

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Grundlagen der angewandten Informationstheorie</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einführung und Grundbegriffe</b>	<b>3</b>
1.1	Was versteht man unter Informationstheorie? . . . . .	3
1.2	Fundamentale Fragen der Informationstheorie . . . . .	7
1.3	Shannons Informationsmaß . . . . .	9
1.3.1	Mathematische Informationsmaße . . . . .	9
1.3.2	Wechselseitige Information . . . . .	10
1.3.3	Entropie einer Zufallsvariablen . . . . .	12
1.3.4	Mittlere wechselseitige Information . . . . .	15
1.3.5	Kettenregel der Entropie . . . . .	20
1.3.6	Kullback-Leibler-Distanz . . . . .	21
1.3.7	Zusammenfassung der wichtigsten Definitionen und Sätze . . . . .	21
1.4	Fundamentale Sätze . . . . .	22
1.4.1	Fano-Ungleichung . . . . .	22
1.4.2	Hauptsatz der Datenverarbeitung . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Verlustlose Quellencodierung</b>	<b>27</b>
2.1	Gedächtnisfreie Quellen . . . . .	27
2.1.1	Typische Sequenzen und asymptotische Äquipartitionseigenschaft . . . . .	27
2.1.2	Simultan Typische Sequenzen . . . . .	30
2.1.3	Shannons Quellencodiertheorem . . . . .	33
2.1.4	Präfixfreie Quellencodierung . . . . .	34
2.1.5	Huffman-Algorithmus . . . . .	38
2.2	Gedächtnisbehaftete Quellen . . . . .	41
2.2.1	Markoff-Quellen . . . . .	41
2.2.2	Willems-Algorithmus . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Kanalcodierung</b>	<b>51</b>
3.1	Wertdiskrete Kanalmodelle . . . . .	51
3.1.1	Übertragungssystem mit Kanalcodierung und -decodierung . . . . .	51
3.1.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten . . . . .	53
3.1.3	Decodierprinzipien . . . . .	55
3.1.4	Zufallscodes . . . . .	56
3.1.5	Diskreter gedächtnisfreier Kanal (DMC) . . . . .	57
3.1.6	Kanalkapazität . . . . .	58

3.1.7	Shannons Kanalcodiertheorem . . . . .	60
3.1.8	Beispiele zur Berechnung der Kanalkapazität . . . . .	62
3.1.9	Bhattacharyya-Schranke . . . . .	70
3.1.10	Gallager-Schranke . . . . .	72
3.1.11	Gallager-Schranke für Zufallscodierung . . . . .	73
3.2	Wertkontinuierliche Kanalmodelle . . . . .	75
3.2.1	Differentielle Entropie . . . . .	75
3.2.2	Wechselseitige Information . . . . .	77
3.2.3	Zeitdiskreter Gauß-Kanal . . . . .	78
3.2.4	Water-Filling-Prinzip . . . . .	81
3.2.5	Bandbegrenzter Gauß-Kanal . . . . .	82
<b>4</b>	<b>Verlustbehaftete Quellencodierung und gemeinsame Quellen- &amp; Kanalcodierung</b>	<b>87</b>
4.1	Rate-Distortion-Theorie . . . . .	87
4.1.1	Verzerrung und Verzerrungsmaße . . . . .	87
4.1.2	Shannons Rate-Distortion-Theorem . . . . .	88
4.2	Gemeinsame Quellen- und Kanalcodierung . . . . .	90
4.2.1	Herleitung der Rate-Distortion-Schranke . . . . .	90
4.2.2	Informationstheoretische Grenzen für eine fehlerbehaftete Übertragung . . . . .	91
4.2.3	Praktische Aspekte der gemeinsamen Quellen- und Kanalcodierung . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Mehrnutzer-Informationstheorie</b>	<b>95</b>
5.1	Vielfachzugriffskanal . . . . .	95
5.2	Rundfunkkanal . . . . .	99
<b>6</b>	<b>Kryptologie</b>	<b>103</b>
6.1	Grundbegriffe der Kryptologie . . . . .	103
6.2	Shannons Theorie zur Geheimhaltung . . . . .	105
6.3	Chiffriersysteme mit öffentlichem Schlüssel . . . . .	109
6.3.1	Zwei Ergebnisse aus der Zahlentheorie . . . . .	110
6.3.2	RSA-Chiffrierverfahren . . . . .	111
6.3.3	RSA-Authentifizierungsverfahren . . . . .	112
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>
<b>II</b>	<b>Grundlagen der Kanalcodierung</b>	<b>117</b>
<b>7</b>	<b>Einführung und Grundbegriffe</b>	<b>119</b>
<b>8</b>	<b>Blockcodes</b>	<b>121</b>
8.1	Grundlegende Eigenschaften von Blockcodes . . . . .	121
8.1.1	Definition von Blockcodes . . . . .	121
8.1.2	Redundanz, Fehlererkennung, Fehlerkorrektur, Coderate . . . . .	122
8.1.3	Systematische Codes . . . . .	123

