

Martin Neukom

Signale, Systeme und Klangsynthese

Grundlagen der Computermusik



PETER LANG

Bern • Berlin • Bruxelles • Frankfurt a. M. • New York • Wien

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	21
Dank	23
1 Einleitung	25
1.1 Übersicht	25
1.2 Anleitungen	27
1.2.1 Der Umgang mit Mathematica-Notebooks	28
1.2.2 Csound-Programme	29
1.2.3 C-Programme	29
1.2.4 CPS-Programme	29
1.3 Historische Übersicht	30
1.3.1 Begriffe	30
1.3.2 Stand der Forschung und Literatur	32
2 Grundlagen der Akustik	33
2.1 Physikalische Grundbegriffe und Einheiten	33
2.1.1 Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung	33
2.1.1.1 Distanzen	33
2.1.1.2 Geschwindigkeit und Beschleunigung	34
2.1.1.3 Integration der Beschleunigung	34
2.1.2 Masse und Kraft	35
2.1.2.1 Masse und Dichte	35
2.1.2.2 Kraft	35
2.1.2.3 Das Newtonsche Aktionsprinzip	36
2.1.3 Impuls, Arbeit, Leistung, Energie	37
2.1.3.1 Impuls	37
2.1.3.2 Arbeit	37
2.1.3.3 Leistung	37
2.1.3.4 Energie	38
2.2 Schwingungen und Wellen	39
2.2.1 Die harmonische Schwingung	39
2.2.1.1 Definition und mathematische Beschreibung	39

2.2.1.2	Die gedämpfte Schwingung	41
2.2.1.3	Addition harmonischer Schwingungen	41
2.2.1.4	Schwebungen	44
2.2.1.5	Eigenschwingungen	45
2.2.1.6	Erzwungene Schwingungen und Resonanz	48
2.2.2	Periodische Schwingungen und ihr Spektrum	48
2.2.2.1	Definition der periodischen Schwingung	48
2.2.2.2	Standardbeispiele	49
2.2.2.3	Weitere Beispiele	49
2.2.2.4	Zusammensetzen periodischer Schwingungen aus harmonischen Schwingungen	50
2.2.2.5	Das Spektrum periodischer Schwingungen	51
2.2.3	Aperiodische Schwingungen	53
2.2.3.1	Nicht harmonische Teilschwingungen	53
2.2.3.2	Rauschen	54
2.2.3.3	Impuls	55
2.2.3.4	Quasiperiodische Schwingungen	56
2.2.3.5	Veränderliche Frequenzen	56
2.2.4	Wellen	58
2.2.4.1	Definition und Beispiele	58
2.2.4.2	Mathematische Beschreibung	60
2.2.4.3	Überlagerung von Wellen	61
2.2.4.4	Wellenausbreitung	64
2.2.4.5	Doppler-Effekt	67
2.3	Schall und Gehör	68
2.3.1	Tonhöhen	68
2.3.1.1	Frequenzbereich und Oktaven	68
2.3.1.2	Teiltonreihe und reine Intervalle	69
2.3.1.3	Intervalle	70
2.3.2	Klangfarbe	72
2.3.2.1	Periodische Schwingungen	72
2.3.2.2	Formanten	74
2.3.2.3	Spektrn veränderlicher Klänge	74
2.3.2.4	Unharmonische Spektren	76
2.3.2.5	Verschmelzung	76
2.3.2.6	Residualtöne	77
2.3.3	Lautstärke	78
2.3.3.1	Schalleistung und Schallintensität	78
2.3.3.2	Dezibel	78
2.3.3.3	Phon	79
2.3.4	Wechselwirkungen der Parameter	80
2.3.4.1	Frequenzgruppen	80
2.3.4.2	Maskierung	81

