörper und Erweiterungskörper . . . . .	218
9.6.1	Primkörper . . . . .	219
9.6.2	Erweiterungskörper . . . . .	220
9.6.3	Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	221
9.7	Reed-Solomon-Codes . . . . .	221
9.7.1	Definition I von Reed-Solomon-Codes . . . . .	221
9.7.2	Definition II von Reed-Solomon-Codes und Generatorpolynom . . . . .	224
9.7.3	Prüfpolynom . . . . .	225
9.7.4	Methoden zur Codierung von Reed-Solomon-Codes . . . . .	226
9.7.5	Paritätsfrequenzen und deren Verschiebung . . . . .	227
9.7.6	Algebraische Decodierung von Reed-Solomon-Codes . . . . .	228
10	Faltungscodes . . . . .	235
10.1	Definition von Faltungscodes . . . . .	235
10.1.1	Schieberegister-Darstellung . . . . .	235
10.1.2	Zustandsdiagramm . . . . .	236
10.1.3	Trellisdiagramm . . . . .	236
10.1.4	Codebaum . . . . .	237
10.1.5	Polynomdarstellung . . . . .	238
10.2	Optimierung von Faltungscodes . . . . .	240
10.2.1	Fehlerpfad . . . . .	240
10.2.2	Freie Distanz . . . . .	241
10.2.3	Distanzspektrum . . . . .	241
10.2.4	Berechnung des Distanzspektrums . . . . .	242
10.2.5	Schranken der Bitfehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	245
10.2.6	Codiergewinn . . . . .	246
10.2.7	Rekursive Faltungscodierer . . . . .	247

10.2.8	Zero-Tailing und Tail-Biting . . . . .	249
10.2.9	Punktierte Faltungscodes und Wiederholungscodes . . . . .	252
10.2.10	Katastrophale Faltungscodierer . . . . .	255
10.3	Decodierung von Faltungscodes . . . . .	255
10.3.1	Viterbi-Algorithmus . . . . .	256
10.3.2	List-Viterbi-Algorithmus und Soft-Output Viterbi-Algorithmus . . . . .	264
10.3.3	Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv-Algorithmus . . . . .	267
10.3.4	Stack-Algorithmus . . . . .	273
10.3.5	Sphere-Decodierung . . . . .	278
10.3.6	Dijkstra-Algorithmus . . . . .	279
10.4	Zusammenhang zwischen Faltungscodes und linearen Blockcodes . . . . .	282
10.4.1	Generatormatrix von Faltungscodes . . . . .	283
10.4.2	Trellisdarstellung von binären linearen Blockcodes . . . . .	285
11	Interleaver . . . . .	289
11.1	Blockinterleaver . . . . .	289
11.2	Faltungsinterleaver . . . . .	291
11.3	Pseudo-Zufallsinterleaver . . . . .	292
12	Verkettete Codes und iterative Decodierung . . . . .	293
12.1	Grundlagen . . . . .	294
12.1.1	Wetterproblem . . . . .	295
12.1.2	Log-Likelihood-Verhältnis . . . . .	295
12.1.3	Symmetrieeigenschaften von Log-Likelihood-Werten . . . . .	302
12.1.4	Weiche Bits . . . . .	304
12.1.5	Zusammenhang zwischen Log-Likelihood-Werten und Kanalkapazität . . . . .	306
12.1.6	Soft-Simulation . . . . .	307
12.2	Verkettete Codes . . . . .	309
12.2.1	Seriell verkettete Codes . . . . .	309
12.2.2	Parallel verkette Codes („Turbo-Codes“) . . . . .	311
12.3	Iterative Decodierung . . . . .	316
12.3.1	Turbo-Prinzip . . . . .	317
12.3.2	Belief-Propagation-Algorithmus . . . . .	319
12.4	Analysemethoden zum Konvergenzverhalten verketteter Codes . . . . .	325
12.4.1	EXIT-Chart-Analyse . . . . .	326
12.4.2	VT-Chart-Analyse . . . . .	341
12.4.3	Density Evolution . . . . .	342
12.4.4	IPC-Analyse . . . . .	345

