

Inhaltsverzeichnis

TEIL I: GRUNDLAGEN

1	Einführung: Codes und Kanäle	1
1.1	Was ist Kanalcodierung ?	1
1.2	Codierung in der Nachrichtenübertragung	6
1.3	Der Begriff des diskreten Kanals	8
1.4	Grundprinzip der Blockcodierung	15
1.5	Hammingdistanz und Minimaldistanz	18
1.6	Maximum-Likelihood-Decodierung	20
1.7	Der Begriff des Codierungsgewinns	25
1.8	Grundgedanke der Kanalcodierung	30
1.9	Aufgaben	30
2	Grundlagen der Shannon'schen Informationstheorie	33
2.1	Kanalkapazität des DMC	33
2.2	Kanalcodierungstheorem	38
2.3	R_0 -Theorem	42
2.4	Codierungsgewinn beim AWGN mit binärem Input	45
2.5	C und R_0 beim AWGN mit nicht-binärem Input	49
2.6	Kanalkapazität beim AWGN mit Bandbegrenzung	57
2.7	Anhang: Beweis des Kanalcodierungstheorems für den BSC	61
2.8	Anhang: Beweis des R_0 -Theorems für den DMC	65
2.9	Aufgaben	67

TEIL II: BLOCKCODES

3	Lineare Blockcodes	69
3.1	Definition linearer Blockcodes	69
3.2	Erkennung und Korrektur von Fehlern und metrische Struktur	73
3.3	Schranken für die Minimaldistanz	80

3.4	Asymptotische Schranken für die Minimaldistanz	84
3.5	Gewichtsverteilung	88
3.6	Wahrscheinlichkeit unerkannter Fehler bei Fehlererkennungs-codes	90
3.7	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Hard-Decision	93
3.8	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Soft-Decision und im allgemeinen Fall (Union Bound)	95
3.9	Aufgaben	102
4	Blockcodes in Matrixbeschreibung	107
4.1	Generatormatrix	107
4.2	Prüfmatrix	111
4.3	Duale Codes und MacWilliams-Identität	115
4.4	Hamming-Codes und Simplex-Codes	118
4.5	Einfache Modifikationen linearer Codes	120
4.6	Nebenklassen-Zerlegung	122
4.7	Syndrom-Decodierung	124
4.8	Aufgaben	126
5	Zyklische Blockcodes	129
5.1	Definition zyklischer Codes und Polynombeschreibung	129
5.2	Generatorpolynom	133
5.3	Prüfpolynom	135
5.4	Systematische Encodierung	139
5.5	Syndrom	143
5.6	Erkennung von Einzelfehlern und Bündelfehlern sowie CRC-Codes	144
5.7	Korrektur von Einzelfehlern und Bündelfehlern	149
5.8	Nicht-algebraische Decodierverfahren	154
5.9	Aufgaben	161
6	Arithmetik von Galoisfeldern und Spektraltransformationen	165
6.1	Einführung in Galoisfelder am Beispiel \mathbb{F}_4	166
6.2	Konstruktion von \mathbb{F}_{p^m} aus \mathbb{F}_p	169
6.3	Minimalpolynome und konjugierte Elemente	177
6.4	Beispiele \mathbb{F}_8 , \mathbb{F}_{16} und \mathbb{F}_{64}	181
6.5	Spektraltransformation auf Galoisfeldern	186
6.6	Aufgaben	190

7	Reed-Solomon und Bose-Chaudhuri-Hocquenghem Codes	193
7.1	Definition der RS-Codes	194
7.2	Definition der BCH-Codes	197
7.3	Beispiele und Eigenschaften von BCH-Codes	202
7.4	Grundlagen der Decodierung: Syndrom und Schlüsselgleichung	211
7.5	Fehlerkorrektur im Frequenzbereich	217
7.6	Fehlerkorrektur im Zeitbereich	219
7.7	Lösung der Schlüsselgleichung mit dem Berlekamp-Massey-Algorithmus	222
7.8	Lösung der Schlüsselgleichung mit dem Euklidischen Algorithmus	225
7.9	Korrektur von Fehlern und Ausfällen	229
7.10	Decodierung binärer BCH-Codes	234
7.11	Modifikationen von RS- und BCH-Codes	239
7.12	Aufgaben	242

