

Inhaltsverzeichnis

I	Signale und Übertragungssysteme	1
1	Systemtheoretische Grundlagen	3
1.1	Klassifikationen von Signalen	4
1.2	Fourier-Transformation	7
1.2.1	Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften	7
1.2.2	Symmetrie der Spektren reeller Zeitsignale	10
1.3	Hilbert-Transformation	11
1.3.1	Definition und Eigenschaften	11
1.3.2	Hilbert-Transformatoren für Bandpass-Signale	14
1.3.3	Analytische Signale	16
1.4	Äquivalente Tiefpass-Darstellung von Bandpass-Signalen und -Systemen	18
1.4.1	Tiefpass-Darstellung von Bandpass-Signalen	18
1.4.2	Strukturen von Quadraturmischern	20
1.4.3	Basisband-Darstellung von Bandpass-Übertragungssystemen	21
1.5	Empfängerstrukturen	24
1.5.1	Prinzip des Frequenzmultiplex	24
1.5.2	Geradeaus-Empfänger	25
1.5.3	Superheterodyn-Prinzip	27
1.5.4	Direktmischende Strukturen	29
1.6	Rauschsignale	30
1.6.1	Beschreibung von stochastischen Prozessen	30
1.6.2	Äquivalente Basisbanddarstellung stationärer Bandpass-Rauschprozesse	35
1.6.3	Die Autokorrelationsmatrix	40
1.6.4	Wiener-Filter	41
	Literaturverzeichnis	44
2	Eigenschaften von Übertragungskanälen	45
2.1	Approximation idealisierter Übertragungskanäle	46
2.1.1	Der ideale Tiefpass	46
2.1.2	Die erste Nyquist Bedingung	47
2.1.3	Filter mit Kosinus-roll-off-Flanke	51
2.2	Zeitdauer-Bandbreite-Produkt	53
2.3	Eigenschaften realer Kanäle	57

2.3.1	Lineare Verzerrungen	57
2.3.2	Nichtlineare Verzerrungen	60
2.3.3	Frequenzverwerfung als Beispiel für einen zeitvarianten Kanal . . .	64
2.3.4	Additive Störungen	65
2.4	Der Funkkanal	70
2.4.1	Zeitinvariante Mehrwegekanäle	70
2.4.2	Mobilfunkkanal	75
	Literaturverzeichnis	84
II	Analoge Übertragung	87
3	Analoge Modulationsverfahren	89
3.1	Definitionen analoger Modulationsformen	90
3.1.1	Amplitudenmodulation	90
3.1.2	Winkelmodulation	91
3.1.3	Einseitenbandmodulation	94
3.1.4	Übersicht	95
3.2	Spektraleigenschaften	96
3.2.1	Lineare Modulationsformen	96
3.2.2	Winkelmodulation	101
3.3	Äquivalente Tiefpassdarstellung von Modulationssignalen	108
3.3.1	Eigenschaften	108
3.3.2	Demodulationsvorschriften	112
3.3.3	Komplexe Sender- und Empfängerstrukturen	117
3.4	Praktische Systeme zur Demodulation	123
3.4.1	Einhüllenden-Demodulation von AM-Signalen	123
3.4.2	FM-Demodulation mit Amplitudenbegrenzung	124
3.4.3	Digitale FM-Demodulation	127
	Literaturverzeichnis	129
4	Einflüsse realer Übertragungskanäle	131
4.1	Kanalverzerrungen bei linearen Modulationsverfahren	132
4.1.1	Kohärente AM-Demodulation	133
4.1.2	Einhüllenden-Demodulation	134
4.1.3	Einseitenband-Demodulation	135
4.2	Lineare Kanalverzerrungen bei Winkelmodulation	135
4.2.1	Quasistationäres Modell	137
4.2.2	Numerische Lösung für sinusförmige Modulation	141
4.2.3	Konstant-Modulus-Algorithmus (CMA) zur Entzerrung winkelmodulierter Signale	144
4.3	Störungen durch additives Rauschen	147
4.3.1	Lineare Modulationsformen	147
4.3.2	Frequenzmodulation	153
	Literaturverzeichnis	157
5	UKW-Rundfunk: Systembeispiel für analoge Modulation	159
5.1	Frequenzbänder für den Hörrundfunk und Fernsehen	160

