

Inhaltsverzeichnis

I Signale und Übertragungssysteme	1
1 Systemtheoretische Grundlagen	1
1.1 Klassifikationen von Signalen	2
1.2 Fourier-Transformation	3
1.2.1 Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften	3
1.2.2 Symmetrie der Spektren reeller Zeitsignale	7
1.3 Hilbert-Transformation	8
1.3.1 Definition und Eigenschaften	8
1.3.2 Approximation durch reale Systeme	13
1.3.3 Hilbert-Transformatoren für Bandpass-Signale	16
1.3.4 Analytische Signale	18
1.3.5 Zusammenhang zwischen Real- und Imaginärteil der Übertragungsfunktionen eines kausalen Systems.	20
1.4 Äquivalente Tiefpass-Darstellung von Bandpass-Signalen und -Systemen .	22
1.4.1 Tiefpass-Darstellung von Bandpass-Signalen	22
1.4.2 Strukturen von Quadraturmischern	24
1.4.3 Basisband-Darstellung von Bandpass-Übertragungssystemen	25
1.5 Empfängerstrukturen	28
1.5.1 Prinzip des Frequenzmultiplex	28
1.5.2 Geradeaus-Empfänger	29
1.5.3 Superheterodyn-Prinzip	30
1.5.4 Direktmischende Strukturen	32
1.6 Rauschsignale	34
1.6.1 Beschreibung von stochastischen Prozessen	34
1.6.2 Äquivalente Basisbanddarstellung stationärer Bandpass-Rauschprozesse	40
1.6.3 Die Autokorrelationsmatrix	44
1.6.4 Wiener-Filter	45
2 Eigenschaften von Übertragungskanälen	49
2.1 Verzerrungsfreie Übertragung – Approximation idealisierter Systeme . . .	50
2.1.1 Definition der Verzerrungsfreiheit	50
2.1.2 Die erste Nyquist Bedingung	52
2.1.3 Filter mit Kosinus-roll-off-Flanke	56

Inhaltsverzeichnis	IX	
2.2	Zeitdauer-Bandbreite-Produkt	58
2.3	Eigenschaften realer Kanäle	63
2.3.1	Lineare Verzerrungen	63
2.3.2	Nichtlineare Verzerrungen	65
2.3.3	Frequenzverwerfung als Beispiel für einen zeitvarianten Kanal	70
2.3.4	Additive Störungen	72
2.4	Das Fernsprechnet	76
2.5	Der Funkkanal	80
2.5.1	Zeitinvariante Mehrwegekanäle	80
2.5.2	Mobilfunkkanal	85
II	Analoge Übertragung	95
3	Analoge Modulationsverfahren	95
3.1	Definitionen analoger Modulationsformen	96
3.1.1	Amplitudenmodulation	96
3.1.2	Winkelmodulation	97
3.1.3	Einseitenbandmodulation	100
3.1.4	Übersicht	103
3.2	Spektraleigenschaften	104
3.2.1	Lineare Modulationsformen	105
3.2.2	Winkelmodulation	110
3.3	Äquivalente Tiefpassdarstellung von Modulationssignalen	116
3.3.1	Eigenschaften	116
3.3.2	Demodulationsvorschriften	121
3.3.3	Komplexe Sender- und Empfängerstrukturen	126
3.4	Praktische Systeme zur Demodulation	132
3.4.1	Einhüllenden-Demodulation von AM-Signalen	132
3.4.2	FM-Demodulation mit Amplitudenbegrenzung	133
3.4.3	Digitale FM-Demodulation	137
4	Einflüsse linearer Verzerrungen	139
4.1	Äquivalente Basisband-Darstellung des Übertragungskanals	140
4.2	Kanalverzerrungen bei linearen Modulationsverfahren	142
4.2.1	Kohärente AM-Demodulation	143
4.2.2	Einhüllenden-Demodulation	143
4.2.3	Einseitenband-Demodulation	145
4.3	Lineare Kanalverzerrungen bei Winkelmodulation	146
4.3.1	Quasistationäres Modell	148
4.3.2	Numerische Lösung für sinusförmige Modulation	152
4.3.3	Konstant-Modulus-Algorithmus (CMA) zur Entzerrung winkelmodulierter Signale	155
5	Additive Störungen	159
5.1	Einflüsse von Störsendern	160
5.1.1	Lineare Modulationsformen	160
5.1.2	Frequenzmodulation	164