8.1.4	Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht . . . . .	125
8.1.5	Minimaldistanz . . . . .	126
8.1.6	Eigenschaften von Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht . . . . .	127
8.1.7	Längenänderungen . . . . .	127
8.2	Lineare Blockcodes . . . . .	128
8.2.1	Definition von linearen Blockcodes . . . . .	128
8.2.2	Minimaldistanz bei linearen Codes . . . . .	129
8.2.3	Hamming-Codes . . . . .	130
8.2.4	Schranken für die Minimaldistanz . . . . .	131
8.3	Decodierung von Blockcodes . . . . .	133
8.3.1	Decodierkugeln . . . . .	133
8.3.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten . . . . .	135
8.3.3	Decodierprinzipien . . . . .	136
8.3.4	„Hard-input“-Decodierung . . . . .	139
8.3.5	„Soft-input“-Decodierung . . . . .	140
8.3.6	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur . . . . .	141
8.3.7	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „hard-input“-Decodierung . . . . .	144
8.3.8	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für uncodierte Übertragung . . . . .	145
8.3.9	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „soft-input“-Decodierung . . . . .	147
8.3.10	Codiergewinn . . . . .	149
8.3.11	Block-Produktcodes . . . . .	149
8.4	Matrixbeschreibung von linearen Blockcodes . . . . .	150
8.4.1	Generatormatrix . . . . .	151
8.4.2	Prüfmatrix . . . . .	151
8.4.3	Duale Codes . . . . .	153
8.4.4	Syndrom und Syndromdecodierung . . . . .	154
8.4.5	Low-Density Parity-Check-Codes (LDPC-Codes) . . . . .	156
8.4.6	Repeat-Accumulate-Codes (RA-Codes) . . . . .	158
8.5	Zyklische Blockcodes . . . . .	159
8.5.1	Definition von zyklischen Blockcodes . . . . .	159
8.5.2	Polynomdarstellung . . . . .	160
8.5.3	Generatorpolynom und Prüfpolynom . . . . .	161
8.5.4	Golay-Code . . . . .	163
8.5.5	CRC-Codes . . . . .	164
8.6	Primkörper und Erweiterungskörper . . . . .	165
8.6.1	Primkörper . . . . .	165
8.6.2	Erweiterungskörper . . . . .	167
8.6.3	Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	167
8.7	Reed-Solomon-Codes . . . . .	167
8.7.1	Definition I von Reed-Solomon-Codes . . . . .	167
8.7.2	Definition II von Reed-Solomon-Codes und Generatorpolynom . . . . .	169
8.7.3	Prüfpolynom . . . . .	171
8.7.4	Methoden zur Codierung von Reed-Solomon-Codes . . . . .	172
8.7.5	Paritätsfrequenzen und deren Verschiebung . . . . .	172
8.7.6	Algebraische Decodierung von Reed-Solomon-Codes . . . . .	173

