

Peter Adam Höher

Grundlagen der digitalen Informationsübertragung

Von der Theorie zu
Mobilfunkanwendungen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 461 Abbildungen, 31 Tabellen und 234 Beispielen

 **Springer Vieweg**

Inhaltsverzeichnis

Teil I Grundlagen der angewandten Informationstheorie

1	Einführung und Grundbegriffe	3
1.1	Was versteht man unter Informationstheorie?	3
1.2	Fundamentale Fragen der Informationstheorie	8
1.3	Shannons Informationsmaß	10
1.3.1	Mathematische Informationsmaße	10
1.3.2	Wechselseitige Information	11
1.3.3	Entropie einer Zufallsvariablen	13
1.3.4	Mittlere wechselseitige Information	17
1.3.5	Kettenregel der Entropie	23
1.3.6	Kullback-Leibler-Distanz	24
1.3.7	Zusammenfassung der wichtigsten Definitionen und Sätze . .	24
1.4	Fundamentale Sätze	25
1.4.1	Fano-Ungleichung	25
1.4.2	Hauptsatz der Datenverarbeitung	28
2	Verlustlose Quellencodierung	31
2.1	Gedächtnisfreie Quellen	31
2.1.1	Typische Sequenzen und asymptotische Äquipartitionseigenschaft	32
2.1.2	Simultan Typische Sequenzen	35
2.1.3	Shannons Quellencodiertheorem	38
2.1.4	Präfixfreie Quellencodierung	39
2.1.5	Huffman-Algorithmus	43
2.1.6	Arithmetische Quellencodierung	47
2.2	Gedächtnisbehaftete Quellen	49
2.2.1	Markoff-Quellen	49
2.2.2	Willems-Algorithmus	55

3	Kanalcodierung	59
3.1	Wertdiskrete Kanalmodelle	59
3.1.1	Übertragungssystem mit Kanalcodierung und-decodierung	59
3.1.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten	61
3.1.3	Decodierprinzipien	63
3.1.4	Zufallscodes	65
3.1.5	Diskreter gedächtnisfreier Kanal (DMC)	66
3.1.6	Kanalkapazität	67
3.1.7	Shannons Kanalcodiertheorem	68
3.1.8	Beispiele zur Berechnung der Kanalkapazität	71
3.1.9	Bhattacharyya-Schranke	79
3.1.10	Gallager-Schranke	81
3.1.11	Gallager-Schranke für Zufallscodierung	82
3.2	Wertkontinuierliche Kanalmodelle	84
3.2.1	Differentielle Entropie	85
3.2.2	Wechselseitige Information	87
3.2.3	Zeitdiskreter Gauß-Kanal	88
3.2.4	Water-Filling-Methode	92
3.2.5	Bandbegrenzter Gauß-Kanal	93
4	Verlustbehaftete Quellencodierung und gemeinsame Quellen- & Kanalcodierung	99
4.1	Rate-Distortion-Theorie	99
4.1.1	Verzerrung und Verzerrungsmaße	100
4.1.2	Shannons Rate-Distortion-Theorem	101
4.2	Gemeinsame Quellen- und Kanalcodierung	106
4.2.1	Herleitung der Rate-Distortion-Schranke	106
4.2.2	Informationstheoretische Grenzen für eine fehlerbehaftete Übertragung	107
4.2.3	Praktische Aspekte der gemeinsamen Quellen- und Kanalcodierung	109
5	Mehrnutzer-Informationstheorie	111
5.1	Vielfachzugriffskanal	111
5.2	Rundfunkkanal	119
5.3	Relaykanal	124
5.4	Interferenzkanal	129
5.5	Duplexkanal	132
6	Netzwerkcodierung	135
6.1	Prinzip der Netzwerkcodierung	135
6.2	Netzwerkcodierung zur Erhöhung des Datendurchsatzes	137

