

# Inhalt

<b>0. Einleitung</b> .....	1
0.1. Motivation.....	1
0.2. Zielsetzung.....	2
0.3. Aufbau.....	3
<b>1. Physikalische Grundlagen der Akustik</b> .....	6
1.1. Klangwahrnehmung.....	6
1.1.1. Das Ohr.....	6
1.1.2. Tonhöhe, Lautstärke, Klangfarbe.....	7
1.2. Schallwellen und Klang.....	7
1.2.1. Schallwellen.....	7
Longitudinalwellen.....	7
Transversalwellen.....	8
1.2.2. Frequenz, Schallintensität, Wellenform.....	8
1.2.3. Addition von Schwingungen.....	9
Überlagerung bei gleichen Eigenfrequenzen.....	10
Überlagerung bei verschiedenen Eigenfrequenzen.....	10
1.2.4. Obertöne.....	12
1.2.5. Klangspektrum.....	15
1.2.6. Ohmsches Gesetz.....	15
1.3. Analyse komplexer Schwingungen.....	16
1.3.1. Fourieranalyse.....	16
1.3.2. Resonanzkurve.....	23
<b>2. Synthetische Klangerzeugung</b> .....	25
2.1. Kurzer geschichtlicher Abriss.....	25
2.2. Subtraktive Synthese.....	27
2.2.1. Analoge Synthesizer.....	27
Oszillatoren.....	28
Filter.....	28
Verstärker.....	30
Steuerspannungen.....	30
2.3. Additive Synthese.....	33
2.3.1. Überlagerung, Addition.....	33
2.3.2. Modulation.....	33
Amplitudenmodulation.....	33
Frequenzmodulation.....	35
Phasenmodulation.....	37
2.3.3. Nachbearbeitung.....	37
<b>3. Digitale Computertechnik</b> .....	38
3.1. Funktionsweise des Computers.....	38
3.1.1. Eigenschaften.....	38
3.1.2. Aufbau.....	38
3.1.3. Programmierung.....	39
3.1.4. Datenspeicherung.....	40

3.1.5.	Datenträger.....	41
	Magnetbänder .....	41
	Magnetplatten .....	41
	Optische Speicher .....	42
3.1.6.	Betriebssystem .....	43
3.2.	Interaktive Programme .....	44
3.2.1.	Ein- und Ausgabegeräte.....	44
	Optische Ausgabegeräte.....	44
	Akustische Ausgabegeräte.....	45
	Manuelle Eingabegeräte.....	46
	Optische Eingabegeräte .....	48
	Akustische Eingabegeräte.....	48
3.2.2.	Interaktionskonzepte .....	49
	Menüselektion.....	49
	Formulare/Masken ausfüllen .....	50
	Kommandosprachen .....	50
	Natürliche Sprache.....	50
	Direkte Manipulation .....	51
3.2.3.	Benutzerschnittstelle .....	51
	Psychologische Aspekte.....	51
	Benutzermodelle und die Verwendung von Metaphern .....	52
	Fenstertechnik .....	54
	Die „goldenen Regeln“ des Dialog-Designs.....	54
3.2.4.	Implementation interaktiver Programme .....	54
	Abfrageschleife .....	54
	Interrupts .....	55
	Polling-Task .....	56
	Event-Queue .....	56
	Ereignis-Abhandlung .....	56
3.3.	Arbeitsstationen .....	57
3.3.1.	Apple Macintosh.....	57
	Human-Interface-Guidelines.....	58
	Prozedurale Programmierung .....	58
	Toolbox .....	59
3.3.2.	NeXT-Workstation .....	63
	MACH Betriebssystem .....	64
	NextStep.....	65
	Window-Server und Display-PostScript.....	67
	Objektorientierte Programmierung .....	68
	Application-Kit .....	72
	Interface-Builder .....	73
3.4.	AD/DA-Wandler .....	76
3.4.1.	Digital/Analog-Wandler .....	79
3.4.2.	Analog/Digital-Wandler .....	80
3.4.3.	Fehlerquellen.....	81
	Aliasing.....	81
	Filterung.....	81
	Quantisierungsrauschen .....	82
3.4.4.	Codierung.....	82
	Pulsmodulation (PCM).....	83
	Delta-Pulsmodulation (DPCM).....	84
	Delta-Modulation (DM).....	84
	Adaptive Verfahren.....	84
3.5.	Signalprozessoren .....	85
3.5.1.	Architektur .....	85
3.5.2.	Programmierung .....	85
3.5.3.	Algorithmen .....	86
3.5.4.	Anwendungen von digitalen Signalprozessoren.....	87

