

Joachim Stange-Elbe  
**Computer und Musik**  
De Gruyter Studium

## Weitere empfehlenswerte Titel



### *Mensch-Maschine-Interaktion*

Andreas Butz, Antonio Krüger, 2014

ISBN 978-3-486-71621-4, e-ISBN (PDF) 978-3-486-71967-3,  
e-ISBN (EPUB) 978-3-486-98971-7



### *Bühnentechnik, 5. Auflage*

Bruno Grösel, 2015

ISBN 978-3-11-035172-9, e-ISBN (PDF) 978-3-11-035689-2,  
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-039686-7, Set-ISBN 978-3-11-043914-4



### *Software-Ergonomie, 3. Auflage*

Michael Herczeg, 2009

ISBN 978-3-486-58725-8, e-ISBN (PDF) 978-3-486-59540-



### *i-com*

Jürgen Ziegler (Editor in Chief), 3 Hefte/Jahrgang

ISSN 1618-162X, eISSN 2196-6826



### *it-Information Technology*

Paul Molitor (Editor in Chief), 6 Hefte/Jahrgang

ISSN 1611-2776, eISSN 2196-7032

Joachim Stange-Elbe

# Computer und Musik



Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen  
der digitalen Musik

**DE GRUYTER**  
OLDENBOURG

**Autor**

Prof. Dr. phil. habil. Joachim Stange-Elbe  
Universität Osnabrück  
Institut für Musikwissenschaft und Musikpädagogik  
Neuer Graben, Schloss  
49074 Osnabrück  
joachim.stange.elbe@googlemail.com

ISBN 978-3-486-59031-9  
e-ISBN (PDF) 978-3-486-72019-8  
e-ISBN (EPUB) 978-3-486-99148-2

**Library of Congress Cataloging-in-Publication Data**

A CIP catalog record for this book has been applied for at the Library of Congress.

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

© 2015 Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston  
Coverabbildung: sad444/iStock/Thinkstock  
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck  
♻ Gedruckt auf säurefreiem Papier  
Printed in Germany

[www.degruyter.com](http://www.degruyter.com)

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>XV</b>
<b>I. Teil: Musik und Technologiekonzepte</b>	<b>1</b>
<b>1 Computer</b>	<b>3</b>
1.1 Der Computer als täglicher Begleiter .....	3
1.2 Der Computer als Digital Audio Workstation (DAW) .....	5
1.3 Historische Computer und Musik .....	7
1.4 Computer und Musik als Allgemeingut.....	10
1.5 Digitale Musik und Musikwissenschaft.....	11
<b>2 Musik</b>	<b>15</b>
2.1 Die wahrnehmungsphysiologischen Grundlagen der Musik .....	15
2.1.1 Beschreibung der gehörten Musik .....	15
2.1.2 Musikalische und physikalische Beschreibung der Musik .....	17
2.1.3 Analoge und digitale Elemente in der Musik.....	20
2.2 Die physikalischen Grundlagen auditiver Ereignisse .....	21
2.2.1 Wahrnehmung und Maßeinheiten.....	23
2.2.2 Besonderheiten bei der Wahrnehmung.....	24
2.3 Die musikalischen Grundlagen auditiver Ereignisse .....	25
2.3.1 Töne und Noten .....	25
2.3.2 Noten, Pausen und ihre Dauern .....	27
2.3.3 Metrum, Rhythmus und Tempo .....	28
2.3.4 Intervalle, Akkorde, Tonarten.....	29
2.3.5 Dynamik und Artikulation.....	31
2.3.6 Die Entwicklung der Notenschrift .....	32
2.4 Die ästhetischen Grundlagen der Musik .....	35