Inhaltsverzeichnis

2.3.4.3	Kombinationstöne	82
2.3.4.4	Besonderheiten der Tonhöhenwahrnehmung	83
2.3.5	Der Raum	85
2.3.5.1	Reflexionen und Nachhall	85
2.3.5.2	Richtungshören	86
2.3.5.3	Distanz	88
3	Signale und Systeme	89
3.1	Analoge Signale und Fourier-Transformation	90
3.1.1	Periodische Signale und Fourier-Reihen	90
3.1.1.1	Fourier-Reihen	90
3.1.1.2	Berechnung der Koeffizienten	92
3.1.1.3	Beispiele	94
3.1.1.4	Darstellung des Spektrums	96
3.1.1.5	(-»Analogie und Verallgemeinerung)	96
3.1.2	Komplexe Darstellung	97
3.1.2.1	Komplexe Zahlen	97
3.1.2.2	Trigonometrische Darstellung	98
3.1.2.3	Exponentialform	100
3.1.2.4	Rechnen mit komplexen Zahlen	101
3.1.2.5	Rotierende komplexe Zeiger	103
3.1.2.6	Fourier-Analyse in komplexer Darstellung	104
3.1.3	Aperiodische Signale und Fourier-Integrale	107
3.1.3.1	Definition	107
3.1.3.2	Beispiele	108
3.1.4	Analoge Systeme	109
3.1.4.1	Definition und Beispiele	110
3.1.4.2	Lineare Differentialgleichungen	110
3.1.4.3	Laplace-Transformation	111
3.2	Digitale Signale, DFT, FFT	112
3.2.1	Digitale Darstellung der Signale	112
3.2.1.1	Abtasten der Signale	113
3.2.1.2	Darstellungen und elementare Beispiele	113
3.2.1.3	Besondere Eigenschaften und grundlegende Transformationen	115
3.2.1.4	Quantisierung	116
3.2.1.5	Aliasing	117
3.2.1.6	Zeiger	119
3.2.2	Die diskrete Fourier-Transformation DFT	120
3.2.2.1	Berechnung der Koeffizienten diskreter Fourier-Reihen	120
3.2.2.2	Beispiele	120
3.2.2.3	Signale mit unbekanntem oder nicht ganzzahligen Perioden	124

	3.2.2.4	Komplexe Formulierung und Eigenschaften der DFT	125
	3.2.2.5	Die schnelle Fourier-Transformation FFT	129
	3.2.3	Die z-Transformation	133
	3.2.3.1	Definition und Transformation elementarer Signale	133
	3.2.3.2	Eigenschaften und Beispiele	134
3.3		Systeme und Filter	135
	3.3.1	Systeme	136
	3.3.1.1	Definition und Beispiele	136
	3.3.1.2	Eigenschaften	137
	3.3.1.3	Impulsantwort und Faltung	138
	3.3.1.4	Eigenschaften im Frequenzbereich	139
	3.3.1.5	Komplexe Formulierung	141
	3.3.1.6	Filter	143
	3.3.1.7	Übertragungsfunktion und z - Ebene	145
	3.3.1.8	Linearphasige Filter	149
	3.3.1.9	Der Entwurf von Filtern	150
	3.3.2	Nichtrekursive Filter / FIR-Filter	151
	3.3.2.1	Definition und Eigenschaften	151
	3.3.2.2	Implementierung	152
	3.3.2.3	Filterentwurf durch Setzen der Nullstellen	154
	3.3.2.4	Fourier-Approximation	157
	3.3.2.5	Fenster	159
	3.3.2.6	Einsetzen der Impulsantwort bekannter Systeme	160
	3.3.3	Rekursive Filter / IIR-Filter	161
	3.3.3.1	Definition und Eigenschaften	161
	3.3.3.2	Implementierung	162
	3.3.3.3	Filterentwurf durch Setzen der Nullstellen und Pole	168
	3.3.3.4	Stabilität	170
	3.3.3.5	Spezielle Filter	170
	3.3.3.6	Filterentwurf durch Transformation kontinuierlicher in diskrete Systeme	175
3.4		Dynamische Systeme und Regelungstechnik	177
	3.4.1	Differentialgleichungen	178
	3.4.1.1	Einführendes Beispiel, Phasenraum	179
	3.4.1.2	Typen von Differentialgleichungen und weitere Begriffe	180
	3.4.1.3	Stationäre Systemanalyse, Kennlinien	184
	3.4.1.4	Numerische Verfahren, Differenzgleichungen	186
	3.4.1.5	Das Pendel	190
	3.4.2	Fixpunkte und Attraktoren	193
	3.4.2.1	Fixpunkte	193
	3.4.2.2	Katastrophen	195
	3.4.2.3	Attraktoren	198
	3.4.3	Chaos	201

3.4.3.1	Einführendes Beispiel	201
3.4.3.2	Bedingungen für Chaos	201
3.4.3.3	Chaos in zeitdiskreten Systemen	203
3.4.3.4	Chaos bei Differentialgleichungen	206
3.4.3.5	Mehrfachlösungen und Sprünge	210
3.4.4	Regelungstechnik	211
3.4.4.1	Einführende Beispiele und Begriffe	212
3.4.4.2	Regelkreiselemente	214
3.4.4.3	Regelkreise	220
3.4.4.4	Nichtlineare Regelkreise	221
3.4.4.5	Berechnungen	226
3.4.4.6	Regeln mit Filtern	227
3.4.4.7	Beispiele	229

