

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen der angewandten Informationstheorie	1
1 Einführung und Grundbegriffe	3
1.1 Was versteht man unter Informationstheorie?	3
1.2 Fundamentale Fragen der Informationstheorie	7
1.3 Shannons Informationsmaß	9
1.3.1 Mathematische Informationsmaße	9
1.3.2 Wechselseitige Information	10
1.3.3 Entropie einer Zufallsvariablen	12
1.3.4 Mittlere wechselseitige Information	15
1.3.5 Kettenregel der Entropie	20
1.3.6 Kullback-Leibler-Distanz	21
1.3.7 Zusammenfassung der wichtigsten Definitionen und Sätze	21
1.4 Fundamentale Sätze	22
1.4.1 Fano-Ungleichung	22
1.4.2 Hauptsatz der Datenverarbeitung	25
2 Verlustlose Quellencodierung	27
2.1 Gedächtnisfreie Quellen	27
2.1.1 Typische Sequenzen und asymptotische Äquipartitionseigenschaft	27
2.1.2 Simultan Typische Sequenzen	30
2.1.3 Shannons Quellencodiertheorem	33
2.1.4 Präfixfreie Quellencodierung	34
2.1.5 Huffman-Algorithmus	38
2.2 Gedächtnisbehaftete Quellen	41
2.2.1 Markoff-Quellen	41
2.2.2 Willems-Algorithmus	47
3 Kanalcodierung	51
3.1 Wertdiskrete Kanalmodelle	51
3.1.1 Übertragungssystem mit Kanalcodierung und -decodierung	51
3.1.2 Fehlerwahrscheinlichkeiten	53
3.1.3 Decodierprinzipien	55
3.1.4 Zufallscodes	56
3.1.5 Diskreter gedächtnisfreier Kanal (DMC)	57
3.1.6 Kanalkapazität	58

3.1.7	Shannons Kanalcodiertheorem	60
3.1.8	Beispiele zur Berechnung der Kanalkapazität	62
3.1.9	Bhattacharyya-Schranke	70
3.1.10	Gallager-Schranke	72
3.1.11	Gallager-Schranke für Zufallscodierung	73
3.2	Wertkontinuierliche Kanalmodelle	75
3.2.1	Differentielle Entropie	75
3.2.2	Wechselseitige Information	77
3.2.3	Zeitdiskreter Gauß-Kanal	78
3.2.4	Water-Filling-Prinzip	81
3.2.5	Bandbegrenzter Gauß-Kanal	82
4	Verlustbehaftete Quellencodierung und gemeinsame Quellen- & Kanalcodierung	87
4.1	Rate-Distortion-Theorie	87
4.1.1	Verzerrung und Verzerrungsmaße	87
4.1.2	Shannons Rate-Distortion-Theorem	88
4.2	Gemeinsame Quellen- und Kanalcodierung	90
4.2.1	Herleitung der Rate-Distortion-Schranke	90
4.2.2	Informationstheoretische Grenzen für eine fehlerbehaftete Übertragung	91
4.2.3	Praktische Aspekte der gemeinsamen Quellen- und Kanalcodierung	93
5	Mehrnutzer-Informationstheorie	95
5.1	Vielfachzugriffskanal	95
5.2	Rundfunkkanal	99
6	Kryptologie	103
6.1	Grundbegriffe der Kryptologie	103
6.2	Shannons Theorie zur Geheimhaltung	105
6.3	Chiffriersysteme mit öffentlichem Schlüssel	109
6.3.1	Zwei Ergebnisse aus der Zahlentheorie	110
6.3.2	RSA-Chiffrierverfahren	111
6.3.3	RSA-Authentifizierungsverfahren	112
	Literaturverzeichnis	113
	II Grundlagen der Kanalcodierung	117
7	Einführung und Grundbegriffe	119
8	Blockcodes	121
8.1	Grundlegende Eigenschaften von Blockcodes	121
8.1.1	Definition von Blockcodes	121
8.1.2	Redundanz, Fehlererkennung, Fehlerkorrektur, Coderate	122
8.1.3	Systematische Codes	123

