

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zum Anliegen dieses Buches	1
1.2	Hinweise zur Notation	3
<b>2</b>	<b>Codierung und Modulation</b>	<b>5</b>
2.1	Digitale Nachrichtenquelle	6
2.2	Modulation	8
2.2.1	Modulation mit zeitbegrenzten Signalelementen	12
2.2.2	Digitale Pulsamplitudenmodulation	13
2.3	Codierung	16
2.3.1	Code und Codierung	17
2.3.2	Formen der Redundanzeinbringung	18
2.3.3	Zuordnung	19
2.4	Übertragung	20
2.4.1	Senderausgangsstufe	20
2.4.2	Dämpfung und Verzerrung	23
2.4.3	Störung	23
2.4.4	Zeitkontinuierliches Kanalmodell	23
2.4.5	Empfängereingangsstufe	24
2.5	Demodulation	26
2.5.1	Demodulation mit harter Entscheidung, Detektion	26
2.5.2	Demodulation mit weicher Entscheidung	27
2.5.3	Synchronisation	27
2.5.4	Äquivalente Codierung	28
2.5.4.1	Signalverzerrungen	28
2.5.4.2	Farbiges Rauschen	30
2.5.5	Zeitdiskretes Kanalmodell	32
2.5.5.1	Zeitdiskreter Kanal ohne Gedächtnis	33
2.5.5.2	Digitales Kanalmodell	33
2.6	Decodierung	34
2.6.1	Codesymbolsequenzschätzung	35
2.6.2	Enddecodierung	35
2.7	Zuverlässigkeit eines digitalen Übertragungssystems	36
2.8	Maximum-Likelihood-Sequenz-Schätzung	37
2.8.1	Maximum-a-posteriori- und Maximum-Likelihood-Sequenz-Schätzung	37

2.8.2	Darstellung von Signalen in Signalräumen . . . . .	38
2.8.3	Optimale Demodulation beim AWGN-Kanal . . . . .	40
2.8.3.1	Metriken bezüglich der Signalelemente . . . . .	43
2.8.3.2	Demodulation durch Korrelation . . . . .	45
2.8.3.3	Entscheidungsgebiete . . . . .	46
2.8.4	Unionsschranke für die Fehlerwahrscheinlichkeit beim AWGN-Kanal . . . . .	47
2.8.5	MLSE bei Demodulation mit harter Entscheidung . . . . .	51
2.8.6	MLSE bei zeitvarianten Kanälen . . . . .	54
2.9	Informationstheoretische Aspekte der redundanten Kanalcodierung . . . . .	54
2.9.1	Fehlerexponent . . . . .	55
2.9.2	Cut-Off-Rate . . . . .	57
2.9.3	Kanalkapazität . . . . .	58
2.9.4	Austausch von Leistungs- und Bandbreiteneffizienz . . . . .	60
<b>3</b>	<b>Trelliscodierung</b> . . . . .	<b>65</b>
3.1	Gedächtnisstrukturen von Trelliscodern . . . . .	66
3.2	Trelliscodierung als Markovprozeß . . . . .	69
3.3	Trellisdiagramm . . . . .	74
3.3.1	Fehlerereignisse und Distanz . . . . .	75
3.3.2	Distanzprofil und Symbolfehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	77
3.3.2.1	Produkttrellisdiagramm . . . . .	77
3.3.2.2	Distanzmatrix und erzeugende Funktion . . . . .	79
3.3.2.3	Beispiel . . . . .	83
3.3.3	Bestimmung der minimalen Distanz . . . . .	84
3.3.3.1	Grenzwert der erzeugenden Funktion . . . . .	84
3.3.3.2	Test kurzer Fehlerereignisse . . . . .	84
3.3.3.3	Sequentieller Algorithmus . . . . .	85
3.4	Mittleres Leistungsspektrum trelliscodierter Signale . . . . .	87
3.4.1	Trelliscodierung mit gleitendem Fenster . . . . .	94
3.4.2	Trelliscoder mit wachsendem Fenster . . . . .	94
3.4.3	Beispiel . . . . .	96
3.4.4	Periodische Markovketten . . . . .	98
<b>4</b>	<b>Trellisdecodierung</b> . . . . .	<b>99</b>
4.1	Kanalmodell für die Decodierung . . . . .	99
4.2	Sequenz- und Einzelsymbolschätzung . . . . .	100
4.3	Sequenzschätzverfahren . . . . .	102
4.3.1	Viterbi-Algorithmus . . . . .	102
4.3.2	Sequenzschätzung mit Zustandsreduktion . . . . .	106
4.3.2.1	Trellisdiagramm mit Butterfly-Struktur . . . . .	106
4.3.2.2	Zustandsreduktion erster Ordnung . . . . .	107
4.3.2.3	Zustandsreduktion höherer Ordnungen . . . . .	109
4.3.2.4	Distanzverlust bei RSSE . . . . .	109
4.3.2.5	Sequenzschätzung mit Entscheidungsrückkopplung	110