2.5	Musik und ihre Wissenschaft .....	36
2.5.1	Musik und Zahl .....	37
2.5.2	Die Musik als Zahlwissenschaft .....	38
2.5.3	Musik als rationale Tonschöpfung .....	39
2.5.4	Musik und Informationstechnologie .....	39
2.6	Epochen der musikalischen Medientechnologie .....	40
2.6.1	Das mechanische Stadium .....	41
2.6.2	Das elektrisch-analoge Stadium .....	45
2.6.3	Das elektronisch-digitale Stadium .....	46
2.6.4	Medientechnologische Transformationen .....	47
<b>3</b>	<b>Computer und Musik</b> .....	<b>49</b>
3.1	Musikalische Hardware .....	49
3.1.1	Der Computer .....	50
3.1.2	Die Aufnahmegerate .....	50
3.1.3	Das Audiointerface als Schnittstelle zum Computer .....	52
3.1.4	Das Mischpult als Schnittstelle zu Mikrofonen und Lautsprechern .....	53
3.1.5	Keyboards und Controller .....	57
3.1.6	Lautsprecher, Kopfhörer .....	57
3.1.7	Verbindungen, Kabel, Anschlüsse .....	58
3.1.8	Digitale Audioschnittstellen .....	59
3.2	Musikalische Produktionsumgebungen .....	60
<b>II. Teil:</b>	<b>Schallaufzeichnungskonzepte</b> .....	<b>63</b>
<b>4</b>	<b>Die Aufzeichnung von akustischen Ereignissen</b> .....	<b>65</b>
4.1	Die Eigenschaften der Schallausbreitung .....	65
4.2	Die Grundprinzipien der Schallaufzeichnung .....	66
4.2.1	Die parametrische Codierung .....	67
4.2.2	Die Signalformcodierung .....	67
4.3	Die mechanische Schallaufzeichnung .....	68
4.4	Der Beginn des Musikkonsums .....	70
4.5	Die elektrische Schallaufzeichnung .....	72
4.6	Die elektromagnetische Schallaufzeichnung .....	72

---

4.7	Die digitale Schallaufzeichnung .....	73
4.8	Die künstlerische Auseinandersetzung mit der Schallaufzeichnungstechnik .....	76
<b>5</b>	<b>Die Digitalisierung einer Schallwelle (Sampling)</b> .....	<b>79</b>
5.1	Die Begriffe „analog“ und „digital“ .....	79
5.2	Der Begriff des Sampling .....	80
5.3	Die Grundvoraussetzungen der Digitalisierung .....	80
5.4	Die Zeitquantisierung .....	82
5.4.1	Das Shannonsche Abtasttheorem und die Nyquist-Frequenz .....	83
5.4.2	Die analoge Tiefpassfilterung .....	83
5.4.3	Aliasing .....	84
5.4.4	Oversampling .....	85
5.5	Die Amplitudenquantisierung .....	85
5.5.1	Die Quantisierungstiefe und Reproduktion der (analogen) Dynamik .....	85
5.5.2	Dithering .....	87
5.6	Die Speicherung des digitalen Schallsignals .....	87
<b>6</b>	<b>Die digitale Archivierung und ihre Trägermedien</b> .....	<b>89</b>
6.1	Die optische Speicherung .....	90
6.2	Die lineare elektromagnetische Speicherung .....	93
6.3	Die direkte elektromagnetische Speicherung (Harddisc-Recording) .....	94
<b>7</b>	<b>Die Datenformate für digitale Audiosignale</b> .....	<b>97</b>
7.1	Die Dateiformate für unkomprimierte Audiosignale .....	98
7.2	Die Kompression von Audiodaten .....	99
7.3	Die Datenformate für die verlustfreie Audiokompression .....	100
7.4	Die verlustbehaftete Audiokompression .....	101
7.4.1	Das predictive coding .....	103
7.4.2	Das perceptual coding .....	103
7.4.3	Die Funktionsweise einer Kompression .....	103
7.5	Die Datenformate für die verlustbehaftete Audiokompression .....	105
7.6	Das ID3-Tag .....	109
7.7	Das Sampling als neue musikalische Kunstform .....	109