4 Programme und Programmiersprachen 231

4.1	Csound	232
4.1.1	Starthilfe	234
4.1.2	Die Syntax des Orchesters	234
4.1.2.1	Der Aufbau eines Orchesters	234
4.1.2.2	Konstanten und Variablen	235
4.1.2.3	Funktionen	236
4.1.2.4	Potenzfunktionen	237
4.1.2.5	Umrechnung verschiedener Darstellungen der Tonhöhen	237
4.1.2.6	Operatoren, Ausdrücke und bedingte Ausdrücke	238
4.1.2.7	Zuweisungen	238
4.1.2.8	Programmkontrolle	239
4.1.2.9	Einfache Signalgeneratoren	240
4.1.2.10	Weitere Signalgeneratoren	243
4.1.2.11	Signalmodifikatoren	243
4.1.2.12	Verzögerungsstrecken	244
4.1.2.13	Eingabe und Ausgabe von Klängen	245
4.1.3	Die Partitur	246
4.1.3.1	Der Aufbau einer Partitur	246
4.1.3.2	Das Format einer Anweisung	246
4.1.3.3	Die Noten der Instrumente, i-Anweisungen	246
4.1.3.4	Funktionen, f-Anweisungen	247
4.1.3.5	Überspringen eines Abschnitts, a-Anweisungen	247
4.1.3.6	Tempo, t-Anweisungen	247
4.1.3.7	Abschnitte und Ende der Partitur, s- und e-Anweisungen	248
4.1.3.8	Die Abarbeitung der Partitur	248
4.1.4	Generatoren zur Erzeugung von Funktionstabellen	248

4.1.4.1	Einlesen aus einer Audiodatei, GEN01	249
4.1.4.2	Direkte Eingabe der Funktionswerte, GEN02	249
4.1.4.3	Polynomfunktionen, GEN03	249
4.1.4.4	Normalisierungsfunktion, GEN04	249
4.1.4.5	Exponentielle Segmente, GEN05	249
4.1.4.6	Segmente kubischer Polynome, GEN06	250
4.1.4.7	Lineare Segmente, GEN07.	250
4.1.4.8	Kurve durch vorgegebene Punkte, GEN08.	250
4.1.4.9	Summen von Sinusfunktionen, GEN09	250
4.1.4.10	Summen von Sinusfunktionen, GEN 10, GEN 19	250
4.1.4.11	Summen von Kosinusfunktionen und Pulse, GEN11	250
4.1.4.12	Besselfunktionen, GEN12.	251
4.1.4.13	Polynomfunktion mit Chebyshev-Koeffizienten, GEN 13	251
4.1.4.14	Polynomfunktion mit Chebyshev-Koeffizienten, GEN 14	251
4.1.4.15	Polynomfunktionen für Phasenquadratur, GEN15	251
4.1.4.16	Schrittfunktion, GEN 17.	251
4.1.4.17	Fenster, GEN20.	251
4.1.4.18	Zufallsverteilungen, GEN21.	252
4.1.4.19	Exponentielle und lineare Segmente, GEN25 und GEN27	252
4.1.5	Das Programm Csound	252
4.1.5.1	Die Kommandozeile	252
4.1.6	(-* Praktische Einführung)	
4.1.6.1	Ein Audiosignal	
4.1.6.2	Tabellen	
4.1.6.3	Angabe der Parameter in der Partitur	
4.1.6.4	Mehrfacher Aufruf eines Instruments	
4.1.6.5	Kontrollsignale und Hüllkurven	
4.1.6.6	Benennung der Signale, Variablen und Konstanten	
4.1.6.7	Diagramme	
4.1.6.8	Arithmetische Berechnungen, Ausdrücke und Funktionen	
4.1.6.9	Klänge einlesen und ausgeben	
4.1.6.10	Verzögerungsstrecken	
4.1.6.11	Programmkontrolle	
4.1.6.12	Klangbearbeitung mit Filtern	
4.1.7	Hilfsprogramme zur Erzeugung von Partituren	253
4.1.7.1	Spezielle Hilfsprogramme	253
4.1.7.2	Partituren mit C-Programmen erstellen	254
4.1.8	Aufgaben und Lösungsmöglichkeiten	256
4.1.8.1	Verändern der Klangfarbe	256
4.1.8.2	Ein springender Ball	259
4.1.8.3	Tonsysteme und Melodien	264
4.1.8.4	(-> Geräusche).	265
4.2	CPS.	266