<b>9</b>	<b>Faltungscodes</b>	<b>179</b>
9.1	Definition von Faltungscodes	179
9.1.1	Schieberegister-Darstellung	179
9.1.2	Zustandsdiagramm	180
9.1.3	Trellisdiagramm	181
9.1.4	Codebaum	182
9.1.5	Polynomdarstellung	183
9.2	Optimierung von Faltungscodes	184
9.2.1	Fehlerpfad	184
9.2.2	Freie Distanz	185
9.2.3	Distanzspektrum	186
9.2.4	Berechnung des Distanzspektrums	186
9.2.5	Schranken der Bitfehlerwahrscheinlichkeit	189
9.2.6	Codiergewinn	190
9.2.7	Rekursive Faltungscodierer	191
9.2.8	Zero-Tailing und Tail-Biting	192
9.2.9	Punktierte Faltungscodes und Wiederholungscodes	196
9.2.10	Katastrophale Faltungscodierer	198
9.3	Decodierung von Faltungscodes	198
9.3.1	Viterbi-Algorithmus	199
9.3.2	List-Viterbi-Algorithmus und Soft-Output Viterbi-Algorithmus	207
9.3.3	Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv-Algorithmus	210
9.3.4	Stack-Algorithmus	215
9.3.5	Sphere-Decodierung	220
9.3.6	Dijkstra-Algorithmus	221
9.4	Zusammenhang zwischen Faltungscodes und linearen Blockcodes	224
9.4.1	Generatormatrix von Faltungscodes	225
9.4.2	Trellisdarstellung von binären linearen Blockcodes	227
<b>10</b>	<b>Interleaver</b>	<b>229</b>
10.1	Blockinterleaver	229
10.2	Faltungsinterleaver	230
10.3	Pseudo-Zufallsinterleaver	232
<b>11</b>	<b>Verkettete Codes und iterative Decodierung</b>	<b>233</b>
11.1	Grundlagen	234
11.1.1	Wetterproblem	234
11.1.2	Log-Likelihood Verhältnis	234
11.1.3	Symmetrieeigenschaften von Log-Likelihood-Werten	239
11.1.4	Weiche Bits	241
11.1.5	Zusammenhang zwischen Log-Likelihood-Werten und Kanalkapazität	242
11.1.6	Soft-Simulation	243

11.2 Verkettete Codes . . . . .	245
11.2.1 Seriell verkettete Codes . . . . .	246
11.2.2 Parallel verkettete Codes („Turbo-Codes“) . . . . .	247
11.3 Iterative Decodierung . . . . .	250
11.3.1 Turbo-Prinzip . . . . .	250
11.3.2 Belief-Propagation-Algorithmus . . . . .	252
11.4 EXIT-Chart-Analyse verketteter Codes . . . . .	254

## Literaturverzeichnis

257

## III Digitale Modulations- und Übertragungsverfahren 263

### 12 Einführung und Grundbegriffe 265

12.1 Signale im Zeit- und Frequenzbereich . . . . .	265
12.2 Basisband- und Bandpasssignale . . . . .	265
12.3 Quadraturmodulation und -demodulation . . . . .	267
12.4 Analog-Digital-Wandlung . . . . .	268
12.4.1 Von analogen zu digitalen Signalen . . . . .	268
12.4.2 Abtastatz und Abtasttheorem (Diskretisierung) . . . . .	268
12.4.3 Pulscodemodulation (Quantisierung) . . . . .	272
12.4.4 A/D- und D/A-Wandlung . . . . .	273
12.4.5 Quantisierungsfehler . . . . .	274
12.4.6 Verallgemeinerungen, Bandpass-Abtasttheorem . . . . .	275
12.5 Zeitkontinuierliche Kanalmodelle . . . . .	276
12.5.1 Zeitkontinuierliches AWGN-Kanalmodell . . . . .	276
12.5.2 Frequenzversatz und Phasenrauschen . . . . .	278
12.5.3 Rayleigh-Kanalmodell . . . . .	279
12.5.4 Rice-Kanalmodell . . . . .	280

### 13 Lineare Modulationsverfahren 281

13.1 Definition von linearen Modulationsverfahren . . . . .	281
13.1.1 Mapping auf die Signalkonstellation . . . . .	282
13.1.2 Impulsformung . . . . .	287
13.2 Signalangepasstes Filter (Matched-Filter) . . . . .	290
13.3 Äquivalente zeitdiskrete Kanalmodelle . . . . .	299
13.3.1 Zeitdiskretes ISI-Kanalmodell . . . . .	299
13.3.2 Zeitdiskretes Kanalmodell für Frequenzversatz und Phasenrauschen . . . . .	302
13.4 Kohärente, differentiell-kohärente und inkohärente Detektion . . . . .	303
13.4.1 Kohärente Detektion . . . . .	304
13.4.2 Differentiell-kohärente Detektion . . . . .	304
13.4.3 Inkohärente Detektion . . . . .	305
13.5 Fehlerwahrscheinlichkeit von linearen Modulationsverfahren . . . . .	306
13.5.1 Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter binärer Übertragung . . . . .	306