<b>4. Digitale Klanganalyse</b> .....	88
4.1. Diskrete Fouriertransformation.....	88
4.1.1. Mathematische Betrachtung der DFT .....	88
4.1.2. Rechteckfenster .....	91
4.1.3. Fensterfunktion.....	93
4.2. Fast-Fourier-Transformation.....	93
4.2.1. FFT-Algorithmus .....	93
4.2.2. Implementation.....	96
4.2.3. Anwendungen.....	97
<b>5. Digitale Klangerzeugung</b> .....	103
5.1. Wellenform-Synthese .....	104
5.2. Additive Synthese .....	104
5.2.1. Vollständige Fouriersynthese.....	106
5.2.2. Additive Synthese mit subtraktiver Nachbearbeitung.....	106
5.2.3. Time-Slice-Verfahren.....	107
5.3. Frequenzmodulations-Synthese .....	107
5.3.1. Einfache FM-Synthese .....	107
5.3.2. Komplexe FM-Synthese in der Praxis .....	110
5.4. Phase-Distortion-Synthese .....	112
5.5. Waveshaping (Nonlinear-Distortion).....	114
5.6. Granular-Synthese.....	115
5.7. Karplus-Strong-Synthese .....	115
5.8. Sampling .....	116
5.8.1. Aufbau eines Samplers.....	116
5.8.2. Aufnahme von Klängen .....	117
5.8.3. Organisation der Samples.....	118
Trim .....	118
Loops .....	118
Reverse .....	119
Multisamples .....	119
Positional-Crossfading .....	120
Velocity-Crossfading .....	120
5.8.4. Nachbearbeitung.....	120
Modulation .....	121
Filterung .....	121
Lautstärke-Hüllkurven .....	121
5.8.5. Speicherung.....	121
5.8.6. ROM-Sample-Synthese.....	121
5.9. Resynthese .....	122
5.10. Sprachsynthese.....	122
5.10.1. Formant-Synthese .....	123
5.10.2. Linear-Predictive-Coding (LPC) .....	124
<b>6. Digitale Klangbearbeitung</b> .....	126
6.1. Digitales Mischpult.....	127
6.2. Verstärker (Amplifier) .....	130
6.2.1. Regelverstärker.....	130
Pegelregler.....	130
Panorama.....	131
Summenverstärker.....	131
6.2.2. Kompressor und Expander .....	131
6.2.3. Begrenzer .....	133
6.2.4. Noisegate.....	133
6.3. Verzögerer (Delay) .....	134
6.3.1. Echo.....	134
6.3.2. Chorus .....	135

6.3.3. Flanging .....	135
6.3.4. Phasing .....	135
6.4. Hall (Reverb) .....	136
6.4.1. Hall .....	136
6.4.2. Gated-Reverb .....	137
6.4.3. Reverse-Reverb .....	137
6.5. Digitale Filter .....	138
6.5.1. FIR-Filter .....	140
6.5.2. IIR-Filter .....	140
6.6. Phase-Vocoder .....	142
6.6.1. Time-Scaling .....	143
6.6.2. Pitch-Transposition .....	144
6.6.3. Zeitvariable Filter .....	144
6.7. Pitch-Shifter .....	144
<b>1. Klangsynthese-Systeme .....</b>	<b>145</b>
7.1. Softwaresysteme .....	145
7.1.1. Akustische Compiler: Music N .....	145
Geschichte .....	145
Übersicht .....	146
Beispiel .....	147
Nachfolger .....	150
7.1.2. Prozedurale Programmierung .....	152
System-Beep .....	154
Note-Synthesizer .....	154
Wave-Table-Synthesizer .....	154
Sampled-Sound-Synthesizer .....	156
Sound-Ressourcen .....	157
Sound-Manager-Routinen .....	160
Sound-Manager-Kommandos .....	163
Beispielprogramm SoundApp .....	166
7.1.3. Objektorientierte Programmierung .....	167
Sound-Hardware .....	167
Sound-Kit .....	168
Music-Kit .....	170
Beispielprogramm Ensemble .....	173
7.1.4. Visuelle Programmierung .....	174
Sound-Module .....	176
Additive Synthese .....	178
Time-Slice-Synthese .....	178
7.2. Echtzeitsysteme .....	178
7.2.1. Sound-Chip .....	179
7.2.2. Synthesizer: Yamaha DX-7 bis SY-77 .....	180
7.2.3. Sampler .....	181
7.2.4. Digital-Piano .....	181
7.3. Integrierte Systeme .....	182
7.3.1. Synclavier .....	183
7.3.2. Fairlight .....	184
7.3.3. AudioFrame .....	184
<b>Digitale Steuerung .....</b>	<b>186</b>
8.1. Musical-Instrument-Digital-Interface (MIDI) .....	186
8.1.1. MIDI-Hardware .....	186
MIDI-Anschlüsse .....	186
Serielles Interface .....	187
MIDI-Netzwerke .....	188
8.1.2. MIDI-Datenformat .....	189
Statusbyte .....	189
Datenbyte .....	190