5.2	Störungen durch additives Rauschen	168
5.2.1	Lineare Modulationsformen	168
5.2.2	Frequenzmodulation	172
5.3	Vergleich der Modulationsarten	177
5.3.1	Vergleich unter gleichen Sendeleistungen	177
5.3.2	Informationstheoretischer Vergleich	178
6	Zwei Systembeispiele für analoge Modulation	183
6.1	Trägerfrequenztechnik im Fernsprechnetz	184
6.2	UKW-Hörrundfunk	187
6.2.1	Frequenzbänder für Hörrundfunk und Fernsehen	187
6.2.2	Optimierung der UKW-ZF-Filter	188
6.2.3	UKW-Preemphase und -Deemphase	192
6.2.4	UKW-Stereophonie	193
6.2.5	Verkehrsfunk	195
	III Digitale Übertragung	197
7	Diskretisierung analoger Quellensignale	197
7.1	Zeitdiskrete, amplitudenkontinuierliche Darstellung	198
7.1.1	Pulsamplitudenmodulation	198
7.1.2	Pulsdauer-, Pulsphasenmodulation	203
7.2	Zeit- und amplitudendiskrete Darstellung: Pulscodemodulation	205
7.2.1	Lineare Quantisierung	205
7.2.2	Nichtlineare Quantisierung	208
7.3	Differentielle Pulscodemodulation	210
7.3.1	Grundprinzip	210
7.3.2	Lineare Prädiktion	211
7.3.3	Vorwärts- und Rückwärtsprädiktion	215
7.3.4	LPC-Sprachcoder	218
7.4	Deltamodulation	222
7.4.1	Grundprinzip	222
7.4.2	Sigma-Delta-Modulation	224
8	Grundlagen der digitalen Datenübertragung	229
8.1	Prinzip der digitalen Übertragung	230
8.1.1	Grundstruktur eines Datenübertragungssystems	230
8.1.2	Spektrum eines Datensignals	231
8.1.3	Intersymbol-Interferenz - Die erste Nyquistbedingung	234
8.1.4	Augendiagramm - Die zweite Nyquistbedingung	239
8.2	Übertragung mit kontrollierter Intersymbol-Interferenz	242
8.2.1	Partial-Response-Codierung	242
8.2.2	Partial-Response-Vorcodierung	249
8.3	Übertragung unter Rauscheinfluss	253
8.3.1	Rauschangepasste Empfangsfilter (Matched-Filter)	253
8.3.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit	259
8.3.3	Signal-Störverhältnis bei PCM-Übertragung	264

Inhaltsverzeichnis	XI
8.4 Systembeispiel: PCM-Übertragung im Fernsprechnet	267
8.4.1 Prinzip des Zeitmultiplex	267
8.4.2 Fernsprech-PCM-Hierarchie	268
9 Digitale Modulation	271
9.1 Lineare Modulationsformen	272
9.1.1 Beschreibung im Signalraum	272
9.1.2 Digitale Modulation mit Nyquist-Impulsformung	276
9.1.3 Offset-PSK	278
9.1.4 Differentielle PSK-Modulation (DPSK)	279
9.1.5 Klassifikation digitaler Modulationssignale	281
9.2 Nichtlineare Modulationsformen	284
9.2.1 Diskrete Frequenzmodulation (FSK)	284
9.2.2 Minimum Shift Keying (MSK)	288
9.2.3 Gaußsches Minimum Shift Keying (GMSK)	291
9.2.4 Continuous-Phase-Modulation (CPM)	293
9.3 Spektraleigenschaften	295
9.3.1 Lineare Modulationsformen	295
9.3.2 Spektren orthogonaler FSK-Signale	298
9.3.3 Numerisches Berechnungsverfahren zur Spektralanalyse beliebiger CPM-Formen	300
9.3.4 Vergleich der Spektren verschiedener Modulationssignale	305
10 Prinzipien der Demodulation	309
10.1 Kohärente Demodulation	310
10.1.1 Grundstrukturen kohärenter Empfänger für lineare Modulationsformen	310
10.1.2 Kohärente Demodulation von MSK-Signalen	311
10.1.3 Näherungsweise Beschreibung von CPM-Signalen durch lineare Modulationsformen	313
10.1.4 Kohärente Demodulation von CPM-Signalen	317
10.2 Inkohärente Demodulation	320
10.2.1 Begriffsklärung	320
10.2.2 Inkohärente Demodulation von DPSK-Signalen	322
10.2.3 Inkohärente Demodulation von DAPSK-Signalen	325
10.2.4 Differentieller Demodulator für CPM-Signale	327
10.2.5 Diskriminator-Demodulator für CPM-Signale	328
10.3 Trägerregelung	331
10.3.1 Trägerregelung im Bandpass-Bereich	331
10.3.2 Entscheidungsrückgekoppelte Trägerregelung im Basisband	335
10.3.3 Linearisiertes Modell für den Phasenregelkreis	337
10.3.4 Statischer Phasenfehler infolge Frequenzverwerfung	339
10.3.5 Phasenjitter	341
10.3.6 Phasenrauschen	343
10.4 Symboltakt-Synchronisation	344
10.4.1 Leistungsdichtespektrum eines quadrierten Datensignals	344

