

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	XIII
<b>1 Grundlagen der Codierung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Verfahren zur Fehlerüberwachung . . . . .	1
1.2 Codierung in Kommunikationssystemen . . . . .	2
1.3 Distanz zwischen Codewörtern . . . . .	6
1.4 Distanz auf einem Gaußschen Kanal bei Soft-Decision Decodierung . . . . .	7
1.5 Beispiel einer Blockcodierung . . . . .	9
1.6 Zufallsfehlererkennung und Korrekturfähigkeit von Block-Codes . . . . .	12
1.7 Restfehlerraten bei Block-Codes . . . . .	13
1.8 Codeleistungsfähigkeit und Codierungsgewinn . . . . .	15
1.9 Generelle Überlegungen zum Codierungsgewinn . . . . .	18
1.10 Informationstheorie . . . . .	19
1.11 Literaturhinweise . . . . .	21
1.12 Übungen . . . . .	22
<b>2 Lineare Block-Codes . . . . .</b>	<b>24</b>
2.1 Einführung . . . . .	24
2.2 Die Mathematik der Binär-codes . . . . .	24
2.3 Linearität . . . . .	25
2.4 Paritätskontrollen . . . . .	27
2.5 Systematische Codes . . . . .	28
2.6 Minimale Hamming-Distanz eines linearen Block-Codes . . . . .	28
2.7 Codierungsvorgang – Generator-Matrix . . . . .	29
2.8 Codierung mit der Paritätskontroll-Matrix . . . . .	30
2.9 Decodieren mit Hilfe der Paritätskontroll-Matrix . . . . .	32
2.10 Decodieren mit Hilfe eines logischen Standardfeldes . . . . .	34
2.11 Codec-Entwurf bei linearen Block-Codes . . . . .	36
2.12 Modifikation von Block-Codes . . . . .	38
2.13 Grenzen der Block-Codes . . . . .	40
2.14 Literaturhinweise . . . . .	44
2.15 Übungen . . . . .	45
<b>3 Zyklische Codes . . . . .</b>	<b>47</b>
3.1 Einführung . . . . .	47
3.2 Definition des zyklischen Codes . . . . .	47
3.3 Beispiel eines zyklischen Codes . . . . .	48
3.4 Darstellung als Polynom . . . . .	49
3.5 Codierung durch Faltung . . . . .	49
3.6 Die zyklische Eigenschaft . . . . .	50

3.7	Folgerung aus der zyklischen Eigenschaft . . . . .	51
3.8	Primitive Polynome . . . . .	52
3.9	Systematisches Codieren von zyklischen Codes . . . . .	53
3.10	Das Syndrom eines zyklischen Codes . . . . .	54
3.11	Realisierung der Codierung . . . . .	55
3.12	Decodierung . . . . .	57
3.13	Decodierungsvorgänge . . . . .	61
3.14	Korrektur mehrerer Fehler . . . . .	62
3.15	Beispiel einer Mehrfehlerkorrektur . . . . .	63
3.16	Verkürzte zyklische Codes . . . . .	65
3.17	Sicherheitserhöhung bei zyklischen Codes . . . . .	66
3.18	BCH-Codes . . . . .	68
3.19	Literaturhinweise . . . . .	69
3.20	Übungen . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Die Arithmetik des Galois-Feldes als Hilfe für die Bearbeitung von Block-Codes . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1	Einführung . . . . .	71
4.2	Definition des Galois-Feldes . . . . .	71
4.3	Galois-Felder $GF(p)$ der Größe einer Primzahl . . . . .	73
4.4	Erweiterung des binären Feldes – Galois-Feld $GF(2^m)$ . . . . .	74
4.5	Zech-Logarithmus . . . . .	75
4.6	Darstellung von Galois-Feldern . . . . .	76
4.7	Eigenschaften von Polynomen und Elementen der Galois-Felder . . . . .	78
4.8	Spezifizierung eines Codes mit Hilfe der Wurzeln . . . . .	81
4.9	Hamming-Codes . . . . .	82
4.10	BCH-Codes . . . . .	82
4.11	Fourier-Transformation im Galois-Feld . . . . .	85
4.12	Wurzeln und spektrale Komponenten . . . . .	86
4.13	BCH-Codes im Frequenzbereich . . . . .	87
4.14	BCH-Decodierung und die BCH-Grenze . . . . .	87
4.15	Decodieren im Frequenzbereich . . . . .	89
4.16	Beispiel einer Codierung und Decodierung . . . . .	90
4.17	Weitere Beispiele für Reed-Solomon-Codes . . . . .	93
4.18	Decodierung binärer BCH-Codes . . . . .	96
4.19	Schlüsselgleichungen in Polynomform . . . . .	96
4.20	Euclid-Algorithmus . . . . .	97
4.21	Der Berlekamp-Massey-Algorithmus . . . . .	99
4.22	Erweiterte Reed-Solomon-Codes . . . . .	101
4.23	Löschungs-Decodierung bei BCH-Codes . . . . .	104
4.24	Beispiel einer Löschungs-Decodierung bei Reed-Solomon-Codes . . . . .	105
4.25	Literaturhinweise . . . . .	107
4.26	Übungen . . . . .	108