**Teil III Digitale Modulations- und Übertragungsverfahren**

<b>13 Einführung und Grundbegriffe . . . . .</b>	<b>351</b>
13.1 Signale im Zeit- und Frequenzbereich . . . . .	351
13.2 Basisband- und Bandpasssignale . . . . .	352
13.3 Quadraturmodulation und -demodulation . . . . .	353
13.4 Analog-Digital-Wandlung . . . . .	354
13.4.1 Von analogen zu digitalen Signalen . . . . .	354
13.4.2 Abtastsatz und Tiefpass-Abtasttheorem (Diskretisierung) . . . . .	355
13.4.3 Pulscodemodulation (Quantisierung) . . . . .	359
13.4.4 A/D- und D/A-Wandlung . . . . .	360
13.4.5 Quantisierungsfehler . . . . .	361
13.4.6 Verbesserung der Auflösung durch Überabtastung und Dithering . . . . .	363
13.4.7 Delta-Sigma A/D-Wandlung, 1-Bit A/D-Wandlung . . . . .	365
13.4.8 Bandpass-Abtasttheorem und Unterabtastung . . . . .	369
13.4.9 Anwendungen des Tiefpass- und Bandpass-Abtasttheorems . . . . .	372
13.4.10 Komprimierte Abtastung: Compressive Sampling . . . . .	373
13.5 Zeitkontinuierliche Kanalmodelle . . . . .	380
13.5.1 Zeitkontinuierliches AWGN-Kanalmodell . . . . .	380
13.5.2 Frequenzversatz und Phasenrauschen . . . . .	382
13.5.3 Rayleigh-Kanalmodell . . . . .	383
13.5.4 Rice-Kanalmodell . . . . .	384
<b>14 Lineare Modulationsverfahren . . . . .</b>	<b>387</b>
14.1 Definition von linearen Modulationsverfahren . . . . .	387
14.1.1 Entwurf der Signalkonstellation . . . . .	391
14.1.2 Impulsformung . . . . .	396
14.2 Signalangepasstes Filter (Matched-Filter) . . . . .	400
14.3 Trägermodulierte vs. trägerlose Übertragung . . . . .	409
14.4 Äquivalente zeitdiskrete Kanalmodelle . . . . .	410
14.4.1 Zeitdiskretes ISI-Kanalmodell . . . . .	410
14.4.2 Zeitdiskretes Kanalmodell für Frequenzversatz und Phasenrauschen . . . . .	413
14.5 Kohärente, differentiell-kohärente und inkohärente Detektion . . . . .	414
14.5.1 Kohärente Detektion . . . . .	416
14.5.2 Differentiell-kohärente Detektion . . . . .	417
14.5.3 Inkohärente Detektion . . . . .	417
14.6 Fehlerwahrscheinlichkeit von linearen Modulationsverfahren . . . . .	418
14.6.1 Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter binärer Übertragung . . . . .	418

14.6.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter $M$ -stufiger Übertragung . . . . .	423
14.7	Leistungsdichtespektrum von linearen Modulationsverfahren . . . . .	426
14.8	Leistungs-/Bandbreitediagramm . . . . .	426
14.9	Lineare Mehrträger-Modulationsverfahren . . . . .	429
14.9.1	Allgemeine lineare Mehrträger-Modulationsverfahren . . . . .	429
14.9.2	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) . . . . .	430
14.9.3	OFDM-Varianten: DMT und PAM-DMT . . . . .	439
14.9.4	Verfahren zur Reduzierung der Signalspitzenleistung . . . . .	441
14.9.5	Mehrträger-basierte Kanalzugriffsverfahren (OFDMA und Varianten) . . . . .	445
14.10	Kombinierte Modulation und Kanalcodierung . . . . .	447
14.10.1	Mehrstufencodierung . . . . .	448
14.10.2	Trelliscodierte Modulation . . . . .	449
14.10.3	Bit-Interleaved Coded Modulation . . . . .	451
14.10.4	Superpositionsmodulation . . . . .	451
15	Duplex-, Mehrfachzugriffs- und Multiplexverfahren . . . . .	465
15.1	Duplexverfahren . . . . .	465
15.1.1	Frequenzduplex (FDD) . . . . .	465
15.1.2	Zeitduplex (TDD) . . . . .	466
15.2	Mehrfachzugriffsverfahren . . . . .	466
15.2.1	Frequency-Division Multiple Access (FDMA) . . . . .	466
15.2.2	Time-Division Multiple Access (TDMA) . . . . .	467
15.2.3	Code-Division Multiple Access (CDMA) . . . . .	467
15.2.4	Space-Division Multiple Access (SDMA) . . . . .	473
15.2.5	Carrier-Sense Multiple Access (CSMA) . . . . .	473
15.3	Multiplexverfahren: FDM, TDM, CDM . . . . .	474
16	Nichtlineare Verzerrungen . . . . .	475
16.1	Systemtheoretische Grundlagen und Modellierung von Leistungsverstärkern . . . . .	475
16.1.1	Klassifizierung und analytische Beschreibung . . . . .	476
16.1.2	Modelle von nichtlinearen Leistungsverstärkern . . . . .	477
16.1.3	Definition von Signalleistungen, Aussteuerung und Crestfaktor . . . . .	479
16.1.4	Auswirkungen nichtlinearer Verzerrungen . . . . .	481
16.2	Berechnung von Leistungsdichtespektrum und Bitfehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	482
16.2.1	Signaldarstellung . . . . .	483
16.2.2	Berechnung des Leistungsdichtespektrums . . . . .	484
16.2.3	Berechnung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	484