8.1.4	Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht	125
8.1.5	Minimaldistanz	126
8.1.6	Eigenschaften von Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht	127
8.1.7	Längenänderungen	127
8.2	Lineare Blockcodes	128
8.2.1	Definition von linearen Blockcodes	128
8.2.2	Minimaldistanz bei linearen Codes	129
8.2.3	Hamming-Codes	130
8.2.4	Schranken für die Minimaldistanz	131
8.3	Decodierung von Blockcodes	133
8.3.1	Decodierkugeln	133
8.3.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten	135
8.3.3	Decodierprinzipien	136
8.3.4	„Hard-input“-Decodierung	139
8.3.5	„Soft-input“-Decodierung	140
8.3.6	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	141
8.3.7	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „hard-input“-Decodierung	144
8.3.8	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für uncodierte Übertragung	145
8.3.9	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „soft-input“-Decodierung	147
8.3.10	Codiergewinn	149
8.3.11	Block-Produktcodes	149
8.4	Matrixbeschreibung von linearen Blockcodes	150
8.4.1	Generatormatrix	151
8.4.2	Prüfmatrix	151
8.4.3	Duale Codes	153
8.4.4	Syndrom und Syndromdecodierung	154
8.4.5	Low-Density Parity-Check-Codes (LDPC-Codes)	156
8.4.6	Repeat-Accumulate-Codes (RA-Codes)	158
8.5	Zyklische Blockcodes	159
8.5.1	Definition von zyklischen Blockcodes	159
8.5.2	Polynomdarstellung	160
8.5.3	Generatorpolynom und Prüfpolynom	161
8.5.4	Golay-Code	163
8.5.5	CRC-Codes	164
8.6	Primkörper und Erweiterungskörper	165
8.6.1	Primkörper	165
8.6.2	Erweiterungskörper	167
8.6.3	Diskrete Fourier-Transformation	167
8.7	Reed-Solomon-Codes	167
8.7.1	Definition I von Reed-Solomon-Codes	167
8.7.2	Definition II von Reed-Solomon-Codes und Generatorpolynom	169
8.7.3	Prüfpolynom	171
8.7.4	Methoden zur Codierung von Reed-Solomon-Codes	172
8.7.5	Paritätsfrequenzen und deren Verschiebung	172
8.7.6	Algebraische Decodierung von Reed-Solomon-Codes	173

9 Faltungscodes	179
9.1 Definition von Faltungscodes	179
9.1.1 Schieberegister-Darstellung	179
9.1.2 Zustandsdiagramm	180
9.1.3 Trellisdiagramm	181
9.1.4 Codebaum	182
9.1.5 Polynomdarstellung	183
9.2 Optimierung von Faltungscodes	184
9.2.1 Fehlerpfad	184
9.2.2 Freie Distanz	185
9.2.3 Distanzspektrum	186
9.2.4 Berechnung des Distanzspektrums	186
9.2.5 Schranken der Bitfehlerwahrscheinlichkeit	189
9.2.6 Codiergewinn	190
9.2.7 Rekursive Faltungscodierer	191
9.2.8 Zero-Tailing und Tail-Biting	192
9.2.9 Punktierter Faltungscodes und Wiederholungscodes	196
9.2.10 Katastrophale Faltungscodierer	198
9.3 Decodierung von Faltungscodes	198
9.3.1 Viterbi-Algorithmus	199
9.3.2 List-Viterbi-Algorithmus und Soft-Output Viterbi-Algorithmus	207
9.3.3 Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv-Algorithmus	210
9.3.4 Stack-Algorithmus	215
9.3.5 Sphere-Decodierung	220
9.3.6 Dijkstra-Algorithmus	221
9.4 Zusammenhang zwischen Faltungscodes und linearen Blockcodes	224
9.4.1 Generatormatrix von Faltungscodes	225
9.4.2 Trellisdarstellung von binären linearen Blockcodes	227
10 Interleaver	229
10.1 Blockinterleaver	229
10.2 Faltungsinterleaver	230
10.3 Pseudo-Zufallsinterleaver	232
11 Verkettete Codes und iterative Decodierung	233
11.1 Grundlagen	234
11.1.1 Wetterproblem	234
11.1.2 Log-Likelihood Verhältnis	234
11.1.3 Symmetrieeigenschaften von Log-Likelihood-Werten	239
11.1.4 Weiche Bits	241
11.1.5 Zusammenhang zwischen Log-Likelihood-Werten und Kanalkapazität	242
11.1.6 Soft-Simulation	243