5.1.1	Analoger Hörrundfunk	160
5.1.2	Analoges Fernsehen	161
5.2	UKW-Rundfunksystem	162
5.2.1	Preemphasis und Deemphasis	162
5.2.2	Stereophonie	163
5.2.3	Verkehrsfunk, RDS	165
III	Digitale Übertragung	167
6	Diskretisierung analoger Quellensignale	169
6.1	Zeitdiskrete, amplitudenkontinuierliche Darstellung	170
6.1.1	Pulsamplitudenmodulation	170
6.1.2	Pulsdauer-, Pulsphasenmodulation	175
6.2	Zeit- und amplitudendiskrete Darstellung: Pulscodemodulation	177
6.2.1	Lineare Quantisierung	177
6.2.2	Nichtlineare Quantisierung	180
6.3	Differentielle Pulscodemodulation	182
6.3.1	Grundprinzip	182
6.3.2	Lineare Prädiktion	183
6.3.3	Vorwärts- und Rückwärtsprädiktion	188
6.3.4	LPC-Sprachcoder	190
6.4	Deltamodulation	194
6.4.1	Grundprinzip	194
6.4.2	Sigma-Delta-Modulation	196
	Literaturverzeichnis	199
7	Grundlagen der digitalen Datenübertragung	201
7.1	Prinzip der digitalen Übertragung	202
7.1.1	Grundstruktur eines Datenübertragungssystems	202
7.1.2	Spektrum eines Datensignals	203
7.1.3	Intersymbol-Interferenz - Die erste Nyquistbedingung	206
7.1.4	Augendiagramm - Die zweite Nyquistbedingung	211
7.2	Anpassung an den analogen Kanal	214
7.2.1	Leitungscode	214
7.2.2	Partial-Response-Codierung	217
7.2.3	Partial-Response-Vorcodierung	225
7.3	Symboltakt-Synchronisation	229
7.3.1	Leistungsdichtespektrum eines quadrierten Datensignals	229
7.3.2	Taktrückgewinnung durch Gleichrichtung des Datensignals	233
7.3.3	Gardner-Taktregelung	234
7.3.4	Entscheidungsrückgekoppelte Taktregelung	237
7.4	Übertragung unter Rauscheinfluss	241
7.4.1	Rauschangepasste Empfangsfilter (Matched-Filter)	241
7.4.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit	247
7.4.3	Signal-Störverhältnis bei PCM-Übertragung	253
7.5	Systembeispiel: PCM-Übertragung im Fernsprechnet	255

7.5.1	Prinzip des Zeitmultiplex	255
7.5.2	Fernsprech-PCM-Hierarchie	257
	Literaturverzeichnis	258
8	Digitale Modulation	259
8.1	Lineare Modulationsformen	260
8.1.1	Beschreibung im Signalraum	260
8.1.2	Digitale Modulation mit Nyquist-Impulsformung	264
8.1.3	Offset-PSK	266
8.1.4	Differentielle PSK-Modulation (DPSK)	267
8.1.5	Klassifikation digitaler Modulationssignale	269
8.2	Nichtlineare Modulationsformen	272
8.2.1	Diskrete Frequenzmodulation (FSK)	272
8.2.2	Minimum Shift Keying (MSK)	276
8.2.3	Gaußsches Minimum Shift Keying (GMSK)	279
8.2.4	Continuous-Phase-Modulation (CPM)	281
8.3	Spektraleigenschaften	283
8.3.1	Lineare Modulationsformen	283
8.3.2	Spektren orthogonaler FSK-Signale	286
8.3.3	Numerisches Berechnungsverfahren zur Spektralanalyse beliebiger CPM-Formen	288
8.3.4	Vergleich der Spektren verschiedener Modulationssignale	292
	Literaturverzeichnis	296
9	Prinzipien der Demodulation	297
9.1	Kohärente Demodulation	298
9.1.1	Grundstrukturen kohärenter Empfänger für lineare Modulationsformen	298
9.1.2	Kohärente Demodulation von MSK-Signalen	300
9.1.3	Näherungsweise Beschreibung von CPM-Signalen durch lineare Modulationsformen	302
9.1.4	Kohärente Demodulation von CPM-Signalen	306
9.2	Inkohärente Demodulation	308
9.2.1	Begriffsklärung	308
9.2.2	Inkohärente Demodulation von DPSK-Signalen	310
9.2.3	Inkohärente Demodulation von DAPSK-Signalen	313
9.2.4	Differentieller Demodulator für CPM-Signale	314
9.2.5	Diskriminator-Demodulator für CPM-Signale	317
9.3	Trägerregelung	319
9.3.1	Trägerregelung im Bandpass-Bereich	319
9.3.2	Entscheidungsrückgekoppelte Trägerregelung im Basisband	323
9.3.3	Linearisiertes Modell für den Phasenregelkreis	325
9.3.4	Statischer Phasenfehler infolge Frequenzverwerfung	327
9.3.5	Phasenjitter	328
9.3.6	Phasenrauschen	330
	Literaturverzeichnis	332