4.2.1	Grundlagen	266
4.2.1.1	Start	266
4.2.1.2	Online Hilfe	267
4.2.1.3	Audio- und Kontrollsignale	267
4.2.1.4	Display-Objekte	268
4.2.1.5	Subpatches	268
4.2.2	Details	269
4.2.2.1	Veränderbare Anzahl von Ein- und Ausgängen	269
4.2.2.2	Eingebaute Sicherheitsmassnahmen	270
4.2.2.3	Tabellen	270
4.2.2.4	Optimierung von CPS-Patches	270
4.2.2.5	Konvertieren von Signalen	271
4.2.2.6	(-> Objekte)	273
4.2.2.7	SDK-Plugins	273
43	Mathematica	277
4.3.1	Grundlagen	278
4.3.1.1	Zum Umgang mit dem Mathematica-System	278
4.3.1.2	Variablen und Rechenoperationen	278
4.3.1.3	Ausdrücke und Funktionen	281
4.3.1.4	Listen	282
4.3.1.5	Gleichungen	286
4.3.1.6	Numerische Mathematik	288
4.3.1.7	Programme	289
4.3.1.8	Dateien erzeugen	290
4.3.2	Klänge	291
4.3.2.1	Klänge abspielen	291
4.3.2.2	Klänge erzeugen und darstellen	293
4.3.3	Grafik	294
4.3.3.1	Funktionen zeichnen	294
4.3.3.2	Datenlisten zeichnen	297
4.3.3.3	Grafik-Primitiven und Grafik-Objekte	297
4.3.3.4	Erzeugen eigener Grafik-Primitiven	299
4.3.3.5	Animationen	300
44	C/C++	301
4.4.1	Grundlagen	301
4.4.1.1	Elemente eines C-Programms	301
4.4.1.2	Einfache Typen	303
4.4.1.3	Abgeleitete Typen	304
4.4.1.4	Zusammengesetzte Typen	306
4.4.1.5	Operatoren, Ausdrücke, mathematische Funktionen	306
4.4.1.6	Kontrollstrukturen	309
4.4.1.7	Verschiedenes	311
4.4.1.8	Funktionen	312

4.4.1.9	Ein- und Ausgabe	315
4.4.1.10	Klassen und Objekte	317
4.4.1.11	Schreiben und Lesen von Binärdateien	320
4.4.1.12	Speicher	321
4.4.2	Erzeugen und Speichern von Klängen	322
4.4.2.1	Klangdateien	322
4.4.2.2	Beispiele	326
4.4.3	Eine praktische Einführung	328
4.4.3.1	Ausgabe auf dem Bildschirm	328
4.4.3.2	Variablen und Dateneingabe	330
4.4.3.3	Arithmetik und mathematische Funktionen	331
4.4.3.4	Kontrollstrukturen	332
4.4.3.5	Felder	334
4.4.3.6	Strukturen	338
4.4.3.7	Dateien schreiben und Eingabekontrolle	338
4.4.3.8	Macros, Funktionen und Header-Dateien	340
4.4.3.9	Klassen und Objekte	340
4.4.3.10	Vererbung	343
4.4.4	Anwendungen	349
4.4.4.1	Erzeugung vieler einzelner Klänge	349
4.4.4.2	Vermehrung von Stimmen	351
5	Grundlagen der Klangsynthese	355
5.1	Grundlegende Techniken der Klangsynthese	355
5.1.1	Übersicht	355
5.1.1.1	Instrumente und ihre Schaltbilder	355
5.1.1.2	Techniken der Klangsynthese	357
5.1.1.3	Programme und Programmiersprachen	358
5.1.1.4	Tabellen	359
5.1.1.5	Audio und Kontrollsignale	359
5.1.1.6	Interpolation	360
5.1.1.7	Programmkontrolle und bedingte Anweisungen	361
5.1.2	Generatoren	361
5.1.2.1	Der Oszillator	361
5.1.2.2	Der Pulsgenerator	364
5.1.2.3	Der Rauschgenerator	366
5.1.3	Kontrollsignale	368
5.1.3.1	Zusammengesetzte Kontrollfunktionen	368
5.1.3.2	Interpolationsfilter	370
5.1.3.3	Variable Kontrollsignale	371
5.1.4	Verzögerungsstrecken	373