<b>5</b>	<b>Konvolutionelle Codes</b>	<b>110</b>
5.1	Einführung	110
5.2	Grundsätzliche Eigenschaften von konvolutionellen Codes	111
5.3	Generator-Polynome	112
5.4	Terminologie	112
5.5	Übergangsgraph des Codierers	113
5.6	Distanzstruktur konvolutioneller Codes	114
5.7	Berechnung von Distanz und Gewichtsstruktur	116
5.8	Lawinenartige Fehlerfortpflanzung	118
5.9	Decodieren auf maximale Ähnlichkeit	118
5.10	Der Viterbi-Algorithmus	119
5.11	Beispiel einer Viterbi-Decodierung	120
5.12	Anwendungsgebiete konvolutioneller Codes	125
5.13	Leistungsvermögen konvolutioneller Codes	126
5.14	Punktierte konvolutionelle Codes	127
5.15	Sequentielle Decodierung	128
5.16	Syndrom-Decodierung	130
5.17	Literaturhinweise	132
5.18	Übungen	133
<b>6</b>	<b>Codierung auf Kanälen mit bündelartiger Fehlerstruktur</b>	<b>135</b>
6.1	Einführung	135
6.2	Beschreibung bündelartiger Fehler	136
6.3	Block-Codes zur Korrektur von einzelnen Fehlerbündeln	137
6.4	Fire-Codes	138
6.5	Konvolutionelle Codes zur Korrektur bündelartiger Fehler	140
6.6	Codes zur Korrektur von innerhalb gewisser Grenzen des Codes auftretenden Fehlerbündeln	141
6.7	Techniken für reale Kanäle	142
6.8	Verschachtelung	144
6.9	Produkt-Codes	146
6.10	Literaturhinweise	150
6.11	Übungen	151
<b>7</b>	<b>Verkettete Codes</b>	<b>152</b>
7.1	Einführung	152
7.2	Prinzip der Verkettung	152
7.3	Verkettung unter Verwendung eines Block-Codes als innerer Code	154
7.4	Codes maximaler Länge	154
7.5	Orthogonale Codes	155
7.6	Reed Muller-Codes	155
7.7	Block-Codes bei Soft-Decision-Decodierung	156
7.8	Verkettung unter Verwendung konvolutioneller Codes als innerer Code	157

7.9	Leistungsfähigkeit verketteter Codes . . . . .	158
7.10	Literaturhinweise . . . . .	160
7.11	Übungen . . . . .	160
<b>8</b>	<b>Codierung auf bandbegrenzten Kanälen . . . . .</b>	<b>162</b>
8.1	Einführung . . . . .	162
8.2	<i>M</i> -stufige Phasenumtastung (MPSK) . . . . .	163
8.3	Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) . . . . .	164
8.4	Ungerboeck-Codes . . . . .	165
8.5	Gruppenaufteilung . . . . .	166
8.6	Codierung der Aufteilung . . . . .	168
8.7	Leistungsfähigkeit von Ungerboeck-Codes . . . . .	169
8.8	Literaturhinweise . . . . .	170
8.9	Übungen . . . . .	171
<b>9</b>	<b>Methoden der Fehlererkennung . . . . .</b>	<b>172</b>
9.1	Einführung . . . . .	172
9.2	Leistungsfähigkeit von Block-Codes in Bezug auf die Erkennung von Zufallsfehlern . . . . .	172
9.3	Gewichtsverteilung . . . . .	173
9.4	Unerkannte Fehlerrate im ungünstigsten Fall . . . . .	175
9.5	Erkennung von Fehlerbündeln . . . . .	176
9.6	Beispiele von Codes zur Fehlererkennung . . . . .	176
9.7	Synchronisation unter Verwendung von Block-Codes . . . . .	177
9.8	Methoden der ARQ . . . . .	179
9.9	Stop-and-Wait-ARQ . . . . .	179
9.10	Go-back-N-ARQ . . . . .	180
9.11	Selective-repeat-ARQ . . . . .	182
9.12	ARQ in Kommunikationsprotokollen . . . . .	183
9.13	Verbindungen von ARQ und FEC . . . . .	184
9.14	Fehlerverdeckung . . . . .	185
9.15	Literaturhinweise . . . . .	186
9.16	Übungen . . . . .	186
<b>10</b>	<b>Auswahl eines Codierungsschemas . . . . .</b>	<b>188</b>
10.1	Einführung . . . . .	188
10.2	Generelle Überlegungen . . . . .	188
10.3	Datenstruktur . . . . .	190
10.4	Informationstyp . . . . .	190
10.5	Datenrate . . . . .	191
10.6	Echtzeit-Verarbeitung . . . . .	192
10.7	Leistungs- und Bandbreitenzwänge . . . . .	193

10.8	Kanalfehlermechanismen . . . . .	193
10.9	Kosten . . . . .	194
10.10	Anwendungen . . . . .	195
<b>Literaturverzeichnis</b>	. . . . .	<b>197</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	. . . . .	<b>200</b>