11.2 Verkettete Codes	245
11.2.1 Seriell verkettete Codes	246
11.2.2 Parallel verkette Codes („Turbo-Codes“)	247
11.3 Iterative Decodierung	250
11.3.1 Turbo-Prinzip	250
11.3.2 Belief-Propagation-Algorithmus	252
11.4 EXIT-Chart-Analyse verketteter Codes	254
Literaturverzeichnis	257
III Digitale Modulations- und Übertragungsverfahren	263
12 Einführung und Grundbegriffe	265
12.1 Signale im Zeit- und Frequenzbereich	265
12.2 Basisband- und Bandpasssignale	265
12.3 Quadraturmodulation und -demodulation	267
12.4 Analog-Digital-Wandlung	268
12.4.1 Von analogen zu digitalen Signalen	268
12.4.2 Abtastsatz und Abtasttheorem (Diskretisierung)	268
12.4.3 Pulscodemodulation (Quantisierung)	272
12.4.4 A/D- und D/A-Wandlung	273
12.4.5 Quantisierungsfehler	274
12.4.6 Verallgemeinerungen, Bandpass-Abtasttheorem	275
12.5 Zeitkontinuierliche Kanalmodelle	276
12.5.1 Zeitkontinuierliches AWGN-Kanalmodell	276
12.5.2 Frequenzversatz und Phasenrauschen	278
12.5.3 Rayleigh-Kanalmodell	279
12.5.4 Rice-Kanalmodell	280
13 Lineare Modulationsverfahren	281
13.1 Definition von linearen Modulationsverfahren	281
13.1.1 Mapping auf die Signalkonstellation	282
13.1.2 Impulsformung	287
13.2 Signalangepasstes Filter (Matched-Filter)	290
13.3 Äquivalente zeitdiskrete Kanalmodelle	299
13.3.1 Zeitdiskretes ISI-Kanalmodell	299
13.3.2 Zeitdiskretes Kanalmodell für Frequenzversatz und Phasenrauschen	302
13.4 Kohärente, differentiell-kohärente und inkohärente Detektion	303
13.4.1 Kohärente Detektion	304
13.4.2 Differentiell-kohärente Detektion	304
13.4.3 Inkohärente Detektion	305
13.5 Fehlerwahrscheinlichkeit von linearen Modulationsverfahren	306
13.5.1 Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter binärer Übertragung	306

13.5.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter M -stufiger Übertragung	310
13.6	Leistungsdichthespektrum von linearen Modulationsverfahren	312
13.7	Leistungs-/Bandbreitediagramm	313
13.8	Lineare Mehrträger-Modulationsverfahren	315
13.8.1	Allgemeine lineare Mehrträger-Modulationsverfahren	315
13.8.2	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)	316
13.9	Kombinierte Modulation und Kanalcodierung	323
13.9.1	Mehrstudefcodierung	323
13.9.2	Trelliscodierte Modulation	324
13.9.3	Bit-Interleaved Coded Modulation	326
13.9.4	Superpositionsmodulation	327
14	Duplex-, Mehrfachzugriffs- und Multiplexverfahren	331
14.1	Duplexverfahren	331
14.1.1	FDD	331
14.1.2	TDD	332
14.2	Mehrfachzugriffsverfahren	332
14.2.1	Frequency-Division Multiple Access (FDMA)	332
14.2.2	Time-Division Multiple Access (TDMA)	333
14.2.3	Code-Division Multiple Access (CDMA)	333
14.2.4	Space-Division Multiple Access (SDMA)	339
14.2.5	Carrier-Sense Multiple Access (CSMA)	339
14.3	Multiplexverfahren: FDM, TDM, CDM	340
15	Nichtlineare Verzerrungen	341
15.1	Systemtheoretische Grundlagen und Modellierung von Leistungsverstärkern	341
15.1.1	Klassifizierung und analytische Beschreibung	341
15.1.2	Modelle von nichtlinearen Leistungsverstärkern	343
15.1.3	Definition von Signalleistungen, Aussteuerung und Crestfaktor	345
15.1.4	Auswirkungen nichtlinearer Verzerrungen	346
15.2	Berechnung von Leistungsdichthespektrum und Bitfehlerwahrscheinlichkeit	347
15.2.1	Signaldarstellung	348
15.2.2	Berechnung des Leistungsdichthespektrums	349
15.2.3	Berechnung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit	350
16	CPM-Modulationsverfahren	353
16.1	Definition von CPM-Modulationsverfahren	353
16.1.1	Minimum Shift Keying (MSK)	354
16.1.2	Continuous Phase Frequency Shift Keying (CPFSK)	355
16.1.3	Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)	356
16.2	Zerlegung und Linearisierung von CPM-Modulationsverfahren	356