<b>8 Die digitale Verarbeitung von Schallereignissen</b>	<b>113</b>
8.1 Die Signalwege beim Aufnahmesystem .....	113
8.2 Latenzen und Buffer .....	114
8.3 Das Audiotransferprotokoll .....	115
8.4 Die Editoren für die digitale Klangverarbeitung .....	115
8.4.1 Der Aufbau und das Aussehen eines Audioeditors .....	116
8.4.2 Elementare Bearbeitungstechniken .....	117
8.5 Die Klassifizierung und der Einsatz von Effekten .....	120
8.6 Die Effekte zur Beeinflussung der Dynamik .....	121
8.6.1 Verstärker .....	121
8.6.2 Panorama .....	122
8.6.3 Kompressor .....	123
8.6.4 Expander .....	125
8.6.5 Noisegate .....	125
8.6.6 Limiter .....	126
8.6.7 De-Esser .....	126
8.7 Die Effekte zur Bearbeitung des Klangspektrums .....	127
8.7.1 Filter .....	127
8.7.2 Equalizer .....	130
8.7.3 Pitch-Shifting (Tonhöhenveränderung) .....	131
8.7.4 Distortion und Overdrive .....	132
8.8 Die Effekte zur Beeinflussung der zeitlichen Verzögerung .....	133
8.8.1 Delay (Echo) .....	133
8.8.2 Reverb (Hall) .....	134
8.8.3 Chorus .....	138
8.8.4 Flanger .....	139
8.8.5 Phaser .....	139
8.9 Der Effekt zur Beeinflussung der Zeitstruktur (Time-Stretching) .....	139
8.10 Die Synthese-Effekte .....	140
8.10.1 Exciter und Enhancer .....	140
8.10.2 Vocoder (voice coder) .....	140
8.10.3 Ringmodulator .....	141



---

8.11	Der Mehrkanalton (Raumklang).....	142
8.11.1	Die analogen Mehrkanaltonverfahren .....	142
8.11.2	Die digitalen Mehrkanaltonverfahren.....	143
8.12	Die Klanganalyse.....	145
8.12.1	Die diskrete Fourier-Transformation (DFT).....	146
8.12.2	Die Fast-Fourier-Transformation (FFT).....	147
8.13	Die Klangrestauration .....	148
8.14	Von den Audiodaten zur Notation .....	150
<b>III. Teil: Klangsynthesekonzepte</b>		<b>153</b>
<b>9 Die akustische Klangerzeugung</b>		<b>155</b>
9.1	Die Eigenschaften der akustischen Instrumente .....	155
9.1.1	Obertonschwingungen und Klangfarbe .....	156
9.1.2	Obertöne, Intervalle und Stimmungen.....	157
9.2	Gestik und Klangcharakter .....	159
9.3	Die technische Entwicklung des Instrumentariums .....	160
<b>10 Die elektrische Klangerzeugung</b>		<b>163</b>
10.1	Die Utopien der elektrischen Klangerzeugung.....	164
10.2	Der Rundfunk als klangerzeugendes Medium.....	165
10.3	Die ersten elektrischen Instrumente und ihre Interfacetechnologie.....	167
10.3.1	Das Telharmonium (Dynamophon).....	167
10.3.2	Der Neo-Bechstein-Flügel.....	168
10.3.3	Das Ätherophon (Thereminvox).....	169
10.3.4	Das Trautonium.....	170
10.3.5	Die Ondes Martenot .....	171
10.3.6	Interfacetechnologien und Repertoire .....	172
10.4	Die Elektronische Musik und der Abschied vom Interpreten .....	173
10.4.1	Die „Komposition“ der Elektronischen Musik.....	174
10.4.2	Die Aufführungsproblematik der Elektronischen Musik.....	178
10.5	Die Musique concrète .....	179