<b>17</b>	<b>CPM-Modulationsverfahren . . . . .</b>	<b>489</b>
17.1	Definition von CPM-Modulationsverfahren . . . . .	489
17.1.1	Minimum Shift Keying (MSK) . . . . .	490
17.1.2	Continuous Phase Frequency Shift Keying (CPFSK) . . . . .	491
17.1.3	Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) . . . . .	491
17.2	Zerlegung und Linearisierung von CPM-Modulationsverfahren . . . . .	492
<b>18</b>	<b>Entzerrung . . . . .</b>	<b>499</b>
18.1	Augendiagramm, lineare Verzerrung, äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell . . . . .	499
18.1.1	Charakterisierung dispersiver Kanäle . . . . .	500
18.1.2	Systemtheoretische Grundlagen und Signalentwurf . . . . .	503
18.1.3	Nyquist-Kriterium im Zeit- und Frequenzbereich . . . . .	506
18.1.4	Signalangepasstes Filter („Matched-Filter“) . . . . .	509
18.1.5	Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit farbigem Rauschen . . . . .	510
18.1.6	Dekorrelationsfilter . . . . .	510
18.1.7	Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit weißem Rauschen . . . . .	512
18.2	Entzerrung linearer Systeme im Zeitbereich . . . . .	515
18.2.1	Lineare Entzerrung . . . . .	515
18.2.2	Entscheidungsrückgekoppelte Entzerrung . . . . .	523
18.2.3	Maximum-Likelihood-Detektion . . . . .	527
<b>19</b>	<b>Kanalschätzung . . . . .</b>	<b>533</b>
19.1	Trainingsbasierte Kanalschätzung . . . . .	533
19.1.1	„Least Squares“ Kanalschätzung . . . . .	534
19.1.2	Korrelative Kanalschätzung . . . . .	536
19.1.3	Interpolative Kanalschätzung . . . . .	538
19.1.4	Gradientenverfahren und stochastisches Gradientenverfahren . . . . .	540
19.2	Entscheidungsgestützte Kanalschätzung . . . . .	541
19.2.1	Stochastisches Gradientenverfahren mit vorläufigen Entscheidungen . . . . .	542
19.2.2	Per-survivor Processing . . . . .	542
19.3	Blinde Kanalschätzung . . . . .	543
<b>20</b>	<b>Digitale Synchronisationsverfahren . . . . .</b>	<b>545</b>
20.1	Struktur eines digitalen Empfängers . . . . .	545
20.2	Maximum-Likelihood-Synchronisation . . . . .	547
20.3	Trägerphasen- und Taktphasensynchronisation für CPM-Modulationsverfahren . . . . .	550

20.4	Trägerphasensynchronisation für PSK-Modulationsverfahren . . . . .	553
20.4.1	Entscheidungsgesteuerte Parametersuche . . . . .	554
20.4.2	Entscheidungsgesteuerte explizite Lösung . . . . .	555
20.4.3	Entscheidungsgesteuertes Nachführverfahren . . . . .	557
20.4.4	Nichtentscheidungsgesteuerte explizite Lösung . . . . .	559
20.4.5	Nichtentscheidungsgesteuertes Nachführverfahren . . . . .	560
20.5	Taktsynchronisation für PSK-Modulationsverfahren . . . . .	560
20.5.1	Taktphasendetektion . . . . .	561
20.5.2	Taktphasenkorrektur . . . . .	562
20.6	Frequenzsynchronisation für PSK-Modulationsverfahren . . . . .	563
20.6.1	Frequenzfehlerdetektion . . . . .	563
20.6.2	Frequenzkorrektur . . . . .	565