10 Übertragung über AWGN-Kanäle	333
10.1 Optimaler Empfänger für gaußsche Störungen	334
10.2 Spezialfall weißer Rauschstörungen (AWGN-Kanal)	337
10.2.1 Korrelationsempfänger	337
10.2.2 Matched-Filter-Empfänger	338
10.3 Störung durch farbiges Rauschen	341
10.3.1 Korrelationsempfänger für farbiges Rauschen	341
10.3.2 Matched-Filter für farbiges Rauschen	343
10.4 Fehlerwahrscheinlichkeit für AWGN-Kanäle	346
10.4.1 Signal- und Störleistungsbeziehungen im äquivalenten Tiefpassbereich	346
10.4.2 Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei zweistufigen Signalformen	349
10.4.3 Bit-Zuordnung bei höherstufigen Modulationsverfahren	351
10.4.4 Bit- und Symbolfehlerwahrscheinlichkeit für QPSK	354
10.4.5 Näherungslösung für höherstufige PSK-Übertragung	356
10.4.6 Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM)	362
10.4.7 Einfluss eines statischen Phasenfehlers	364
10.4.8 Inkohärente DPSK-Demodulation	365
10.4.9 Fehlerwahrscheinlichkeiten für MSK und GMSK	367
Literaturverzeichnis	371
11 Entzerrung	373
11.1 Grundstrukturen von Entzerrern	374
11.1.1 Matched-Filter-Empfänger mit Entzerrung	374
11.1.2 Bandpass- und Basisbandentzerrung	376
11.1.3 Inverse Systeme	378
11.1.4 Least-Squares-Lösungen für inverse Systeme	384
11.2 Lineare Entzerrung mit nichtrekursiven Systemen	387
11.2.1 Bedingungen zur perfekten Entzerrung	387
11.2.2 Symboltaktentzerrer	390
11.2.3 Entzerrer mit Doppelabtastung	392
11.2.4 Beschreibung der Entzerrerlösungen durch die Pseudoinverse	396
11.2.5 Minimum-Mean-Square-Error-Lösung (MMSE) für lineare Entzerrer	397
11.2.6 Beispiele zur linearen Entzerrung	402
11.2.7 Einfluss des Abtastzeitpunktes auf die Entzerrung	403
11.3 Nichtlineare Entzerrerstrukturen	406
11.3.1 Quantisierte Rückführung (Decision Feedback)	406
11.3.2 MMSE-Lösung für Entzerrer mit quantisierter Rückführung	408
11.3.3 Beispiel: MMSE-Entwurf für lineare und nichtlineare Entzerrung	411
11.3.4 Tomlinson-Harashima-Vorcodierung	413
11.4 Adaptive Entzerrereinstellung	416
11.4.1 Least-Mean-Squares-Algorithmus (LMS)	418
11.4.2 Konvergenz des LMS-Algorithmus	421
11.4.3 Rekursiver Least-Squares-Algorithmus (RLS)	426
11.5 Lattice-Entzerrer	429