---

<b>11 Die erste Musik aus dem Computer</b>	<b>181</b>
11.1 Musikalische digitale Töne.....	181
11.2 Die ersten Programmiersprachen.....	183
11.3 Die Ästhetik der Computermusik.....	184
11.4 Der Computer und die Klangforschung.....	184
11.5 Die Frequenzmodulation.....	185
<b>12 Der Synthesizer</b>	<b>187</b>
12.1 Der Synthesizer als elektronisches Spielinstrument.....	188
12.2 Die subtraktive Klangsynthese.....	189
12.3 Der klassische Aufbau des modularen Synthesizers.....	191
12.3.1 Spannungssteuerung.....	191
12.3.2 Oszillatoren.....	192
12.3.3 Filter.....	192
12.3.4 Verstärker.....	193
12.3.5 Hüllkurvengenerator.....	193
12.3.6 LFO – Low Frequency Oscillator.....	194
12.4 Die Weiterentwicklung des analogen Synthesizers.....	195
<b>13 Die unterschiedlichen Verfahren der Klangsynthese</b>	<b>197</b>
13.1 Die Klassifizierung der Klangsynthefverfahren.....	197
13.2 Die lineare Klangsynthese.....	198
13.2.1 Additive Klangsynthese.....	198
13.2.2 Resynthese.....	199
13.2.3 Subtraktive Klangsynthese.....	200
13.2.4 Wavetable-Synthese.....	201
13.2.5 Vektor-Synthese.....	202
13.3 Die nichtlineare Klangsynthese.....	202
13.3.1 Phase-Distortion-Synthese (PD-Synthese).....	203
13.3.2 Waveshaping-Synthese.....	204
13.3.3 Modulations-Synthese (AM- und FM-Synthese).....	204
13.4 Die Synthese mit Samples.....	207
13.4.1 Linear-Arithmetische-Synthese (LA-Synthese).....	208

Inhalt	XI
13.4.2 Sampling .....	208
13.4.3 Granularsynthese .....	212
13.4.4 Wavesequenzung.....	213
13.5 Das Physical Modeling.....	213
13.6 Der Synthesizer als Computer .....	216
13.6.1 Synclavier.....	216
13.6.2 Fairlight CMI.....	216
<b>14 Die Virtualisierung des Instrumentariums</b>	<b>219</b>
14.1 Die Schnittstellen für Audio-Plug-ins.....	219
14.2 Die Virtualisierungstechnologien der Klangsynthese.....	221
14.3 Die Urform des virtuellen Synthesizers.....	222
14.4 Der Aufbau und die Handhabung von Audio-Plug-ins.....	223
<b>IV. Teil: Produktionskonzepte</b>	<b>229</b>
<b>15 Die traditionellen musikalischen Produktionskonzepte</b>	<b>231</b>
15.1 Die Elemente der Notenschrift .....	232
15.2 Die Digitalisierung der Notenschrift.....	233
15.3 Die Notwendigkeit der Performance .....	236
<b>16 Die Mechanisierungs- und Automatisierungskonzepte</b>	<b>237</b>
16.1 Die historischen Wurzeln der Mechanisierung.....	237
16.2 Das Selbstspielklavier.....	239
16.3 Die künstlerischen Innovationen durch das Selbstspielklavier .....	242
<b>17 MIDI als digitales Kommunikationskonzept</b>	<b>243</b>
17.1 Die historische Entwicklung von MIDI.....	243
17.2 Die grundlegende Funktionsweise von MIDI.....	244
17.3 Die MIDI-Hardware .....	245
17.4 Die MIDI-Kommunikation.....	247
17.5 Der Aufbau der MIDI-Nachrichten .....	248
17.5.1 Die Channel-Voice-Messages .....	250
17.5.2 Die Channel-Mode-Messages .....	252

