

Peter Adam Höher

Grundlagen der digitalen Informationsübertragung

Von der Theorie zu Mobilfunkanwendungen

Mit 357 Abbildungen, 26 Tabellen und 196 Beispielen

STUDIUM



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	Wechselseitigeinformation.	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	Punktierte 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	Faltung्सinterleaver	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 verkettete 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 Abtastatz 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	Leistungsdichtespektrum von linearen Modulationsverfahren.	312
13.7	Leistungs7Bandbreitediagramm.	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	Mehrstufercodierung.	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 Leistungsdichtespektrum und Bitfehlerwahrscheinlichkeit . . .	347
15.2.1	Signaldarstellung	348
15.2.2	Berechnung des Leistungsdichtespektrums.	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 Taktsynchronisation 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	Zellulare 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, Gemischtphasigkeit	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	Kanal Schätzung zur Gleichkanalinterferenzunterdrückung	509
26.5.1	Joint-Least-Squares Kanalschätzung.	510
26.5.2	Semi-blinde Kanalschätzung	511
27	Senderseitige Signalverarbeitung: Vorcodierung und Strahlformung	513
27.1	Lineare Vorcodierung	513
27.1.1	SVD-basierte Vorcodierung.	514
27.1.2	ZF-Vorcodierung.	515
27.1.3	MMSE-Vorcodierung.	515
27.2	Nichtlineare Vorcodierung	515
27.2.1	„Writing on Dirty-Paper“-Konzept	515
27.2.2	Tomlinson-Harashima-Vorcodierung.	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