TEIL III: FALTUNGSCODES UND TRELISCODES

8	Beschreibung und Eigenschaften von Faltungscodes	245
8.1	Definition und Schieberegister-Beschreibung	246
8.2	Polynombeschreibung	249
8.3	Spezielle Codeklassen: Terminierte, punktierte, systematische und transparente Faltungscodes	250
8.4	Nicht-katastrophale Encoder und Encoder-Inverses	254
8.5	Distanzeigenschaften und optimale Faltungscodes	257
8.6	Trellisdiagramm	259
8.7	Zustandsdiagramm	263
8.8	Gewichtsfunktion eines Faltungscodes	264
8.9	Algorithmen zur Berechnung der Gewichtsfunktion	268
8.10	Aufgaben	270
9	ML-Decodierung mit dem Viterbi-Algorithmus und Fehlerwahrscheinlichkeit von Faltungscodes	273
9.1	Viterbi-Metrik	274
9.2	Viterbi-Algorithmus für terminierte Codes	276
9.3	Viterbi-Algorithmus für nicht-terminierte Codes	279
9.4	Hinweise zur Implementierung und Synchronisation	283
9.5	Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit	285

9.6	Fehlerstrukturen bei der Decodierung	291
9.7	Verkettete Codierung und Anforderungen an Soft-Decision- Output	293
9.8	Viterbi-Algorithmus mit Soft-Decision-Output (SOVA)	296
9.9	Vergleich Blockcodes – Faltungscodes	298
9.10	Aufgaben	302
10	Trelliscodierte Modulation (TCM)	305
10.1	Vorüberlegungen zu höherstufigen Modulationsverfahren	305
10.2	TCM-Grundprinzip: Teilmengen-Partitionierung und Ungerböck-Encoder	309
10.3	Encoder-Strukturen und Polynombeschreibung	315
10.4	Distanzeigenschaften und Trellisdiagramm	321
10.5	Optimale Codes nach Ungerböck	327
10.6	ML-Decodierung mit dem Viterbi-Algorithmus	331
10.7	Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit	333
10.8	Rotationsinvariante TCM	337
10.9	Mehrdimensionale TCM	342
10.10	Mehrstufigencodierte und blockcodierte Modulation	352
10.11	Pragmatische TCM nach Viterbi	358
10.12	Aufgaben	362

TEIL IV: ERGÄNZUNGEN UND ANWENDUNGEN

11	Ergänzungen: Spezielle Codes und Kanäle	365
11.1	Interleaving-Verfahren	365
11.2	Fadingkanäle: Grundlagen und Reed-Solomon Codes	369
11.3	Fadingkanäle und trelliscodierte Modulation	374
11.4	Kanäle mit Interferenz-Verzerrungen und Maximum-Likelihood Sequence Estimation (MLSE) bei uncodierter Übertragung	380
11.5	MLSE bei codierter Übertragung	384
11.6	Continuous Phase Modulation (CPM)	386
11.7	Soft-Decision ML-Decodierung von Blockcodes	392
11.8	Produktcodes	395
11.9	Verkettung von Blockcodes	396
11.10	Summenkonstruktion und Reed-Muller Codes	399

12 Ausgewählte Anwendungen	403
12.1 Satellitenkommunikation	403
12.2 Modems: Datenübertragung über den Telefonkanal	408
12.3 Mobilfunk nach dem GSM-Standard	412
12.4 Kanal- und Quellencodierung für zukünftige Mobilfunksysteme	421
12.5 Richtfunk	423
12.6 Compact Disc (CD)	425
ANHANG: Mathematische Grundlagen	431
A.1 Elementare Analysis	431
A.2 Binomialkoeffizienten und Entropiefunktion	432
A.3 Wahrscheinlichkeitsrechnung	434
A.4 Algebra (Gruppen, Ringe, Körper)	438
A.5 Lineare Algebra und Vektorräume	444
A.6 Polynome	446
A.7 Euklidischer Algorithmus	449
A.8 Polynom-Restklassenringe	453
Lösungshinweise zu den Aufgaben	459
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	483
Literaturverzeichnis	489
Sachverzeichnis	497