10.4.2	Taktrückgewinnung durch Gleichrichtung des Datensignals	348
10.4.3	Gardner-Taktregelung	349
10.4.4	Entscheidungsrückgekoppelte Taktregelung	352
11	Übertragung über AGN-Kanäle	357
11.1	Optimaler Empfänger für gaußsche Störungen	358
11.2	Spezialfall weißer Rauschstörungen (AWGN-Kanal)	361
11.2.1	Korrelationsempfänger	361
11.2.2	Matched-Filter-Empfänger	362
11.3	Störung durch farbiges Rauschen	365
11.3.1	Korrelationsempfänger für farbiges Rauschen	365
11.3.2	Matched-Filter für farbiges Rauschen	367
11.4	Fehlerwahrscheinlichkeit für AWGN-Kanäle	370
11.4.1	Signal- und Störleistungsbeziehungen im äquivalenten Tiefpassbereich	370
11.4.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei zweistufigen Signalformen	373
11.4.3	Bit-Zuordnung bei höherstufigen Modulationsverfahren	375
11.4.4	Bit- und Symbolfehlerwahrscheinlichkeit für QPSK	378
11.4.5	Näherungslösung für höherstufige PSK-Übertragung	380
11.4.6	Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM)	386
11.4.7	Einfluss eines statischen Phasenfehlers	388
11.4.8	Inkohärente DPSK-Demodulation	389
11.4.9	Fehlerwahrscheinlichkeiten für MSK und GMSK	391
12	Entzerrung	397
12.1	Grundstrukturen von Entzerrern	398
12.1.1	Matched-Filter-Empfänger mit Entzerrung	398
12.1.2	Bandpass- und Basisbandentzerrung	400
12.1.3	Inverse Systeme	403
12.1.4	Least-Squares-Lösungen für inverse Systeme	408
12.2	Lineare Entzerrung mit nichtrekursiven Systemen	411
12.2.1	Bedingungen zur perfekten Entzerrung	411
12.2.2	Symboltaktentzerrer	414
12.2.3	Entzerrer mit Doppelabtastung	416
12.2.4	Beschreibung der Entzerrerlösungen durch die Pseudoinverse	420
12.2.5	Minimum-Mean-Square-Error-Lösung (MMSE) für lineare Entzerrer	421
12.2.6	Beispiele zur linearen Entzerrung	425
12.2.7	Einfluss des Abtastzeitpunktes auf die Entzerrung	428
12.3	Nichtlineare Entzerrerstrukturen	429
12.3.1	Quantisierte Rückführung (Decision Feedback)	429
12.3.2	MMSE-Lösung für Entzerrer mit quantisierter Rückführung	431
12.3.3	Beispiel: MMSE-Entwurf für lineare und nichtlineare Entzerrung	435
12.3.4	Tomlinson-Harashima-Vorcodierung	437
12.4	Adaptive Entzerrereinstellung	440
12.4.1	Least-Mean-Squares-Algorithmus (LMS)	441
12.4.2	Konvergenz des LMS-Algorithmus	445