13.5.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter $M$ -stufiger Übertragung . . .	310
13.6	Leistungsdichtespektrum von linearen Modulationsverfahren . . . . .	312
13.7	Leistungs-/Bandbreitediagramm . . . . .	313
13.8	Lineare Mehrträger-Modulationsverfahren . . . . .	315
13.8.1	Allgemeine lineare Mehrträger-Modulationsverfahren . . . . .	315
13.8.2	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) . . . . .	316
13.9	Kombinierte Modulation und Kanalcodierung . . . . .	323
13.9.1	Mehrstufigencodierung . . . . .	323
13.9.2	Trelliscodierte Modulation . . . . .	324
13.9.3	Bit-Interleaved Coded Modulation . . . . .	326
13.9.4	Superpositionsmodulation . . . . .	327
<b>14</b>	<b>Duplex-, Mehrfachzugriffs- und Multiplexverfahren</b>	<b>331</b>
14.1	Duplexverfahren . . . . .	331
14.1.1	FDD . . . . .	331
14.1.2	TDD . . . . .	332
14.2	Mehrfachzugriffsverfahren . . . . .	332
14.2.1	Frequency-Division Multiple Access (FDMA) . . . . .	332
14.2.2	Time-Division Multiple Access (TDMA) . . . . .	333
14.2.3	Code-Division Multiple Access (CDMA) . . . . .	333
14.2.4	Space-Division Multiple Access (SDMA) . . . . .	339
14.2.5	Carrier-Sense Multiple Access (CSMA) . . . . .	339
14.3	Multiplexverfahren: FDM, TDM, CDM . . . . .	340
<b>15</b>	<b>Nichtlineare Verzerrungen</b>	<b>341</b>
15.1	Systemtheoretische Grundlagen und Modellierung von Leistungsverstärkern . . .	341
15.1.1	Klassifizierung und analytische Beschreibung . . . . .	341
15.1.2	Modelle von nichtlinearen Leistungsverstärkern . . . . .	343
15.1.3	Definition von Signalleistungen, Aussteuerung und Crestfaktor . . . . .	345
15.1.4	Auswirkungen nichtlinearer Verzerrungen . . . . .	346
15.2	Berechnung von Leistungsdichtespektrum und Bitfehlerwahrscheinlichkeit . . .	347
15.2.1	Signaldarstellung . . . . .	348
15.2.2	Berechnung des Leistungsdichtespektrums . . . . .	349
15.2.3	Berechnung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit . . . . .	350
<b>16</b>	<b>CPM-Modulationsverfahren</b>	<b>353</b>
16.1	Definition von CPM-Modulationsverfahren . . . . .	353
16.1.1	Minimum Shift Keying (MSK) . . . . .	354
16.1.2	Continuous Phase Frequency Shift Keying (CPFSK) . . . . .	355
16.1.3	Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) . . . . .	356
16.2	Zerlegung und Linearisierung von CPM-Modulationsverfahren . . . . .	356

<b>17 Entzerrung</b>	<b>361</b>
17.1 Augendiagramm, lineare Verzerrung, äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell	361
17.1.1 Charakterisierung dispersiver Kanäle	362
17.1.2 Systemtheoretische Grundlagen und Signalentwurf	365
17.1.3 Nyquist-Kriterium im Zeit- und Frequenzbereich	368
17.1.4 Signalangepasstes Filter	370
17.1.5 Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit farbigem Rauschen	371
17.1.6 Dekorrelationsfilter („Whitening-Filter“)	371
17.1.7 Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit weißem Rauschen	373
17.2 Entzerrung linearer Systeme	375
17.2.1 Lineare Entzerrung	376
17.2.2 Entscheidungsrückgekoppelte Entzerrung	384
17.2.3 Maximum-Likelihood-Detektion	387
<b>18 Kanalschätzung</b>	<b>393</b>
18.1 Trainingsbasierte Kanalschätzung	393
18.1.1 „Least Squares“ Kanalschätzung	394
18.1.2 Korrelative Kanalschätzung	396
18.1.3 Interpolative Kanalschätzung	397
18.1.4 Gradientenverfahren und stochastisches Gradientenverfahren	399
18.2 Entscheidungsgestützte Kanalschätzung	400
18.2.1 Stochastisches Gradientenverfahren mit vorläufigen Entscheidungen	400
18.2.2 Per-survivor Processing	401
18.3 Blinde Kanalschätzung	401
<b>19 Digitale Synchronisationsverfahren</b>	<b>403</b>
19.1 Struktur eines digitalen Empfängers	403
19.2 Maximum-Likelihood-Synchronisation	405
19.3 Trägerphasen- und Taktphasensynchronisation für CPM-Modulationsverfahren	408
19.4 Trägerphasensynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	410
19.4.1 Entscheidungsgesteuerte Parametersuche	412
19.4.2 Entscheidungsgesteuerte explizite Lösung	413
19.4.3 Entscheidungsgesteuertes Nachführverfahren	414
19.4.4 Nichtentscheidungsgesteuerte explizite Lösung	416
19.4.5 Nichtentscheidungsgesteuertes Nachführverfahren	416
19.5 Taktsynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	417
19.5.1 Taktphasendetektion	418
19.5.2 Taktphasenkorrektur	420
19.6 Frequenzsynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	420
19.6.1 Frequenzfehlerdetektion	421
19.6.2 Frequenzkorrektur	422

