
Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen: Signale und Systeme	1
1.1	Signale	1
1.1.1	Definitionen	1
1.1.2	Energie- und Leistungssignale, Korrelationsfunktionen	3
1.1.3	Signalräume	6
1.1.4	Orthogonalreihen, Fourier-Transformation	9
1.1.5	Elementarsignale und deren Spektren	11
1.1.6	Stochastische Signale	13
1.2	Systeme	21
1.2.1	LTI-Systeme, Faltungsoperation	23
1.2.2	Elementarsysteme	25
1.3	Übertragung von stochastischen Signalen über LTI-Systeme	26
1.3.1	Übertragung über allgemeine LTI-Systeme	26
1.3.2	Übertragung von WGR über einen idealen Tiefpass	27
1.3.3	WGR am Eingang von zwei LTI-Systemen	28
1.4	BP-Signale und BP-Systeme im äquivalenten TP-Bereich	29
1.4.1	Analytisches Signal und Hilbert-Transformation	29
1.4.2	BP-TP-Transformation	30
1.4.3	BP-Systeme im äquivalenten TP-Bereich	35
1.4.4	BP-TP-Transformationen bei beliebigen Signalen	37
1.4.5	BP-Rauschen und äquivalentes TP-Rauschen	39
1.4.6	Korrelationsfunktionen, Energien und Leistungen bei äquivalenten TP-Signalen	41
1.5	Abtasttheorem für bandbegrenzte Signale	45
1.6	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen	49
1.7	Aufgaben	50
2	Grundlegende Verfahren zur Übertragung digitaler Signale	53
2.1	Übertragungsmodelle, Kanäle	53
2.2	Übertragung von Signalen und Information	56
2.3	Binäre Übertragung	62

2.3.1	Optimales Empfangsverfahren.....	63
2.3.2	Empfängerstrukturen	68
2.3.3	Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit	71
2.3.4	Spezialfälle: bipolar, unipolar, orthogonal.....	74
2.3.5	Kontinuierliche Übertragung, erstes Nyquist-Kriterium .	78
2.4	M-wertige Übertragung	82
2.4.1	Optimales Empfangsverfahren, Empfängerstrukturen ...	82
2.4.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten	84
2.4.3	Verallgemeinertes erstes Nyquist-Kriterium	92
2.5	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen.....	94
2.6	Anhang	95
2.6.1	ML-Regel für zeitkontinuierliche Signale und für Signalvektoren	95
2.7	Aufgaben.....	98
3	Spezielle Verfahren zur Übertragung digitaler Signale	107
3.1	Übertragungsmodell, Modulationsverfahren	107
3.1.1	Übertragungsmodell	108
3.1.2	Lineare Modulationsverfahren.....	110
3.1.3	Freiheitsgrade.....	112
3.2	Übertragung über TP-Kanäle	114
3.2.1	TP-Kanäle	114
3.2.2	Charakteristika einiger Modulationsverfahren	115
3.3	Übertragung mit linearen Modulationsverfahren über BP-Kanäle	118
3.3.1	BP-Kanäle	118
3.3.2	Übertragungsmodelle mit BP-TP-Transformation.....	118
3.3.3	Übertragungsmodell mit BP-Signalen	125
3.3.4	Zwei-, Ein- und Restseitenband-Modulationsverfahren ..	128
3.3.5	Charakteristika einiger Modulationsverfahren	131
3.3.6	Kohärente und inkohärente Übertragung, DPSK	137
3.3.7	Träger- und Taktsynchronisation	143
3.4	Frequency-Shift-Keying-Übertragungsverfahren.....	146
3.4.1	FSK und Übertragung mit orthogonalen Elementarsignalen	146
3.4.2	MSK und GMSK	148
3.4.3	CPM und CPFSK	152
3.5	Fehlerwahrscheinlichkeiten, Bandbreite- und Leistungsausnutzung.....	155
3.6	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen.....	164
3.7	Aufgaben.....	165