6.3	Netzwerkcodierung zur Erhöhung der Zuverlässigkeit	140
6.4	Netzwerkcodierung zur Verbesserung der Datensicherheit	141
7	Kryptologie	143
7.1	Grundbegriffe der Kryptologie	143
7.2	Shannons Theorie zur Geheimhaltung	145
7.3	Chiffriersysteme mit öffentlichem Schlüssel	150
7.3.1	Zwei Ergebnisse aus der Zahlentheorie	15.1
7.3.2	RSA-Chiffrierverfahren	152
7.3.3	RSA-Authentifizierungsverfahren	153
Teil II Grundlagen der Kanalcodierung		
8	Einführung und Grundbegriffe	157
9	Blockcodes	161
9.1	Grundlegende Eigenschaften von Blockcodes	161
9.1.1	Definition von Blockcodes	161
9.1.2	Redundanz, Fehlererkennung, Fehlerkorrektur und Coderate	162
9.1.3	Systematische Codes	164
9.1.4	Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht	166
9.1.5	Minimaldistanz	167
9.1.6	Eigenschaften von Hamming-Distanz und Hamming-Gewicht	167
9.1.7	Längenänderungen	168
9.2	Lineare Blockcodes	170
9.2.1	Definition von linearen Blockcodes	170
9.2.2	Minimaldistanz bei linearen Codes	170
9.2.3	Hamming-Codes	171
9.2.4	Schranken für die Minimaldistanz	172
9.3	Decodierung von Blockcodes	175
9.3.1	Decodierkugeln	175
9.3.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten	177
9.3.3	Decodierprinzipien	177
9.3.4	„Hard-input“-Decodierung	181
9.3.5	„Soft-input“-Decodierung	182
9.3.6	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	183
9.3.7	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „hard-input“-Decodierung	186
9.3.8	Bitfehlerwahrscheinlichkeit für uncodierte Übertragung	188
9.3.9	Wortfehlerwahrscheinlichkeit für „soft-input“-Decodierung .	190
9.3.10	Codiergewinn	192
9.3.11	Block-Produktcodes	192

9.4	Matrixbeschreibung von linearen Blockcodes	194
9.4.1	Generatormatrix	194
9.4.2	Prüfmatrix	195
9.4.3	Duale Codes	197
9.4.4	Syndrom und Syndromdecodierung	198
9.4.5	Low-Density Parity-Check-Codes (LDPC-Codes)	200
9.4.6	Tornado-Codes und Fountain-Codes	205
9.4.7	Repeat-Accumulate-Codes (RA-Codes)	209
9.5	Zyklische Blockcodes	210
9.5.1	Definition von zyklischen Blockcodes	210
9.5.2	Polynomdarstellung	212
9.5.3	Generatorpolynom und Prüfpolynom	212
9.5.4	Golay-Code	217
9.5.5	CRC-Codes	217
9.6	Primkörper und Erweiterungskörper	218
9.6.1	Primkörper	219
9.6.2	Erweiterungskörper	220
9.6.3	Diskrete Fourier-Transformation	221
9.7	Reed-Solomon-Codes	221
9.7.1	Definition I von Reed-Solomon-Codes	221
9.7.2	Definition II von Reed-Solomon-Codes und Generatorpolynom	224
9.7.3	Prüfpolynom	225
9.7.4	Methoden zur Codierung von Reed-Solomon-Codes	226
9.7.5	Paritätsfrequenzen und deren Verschiebung	227
9.7.6	Algebraische Decodierung von Reed-Solomon-Codes	228
10	Faltungscodes	235
10.1	Definition von Faltungscodes	235
10.1.1	Schieberegister-Darstellung	235
10.1.2	Zustandsdiagramm	236
10.1.3	Trellisdiagramm	236
10.1.4	Codebaum	237
10.1.5	Polynomdarstellung	238
10.2	Optimierung von Faltungscodes	240
10.2.1	Fehlerpfad	240
10.2.2	Freie Distanz	241
10.2.3	Distanzspektrum	241
10.2.4	Berechnung des Distanzspektrums	242
10.2.5	Schranken der Bitfehlerwahrscheinlichkeit	245
10.2.6	Codiergewinn	246
10.2.7	Rekursive Faltungscodierer	247