11.5.1	Lattice-Prädiktor zur Dekorrelation	429
11.5.2	Struktur des Lattice-Entzerrers	433
11.5.3	Lattice-Gradientenverfahren	438
11.5.4	Konvergenzvergleich der Adaptionsalgorithmen	442
11.6	Entzerrung unter additivem Kanalrauschen	445
11.6.1	Einfluss von Rauschen auf die MMSE-Lösung	445
11.6.2	S/N-Verlust infolge der Entzerrung	447
11.6.3	Fehlerwahrscheinlichkeit unter Entzerrer-Einfluss	450
11.6.4	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Tomlinson-Harashima-Vorcodierung	455
	Literaturverzeichnis	457
12	Maximum-Likelihood-Schätzung von Datenfolgen	459
12.1	Maximum-Likelihood-Schätzung	460
12.1.1	Grundstruktur des optimalen Empfängers	460
12.1.2	Optimaler Empfänger mit Dekorrelationsfilter (Forney-Empfänger)	462
12.2	Viterbi-Algorithmus	466
12.2.1	Viterbi-Detektion endlicher Datenfolgen	466
12.2.2	Detektion unbegrenzter Datenfolgen	473
12.3	Einfluss von additivem Kanalrauschen	475
12.3.1	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Viterbi-Detektion	475
12.3.2	S/N-Verlustfaktor	482
12.3.3	Ungünstigste Kanäle 1. und 2. Ordnung	483
12.4	Vorentzerrer zur Verkürzung der Kanalimpulsantwort	488
	Literaturverzeichnis	493
13	Kanalschätzung	495
13.1	Referenzsignal-gestützte Kanalschätzung	496
13.1.1	Geschlossene Lösung nach Wiener-Lee	496
13.1.2	LMS-Kanalschätzung	497
13.1.3	Maximum-Likelihood-Kanalschätzung	499
13.1.4	Maximum-a-posteriori-Schätzung	501
13.1.5	Orthogonale Folgen	505
13.1.6	Systembeispiel: GSM-Kanalschätzung	508
13.2	Blinde Kanalschätzung	514
13.2.1	Prinzipielle Ansätze	514
13.2.2	SOCS-Algorithmen	517
	Literaturverzeichnis	521
IV	Mobilfunk-Kommunikation	525
14	Übertragung über Funkkanäle	527
14.1	Standards zur Mobilfunk-Übertragung	528
14.2	Übertragung über nicht frequenzselektive Rayleigh-Kanäle	531
14.2.1	Ergodische Fehlerwahrscheinlichkeit	531
14.2.2	Ausfall-Wahrscheinlichkeit	535
14.3	Diversität	536