5.1.4.1	Definition und direkte Implementierung	373
5.1.4.2	Ringpuffer	375
5.1.4.3	Verzögerungstrecken mit variabler Länge	376
5.1.4.4	Verzögerungstrecken mit Rückkopplung	380
5.1.4.5	Anwendungen	384
5.2	Additive Synthese	385
5.2.1	Synthese periodischer Schwingungen	385
5.2.1.1	Grundlegende Technik	385
5.2.1.2	Veränderliche Parameter	386
5.2.1.3	Verschmelzung	387
5.2.1.4	Datenreduktion	389
5.2.1.5	Akustische Illusionen	389
5.2.2	Analyse - Resynthese	392
5.2.2.1	Übersicht	393
5.2.2.2	Analyse veränderlicher Signale	394
5.2.2.3	Der Phase Vocoder	395
5.3	Subtraktive Synthese	395
5.3.1	Filter	396
5.3.1.1	Beschreibung der Eigenschaften im Frequenzbereich	396
5.3.1.2	Filtertypen	397
5.3.1.3	Spezielle Filter	398
5.3.1.4	Filter kombinieren	399
5.3.1.5	Effekte im Zeitbereich	400
5.3.1.6	Veränderliche Filter	401
5.3.2	Anwendungen	402
5.3.2.1	Klangquellen	402
5.3.2.2	Resonatoren und Formanten	403
5.3.2.3	Lineare Prädiktion	406
6	Nichtlineare Techniken	407
6.1	Modulationstechniken und Verzerrung	407
6.1.1	Amplituden- und Ringmodulation	407
6.1.1.1	Einführendes Beispiel	408
6.1.1.2	Grundlegende Technik	408
6.1.1.3	Das Spektrum	410
6.1.1.4	Ringmodulation	413
6.1.2	Frequenzmodulation	414
6.1.2.1	Einführendes Beispiel	414
6.1.2.2	Grundlegende Technik	415
6.1.2.3	Das Spektrum frequenzmodulierter Schwingungen	417
6.1.2.4	Das Verhältnis $f_c : f_m$	422

6.1.2.5	Veränderliche Spektren	423
6.1.2.6	Instrumente	424
6.1.2.7	Erweiterungen	425
6.1.2.8	Der Einfluss der Phase	429
6.1.3	Nichtlineare Verzerrung - Waveshaping	431
6.1.3.1	Einführendes Beispiel	432
6.1.3.2	Waveshaping	434
6.1.3.3	Der Modulationsindex	436
6.1.3.4	Polynome als Übertragungsfunktionen	437
6.1.3.5	Tschebyscheff-Polynome als Übertragungsfunktionen	440
6.1.3.6	Limiter, Kompressor und Expander	443
6.2	Nichtlineare Systeme	445
6.2.1	Nichtrekursive Systeme mit einem Eingangssignal	445
6.2.1.1	Funktionen eines Eingangswertes	445
6.2.1.2	Funktionen mehrerer Eingangswerte	447
6.2.2	Nichtrekursive Systeme mit mehreren Eingangssignalen	453
6.2.2.1	Funktionen je eines Eingangswertes	453
6.2.2.2	Spezielle Funktionen zweier Eingangssignale	455
6.2.2.3	Funktionen mehrerer Werte mehrerer Eingangssignale	460
6.2.3	Rekursive Systeme	461
6.2.3.1	Funktionen eines Wertes	461
6.2.3.2	Funktionen zweier Werte	465
6.2.4	Zeitvariante Systeme	466
6.2.4.1	Abgrenzung der Systeme	466
6.2.4.2	Nichtrekursive Systeme mit konstanten Verzögerungen	467
6.2.4.3	Nichtrekursive Systeme mit variablen Verzögerungen	468
6.2.4.4	Rekursive Systeme mit konstanten Verzögerungen	470
6.2.4.5	Rekursive Systeme mit variablen Verzögerungen	471
7	Verschiedene Analyse- und Synthesetechniken	475
7.1	Granular-Synthese	475
7.1.1	Grundlagen	475
7.1.1.1	Grains	475
7.1.1.2	Technische Realisierungen	477
7.1.1.3	Synchrone Synthese	480
7.1.1.4	Asynchrone Synthese	482
7.1.2	Anwendungen	483
7.1.2.1	FOF	483
7.1.2.2	VOSIM	484
7.1.2.3	Granulieren gesampelter Klänge	486
7.2	Analyse und Synthese mit Hilfe unterschiedlicher Funktionen	488