4.3.2.6	Wahl der Hyperzustände . . . . .	112
4.3.2.7	Leistungseffizienz bei RSSE . . . . .	116
4.3.2.8	Zustandsreduktion bei der Pfadaufspaltung . . . . .	118
4.3.3	Sequentielle Decodierung . . . . .	122
4.3.4	Selektionsalgorithmus . . . . .	124
4.4	Verfahren zur Einzelsymbolschätzung . . . . .	126
4.4.1	Fortlaufende Einzelsymbolschätzung . . . . .	127
4.4.2	Einzelsymbolschätzung bei terminiertem Trellisdiagramm . .	129
4.4.3	Fortlaufende Einzelsymbolschätzung durch empfangsseitige Blockbildung . . . . .	133
4.5	Zuverlässigkeitsschätzung beim Viterbi–Algorithmus . . . . .	134
4.5.1	Zuverlässigkeitsschätzung für Binärsymbole . . . . .	135
4.5.2	Zuverlässigkeit von Zeichen . . . . .	137
4.5.3	Anmerkungen zur Realisierung . . . . .	138
<b>5</b>	<b>Trelliscodierte digitale Übertragungsverfahren</b>	<b>141</b>
5.1	Lineare Impulsinterferenzen . . . . .	141
5.1.1	Interpretation linearer Impulsinterferenzen als Trelliscodierung . . . . .	143
5.1.1.1	Zeitliche Segmentierung . . . . .	143
5.1.1.2	Whitened–Matched–Filter . . . . .	145
5.1.1.3	Spektrale Faktorisierung . . . . .	154
5.1.2	Distanzeigenschaften . . . . .	155
5.1.2.1	Minimale Euklidische Distanz . . . . .	155
5.1.2.2	Distanzprofil . . . . .	160
5.1.3	Zustandsreduktion . . . . .	163
5.1.3.1	Detektion mit Entscheidungsrückkopplung und Tomlinson–Harashima–Vordcodierung . . . . .	164
5.1.3.2	Sequenzschätzung mit Entscheidungsrückkopplung .	168
5.1.4	Impulsinterferenzfreie Entzerrung . . . . .	170
5.1.4.1	Optimales Nyquist–Filter . . . . .	170
5.1.4.2	Störungsprädiktion . . . . .	172
5.2	Continuous–Phase–Modulation . . . . .	176
5.2.1	Das CPM–Signal . . . . .	176
5.2.2	Interpretation als trelliscodiertes Signal . . . . .	179
5.2.2.1	Periodische Trelliscodierung . . . . .	181
5.2.2.2	Zeitinvariante Trelliscodierung . . . . .	182
5.2.3	Effizienz von CPM–Verfahren . . . . .	184
5.2.3.1	Leistungseffizienz . . . . .	184
5.2.3.2	Bandbreiteneffizienz . . . . .	188
5.2.3.3	Komplexität . . . . .	190
5.2.4	Aufwandsreduzierte CPM–Empfänger . . . . .	192
5.2.4.1	Sequenzschätzung mit reduzierter Zustandszahl . .	193
5.2.4.2	Empfänger mit spektraler Abtastung . . . . .	193
5.2.4.3	Empfängersynchronisation . . . . .	198