12.4.3	Rekursiver Least-Squares-Algorithmus (RLS)	450
12.5	Lattice-Entzerrer	453
12.5.1	Lattice-Prädiktor zur Dekorrelation	453
12.5.2	Struktur des Lattice-Entzerrers	457
12.5.3	Lattice-Gradientenverfahren	462
12.5.4	Konvergenzvergleich der Adaptionsalgorithmen	466
12.6	Entzerrung unter additivem Kanalrauschen	469
12.6.1	Einfluss von Rauschen auf die MMSE-Lösung	469
12.6.2	S/N-Verlust infolge der Entzerrung	471
12.6.3	Fehlerwahrscheinlichkeit unter Entzerrer-Einfluss	474
12.6.4	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Tomlinson-Harashima-Vorcodierung	479
13	Maximum-Likelihood-Schätzung von Datenfolgen	483
13.1	Maximum-Likelihood-Schätzung	484
13.1.1	Grundstruktur des optimalen Empfängers	484
13.1.2	Optimaler Empfänger mit Dekorrelationsfilter	486
13.2	Viterbi-Algorithmus	489
13.2.1	Viterbi-Detektion endlicher Datenfolgen	489
13.2.2	Detektion unbegrenzter Datenfolgen	495
13.3	Einfluss von additivem Kanalrauschen	499
13.3.1	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Viterbi-Detektion	499
13.3.2	S/N-Verlustfaktor	506
13.3.3	Ungünstigste Kanäle 1. und 2. Ordnung	507
13.4	Vorentzerrer zur Verkürzung der Kanalimpulsantwort	513
14	Kanalschätzung	519
14.1	Referenzsignal-gestützte Kanalschätzung	520
14.1.1	Geschlossene Lösung nach Wiener-Lee	520
14.1.2	LMS-Kanalschätzung	521
14.1.3	Maximum-Likelihood-Kanalschätzung	523
14.1.4	Maximum-a-posteriori-Schätzung	525
14.1.5	Orthogonale Folgen	529
14.2	Blinde Kanalschätzung	533
14.2.1	Prinzipielle Ansätze	533
14.2.2	SOCS-Algorithmen	536
14.2.3	HOS-Algorithmen	544
14.3	GSM-Kanalschätzung	552
14.3.1	GSM-Burststruktur	552
14.3.2	Turbo-Kanalschätzung	553
14.3.3	Referenzgestützte und blinde GSM-Kanalschätzung	555
IV	Mobilfunk-Kommunikation	559
15	Übertragung über Funkkanäle	559
15.1	Standards zur Mobilfunk-Übertragung	560
15.2	Übertragung über nicht frequenzselektive Rayleigh-Kanäle	563
15.2.1	Ergodische Fehlerwahrscheinlichkeit	563

15.2.2	Ausfall-Wahrscheinlichkeit	567
15.3	Diversität	569
15.3.1	Kanalmodell und Empfängerstrukturen	569
15.3.2	Ergodische Bitfehlerwahrscheinlichkeit	572
15.4	Entzerrung von frequenzselektiven Schwundkanälen	578
16	Mehrträger-Modulation	581
16.1	Grundprinzip der Mehrträger-Übertragung	582
16.1.1	Struktur eines Mehrträgersystems	582
16.1.2	Das OFDM-Konzept	585
16.2	Entzerrung	588
16.2.1	Das Guardintervall	588
16.2.2	Entzerrung im Frequenzbereich	593
16.2.3	Vorentzerrer zur Impulsverkürzung	596
16.2.4	Einträger-Frequenzbereichs-Entzerrer	597
16.3	OFDM-Kanalschätzung	601
16.3.1	Kohärente und inkohärente Empfängerstrukturen	601
16.3.2	OFDM-Kanalschätzung mit Hilfe einer Präambel	603
16.3.3	Pilotträger in Zeit- und Frequenzrichtung	607
16.4	Übergang auf den analogen Kanal	613
16.4.1	Spektralformung des Sendesignals	613
16.4.2	Außerbandstrahlung infolge nichtlinearer Verzerrungen	616
16.4.3	Verfahren zur Spitzenwertreduktion	618
16.5	Mehrträger-Systeme mit weicher Impulsformung	621
16.5.1	Intersymbol- und Intercarrier-Interferenz	621
16.5.2	Orthogonales Verfahren mit Offset-QAM	625
16.5.3	Nichtorthogonale Systeme mit minimalem Zeit-Bandbreiteprodukt	626
16.6	Drei Beispiele zur OFDM-Übertragung	629
16.6.1	Die WLAN-Systeme IEEE 802.11a und HIPERLAN/2	629
16.6.2	DAB und DVB-T	633
16.6.3	Long Term Evolution (LTE)	636
17	Codemultiplex-Übertragung	639
17.1	Grundprinzip des Codemultiplex	640
17.1.1	Prinzip der spektralen Spreizung	640
17.1.2	CDMA-Empfänger für nicht frequenzselektive Kanäle	642
17.1.3	Pseudo-Zufallsfolgen	643
17.1.4	Walsh-Codes	651
17.1.5	CDMA: Ein Zugriffsverfahren für zellulare Netze	653
17.2	Höherstufige orthogonale Modulation	659
17.2.1	Modulation durch Walsh-Signale	659
17.2.2	Empfänger für M -stufige orthogonale Modulation	662
17.2.3	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für AWGN-Kanäle	667
17.3	Codemultiplex-Übertragung über frequenzselektive Kanäle	674
17.3.1	Rake-Empfänger	674
17.3.2	Kohärenter Empfänger für M -stufige orthogonale Modulation	678