8.1.3.	MIDI-Modes.....	191
	Omni-Mode .....	192
	Poly-Mode.....	192
	Mono-Mode.....	192
	Multi-Mode .....	192
8.1.4.	MIDI-Nachrichten .....	192
	Channel-Voice-Messages.....	193
	Channel-Mode-Messages .....	195
	System-Common-Messages .....	196
	System-Realtime-Messages .....	197
	System-Exclusive-Messages .....	198
8.1.5.	MIDI-Datenfluss .....	198
8.1.6.	Synchronisation .....	199
	Control-Voltage.....	200
	Tape-Sync.....	200
	SMPTE .....	200
	MIDI-Time-Code .....	201
8.1.7.	MIDI-Programmierung .....	203
	MidiPascal .....	203
	Macintosh MIDI-Manager .....	207
	Visuelle MIDI-Programmierung .....	211
8.2.	Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	215
8.2.1.	Computerinteraktion.....	215
	Kommandoeingabe über die Tastatur .....	215
	Mausmanipulation.....	215
8.2.2.	Klaviertastaturen .....	217
	Parameter.....	217
	Beispiele.....	218
8.2.3.	Saitenwandler .....	219
	MIDI-Bass .....	219
	MIDI-Gitarre .....	220
	MIDI-Streicher .....	220
8.2.4.	Blaswandler.....	220
	MIDI-Saxophon, MIDI-Trompete .....	221
8.2.5.	Schlagwandler .....	221
	Drum-Pads.....	221
	Drum-to-MIDI.....	221
	Berührungsempfindliche Flächen .....	222
8.2.6.	Pitch-to-MIDI.....	222
8.2.7.	Diverse MIDI-Controller.....	222
<b>9.</b>	<b>Digitale Aufzeichnung .....</b>	<b>223</b>
9.1.	Tonaufzeichnung.....	223
9.1.1.	Analoge Schallaufzeichnung.....	223
9.1.2.	Eigenschaften der digitalen Tonaufzeichnung .....	225
9.1.3.	Signalcodierung.....	227
9.1.4.	Fehlerschutzcodierung .....	228
	Redundanz.....	228
	Codespreizung.....	228
	Parität .....	229
9.1.5.	Kanalcodierung .....	229
9.1.6.	Fehlererkennung und -korrektur.....	230
9.2.	Compact-Disc .....	231
9.2.1.	Laserabtastung.....	231
9.2.2.	Speicherformat .....	233
	EFM-Codierung .....	233
	Frame- und Blockstruktur .....	234
	CIRC .....	235
	CD-Herstellung .....	235