<b>IV Konzepte der Mobilfunkkommunikation</b>	<b>427</b>
<b>20 Grundlagen der Mobilfunkkommunikation</b>	<b>429</b>
20.1 Was ist Mobilfunkkommunikation? . . . . .	429
20.2 Klassifizierung von Mobilfunksystemen . . . . .	429
20.3 Netztopologien . . . . .	430
20.3.1 Das zellulare Konzept . . . . .	430
20.3.2 Gleichwellennetz . . . . .	431
20.3.3 Ad-hoc- und Sensornetze . . . . .	432
20.4 Beispiele für Mobilfunksysteme . . . . .	432
20.4.1 Rundfunksysteme . . . . .	432
20.4.2 Funkrufsysteme . . . . .	433
20.4.3 Betriebsfunk- und Bündelfunksysteme . . . . .	433
20.4.4 Flugfunksysteme . . . . .	433
20.4.5 Schnurlose Telefone . . . . .	434
20.4.6 Wireless PAN, Wireless LAN und Wireless MAN . . . . .	434
20.4.7 Zellulare Mobilfunksysteme . . . . .	434
20.5 OSI-Schichtenmodell . . . . .	435
<b>21 Beschreibung und Modellierung von Mobilfunkkanälen</b>	<b>437</b>
21.1 Übertragungskanal und Mobilfunkszenario . . . . .	437
21.2 Phänomenologische Kanalbeschreibung . . . . .	439
21.2.1 Weltraumszenario . . . . .	439
21.2.2 Zeitinvariantes 2-Pfad-Modell . . . . .	442
21.2.3 Realistische Szenarien . . . . .	442
21.3 Stochastische Kanalmodellierung . . . . .	443
21.3.1 Zeitvariante Impulsantwort und Gewichtsfunktion . . . . .	444
21.3.2 Entfernungsabhängige Funkfelddämpfung . . . . .	445
21.3.3 Langzeit-Schwundmodelle . . . . .	447
21.3.4 Kurzzeit-Schwundmodelle . . . . .	447
<b>22 Diversitätsempfang, MIMO-Systeme und Space-Time-Codes</b>	<b>459</b>
22.1 Diversitätsempfang . . . . .	459
22.2 MIMO-Systeme . . . . .	463
22.3 Raum-Zeit-Codes . . . . .	465
22.3.1 „Delay-Diversity“ . . . . .	465
22.3.2 Raum-Zeit-Blockcodes . . . . .	466
22.3.3 „Bell Labs Layered Space-Time (BLAST)“-Architektur . . . . .	469
<b>23 DS-CDMA-Empfängerkonzepte</b>	<b>471</b>
23.1 Mehrnutzerdetektion für DS-CDMA-Systeme . . . . .	471
23.1.1 Spreizsequenzen: Eigenschaften und Familien . . . . .	471
23.1.2 Bitfehlerwahrscheinlichkeit ohne Mehrnutzerdetektion . . . . .	475
23.1.3 Modellierung von Mehrnutzerinterferenz . . . . .	478