7.2.1	Walsh Synthese	488
7.2.1.1	Walsh-Funktionen	488
7.2.1.2	Beispiele	489
7.2.2	Logarithmische Unterteilung des Frequenzbereichs	490
7.2.3	Wavelets	491
7.2.3.1	Wavelets	492
7.2.3.2	Die kontinuierliche Wavelet-Transformation	493
7.2.3.3	Die diskrete Wavelet-Transformation	496

8 Physikalisches Modellieren 499

8.1	Feder-Masse-Modelle	500
8.1.1	Systeme mit einer Masse	502
8.1.1.1	Die harmonische Schwingung	502
8.1.1.2	Anregung der Schwingung	506
8.1.1.3	Die gedämpfte harmonische Schwingung	507
8.1.1.4	Anregung der gedämpften Schwingung	510
8.1.1.5	Schwingung mit nichtlinearer Beschleunigung	515
8.1.1.6	Berechnungen	517
8.1.2	Systeme mit zwei Massen	518
8.1.2.1	Die Schwingungen zweier gekoppelter Massen	519
8.1.2.2	Anregung und Dämpfung	521
8.1.2.3	Nichtlineare Beschleunigung	523
8.1.2.4	Berechnung der Frequenzen	524
8.1.2.5	Berechnungen	527
8.1.3	Lineare Anordnung gekoppelter Massen	529
8.1.3.1	Modell mit drei Massen	529
8.1.3.2	Die Saite	531
8.1.3.3	Korrektur der Dispersionsrelation	533
8.1.3.4	Dämpfung	536
8.1.3.5	Tonabnahme	538
8.1.3.6	Anregung der Saite	538
8.1.3.7	Flageolett	540
8.1.4	Anordnungen gekoppelter Massen in einer Ebene	543
8.1.4.1	Ein Beispiel mit drei Massen	543
8.1.4.2	Aufteilung der Ebene durch ein regelmässiges Gitter	544
8.1.4.3	Eigenschwingungen des Gitters	548
8.1.4.4	Gegenstände mit gekrümmten Rändern	550
8.1.4.5	Gegenstände mit frei schwingenden Rändern	550
8.1.4.6	Starrkörperbewegungen	552
8.1.4.7	In sich zurückgekrümmte Flächen	553
8.1.4.8	Gitter mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Massen	554

8.1.4.9	Unregelmässige Gitter	557
8.1.4.10	Unregelmässige Dichte oder Elastizität	560
8.1.5	Anordnungen gekoppelter Massen im Raum	561
8.1.5.1	Longitudinale und transversale Schwingungen einer Masse	561
8.1.5.2	Aufteilung des Raums durch ein regelmässiges Gitter	563
8.1.5.3	Frei bewegliche Körper	565
8.1.5.4	Ein Modell mit Fixpunkten	569
8.1.5.5	Veränderliche Fixpunkte	572
8.1.5.6	Einwirkung der Schwerkraft	573
8.1.5.7	Dämpfung	574
8.1.6	Beliebige Anordnungen und Veränderungen	575
8.1.6.1	Gekoppelte Saiten	575
8.1.6.2	Geometrisch unmögliche Körper	578
8.1.6.3	Mehrdimensionale Räume	579
8.1.6.4	Real nicht mögliche Beschleunigung	580
8.1.6.5	Auseinanderbrechende und verschmelzende Gegenstände.	581
8.2	Wellenleiter	583
8.2.1	Die einfache Verzögerungsstrecke	583
8.2.1.1	Verzögerungsstrecken	583
8.2.1.2	Eine einfache Dämpfung	585
8.2.1.3	Die Frequenz	587
8.2.1.4	Zentrierung der Werte	590
8.2.1.5	Die Anregung	590
8.2.1.6	Der Karplus-Strong Algorithmus	593
8.2.2	Wellenleiter	595
8.2.2.1	Der ideale Wellenleiter	595
8.2.2.2	Reflexion	597
8.2.2.3	Laufende Wellen als Lösung der Wellengleichung	598
8.2.2.4	Alternative Variablen zur Darstellung der Wellen	601
8.2.3.	Tonabnahme und Anregung	602
8.2.3.1	Ort der Tonabnahme und der Anregung	602
8.2.3.2	Dauer der Anregung	604
8.2.3.3	Anregung ohne Rückkopplung	605
8.2.3.4	Anregung mit Rückkopplung	607
8.2.3.5	Selektive Reflexion und Klangabstrahlung	612
8.2.3.6	Flageolett	612
9	Klang und Raum	615
9.1	Räumliches Hören	616
9.1.1	Richtungshören	617
9.1.1.1	Zeitunterschied	617

