

# Inhaltsverzeichnis

<b>I Signale und Übertragungssysteme</b>	<b>1</b>
<b>1 Systemtheoretische Grundlagen</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Eigenschaften von Übertragungskanälen</b>	<b>49</b>
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
<b>II</b>	<b>Analoge Übertragung</b>	<b>95</b>
<b>3</b>	<b>Analoge Modulationsverfahren</b>	<b>95</b>
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
<b>4</b>	<b>Einflüsse linearer Verzerrungen</b>	<b>139</b>
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
<b>5</b>	<b>Additive Störungen</b>	<b>159</b>
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
<b>6</b>	<b>Zwei Systembeispiele für analoge Modulation</b>	<b>183</b>
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
<b>III</b>	<b>Digitale Übertragung</b>	<b>197</b>
<b>7</b>	<b>Diskretisierung analoger Quellensignale</b>	<b>197</b>
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
<b>8</b>	<b>Grundlagen der digitalen Datenübertragung</b>	<b>229</b>
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
<b>9 Digitale Modulation</b>	<b>271</b>
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
<b>10 Prinzipien der Demodulation</b>	<b>309</b>
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
<b>11</b>	<b>Übertragung über AGN-Kanäle</b>	<b>357</b>
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
<b>12</b>	<b>Entzerrung</b>	<b>397</b>
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
<b>13</b>	<b>Maximum-Likelihood-Schätzung von Datenfolgen</b>	<b>483</b>
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
<b>14</b>	<b>Kanalschätzung</b>	<b>519</b>
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
<b>IV</b>	<b>Mobilfunk-Kommunikation</b>	<b>559</b>
<b>15</b>	<b>Übertragung über Funkkanäle</b>	<b>559</b>
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
<b>16</b>	<b>Mehrträger-Modulation</b>	<b>581</b>
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
<b>17</b>	<b>Codemultiplex-Übertragung</b>	<b>639</b>
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
<b>18 Mehrantennen-Systeme</b>	<b>711</b>
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
<b>Anhang A-H</b>	<b>748</b>
<b>A Korrespondenzen zur Fourier- und Hilberttransformation</b>	<b>749</b>
A.1 Fouriertransformation . . . . .	749
A.2 Hilberttransformation . . . . .	751
<b>B Auszüge aus der Linearen Algebra</b>	<b>753</b>
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
<b>C</b>	<b>Zeitdiskrete Simulationsmodelle</b>	<b>773</b>
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
<b>D</b>	<b>Beschreibung gaußverteilter Rauschprozesse</b>	<b>785</b>
D.1	Diskrete Karhunen-Loève Transformation . . . . .	785
D.2	Verbunddichte eines farbigen Gauß-Prozesses . . . . .	787
<b>E</b>	<b>Ableitungen zum Lattice-Entzerrer</b>	<b>789</b>
E.1	Levinson-Durbin-Rekursion . . . . .	789
E.2	Orthogonalität der Rückwärts-Prädiktionsfehler . . . . .	792
E.3	Herleitungen zum Lattice-Gradientenalgorithmus . . . . .	794
<b>F</b>	<b>Ergänzung zur Maximum-Likelihood-Schätzung</b>	<b>797</b>
F.1	Faltungsmatrizen . . . . .	797
F.2	Dekorrelationsfilter . . . . .	799
<b>G</b>	<b>Bedingungen für die ideale Kanalentzerrung mit Hilfe von T/2-Entzerrern</b>	<b>803</b>
G.1	Herleitung der Singularitäts-Bedingungen . . . . .	803
G.2	Beispiele . . . . .	806
<b>H</b>	<b>Matrix-Inversionslemma</b>	<b>811</b>
H.1	Allgemeine Herleitung . . . . .	811
H.2	Spezielle Form im RLS-Algorithmus . . . . .	812
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>815</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>837</b>