23.1.4	Klassifizierung von Mehrnutzer-Empfängern . . . . .	480
23.2	Rake-Empfänger für DS-CDMA-Systeme . . . . .	483
<b>24</b>	<b>Verfahren zur Verkürzung einer Kanalimpulsantwort</b>	<b>487</b>
24.1	Empfängerstrukturen . . . . .	487
24.2	Minimalphasigkeit, Maximalphasigkeit, Gemischtphasigkeit . . . . .	488
24.3	Vorfilter zur Erzeugung einer minimalphasigen Impulsantwort . . . . .	489
24.3.1	Wurzelsuche . . . . .	489
24.3.2	Spektrale Faktorisierung . . . . .	490
24.4	Vorfilter zur Verkürzung einer Impulsantwort . . . . .	495
<b>25</b>	<b>Trellisbasierte Entzerrung mit Zustandsreduktion</b>	<b>499</b>
25.1	Motivation . . . . .	499
25.2	Zweigmetrik ohne Zustandsreduktion . . . . .	500
25.3	Zustandsreduktion durch Entscheidungsrückkopplung . . . . .	500
25.4	Zustandsreduktion durch „set-partitioning“ . . . . .	501
<b>26</b>	<b>Gleichkanalinterferenzunterdrückung</b>	<b>505</b>
26.1	Motivation . . . . .	505
26.2	Äquivalentes zeitdiskretes CCI-Kanalmodell . . . . .	505
26.3	Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (MLSE-Detektor) . . . . .	506
26.4	Joint-Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (JMLSE-Detektor) . . . . .	508
26.5	Kanalschätzung zur Gleichkanalinterferenzunterdrückung . . . . .	509
26.5.1	Joint-Least-Squares Kanalschätzung . . . . .	510
26.5.2	Semi-blinde Kanalschätzung . . . . .	511
<b>27</b>	<b>Senderseitige Signalverarbeitung: Vorcodierung und Strahlformung</b>	<b>513</b>
27.1	Lineare Vorcodierung . . . . .	513
27.1.1	SVD-basierte Vorcodierung . . . . .	514
27.1.2	ZF-Vorcodierung . . . . .	515
27.1.3	MMSE-Vorcodierung . . . . .	515
27.2	Nichtlineare Vorcodierung . . . . .	515
27.2.1	„Writing on Dirty-Paper“-Konzept . . . . .	515
27.2.2	Tomlinson-Harashima-Vorcodierung . . . . .	515
27.3	Strahlformung (Beamforming) . . . . .	516
27.3.1	Phased-Array-Verfahren . . . . .	518
27.3.2	Schellkunoff-Polynomial-Verfahren . . . . .	519
27.3.3	Dolph-Tschebyscheff-Verfahren . . . . .	520
27.3.4	Codebuch-Verfahren . . . . .	522

<b>V</b>	<b>Anhang</b>	<b>529</b>
<b>A</b>	<b>Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung</b>	<b>531</b>
A.1	Begriffe aus der (wert-)diskreten Wahrscheinlichkeitsrechnung . . . . .	531
A.2	Begriffe aus der (wert-)kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsrechnung . . . . .	535
A.3	Charakteristische Funktion . . . . .	537
A.4	Transformation einer Zufallsvariable . . . . .	538
A.5	Gesetz der großen Zahlen und Zentraler Grenzwertsatz . . . . .	539
<b>B</b>	<b>Grundlagen der Matrizenrechnung</b>	<b>541</b>
B.1	Grundlegende Definitionen und Begriffe . . . . .	541
B.2	Spezielle Klassen von quadratischen Matrizen . . . . .	542
B.3	Determinante einer quadratischen Matrix . . . . .	543
B.4	Matrixoperationen . . . . .	543
B.5	Lineare Gleichungssysteme . . . . .	545
B.6	Eigenwerte, Eigenvektoren und Spur einer quadratischen Matrix . . . . .	546
<b>C</b>	<b>Grundlagen der Signal- und Systemtheorie</b>	<b>549</b>
C.1	Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Faltung . . . . .	549
C.2	Zeitkontinuierliche Fourier-Transformation . . . . .	549
C.3	Z-Transformation . . . . .	550
C.4	Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	552
C.5	Lineare zeitinvariante Systeme . . . . .	552
C.6	Lineare zeitvariante Systeme . . . . .	554
C.7	Eigenschaften deterministischer Signale . . . . .	555
C.8	Stochastische Prozesse . . . . .	556
C.9	Stochastische Prozesse und LTI-Systeme . . . . .	558
<b>D</b>	<b>Simulationswerkzeuge</b>	<b>561</b>
D.1	Aufbau eines Simulationswerkzeugs . . . . .	562
D.2	Simulatorkonzepte . . . . .	563
D.3	Einbindung in eine Realisierungsumgebung . . . . .	564
D.4	Kriterien zur Auswahl eines Simulationswerkzeugs . . . . .	565
D.5	Professionelle Simulationswerkzeuge . . . . .	565
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>567</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>571</b>