#### Teil IV Konzepte der Mobilfunkkommunikation

21	<b>Grundlagen der Mobilfunkkommunikation . . . . .</b>	569
21.1	Was ist Mobilfunkkommunikation? . . . . .	569
21.2	Klassifizierung von Mobilfunksystemen . . . . .	569
21.3	Netztopologien . . . . .	571
21.3.1	Das zellulare Konzept . . . . .	571
21.3.2	Gleichwellennetz . . . . .	573
21.3.3	Ad-hoc- und Sensornetze . . . . .	573
21.4	Beispiele für Mobilfunksysteme . . . . .	574
21.4.1	Rundfunksysteme . . . . .	574
21.4.2	Funkrufsysteme . . . . .	574
21.4.3	Betriebsfunk- und Bündelfunksysteme . . . . .	574
21.4.4	Flugfunksysteme . . . . .	575
21.4.5	Schnurlose Telefone . . . . .	575
21.4.6	Wireless PAN, Wireless LAN, Wireless MAN und Wireless RAN . . . . .	575
21.4.7	Zellulare Mobilfunksysteme . . . . .	576
21.5	OSI-Schichtenmodell . . . . .	577
22	<b>Beschreibung und Modellierung von Mobilfunkkanälen . . . . .</b>	579
22.1	Übertragungskanal und Mobilfunkszenario . . . . .	579
22.2	Phänomenologische Kanalbeschreibung . . . . .	582
22.2.1	Weltraumszenario . . . . .	582
22.2.2	Zeitinvariantes 2-Pfad-Modell . . . . .	585
22.2.3	Realistische Szenarien . . . . .	586
22.3	Stochastische Kanalmodellierung . . . . .	587
22.3.1	Zeitvariante Impulsantwort und Gewichtsfunktion . . . . .	587

22.3.2	Entfernungsabhängige Funkfelddämpfung . . . . .	589
22.3.3	Langzeit-Schwundmodelle . . . . .	590
22.3.4	Kurzzeit-Schwundmodelle . . . . .	592
<b>23</b>	<b>Diversitätsempfang, MIMO-Systeme und Space-Time-Codes . . . . .</b>	<b>605</b>
23.1	Diversitätsempfang . . . . .	605
23.2	MIMO-Systeme . . . . .	610
23.3	Kanalkapazität von MIMO-Systemen . . . . .	612
23.3.1	Kanalkapazität deterministischer MIMO-Kanäle . . . . .	613
23.3.2	Kanalkapazität ergodischer MIMO-Kanäle . . . . .	615
23.3.3	Kanalkapazität nichtergodischer MIMO-Kanäle (Outage-Kanalkapazität) . . . . .	616
23.4	Raum-Zeit-Codes . . . . .	617
23.4.1	„Delay-Diversity“ . . . . .	617
23.4.2	Raum-Zeit-Blockcodes . . . . .	618
23.4.3	„Bell Labs Layered Space-Time (BLAST)“-Architekturen . . . . .	621
<b>24</b>	<b>DS-CDMA-Empfängerkonzepte . . . . .</b>	<b>625</b>
24.1	Mehrnutzerdetektion für DS-CDMA-Systeme . . . . .	625
24.1.1	Spreizsequenzen: Eigenschaften und Familien . . . . .	626
24.1.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit ohne Mehrnutzerdetektion . . . . .	629
24.1.3	Modellierung von Mehrnutzerinterferenz . . . . .	633
24.1.4	Klassifizierung von Mehrnutzer-Empfängern . . . . .	636
24.2	Rake-Empfänger für DS-CDMA-Systeme . . . . .	639
<b>25</b>	<b>Verfahren zur Verkürzung einer Kanalimpulsantwort . . . . .</b>	<b>643</b>
25.1	Empfängerstrukturen . . . . .	643
25.2	Minimalphasigkeit, Maximalphasigkeit, Gemischtphasigkeit . . . . .	644
25.3	Vorfilter zur Erzeugung einer minimalphasigen Impulsantwort . . . . .	645
25.3.1	Wurzelsuche . . . . .	645
25.3.2	Spektrale Faktorisierung . . . . .	647
25.4	Vorfilter zur Verkürzung einer Impulsantwort . . . . .	651
<b>26</b>	<b>Trellisbasierte Entzerrung mit Zustandsreduktion . . . . .</b>	<b>655</b>
26.1	Motivation . . . . .	655
26.2	Zweigmetrik ohne Zustandsreduktion . . . . .	656
26.3	Zustandsreduktion durch Entscheidungsrückkopplung . . . . .	656
26.4	Zustandsreduktion durch „set-partitioning“ . . . . .	657
<b>27</b>	<b>Gleichkanalinterferenzunterdrückung . . . . .</b>	<b>661</b>
27.1	Motivation . . . . .	661
27.2	Äquivalentes zeitdiskretes CCI-Kanalmodell . . . . .	662
27.3	Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (MLSE-Detektor) . . . . .	662