10.2.8	Zero-Tailing und Tail-Biting	249
10.2.9	Punktierte Faltungscodes und Wiederholungscodes	252
10.2.10	Katastrophale Faltungscodierer	255
10.3	Decodierung von Faltungscodes	255
10.3.1	Viterbi-Algorithmus	256
10.3.2	List-Viterbi-Algorithmus und Soft-Output Viterbi-Algorithmus	264
10.3.3	Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv-Algorithmus	267
10.3.4	Stack-Algorithmus	273
10.3.5	Sphere-Decodierung	278
10.3.6	Dijkstra-Algorithmus	279
10.4	Zusammenhang zwischen Faltungscodes und linearen Blockcodes . . .	282
10.4.1	Generatormatrix von Faltungscodes	283
10.4.2	Trellisdarstellung von binären linearen Blockcodes	285
11	Interleaver	289
11.1	Blockinterleaver	289
11.2	Faltungsinterleaver	291
11.3	Pseudo-Zufallsinterleaver	292
12	Verkettete Codes und iterative Decodierung	293
12.1	Grundlagen	294
12.1.1	Wetterproblem	295
12.1.2	Log-Likelihood-Verhältnis	295
12.1.3	Symmetrieeigenschaften von Log-Likelihood-Werten	302
12.1.4	Weiche Bits	304
12.1.5	Zusammenhang zwischen Log-Likelihood-Werten und Kanalkapazität	306
12.1.6	Soft-Simulation	307
12.2	Verkettete Codes	309
12.2.1	Seriell verkettete Codes	309
12.2.2	Parallel verkettete Codes („Turbo-Codes“)	311
12.3	Iterative Decodierung	316
12.3.1	Turbo-Prinzip	317
12.3.2	Belief-Propagation-Algorithmus	319
12.4	Analysemethoden zum Konvergenzverhalten verketteter Codes	325
12.4.1	EXIT-Chart-Analyse	326
12.4.2	VT-Chart-Analyse	341
12.4.3	Density Evolution	342
12.4.4	IPC-Analyse	345

Teil III Digitale Modulations- und Übertragungsverfahren

13	Einführung und Grundbegriffe	351
13.1	Signale im Zeit- und Frequenzbereich	351
13.2	Basisband- und Bandpasssignale	352
13.3	Quadraturmodulation und -demodulation	353
13.4	Analog-Digital-Wandlung	354
13.4.1	Von analogen zu digitalen Signalen	354
13.4.2	Abtastatz und Tiefpass-Abtasttheorem (Diskretisierung) . . .	355
13.4.3	Pulscodemodulation (Quantisierung)	359
13.4.4	A/D- und D/A-Wandlung	360
13.4.5	Quantisierungsfehler	361
13.4.6	Verbesserung der Auflösung durch Überabtastung und Dithering	363
13.4.7	Delta-Sigma A/D-Wandlung, 1-Bit A/D-Wandlung	365
13.4.8	Bandpass-Abtasttheorem und Unterabtastung	369
13.4.9	Anwendungen des Tiefpass- und Bandpass-Abtasttheorems .	372
13.4.10	Komprimierte Abtastung: Compressive Sampling	373
13.5	Zeitkontinuierliche Kanalmodelle	380
13.5.1	Zeitkontinuierliches AWGN-Kanalmodell	380
13.5.2	Frequenzversatz und Phasenrauschen	382
13.5.3	Rayleigh-Kanalmodell	383
13.5.4	Rice-Kanalmodell	384
14	Lineare Modulationsverfahren	387
14.1	Definition von linearen Modulationsverfahren	387
14.1.1	Entwurf der Signalkonstellation	391
14.1.2	Impulsformung	396
14.2	Signalangepasstes Filter (Matched-Filter)	400
14.3	Trägermodulierte vs. trägerlose Übertragung	409
14.4	Äquivalente zeitdiskrete Kanalmodelle	410
14.4.1	Zeitdiskretes ISI-Kanalmodell	410
14.4.2	Zeitdiskretes Kanalmodell für Frequenzversatz und Phasenrauschen	413
14.5	Kohärente, differentiell-kohärente und inkohärente Detektion	414
14.5.1	Kohärente Detektion	416
14.5.2	Differentiell-kohärente Detektion	417
14.5.3	Inkohärente Detektion	417
14.6	Fehlerwahrscheinlichkeit von linearen Modulationsverfahren	418
14.6.1	Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter binärer Übertragung	418