9.1.1.2	Intensitätsunterschied	618
9.1.1.3	Filterung	620
9.1.2	Distanz	622
9.1.2.1	Abnahme der Schallintensität	622
9.1.2.2	Anteil des indirekten Schalls	624
9.1.3	Bewegung im Raum	624
9.1.3.1	Der Doppler-Effekt	624
9.1.3.2	Zusätzliche Informationen durch Positionsveränderung	627
9.2	Reflexion und Nachhall	628
9.2.1	Reflexionen	628
9.2.1.1	Geometrische Betrachtungen	628
9.2.1.2	Streuung und Absorption	633
9.2.2	Nachhall	634
9.2.2.1	Eigenschaften des Nachhalls	634
9.2.2.2	Einfache Hallgeneratoren	635
9.2.2.3	Frequenzabhängigkeit	638
9.2.2.4	Komplexere Filter	640
9.2.2.5	Faltung mit Impulsantwort	640
9.3	Raumsimulation und Beschallung	641
9.3.1	Ideale Lösungen	641
9.3.1.1	Simulation der Schallquellen	641
9.3.1.2	Reproduktion des Schallfelds	642
9.3.1.3	Erzeugung der Schwingungen im Ohr	643
9.3.2	Praktische Lösungen	644
9.3.2.1	Stereo	644
9.3.2.2	Ambisonic	645
9.3.2.3	Dekorrelation	654

10 Computer und Komposition

659

10.1	Zufall und Wahrscheinlichkeit	659
10.1.1	Grundbegriffe der Kombinatorik	659
10.1.1.1	Einführende Beispiele	660
10.1.1.2	Permutationen	660
10.1.1.3	Kombinationen	661
10.1.1.4	Variationen	662
10.1.1.5	Anordnungen	663
10.1.1.6	Binomial- und Polynomkoeffizienten	663
10.1.2	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung	664
10.1.2.1	Standardbeispiele und Begriffe	664
10.1.2.2	Definitionen	665
10.1.2.3	Verknüpfungen von Ereignissen	665

10.1.2.4	Wahrscheinlichkeitsbegriffe und Axiome	666
10.1.2.5	Bedingte Wahrscheinlichkeit und stochastische Unabhängigkeit	668
10.1.2.6	Beispiele	668
10.1.3	Wahrscheinlichkeits- und Verteilungsfunktion von Zufallsgrößen	669
10.1.3.1	Zufallsvariablen und Wahrscheinlichkeitsfunktion	669
10.1.3.2	Stetige Zufallsvariablen und ihre Dichtefunktion.	670
10.1.3.3	Die Verteilungsfunktion	671
10.1.3.4	Stetige Dichtefunktion und ihre Verteilungen	672
10.1.3.5	Funktionen von Zufallsgrößen	673
10.1.3.6	Kennwerte oder Masszahlen einer Wahrscheinlichkeitsverteilung	674
10.1.3.7	Parameterkonzepte	676
10.1.4	Erzeugen von Zufallszahlen mit vorgegebener Dichte oder Verteilung	677
10.1.4.1	Pseudozufallszahlen	677
10.1.4.2	Direkte Verfahren zur Erzeugung einer Verteilung	680
10.1.4.3	Inversion der Verteilungsfunktion	682
10.1.4.4	Verwerfungsmethode	683
10.1.4.5	Tabelle von Elementen mit gewünschter Häufigkeit	685
10.1.5	Spezielle Verteilungen	688
10.1.5.1	Gleich-oder Rechteckverteilung $Re(a; b)$	688
10.1.5.2	Trapezverteilung $Tr(a; b; c; d)$	689
10.1.5.3	Binomialverteilung $Bi(n; P)$	690
10.1.5.4	Poisson-Verteilung $Po(A)$	691
10.1.5.5	Normalverteilung $No(\mu, \sigma^2)$	692
10.1.5.6	Exponentialverteilung $Ex(A)$	693
10.1.5.7	Gamma-Verteilung	694
10.1.5.8	Weibull-Verteilung $We(a; b; c)$	695
10.1.6	Anwendungen	697
10.1.6.1	Klänge aus Folgen von Zufallszahlen	697
10.1.6.2	Anwendung auf musikalische Parameter	698
10.1.6.3	Anwendung veränderlicher Verteilungen.	699
10.1.6.4	Auswählen aus Zufallswerten	702
10.2	Stochastische Prozesse	703
10.2.1	Einführende Beispiele und Begriffe	703
10.2.1.1	Ein Glücksspiel	703
10.2.1.2	Weisses Rauschen	704
10.2.1.3	Allgemeine Formulierung der Begriffe	705
10.2.2	Markov-Ketten	706
10.2.2.1	Einführende Beispiele	706
10.2.2.2	Definition	709
10.2.2.3	Übergangsmatrix und Zustandsvektoren	710
10.2.2.4	Anwendung	711