5.2.5	Codierung für CPM . . . . .	200
5.2.5.1	CPM mit wechselndem Modulationsindex . . . . .	200
5.2.5.2	Faltungscodierung für CPM . . . . .	200
5.2.5.3	Blockcodierung für CPM . . . . .	201
5.3	Faltungscodierung . . . . .	204
5.3.1	Einführung in die algebraische Struktur finiter Körper . . . . .	204
5.3.1.1	Gruppe . . . . .	205
5.3.1.2	Körper . . . . .	206
5.3.1.3	Vektorräume, lineare Abbildungen . . . . .	208
5.3.1.4	Polynomring, Quotientenkörper . . . . .	209
5.3.2	Lineare dispersive Systeme . . . . .	210
5.3.2.1	Einfache Scrambler . . . . .	212
5.3.2.2	Mehrfaeche Scrambler . . . . .	213
5.3.3	Faltungscodierung . . . . .	215
5.3.3.1	Äquivalente Coder . . . . .	216
5.3.3.2	Systematische Faltungscoder . . . . .	221
5.3.3.3	Prüfmatrix und dualer Code . . . . .	221
5.3.4	Distanzeigenschaften von Faltungscodes . . . . .	222
5.3.5	Gelochte Faltungscodes . . . . .	226
5.3.5.1	Decodierung gelochter Faltungscodes . . . . .	227
5.3.5.2	Äquivalenter Code und Distanzeigenschaften . . . . .	228
5.3.5.3	Ratenkompatibel gelochte Faltungscodes . . . . .	229
5.4	Trelliscodierte Pulsamplitudenmodulation . . . . .	231
5.4.1	Digitale Pulsamplitudenmodulation . . . . .	232
5.4.2	Informationstheoretische Motivation . . . . .	234
5.4.3	Trelliscodierte PAM mit einfacher Zuordnung . . . . .	237
5.4.3.1	Codierung für biorthogonale Signalkonstellationen .	237
5.4.3.2	Zuordnung durch Partitionierung der Signalmenge .	238
5.4.3.3	Codeoptimierung . . . . .	242
5.4.3.4	Decodierung . . . . .	245
5.4.3.5	Berechnung der Distanzprofile . . . . .	247
5.4.4	Trelliscodierung mit mehrfacher Zuordnung . . . . .	250
5.4.4.1	Lattice-Codes . . . . .	251
5.4.4.2	Partitionierung des Gitters $\mathbb{Z}^4$ . . . . .	252
5.4.4.3	Mehrstufencodierung . . . . .	253
5.4.4.4	Decodierung . . . . .	256
5.4.5	Rotationsinvariante Verfahren . . . . .	259
5.4.6	Zeitvariante Modulation bei PSK . . . . .	260
<b>6</b>	<b>Vergleich trelliscodierter Übertragungsverfahren</b>	<b>261</b>
6.1	Vergleich von CPM und PAM . . . . .	261
6.2	Vergleich von CPM und trelliscodierter PAM . . . . .	264
6.3	Vergleich trelliscodierter QAM-Verfahren . . . . .	267
6.4	Vergleich anhand der cut-off-Rate . . . . .	270

<b>Anhang</b>	<b>275</b>
<b>Erzeugende Funktionen der Distanzprofile von Faltungscodes</b>	
A.1 Codes der Rate $R_c = 1/2$ . . . . .	275
A.2 Codes der Rate $R_c = 1/3$ . . . . .	278
A.3 Codes der Rate $R_c = 2/3$ (Gelochte Codes) . . . . .	280
A.4 Codes der Rate $R_c = 3/4$ (Gelochte Codes) . . . . .	282
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>285</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>303</b>