---

17.5.3	Die System Messages.....	253
17.5.4	Die Synchronisation mit MIDI.....	254
17.6	Das Standard-MIDI-File.....	255
17.7	General-MIDI-(GM)-Spezifikation .....	256
17.8	Zusammenstellung der wichtigsten MIDI-Werte .....	256
17.9	Die Vorteile und Nachteile des MIDI-Standards.....	256
17.10	Open Sound Control (OSC).....	258
<b>18</b>	<b>Musikalische Produktionskonzepte</b>	<b>261</b>
18.1	Sequenzler .....	262
18.1.1	Die historischen Wurzeln des Sequenzers.....	263
18.1.2	Die Produktionsumgebung eines Sequenzers.....	264
18.1.3	Die Eingabe von MIDI-Events.....	270
18.1.4	Die Quantisierung von MIDI- und Audio-Ereignissen .....	271
18.1.5	Die Darstellung der MIDI-Events (MIDI-Editoren) .....	273
18.1.6	Der Mixer, die Effekte und der Singalfluss.....	277
18.2	Notensatz.....	281
18.3	Klangeditoren .....	283
<b>19</b>	<b>Performancekonzepte</b>	<b>287</b>
19.1	Aufführung, Interpretation, Performance .....	287
19.2	Performance mit dem Computer.....	288
19.2.1	Komposition und Performance als Live-Act.....	288
19.2.2	Der Plattenspieler im Computer.....	292
19.3	Performance durch den Computer.....	294
<b>20</b>	<b>Programmierungsumgebungen</b>	<b>297</b>
20.1	Historische Ansätze .....	298
20.1.1	Musikalische „Würfelspiele“ .....	299
20.1.2	Der Computer komponiert .....	301
20.2	Technologische Ansätze.....	303
20.2.1	Theoretische Aspekte einer algorithmischen Komposition.....	304
20.2.2	Programmumgebungen als algorithmische Kompositionshilfen.....	308

20.3	Textbasierte Programmierumgebungen .....	309
20.3.1	Common Music .....	310
20.3.2	Csound.....	310
20.3.3	SuperCollider .....	313
20.4	Grafische interaktive Programmierumgebungen .....	315
20.4.1	Max/MSP .....	315
20.4.2	Max for Live.....	321
<b>V. Teil:</b>	<b>Interaktionskonzepte</b>	<b>323</b>
<b>21</b>	<b>Traditionelle musikalische Schnittstellen</b>	<b>325</b>
21.1	Die Schnittstellen des akustischen Instrumentariums .....	325
21.2	Die Schnittstellen der elektrischen Instrumente.....	326
<b>22</b>	<b>Digitale musikalische Schnittstellen</b>	<b>329</b>
22.1	Die computereigenen Schnittstellen .....	329
22.2	Historische Interaktionskonzepte.....	330
22.2.1	Music Mouse .....	330
22.2.2	M .....	332
22.2.3	Jam Factory .....	333
22.3	MIDI-Controller .....	334
22.3.1	Frei konfigurierbare Controller .....	334
22.3.2	Vorkonfigurierte Controller .....	335
22.4	Akustische Instrumente als Controller.....	335
22.5	Performance Controller .....	337
22.5.1	Hyperinstruments .....	339
22.5.2	Instrument-inspired gestual controller.....	339
22.5.3	Expanded range controller.....	340
22.5.4	Immersive Controller .....	340
22.6	Grafische Interaktion .....	342
<b>23</b>	<b>Musik mit mobile devices</b>	<b>345</b>
23.1	Die Schnittstellen bei mobile devices .....	346
23.2	Die Klassifizierung der music apps .....	347

---

23.3	Die spezifischen Interaktionskonzepte .....	348
23.3.1	Touch-Controller.....	349
23.3.2	Musikalische Notizbücher (Groove-Boxen) .....	350
23.3.3	Virtuelle Orchester.....	352
23.3.4	None Touch Interface.....	353
23.3.5	Vom Table zum Tablet.....	354
23.3.6	Generative Music .....	355
23.4	Der derzeitige Stellenwert der music apps .....	357
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>359</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>365</b>
<b>Linkverzeichnis</b>		<b>377</b>
<b>Tabellenanhang</b>		<b>383</b>
<b>Indexverzeichnis</b>		<b>393</b>