Inhaltsverzeichnis	XV
17.3.3 Inkohärenter Rake-Empfänger	680
17.4 CDMA-Übertragung über Mobilfunkkanäle	686
17.4.1 Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei Einnutzer-Übertragung	686
17.4.2 Mehrnutzer-Interferenz	689
17.5 Mehrträger-CDMA	694
17.5.1 Prinzip des MC-CDMA	694
17.5.2 Vergleich mit Einträger-CDMA	699
17.6 Zwei Beispiele für CDMA-Mobilfunksysteme	701
17.6.1 UMTS	701
17.6.2 Das IS-95-System	707
18 Mehrantennen-Systeme	711
18.1 Kanäle mit mehreren Ein- und Ausgängen (MIMO)	712
18.1.1 Zielsetzung	712
18.1.2 Systemmodell	713
18.1.3 Eigenmoden eines MIMO-Übertragungssystems	714
18.1.4 Korrelationsmatrizen von MIMO-Systemen	718
18.1.5 Kanalkapazität des MIMO-Kanals	719
18.2 Mehrantennen-Konzepte zur Verbesserung der Übertragungssicherheit	723
18.2.1 SIMO-Systeme: Maximum Ratio Combining am Empfänger	723
18.2.2 MISO-Systeme mit Kanalkennntnis am Sender: Beamforming	726
18.2.3 MISO-Systeme ohne Kanalkennntnis am Sender: Space-Time-Codes	729
18.3 Erhöhung der Übertragungsrate durch Raum-Multiplex	735
18.3.1 Multi-Layer-Übertragung bei Kanalkennntnis am Sender	735
18.3.2 Multi-Layer-Konzepte ohne Kanalkennntnis am Sender	739
18.3.3 Successive Interference Cancellation (SIC)	741
18.3.4 Messergebnisse	744
Anhang A-H	748
A Korrespondenzen zur Fourier- und Hilberttransformation	749
A.1 Fouriertransformation	749
A.2 Hilberttransformation	751
B Auszüge aus der Linearen Algebra	753
B.1 Übersicht über wichtige Beziehungen	753
B.1.1 Nomenklatur und Definitionen	753
B.1.2 Addition, Multiplikation, elementare Eigenschaften	756
B.1.3 Determinanten	758
B.1.4 Inverse einer Matrix	759
B.1.5 Unitäre Matrizen	760
B.1.6 Eigenwerte und Eigenvektoren	761
B.1.7 Singulärwertzerlegung	762
B.1.8 Pseudoinverse	764
B.1.9 Weitere Matrix-Zerlegungen	764
B.1.10 Ableitung nach Vektoren	766
B.2 Vektorielle Darstellung von Signalen	767

B.2.1	Beschreibung der Faltung als Skalarprodukt	768
B.2.2	Die Faltungsmatrix	769
C	Zeitdiskrete Simulationsmodelle	773
C.1	Übergang von einem zeitkontinuierlichen auf einen zeitdiskreten Rauschprozess	773
C.2	Das Störabstandsmaß E_S/N_0	775
C.2.1	Reelle Tiefpass-Übertragung	775
C.2.2	Modulierte Übertragung im äquivalenten Tiefpassbereich	777
C.2.3	Symboltaktmodell eines Übertragungssystems	779
C.3	Erzeugung einer Gaußverteilung aus einem gleichverteilten Prozess	782
D	Beschreibung gaußverteilter Rauschprozesse	785
D.1	Diskrete Karhunen-Loève Transformation	785
D.2	Verbunddichte eines farbigen Gauß-Prozesses	787
E	Ableitungen zum Lattice-Entzerrer	789
E.1	Levinson-Durbin-Rekursion	789
E.2	Orthogonalität der Rückwärts-Prädiktionsfehler	792
E.3	Herleitungen zum Lattice-Gradientenalgorithmus	794
F	Ergänzung zur Maximum-Likelihood-Schätzung	797
F.1	Faltungsmatrizen	797
F.2	Dekorrelationsfilter	799
G	Bedingungen für die ideale Kanalentzerrung mit Hilfe von T/2-Entzerrern	803
G.1	Herleitung der Singularitäts-Bedingungen	803
G.2	Beispiele	806
H	Matrix-Inversionslemma	811
H.1	Allgemeine Herleitung	811
H.2	Spezielle Form im RLS-Algorithmus	812
	Literaturverzeichnis	815
	Sachverzeichnis	837