17 Entzerrung	361
17.1 Augendiagramm, lineare Verzerrung, äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell	361
17.1.1 Charakterisierung dispersiver Kanäle	362
17.1.2 Systemtheoretische Grundlagen und Signalentwurf	365
17.1.3 Nyquist-Kriterium im Zeit- und Frequenzbereich	368
17.1.4 Signalangepasstes Filter	370
17.1.5 Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit farbigem Rauschen	371
17.1.6 Dekorrelationsfilter („Whitening-Filter“)	371
17.1.7 Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit weißem Rauschen	373
17.2 Entzerrung linearer Systeme	375
17.2.1 Lineare Entzerrung	376
17.2.2 Entscheidungsrückgekoppelte Entzerrung	384
17.2.3 Maximum-Likelihood-Detektion	387
18 Kanalschätzung	393
18.1 Trainingsbasierte Kanalschätzung	393
18.1.1 „Least Squares“ Kanalschätzung	394
18.1.2 Korrelative Kanalschätzung	396
18.1.3 Interpolative Kanalschätzung	397
18.1.4 Gradientenverfahren und stochastisches Gradientenverfahren	399
18.2 Entscheidungsgestützte Kanalschätzung	400
18.2.1 Stochastisches Gradientenverfahren mit vorläufigen Entscheidungen	400
18.2.2 Per-survivor Processing	401
18.3 Blinde Kanalschätzung	401
19 Digitale Synchronisationsverfahren	403
19.1 Struktur eines digitalen Empfängers	403
19.2 Maximum-Likelihood-Synchronisation	405
19.3 Trägerphasen- und Taktphasensynchronisation für CPM-Modulationsverfahren	408
19.4 Trägerphasensynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	410
19.4.1 Entscheidungsgesteuerte Parametersuche	412
19.4.2 Entscheidungsgesteuerte explizite Lösung	413
19.4.3 Entscheidungsgesteuertes Nachführverfahren	414
19.4.4 Nichtentscheidungsgesteuerte explizite Lösung	416
19.4.5 Nichtentscheidungsgesteuertes Nachführverfahren	416
19.5 Taksynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	417
19.5.1 Taktphasendetektion	418
19.5.2 Taktphasenkorrektur	420
19.6 Frequenzsynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	420
19.6.1 Frequenzfehlerdetektion	421
19.6.2 Frequenzkorrektur	422
Literaturverzeichnis	423

IV Konzepte der Mobilfunkkommunikation	427
20 Grundlagen der Mobilfunkkommunikation	429
20.1 Was ist Mobilfunkkommunikation?	429
20.2 Klassifizierung von Mobilfunksystemen	429
20.3 Netztopologien	430
20.3.1 Das zellulare Konzept	430
20.3.2 Gleichwellennetz	431
20.3.3 Ad-hoc- und Sensornetze	432
20.4 Beispiele für Mobilfunksysteme	432
20.4.1 Rundfunksysteme	432
20.4.2 Funkrufsysteme	433
20.4.3 Betriebsfunk- und Bündelfunksysteme	433
20.4.4 Flugfunksysteme	433
20.4.5 Schnurlose Telefone	434
20.4.6 Wireless PAN, Wireless LAN und Wireless MAN	434
20.4.7 Zelluläre Mobilfunksysteme	434
20.5 OSI-Schichtenmodell	435
21 Beschreibung und Modellierung von Mobilfunkkanälen	437
21.1 Übertragungskanal und Mobilfunkszenario	437
21.2 Phänomenologische Kanalbeschreibung	439
21.2.1 Weltraumszenario	439
21.2.2 Zeitinvariantes 2-Pfad-Modell	442
21.2.3 Realistische Szenarien	442
21.3 Stochastische Kanalmodellierung	443
21.3.1 Zeitvariante Impulsantwort und Gewichtsfunktion	444
21.3.2 Entfernungsabhängige Funkfelddämpfung	445
21.3.3 Langzeit-Schwundmodelle	447
21.3.4 Kurzzeit-Schwundmodelle	447
22 Diversitätsempfang, MIMO-Systeme und Space-Time-Codes	459
22.1 Diversitätsempfang	459
22.2 MIMO-Systeme	463
22.3 Raum-Zeit-Codes	465
22.3.1 „Delay-Diversity“	465
22.3.2 Raum-Zeit-Blockcodes	466
22.3.3 „Bell Labs Layered Space-Time (BLAST)“-Architektur	469
23 DS-CDMA-Empfängerkonzepte	471
23.1 Mehrnutzerdetektion für DS-CDMA-Systeme	471
23.1.1 Spreizsequenzen: Eigenschaften und Familien	471
23.1.2 Bitfehlerwahrscheinlichkeit ohne Mehrnutzerdetektion	475
23.1.3 Modellierung von Mehrnutzerinterferenz	478