10.2.2.5	Markov-Ketten mit veränderlichen Übergangswahrscheinlichkeiten (.	715
10.2.2.6	Markov-Ketten mit veränderlichen Zuständen	717
10.2.2.7	Weitere Beispiele 7	718
10.2.3	Weitere stochastische Prozesse	722
10.2.3.1	Prozesse mit unabhängigen Zuwächsen	722
10.2.3.2	Random Walk	723
10.2.3.3	Beschreibung des Prozesses durch sein Spektrum	726
10.2.3.4	Prozesse mit Einflüssen weiter zurückliegender Ereignisse	727
10.2.3.5	Prozesse mit gesiebteten Zufallsvariablen	729
10.3	Automaten, Goldener Schnitt, Chaos	730
10.3.1	Zelluläre Automaten	730
10.3.1.1	Eindimensionaler Automat mit zwei Zuständen	730
10.3.1.2	Eindimensionaler Automat mit vielen Zuständen	732
10.3.1.3	Zweidimensionaler Automat mit zwei Zuständen	734
10.3.1.4	Zweidimensionale Automaten mit vielen Zuständen	735
10.3.2	Der Goldene Schnitt	736
10.3.2.1	Definition und klassische Konstruktion	737
10.3.2.2	Fibonacci-Folgen	738
10.3.2.3	Kettenbrüche	739
10.3.2.4	Fraktale	740
10.3.2.5	Ein Wachstumsprozess	741
10.3.2.6	Anwendungen	744
10.3.3	»Chaostheorie«	750
10.3.3.1	Begriffe	751
10.3.3.2	Theorie dynamischer Systeme	752
10.3.3.3	Selbstähnlichkeit und Fraktale	753
10.3.3.4	Anwendungen in der Musik	754

Anhang A Mathematische Grundlagen 761

A.1	Zahlen und Rechenoperationen	761
A.1.1	Zahlen	761
A.1.2	Regeln der Algebra	762
A.2	Aussagen, Verknüpfungen, Mengen	763
A.2.1	Aussagen	763
A.2.2	Mengen	764
A.2.3	Teilmenge und Potenzmenge	764
A.2.4	Verknüpfungen von Mengen	764
A.2.5	Kartesisches Produkt von Mengen	764
A.3	Gleichungen	765
A.3.1	Definitionen und Begriffe.	765

A.3.2	Äquivalente Umformungen	765
A.3.3	Algebraische Gleichungen	766
A.3.4	Lineare Gleichungssysteme und Matrizen	766
A.3.5	Transzendente Gleichungen	768
A.4	Funktionen	769
A.4.1	Definition	769
A.4.2	Darstellungen und Eigenschaften von Funktionen	770
A.4.3	Spezielle Funktionen	771
A.4.4	Zusammengesetzte Funktionen	780
A.4.5	Parametrische Darstellung	781
A.4.6	Funktionen mehrerer Variablen	782
A.4.7	Gerade und ungerade Funktionen	782
A.4.8	Folgen und Reihen	782
A.5	Differential- und Integralrechnung	783
A.5.1	Die Ableitung einer Funktion	783
A.5.2	Differentiationsregeln	784
A.5.3	Das unbestimmte Integral einer Funktion	785
A.5.4	Integrationsformeln	786
A.5.5	Das bestimmte Integral	787
 Anhang B Tabellen		 789
B.1	Tonhöhen	789
B.2	Formanten	789
B.3	Konstanten	790
B.4	Fibonacci - Folge	790
B.5	Primzahlen	791
B.6	Besselfunktionen	792
B.7	Tschebyscheff-Polynome	793
 Literatur		 795
Nach Nummern		795
Nach Themen		799
 Index		 803