14.6.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei kohärenter M-stufiger Übertragung	423
14.7	Leistungsdichtespektrum von linearen Modulationsverfahren	426
14.8	Leistungs-/Bandbreitediagramm	426
14.9	Lineare Mehrträger-Modulationsverfahren	429
14.9.1	Allgemeine lineare Mehrträger-Modulationsverfahren	429
14.9.2	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)	430
14.9.3	OFDM-Varianten: DMT und PAM-DMT	439
14.9.4	Verfahren zur Reduzierung der Signalspitzenleistung	441
14.9.5	Mehrträger-basierte Kanalzugriffsverfahren (OFDMA und Varianten)	445
14.10	Kombinierte Modulation und Kanalcodierung	447
14.10.1	Mehrstufercodierung	448
14.10.2	Trelliscodierte Modulation	449
14.10.3	Bit-Interleaved Coded Modulation	451
14.10.4	Superpositionsmodulation	451
15	Duplex-, Mehrfachzugriffs- und Multiplexverfahren	465
15.1	Duplexverfahren	465
15.1.1	Frequenzduplex (FDD)	465
15.1.2	Zeitduplex (TDD)	466
15.2	Mehrfachzugriffsverfahren	466
15.2.1	Frequency-Division Multiple Access (FDMA)	466
15.2.2	Time-Division Multiple Access (TDMA)	467
15.2.3	Code-Division Multiple Access (CDMA)	467
15.2.4	Space-Division Multiple Access (SDMA)	473
15.2.5	Carrier-Sense Multiple Access (CSMA)	473
15.3	Multiplexverfahren: FDM, TDM, CDM	474
16	Nichtlineare Verzerrungen	475
16.1	Systemtheoretische Grundlagen und Modellierung von Leistungsverstärkern	475
16.1.1	Klassifizierung und analytische Beschreibung	476
16.1.2	Modelle von nichtlinearen Leistungsverstärkern	477
16.1.3	Definition von Signalleistungen, Aussteuerung und Crestfaktor	479
16.1.4	Auswirkungen nichtlinearer Verzerrungen	481
16.2	Berechnung von Leistungsdichtespektrum und Bitfehlerwahrscheinlichkeit	482
16.2.1	Signaldarstellung	483
16.2.2	Berechnung des Leistungsdichtespektrums	484
16.2.3	Berechnung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit	484

17	CPM-Modulationsverfahren	489
17.1	Definition von CPM-Modulationsverfahren	489
17.1.1	Minimum Shift Keying (MSK)	490
17.1.2	Continuous Phase Frequency Shift Keying (CPFSK)	491
17.1.3	Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)	491
17.2	Zerlegung und Linearisierung von CPM-Modulationsverfahren	492
18	Entzerrung	499
18.1	Augendiagramm, lineare Verzerrung, äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell	499
18.1.1	Charakterisierung dispersiver Kanäle	500
18.1.2	Systemtheoretische Grundlagen und Signalentwurf	503
18.1.3	Nyquist-Kriterium im Zeit- und Frequenzbereich	506
18.1.4	Signalangepasstes Filter („Matched-Filter“)	509
18.1.5	Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit farbigem Rauschen	510
18.1.6	Dekorrelationsfilter	510
18.1.7	Äquivalentes zeitdiskretes ISI-Kanalmodell mit weißem Rauschen	512
18.2	Entzerrung linearer Systeme im Zeitbereich	515
18.2.1	Lineare Entzerrung	515
18.2.2	Entscheidungsrückgekoppelte Entzerrung	523
18.2.3	Maximum-Likelihood-Detektion	527
19	Kanalschätzung	533
19.1	Trainingsbasierte Kanalschätzung	533
19.1.1	„Least Squares“ Kanalschätzung	534
19.1.2	Korrelative Kanalschätzung	536
19.1.3	Interpolative Kanalschätzung	538
19.1.4	Gradientenverfahren und stochastisches Gradientenverfahren	540
19.2	Entscheidungsgestützte Kanalschätzung	541
19.2.1	Stochastisches Gradientenverfahren mit vorläufigen Entscheidungen	542
19.2.2	Per-survivor Processing	542
19.3	Blinde Kanalschätzung	543
20	Digitale Synchronisationsverfahren	545
20.1	Struktur eines digitalen Empfängers	545
20.2	Maximum-Likelihood-Synchronisation	547
20.3	Trägerphasen- und Taktphasensynchronisation für CPM-Modulationsverfahren	550