4	Übertragung analoger Signale	179
4.1	Anwendung des Abtasttheorems	180
4.1.1	Übertragung digitalisierter Abtastwerte, PCM	180
4.1.2	Zeitdiskrete Übertragungsverfahren	184
4.2	Übertragung mit linearen Modulationsverfahren über BP-Kanäle	184
4.2.1	QAM	184
4.2.2	ZSB-AM ohne Träger	187
4.2.3	ZSB-AM mit Träger, inkohärenter Empfang	188
4.2.4	ESB-AM und RSB-AM	191
4.3	Winkelmodulationsverfahren	194
4.4	Störverhalten von Übertragungsverfahren für analoge Signale	199
4.5	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen	201
4.6	Aufgaben	202
 5	 Übertragungskanäle, Kanalmodelle	 205
5.1	Übertragungskanäle mit linearen Verzerrungen	205
5.2	Zeitvariante und stochastisch-zeitvariante Kanäle, Fading	211
5.2.1	Zeitvariante Stoßantwort	211
5.2.2	Zeitvariante Übertragungsfunktion	216
5.2.3	BP-TP-Transformation bei zeitvarianten Systemen	220
5.2.4	Zusammenschaltungen bei zeitvarianten Systemen	221
5.2.5	Fadingkanäle	223
5.2.6	Systemfunktionen von zeitvarianten Kanälen	225
5.3	Kanalmodelle	231
5.3.1	Rayleigh-Kanal (Rayleigh-Fading)	232
5.3.2	Rice-Kanal (Rice-Fading)	239
5.3.3	WSSUS-Kanal	240
5.4	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen	242
5.5	Aufgaben	243
 6	 Digitale Übertragung über linear verzerrende Kanäle	 249
6.1	Übertragungsmodell, Empfangsverfahren	249
6.1.1	Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSE)	249
6.1.2	Empfangsverfahren mit Matched-Filter	252
6.2	Adaptive Entzerrung	256
6.2.1	Ansätze für Nicht-ML-Empfangsalgorithmen	257
6.2.2	Transversalentzerrer (TE)	258
6.2.3	Entzerrer mit Entscheidungsrückführung (DFE)	260
6.2.4	Optimale Koeffizienten beim DFE und TE	263
6.2.5	MLSE-Entzerrung mit dem Viterbi-Algorithmus (VA) ..	270
6.3	Adaptive Echokompensation	279
6.4	Adaptionsverfahren, Kanalschätzung	281
6.4.1	Gradientenverfahren bei DFE und TE	282
6.4.2	Kanalschätzung	284

6.4.3	Besonderheiten bei zeitvarianten Kanälen	285
6.5	Fehlerwahrscheinlichkeiten	287
6.6	Anhang	288
6.6.1	Anmerkung zu diskreten Faltungsprodukten	288
6.7	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen	289
6.8	Aufgaben	290
7	Informationstheorie, Quellen- und Kanalcodierung	301
7.1	Grundlagen der Informationstheorie	301
7.1.1	Vorbetrachtung	301
7.1.2	Informationsgehalt und Entropie	304
7.1.3	Codierung	309
7.1.4	Diskrete Kanäle, Kanalkapazität	310
7.1.5	Kapazität von kontinuierlichen Kanälen	320
7.2	Einführung in die Quellencodierung	326
7.2.1	Codierung von diskreten Quellen	326
7.2.2	Codierung von kontinuierlichen Quellen	330
7.3	Einführung in die Kanalcodierung	334
7.3.1	Grundlagen	334
7.3.2	Blockcodes	349
7.3.3	Faltungs codes	353
7.3.4	Anmerkungen zur Kanalcodierung	357
7.4	Anhang	359
7.4.1	Zur differentiellen Entropie der Gauß-Verteilung	359
7.4.2	Additiver Gauß-Kanal: Verteilungsdichten, Entropien	360
7.5	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen	362
7.6	Aufgaben	364
8	Teilungsverfahren, Multiplex	373
8.1	Grundlegende Multiplexverfahren	374
8.1.1	Frequenzmultiplex (FDM)	374
8.1.2	Zeitmultiplex (TDM)	376
8.1.3	Multiplex bei räumlich verteilten Nutzern	379
8.2	Multiplex bei linearen Modulationsverfahren	380
8.2.1	Allgemeiner Fall	380
8.2.2	Spezialfälle FDM und TDM	382
8.2.3	Spezialfall CDM	383
8.2.4	Spezialfall OFDM	387
8.2.5	Multiplex-Übertragung von Analogsignalen	395
8.3	Vektorwertige Übertragung mit linearen Modulationsverfahren	396
8.3.1	Skalare Übertragung	397
8.3.2	MIMO-Kanäle	399
8.3.3	Vektor-Übertragungsmodell	401
8.3.4	Vektor-Übertragungsmodell bei SISO-Kanälen	404
8.3.5	Multiplexverfahren und Strukturen von $R(k)$	405

8.3.6	Zerlegung von $R(k)$	410
8.3.7	Diversität, räumliches Multiplex, Kanalkapazitäten	412
8.3.8	Vektordetektion	418
8.4	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen	422
8.5	Aufgaben	423
9	Vielfachzugriffsverfahren, Netze, Kommunikationssysteme	427
9.1	Vielfachzugriff	427
9.1.1	Problemstellung	427
9.1.2	Theorie der Warteschlangen	430
9.1.3	Vielfachzugriff und Protokolle	435
9.2	Kommunikationssysteme: Eine kurze Einführung	443
9.2.1	Kommunikationssysteme – Kommunikationsnetze	443
9.2.2	OSI-Modell	445
9.2.3	Verbindung von Netzen	448
9.3	Zusammenfassung und bibliographische Anmerkungen	450
9.4	Aufgaben	451
	Symbolverzeichnis	455
	Literaturverzeichnis	461
	Sachverzeichnis	467