9.2.3. Anwendungen .....	236
CD-Audio .....	236
CD-ROM .....	237
CD-Interactive .....	238
CD-ROM XA .....	238
CD-Video .....	238
9.3. Digitale Bandmaschinen .....	239
9.3.1. Aufzeichnungs- und Wiedergabeverfahren .....	239
Servo-Steuerung .....	240
Schrägspur-Aufzeichnung .....	240
Longitudinalspur-Aufzeichnung .....	241
Mehrkanal-Aufzeichnung .....	241
9.3.2. Anwendungen .....	243
Videorecorder mit PCM-Adapter .....	243
Video8 .....	243
R-DAT .....	244
DASH- und PD-Mehrkanalmaschinen .....	244
9.4. Direct-to-Disc-Recording .....	245
9.4.1. Aufzeichnungs- und Wiedergabeverfahren .....	245
Klangbearbeitung .....	245
Abspiellisten .....	246
9.4.2. Beispiele .....	248
Workstation-Systeme .....	248
Stand-alone-Systeme .....	249
9.5. Digitale Übertragungssysteme .....	249
9.5.1. Signal-Bus-Systeme .....	249
S/PDIF-Bus .....	249
AES/EBU-Studiobus .....	250
SDIF .....	251
MADI .....	251
9.5.2. Digitale Telephonübertragung .....	251
9.5.3. Digitale Funkübertragung .....	252
<b>10. Kompositions- und Aufführungshilfen .....</b>	<b>253</b>
10.1. Instrumentensteuerung .....	253
10.1.1. Synthesizer-Programmierung .....	253
10.1.2. Editor-Software .....	253
10.1.3. Klangbibliothekenverwalter .....	255
10.1.4. MIDI-Netzwerk-Konfiguration .....	255
10.2. MIDI-Sequencer .....	255
10.2.1. Funktionsweise .....	256
10.2.2. Eingabemodi .....	257
Step .....	257
Realtime .....	258
Overdub .....	258
Punch-in/Punch-out .....	258
10.2.3. Editoren .....	258
Event-Editor .....	258
Matrix-Editor .....	259
Noten-Editor .....	259
Controller-Editor .....	261
10.3. Notensatz-Programme .....	262
10.4. Algorithmische Kompositionen .....	265
10.4.1. Begleitautomaten .....	265
10.4.2. Interaktive Kompositionen .....	267
10.4.3. Mathematische Kompositionen .....	269
10.5. Künstliche Intelligenz .....	269

10.6.	Unterrichtsprogramme .....	271
10.6.1.	MIDI-Sequenzer als Lehrhilfsmittel .....	271
10.6.2.	Lernprogramme .....	271
	Drill-and-Practice .....	271
	Entdeckendes Lernen.....	272
<b>11.</b>	<b>Multimedia-Systeme .....</b>	<b>276</b>
11.1.	Konzepte .....	276
11.1.1.	Multimedia .....	276
11.1.2.	Hypertext.....	277
11.1.3.	Hypermedia .....	278
11.2.	Multimedia-Werkzeuge .....	279
11.2.1.	Hardware .....	279
	MIDI-Netzwerk .....	279
	Synthesizer.....	280
	AD/DA-Wandler und Signalprozessoren .....	281
	Compact-Disc-Laufwerk .....	283
	Bildplattenspieler.....	285
11.2.2.	Software .....	285
	Autorensystem: HyperCard .....	286
	Audio-Input: MacRecorder.....	288
	Professionelle Audioverarbeitung: Audiomedia .....	290
	Sprachsynthese: HyperAnimator.....	290
	MIDI-Steuerung: HyperMIDI .....	291
	Compact-Disc-Steuerung: CD-Audio-Toolkit .....	292
	Animationen: Macromind Director .....	293
11.3.	Anwendungsbeispiele .....	294
11.3.1.	Digitale Lexika und Literatur-Hypertexte.....	294
11.3.2.	Musikalische Werkanalyse.....	296
11.3.3.	Instrumenten-Lehrgang .....	298
11.3.4.	Lehrgang zur FM-Synthese.....	299
11.3.5.	Choreographie-Entwurf.....	302
<b>12.</b>	<b>Nachwort .....</b>	<b>303</b>
12.1.	Veränderte Musikproduktionen .....	303
12.2.	Computermusik als Forschungsgebiet .....	305
<b>13.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>307</b>
13.1.	Tabellen.....	307
13.1.1.	Binär-Hexadezimal-Dezimal-Umrechnung .....	307
13.1.2.	ASCII-Code.....	308
13.1.3.	Produkte .....	309
	Arbeitsstationen .....	309
	Kommerzielle Musik-Software .....	310
	Public-Domain-Software.....	312
13.2.	Computermusik-Zentren.....	314
13.2.1.	Szene Schweiz.....	314
	Schweizerisches Zentrum für Computermusik.....	314
	Studio für elektronische Musik.....	314
	Multimedia-Laboratorium der Universität Zürich.....	314
	Schweizerische Gesellschaft für Computermusik .....	315
	Veranstaltung „Computer and Art“ in Lugano.....	315
13.2.2.	Szene International.....	315
	Media-Laboratory, MIT.....	315
	IRCAM, Paris.....	316
	CME & CARL, San Diego.....	316

	Laboratorio di Informatica Musicale, Milano .....	316
	Ars Electronica, Linz.....	316
	Vereinigungen .....	316
13.3.	Glossar .....	317
13.4.	Personen- und Sachverzeichnis .....	325
13.5.	Discographie.....	335
13.6.	Literaturverzeichnis .....	336
	13.6.1. Bücher & Artikel.....	336
	13.6.2. Zeitschriften & Periodica .....	346