14.3.1	Kanalmodell und Empfängerstrukturen	536
14.3.2	Ergodische Bitfehlerwahrscheinlichkeit	541
14.4	Entzerrung von frequenzselektiven Schwundkanälen	546
	Literaturverzeichnis	547
15	Mehrträger-Modulation	549
15.1	Grundprinzip der Mehrträger-Übertragung	550
15.1.1	Struktur eines Mehrträgersystems	550
15.1.2	Das OFDM-Konzept	554
15.2	Entzerrung	557
15.2.1	Das Guardintervall	557
15.2.2	Entzerrung im Frequenzbereich	562
15.2.3	Vorentzerrer zur Impulsverkürzung	564
15.2.4	Einträger-Frequenzbereichs-Entzerrer	566
15.3	OFDM-Kanalschätzung	570
15.3.1	Kohärente und inkohärente Empfängerstrukturen	570
15.3.2	OFDM-Kanalschätzung mit Hilfe einer Präambel	572
15.3.3	OFDM-Kanalschätzung in Zeit- und Frequenzrichtung	577
15.4	Übergang auf den analogen Kanal	583
15.4.1	Spektralformung des Sendesignals	583
15.4.2	Außerbandstrahlung infolge nichtlinearer Verzerrungen	584
15.4.3	Verfahren zur Spitzenwertreduktion	587
15.5	Mehrträger-Systeme mit weicher Impulsformung	590
15.5.1	Intersymbol- und Inter-carrier-Interferenz	590
15.5.2	Orthogonales Verfahren mit Offset-QAM	594
15.5.3	Nichtorthogonale Systeme mit minimalem Zeit-Bandbreitprodukt	595
15.6	Drei Beispiele zur OFDM-Übertragung	598
15.6.1	Die WLAN-Systeme IEEE 802.11a und HIPERLAN/2	598
15.6.2	DAB und DVB-T	602
15.6.3	Long Term Evolution (LTE)	605
	Literaturverzeichnis	607
16	Codemultiplex-Übertragung	611
16.1	Grundprinzip des Codemultiplex	613
16.2	Spreizsequenzen	618
16.2.1	Pseudo-Zufallsfolgen	619
16.2.2	Walsh-Codes	625
16.3	CDMA-Empfangsmodelle	629
16.3.1	Nicht-frequenzselektiver Kanal: Zeitdiskrete (a)synchrone Empfangsmodelle	630
16.3.2	Frequenzselektiver Kanal: Blockweises, zeitdiskretes (a)synchrones Empfangsmodell	633
16.4	Einnutzer-Detektion	636
16.4.1	Korrelationsempfänger (Single-User Matched-Filter)	636
16.4.2	Rake-Empfänger	641
16.4.3	Inkohärenter Rake-Empfänger	648

16.4.4	Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei Einnutzer-Übertragung	649
16.4.5	Mehrnutzer-Interferenz	651
16.5	Mehrnutzer-Detektion	658
16.5.1	Einleitung	658
16.5.2	Lineare Empfänger für eine Mehrnutzer-Detektion	659
16.5.3	Matched-Filter	665
16.5.4	Zero-Forcing- / Least Squares-Empfänger	668
16.5.5	Minimum Mean-Square Error (MMSE)-Empfänger	671
16.6	Leistungsregelung	682
16.6.1	Standard-Interferenzfunktion und Standard-Leistungsregelung . .	684
16.6.2	Auf maximale Leistungen begrenzte Leistungsregelung	690
16.6.3	Gemeinsame Leistungsregelung und Linear Minimum Mean Square Error (LMMSE) Interferenzunterdrückung	692
16.7	Weitere Aspekte von CDMA	699
16.8	Mehrträger-CDMA	702
16.8.1	Prinzip des MC-CDMA	702
16.8.2	Vergleich mit Einträger-CDMA	706
16.9	UMTS: Beispiel eines CDMA Mobilfunksystems	709
	Literaturverzeichnis	714
17	Mehrantennen-Systeme	719
17.1	Kanäle mit mehreren Ein- und Ausgängen (MIMO)	720
17.1.1	Zielsetzung	720
17.1.2	Systemmodell	721
17.1.3	Eigenmoden eines MIMO-Übertragungssystems	723
17.1.4	Korrelationsmatrizen von MIMO-Systemen	726
17.1.5	Kanalkapazität des MIMO-Kanals	727
17.2	Mehrantennen-Konzepte zur Verbesserung der Übertragungssicherheit . .	732
17.2.1	SIMO-Systeme: Maximum Ratio Combining am Empfänger	732
17.2.2	MISO-Systeme mit Kanalkenntnis am Sender: Beamforming	733
17.2.3	MISO-Systeme ohne Kanalkenntnis am Sender: Space-Time-Codes	737
17.3	Erhöhung der Übertragungsrate durch Raum-Multiplex	747
17.3.1	Multi-Layer-Übertragung bei Kanalkenntnis am Sender	747
17.3.2	Multi-Layer-Konzepte ohne Kanalkenntnis am Sender	752
17.3.3	Detektionsverfahren	753
17.3.4	Messergebnisse	757
17.4	Mehrnutzer-Szenarien	760
17.4.1	Uplink	761
17.4.2	Downlink	761
	Literaturverzeichnis	763
18	Compressive Sensing	767
18.1	Definitionen und sparses Systemmodell	769
18.2	Rekonstruktionskriterien	775
18.2.1	Nullraum-Bedingung	775