23.1.4 Klassifizierung von Mehrnutzer-Empfängern	480
23.2 Rake-Empfänger für DS-CDMA-Systeme	483
24 Verfahren zur Verkürzung einer Kanalimpulsantwort	487
24.1 Empfängerstrukturen	487
24.2 Minimalphasigkeit, Maximalphasigkeit, Gemischphasigkeit	488
24.3 Vorfilter zur Erzeugung einer minimalphasigen Impulsantwort	489
24.3.1 Wurzelsuche	489
24.3.2 Spektrale Faktorisierung	490
24.4 Vorfilter zur Verkürzung einer Impulsantwort	495
25 Trellisbasierte Entzerrung mit Zustandsreduktion	499
25.1 Motivation	499
25.2 Zweigmetrik ohne Zustandsreduktion	500
25.3 Zustandsreduktion durch Entscheidungsrückkopplung	500
25.4 Zustandsreduktion durch „set-partitioning“	501
26 Gleichkanalinterferenzunterdrückung	505
26.1 Motivation	505
26.2 Äquivalentes zeitdiskretes CCI-Kanalmodell	505
26.3 Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (MLSE-Detektor)	506
26.4 Joint-Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (JMLSE-Detektor)	508
26.5 Kanalschätzung zur Gleichkanalinterferenzunterdrückung	509
26.5.1 Joint-Least-Squares Kanalschätzung	510
26.5.2 Semi-blinde Kanalschätzung	511
27 Senderseitige Signalverarbeitung: Vordcodierung und Strahlformung	513
27.1 Lineare Vordcodierung	513
27.1.1 SVD-basierte Vordcodierung	514
27.1.2 ZF-Vordcodierung	515
27.1.3 MMSE-Vordcodierung	515
27.2 Nichtlineare Vordcodierung	515
27.2.1 „Writing on Dirty-Paper“-Konzept	515
27.2.2 Tomlinson-Harashima-Vordcodierung	515
27.3 Strahlformung (Beamforming)	516
27.3.1 Phased-Array-Verfahren	518
27.3.2 Schelkunoff-Polynomial-Verfahren	519
27.3.3 Dolph-Tschebyscheff-Verfahren	520
27.3.4 Codebuch-Verfahren	522
Literaturverzeichnis	525

V Anhang	529
A Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung	531
A.1 Begriffe aus der (wert-)diskreten Wahrscheinlichkeitsrechnung	531
A.2 Begriffe aus der (wert-)kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsrechnung	535
A.3 Charakteristische Funktion	537
A.4 Transformation einer Zufallsvariable	538
A.5 Gesetz der großen Zahlen und Zentraler Grenzwertsatz	539
B Grundlagen der Matrizenrechnung	541
B.1 Grundlegende Definitionen und Begriffe	541
B.2 Spezielle Klassen von quadratischen Matrizen	542
B.3 Determinante einer quadratischen Matrix	543
B.4 Matrixoperationen	543
B.5 Lineare Gleichungssysteme	545
B.6 Eigenwerte, Eigenvektoren und Spur einer quadratischen Matrix	546
C Grundlagen der Signal- und Systemtheorie	549
C.1 Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Faltung	549
C.2 Zeitkontinuierliche Fourier-Transformation	549
C.3 Z-Transformation	550
C.4 Diskrete Fourier-Transformation	552
C.5 Lineare zeitinvariante Systeme	552
C.6 Lineare zeitvariante Systeme	554
C.7 Eigenschaften deterministischer Signale	555
C.8 Stochastische Prozesse	556
C.9 Stochastische Prozesse und LTI-Systeme	558
D Simulationswerkzeuge	561
D.1 Aufbau eines Simulationswerkzeugs	562
D.2 Simulatorkonzepte	563
D.3 Einbindung in eine Realisierungsumgebung	564
D.4 Kriterien zur Auswahl eines Simulationswerkzeugs	565
D.5 Professionelle Simulationswerkzeuge	565
Abkürzungsverzeichnis	567
Sachwortverzeichnis	571