---

27.4	Joint-Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (JMLSE-Detektor) . . . . .	664
27.5	Kanalschätzung zur Gleichkanalinterferenzunterdrückung . . . . .	667
27.5.1	Joint-Least-Squares Kanalschätzung . . . . .	667
27.5.2	Semi-blinde Kanalschätzung . . . . .	668
28	<b>Senderseitige Signalverarbeitung: Vorcodierung und Strahlformung</b> . . . . .	671
28.1	Lineare Vercodierung . . . . .	672
28.1.1	SVD-basierte Vercodierung . . . . .	672
28.1.2	ZF-Vercodierung . . . . .	673
28.1.3	MMSE-Vercodierung . . . . .	674
28.2	Nichtlineare Vercodierung . . . . .	674
28.2.1	„Writing on Dirty-Paper“-Konzept . . . . .	674
28.2.2	Tomlinson-Harashima-Vercodierung . . . . .	674
28.3	Strahlformung (Beamforming) . . . . .	675
28.3.1	Phased-Array-Verfahren . . . . .	679
28.3.2	Schelkunoff-Polynomial-Verfahren . . . . .	680
28.3.3	Dolph-Tschebyscheff-Verfahren . . . . .	682
28.3.4	Codebuch-Verfahren . . . . .	684
29	<b>Ultrabreitband-Systeme</b> . . . . .	687
29.1	Grundlagen und Definitionen . . . . .	688
29.2	Impuls-basierte Ultrabreitband-Kommunikation . . . . .	689
29.3	Mehrträger-basierte Ultrabreitband-Kommunikation . . . . .	693
29.4	Funkortung . . . . .	694
30	<b>Software-Defined Radio und Cognitive Radio</b> . . . . .	699
30.1	Das Software-Defined Radio Konzept . . . . .	699
30.2	Ausführungsformen des Software-Defined Radio Konzepts . . . . .	701
30.3	Adaptives Radio, Kognitives Radio und Intelligentes Radio . . . . .	703
30.4	Ausführungsformen des Kognitiven Radio Konzepts . . . . .	704

## Teil V Anhang

31	<b>Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung</b> . . . . .	709
31.1	Begriffe aus der (wert-)diskreten Wahrscheinlichkeitsrechnung . . . . .	709
31.2	Begriffe aus der (wert-)kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsrechnung	714
31.3	Charakteristische Funktion . . . . .	718
31.4	Transformation einer Zufallsvariable . . . . .	719
31.5	Gesetz der großen Zahlen und Zentraler Grenzwertsatz . . . . .	720
32	<b>Grundlagen der Matrizenrechnung</b> . . . . .	723
32.1	Grundlegende Definitionen und Begriffe . . . . .	723

32.2	Spezielle Klassen von quadratischen Matrizen . . . . .	725
32.3	Determinante einer quadratischen Matrix . . . . .	725
32.4	Matrixoperationen . . . . .	727
32.5	Lineare Gleichungssysteme . . . . .	729
32.6	Eigenwerte, Eigenvektoren und Spur einer quadratischen Matrix . . . . .	730
32.7	Matrixtransformationen . . . . .	731
<b>33</b>	<b>Grundlagen der Signal- und Systemtheorie . . . . .</b>	<b>733</b>
33.1	Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Faltung . . . . .	733
33.2	Zeitkontinuierliche Fourier-Transformation . . . . .	733
33.3	Z-Transformation . . . . .	735
33.4	Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	736
33.5	Lineare zeitinvariante Systeme . . . . .	737
33.6	Lineare zeitvariante Systeme . . . . .	739
33.7	Eigenschaften deterministischer Signale . . . . .	741
33.8	Stochastische Prozesse . . . . .	742
33.9	Stochastische Prozesse und LTI-Systeme . . . . .	745
<b>34</b>	<b>Simulationswerkzeuge . . . . .</b>	<b>747</b>
34.1	Aufbau eines Simulationswerkzeugs . . . . .	749
34.2	Simulatorkonzepte . . . . .	750
34.3	Einbindung in eine Realisierungsumgebung . . . . .	751
34.4	Kriterien zur Auswahl eines Simulationswerkzeugs . . . . .	752
34.5	Professionelle Simulationswerkzeuge . . . . .	752
<b>Literatur . . . . .</b>		<b>755</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>775</b>