20.4	Trägerphasensynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	553
20.4.1	Entscheidungsgesteuerte Parametersuche	554
20.4.2	Entscheidungsgesteuerte explizite Lösung	555
20.4.3	Entscheidungsgesteuertes Nachführverfahren	557
20.4.4	Nichtentscheidungsgesteuerte explizite Lösung	559
20.4.5	Nichtentscheidungsgesteuertes Nachführverfahren	560
20.5	Taktsynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	560
20.5.1	Taktphasendetektion	561 –
20.5.2	Taktphasenkorrektur	562
20.6	Frequenzsynchronisation für PSK-Modulationsverfahren	563
20.6.1	Frequenzfehlerdetektion	563
20.6.2	Frequenzkorrektur	565

Teil IV Konzepte der Mobilfunkkommunikation

21	Grundlagen der Mobilfunkkommunikation	569
21.1	Was ist Mobilfunkkommunikation?	569
21.2	Klassifizierung von Mobilfunksystemen	569
21.3	Netztopologien	571
21.3.1	Das zellulare Konzept	571
21.3.2	Gleichwellennetz	573
21.3.3	Ad-hoc- und Sensornetze	573
21.4	Beispiele für Mobilfunksysteme	574
21.4.1	Rundfunksysteme	574
21.4.2	Funkrufsysteme	574
21.4.3	Betriebsfunk- und Bündelfunksysteme	574
21.4.4	Flugfunksysteme	575
21.4.5	Schnurlose Telefone	575
21.4.6	Wireless PAN, Wireless LAN, Wireless MAN und Wireless RAN	575
21.4.7	Zellulare Mobilfunksysteme	576
21.5	OSI-Schichtenmodell	577
22	Beschreibung und Modellierung von Mobilfunkkanälen	579
22.1	Übertragungskanal und Mobilfunkszenario	579
22.2	Phänomenologische Kanalbeschreibung	582
22.2.1	Weltraumszenario	582
22.2.2	Zeitinvariantes 2-Pfad-Modell	585
22.2.3	Realistische Szenarien	586
22.3	Stochastische Kanalmodellierung	587
22.3.1	Zeitvariante Impulsantwort und Gewichtsfunktion	587

22.3.2	Entfernungsabhängige Funkfelddämpfung	589
22.3.3	Langzeit-Schwundmodelle	590
22.3.4	Kurzzeit-Schwundmodelle	592
23	Diversitätsempfang, MIMO-Systeme und Space-Time-Codes	605
23.1	Diversitätsempfang	605
23.2	MIMO-Systeme	610
23.3	Kanalkapazität von MIMO-Systemen	612
23.3.1	Kanalkapazität deterministischer MIMO-Kanäle	613
23.3.2	Kanalkapazität ergodischer MIMO-Kanäle	615
23.3.3	Kanalkapazität nichtergodischer MIMO-Kanäle (Outage-Kanalkapazität)	616
23.4	Raum-Zeit-Codes	617
23.4.1	„Delay-Diversity“	617
23.4.2	Raum-Zeit-Blockcodes	618
23.4.3	„Bell Labs Layered Space-Time (BLAST)“-Architekturen . . .	621
24	DS-CDMA-Empfängerkonzepte	625
24.1	Mehrnutzerdetektion für DS-CDMA-Systeme	625
24.1.1	Spreizsequenzen: Eigenschaften und Familien	626
24.1.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit ohne Mehrnutzerdetektion	629
24.1.3	Modellierung von Mehrnutzerinterferenz	633
24.1.4	Klassifizierung von Mehrnutzer-Empfängern	636
24.2	Rake-Empfänger für DS-CDMA-Systeme	639
25	Verfahren zur Verkürzung einer Kanalimpulsantwort	643
25.1	Empfängerstrukturen	643
25.2	Minimalphasigkeit, Maximalphasigkeit, Gemischtphasigkeit	644
25.3	Vorfilter zur Erzeugung einer minimalphasigen Impulsantwort	645
25.3.1	Wurzelsuche	645
25.3.2	Spektrale Faktorisierung	647
25.4	Vorfilter zur Verkürzung einer Impulsantwort	651
26	Trellisbasierte Entzerrung mit Zustandsreduktion	655
26.1	Motivation	655
26.2	Zweigmetrik ohne Zustandsreduktion	656
26.3	Zustandsreduktion durch Entscheidungsrückkopplung	656
26.4	Zustandsreduktion durch „set-partitioning“	657
27	Gleichkanalinterferenzunterdrückung	661
27.1	Motivation	661
27.2	Äquivalentes zeitdiskretes CCI-Kanalmodell	662
27.3	Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (MLSE-Detektor)	662