18.2.2	Restricted Isometry Property (RIP)	776
18.2.3	Kohärenz	780
18.2.4	Anzahl der Beobachtungen m	781
18.2.5	Sensing-Matrizen	782
18.3	Rekonstruktionsgüte	783
18.3.1	C -Robustheit	784
18.3.2	Rekonstruktionsfehler	786
18.4	Compressive Sensing Algorithmen	790
18.4.1	l_1 -Optimierung	790
18.4.2	Greedy-Methoden	797
18.4.3	Iterative Hard Thresholding-Methoden	800
18.4.4	Leistungsfähigkeit von Compressive Sensing Algorithmen	801
18.4.5	Block-/Gruppen-sparse Algorithmen	802
18.5	CS-basierte Kanalschätzung	807
18.5.1	CS-basierte Kanalschätzung für eine OFDM-Übertragung	807
18.5.2	CS-basierte Kanalschätzung für eine Einträgerübertragung	812
18.6	Compressive Sensing Mehrnutzerdetektion	813
18.6.1	Sporadische Datenübertragung kurzzeitig aktiver Nutzer	815
18.6.2	Block-Correlation Successive Interference Cancellation - ein Beispiel einer Greedy-basierten CS-MUD mit Kanaldecodierung	819
18.6.3	Maximum a-posteriori (MAP)-CS-Detektion	824
	Literaturverzeichnis	829
Anhang A-H		835
A Korrespondenzen zur Fourier- und Hilberttransformation		835
A.1	Fouriertransformation	835
A.2	Hilberttransformation	837
B Auszüge aus der Linearen Algebra		839
B.1	Übersicht über wichtige Beziehungen	839
B.1.1	Nomenklatur und Definitionen	839
B.1.2	Addition, Multiplikation, elementare Eigenschaften	843
B.1.3	Determinanten	844
B.1.4	Inverse einer Matrix	846
B.1.5	Unitäre Matrizen	846
B.1.6	Eigenwerte und Eigenvektoren	847
B.1.7	Singulärwertzerlegung	849
B.1.8	Pseudoinverse	850
B.1.9	Weitere Matrix-Zerlegungen	851
B.1.10	Zufallsvariablen/-vektoren/-matrizen	853
B.1.11	Ableitung nach Vektoren	854
B.2	Vektorielle Darstellung von Signalen	855
B.2.1	Beschreibung der Faltung als Skalarprodukt	855
B.2.2	Die Faltungsmatrix	856
C Zeitdiskrete Simulationsmodelle		859

C.1	Übergang von einem zeitkontinuierlichen auf einen zeitdiskreten Rauschprozess	859
C.2	Das Störabstandsmaß E_S/N_0	861
C.2.1	Reelle Tiefpass-Übertragung	861
C.2.2	Modulierte Übertragung im äquivalenten Tiefpassbereich	863
C.2.3	Symboltaktmodell eines Übertragungssystems	865
C.3	Erzeugung einer Gaußverteilung aus einem gleichverteilten Prozess	868
D	Beschreibung gaußverteilter Rauschprozesse	871
D.1	Diskrete Karhunen-Loève Transformation	871
D.2	Verbunddichte eines farbigen Gauß-Prozesses	873
E	Ableitungen zum Lattice-Entzerrer	875
E.1	Levinson-Durbin-Rekursion	875
E.2	Orthogonalität der Rückwärts-Prädiktionsfehler	878
E.3	Herleitungen zum Lattice-Gradientenalgorithmus	880
F	Ergänzung zur Maximum-Likelihood-Schätzung	883
F.1	Faltungsmatrizen	883
F.2	Dekorrelationsfilter	885
G	Bedingungen für die ideale Kanalentzerrung mit Hilfe von T/2-Entzerrern	889
G.1	Herleitung der Singularitäts-Bedingungen	889
G.2	Beispiele	892
H	Matrix-Inversionslemma	897
H.1	Allgemeine Herleitung	897
H.2	Spezielle Form im RLS-Algorithmus	898
	Literaturverzeichnis	899
	Abkürzungen	901
	Sachverzeichnis	907