27.4	Joint-Maximum-Likelihood-Sequenzschätzung (JMLSE-Detektor)	664
27.5	Kanalschätzung zur Gleichkanalinterferenzunterdrückung	667
27.5.1	Joint-Least-Squares Kanalschätzung	667
27.5.2	Semi-blinde Kanalschätzung	668
28	Senderseitige Signalverarbeitung: Vorcodierung und Strahlformung	671
28.1	Lineare Vorcodierung	672
28.1.1	SVD-basierte Vorcodierung	672
28.1.2	ZF-Vorcodierung	673
28.1.3	MMSE-Vorcodierung	674
28.2	Nichtlineare Vorcodierung	674
28.2.1	„Writing on Dirty-Paper“-Konzept	674
28.2.2	Tomlinson-Harashima-Vorcodierung	674
28.3	Strahlformung (Beamforming)	675
28.3.1	Phased-Array-Verfahren	679
28.3.2	Schelkunoff-Polynomial-Verfahren	680
28.3.3	Dolph-Tschebyscheff-Verfahren	682
28.3.4	Codebuch-Verfahren	684
29	Ultrabreitband-Systeme	687
29.1	Grundlagen und Definitionen	688
29.2	Impuls-basierte Ultrabreitband-Kommunikation	689
29.3	Mehrträger-basierte Ultrabreitband-Kommunikation	693
29.4	Funkortung	694
30	Software-Defined Radio und Cognitive Radio	699
30.1	Das Software-Defined Radio Konzept	699
30.2	Ausführungsformen des Software-Defined Radio Konzepts	701
30.3	Adaptives Radio, Kognitives Radio und Intelligentes Radio	703
30.4	Ausführungsformen des Kognitiven Radio Konzepts	704
Teil V Anhang		
31	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung	709
31.1	Begriffe aus der (wert-)diskreten Wahrscheinlichkeitsrechnung	709
31.2	Begriffe aus der (wert-)kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsrechnung	714
31.3	Charakteristische Funktion	718
31.4	Transformation einer Zufallsvariable	719
31.5	Gesetz der großen Zahlen und Zentraler Grenzwertsatz	720
32	Grundlagen der Matrizenrechnung	723
32.1	Grundlegende Definitionen und Begriffe	723

32.2	Spezielle Klassen von quadratischen Matrizen	725
32.3	Determinante einer quadratischen Matrix	725
32.4	Matrixoperationen	727
32.5	Lineare Gleichungssysteme	729
32.6	Eigenwerte, Eigenvektoren und Spur einer quadratischen Matrix	730
32.7	Matrixtransformationen	731
33	Grundlagen der Signal- und Systemtheorie	733
33.1	Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Faltung	733
33.2	Zeitkontinuierliche Fourier-Transformation	733
33.3	Z-Transformation	735
33.4	Diskrete Fourier-Transformation	736
33.5	Lineare zeitinvariante Systeme	737
33.6	Lineare Zeitvariante Systeme	739
33.7	Eigenschaften deterministischer Signale	741
33.8	Stochastische Prozesse	742
33.9	Stochastische Prozesse und LTI-Systeme	745
34	Simulationswerkzeuge	747
34.1	Aufbau eines Simulationswerkzeugs	749
34.2	Simulatorkonzepte	750
34.3	Einbindung in eine Realisierungsumgebung	751
34.4	Kriterien zur Auswahl eines Simulationswerkzeugs	752
34.5	Professionelle Simulationswerkzeuge	752
	Literatur	755
	Sachverzeichnis	775