# Vorwort

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts über die Zusammenhänge zwischen Computer und Musik zu schreiben, bedeutet, sich ständig mit neuen Technologien auseinanderzusetzen. Die Definition und Handhabung dessen, was wir heute als Computer bezeichnen, unterliegen einer ständigen innovativen Wandlung. Der Computer als wörtlich übersetzte Rechenmaschine wurde innerhalb des letzten Jahrhunderts in allen denkbaren Anwendungsgebieten heimisch und ist zum Alltagsbegleiter geworden. Ebenso hat sich in dieser Zeit – und dies gilt besonders seit der generellen Elektrifizierung – unser produktiver wie reproduktiver Umgang mit Musik nachhaltig verändert: Musik ohne Elektrizität, Musik ohne digitales Endverbrauchergerät ist in der heutigen Gesellschaft nicht mehr denkbar. Dabei sind die Erscheinungsformen so vielfältig, dass im Detail betrachtet eine fast unüberschaubare Menge von Musikproduktionswerkzeugen existiert, denen jedoch alle bestimmte Grundprinzipien innewohnen. Diese werden systematisiert und ausgehend von den analogen Wurzeln weitergedacht, bis zu den Umgangsformen mit Musik, die sich aus ihrer digitalen Wesenheit ableiten. Angesichts der ständigen technologischen Weiterentwicklungen ist die Darstellung der aktuellen Produktionsumgebungen eine gegenwärtige Momentaufnahme.

Das Buch wurde in Anlehnung an die Vorlesungen zur Musikalischen Medientechnologie, zur Geschichte der Elektronischen Musik und der Computermusik sowie über die Produktionsformen einer Digitalen Musik konzipiert. Den roten Faden bildete dabei stets die Verknüpfung von aktuellen Produktionsbedingungen mit grundlegenden Technologien und ihren historischen Bezügen. Bei den notwendigen Beschreibungen von beispielhaften Softwareanwendungen wurde auf eine übergreifende allgemeingültige Darstellung geachtet.

Gedankt sein denjenigen Personen, die mit ihrem Engagement die Ideen zu diesem Buch förderten, die sich mit theoretischen wie praktischen Ratschlägen an den begleitenden Diskussionen beteiligten, die zahlreiche Fotografien und Bildschirmdarstellungen von Hardware und Software zur Verfügung stellten und die eine erste kritische Durchsicht der einzelnen Kapitel übernahmen. Ihre Anregungen sind in die einzelnen Kapitel mit eingeflossen, es waren wertvolle Beiträge, die zur Darstellung und Erhellung des künstlerischen Potenzials der digitalen Musiktechnologie beitrugen.

Hamburg, im Juli 2015





I. Teil

# **Musik und Technologiekonzepte**



# 1 Computer

Als Ende der 1960er Jahre, zu Zeiten der ersten Landung auf dem Mond, einige Zukunftsperspektiven für die kommende Jahrtausendwende prognostiziert wurden, standen fliegende Autos und das Wohnen unter Wasser in entsprechenden Behausungen mit an vorderster Stelle. Davon, dass jedoch der Computer in allen seinen unterschiedlichen Erscheinungsformen und dem damit verbundenen Internet tiefe Spuren in unserem sozialen, ökonomischen und künstlerisch-kulturellen Leben hinterlassen würde, war zu dieser Zeit nicht die Rede. Die zunehmende Digitalisierung, die in fast allen Lebensbereichen Einzug gehalten hat, setzt uns in ein anderes Verhältnis zu unserer Welt und bestimmt uns in unserem täglichen Handeln. Der Computer rückt immer mehr in das Zentrum unserer Arbeitswelt und unserer Freizeit, sowohl das Business als auch der Zeitvertreib werden von den digitalen Technologien absorbiert. Gerade im musikalischen Bereich sind seit Mitte der 1980er Jahre tiefgreifende Veränderungen im Umgang mit der Produktion und Reproduktion zu verzeichnen.

## 1.1 Der Computer als täglicher Begleiter

Laut der Internet-Enzyklopädie Wikipedia ist „ein Computer oder Rechner ... ein Apparat, der Daten mithilfe einer programmierbaren Rechenvorschrift verarbeiten kann“ [172]. Die Vielfalt seiner Erscheinungsweisen – als *Desktop-Rechner*, *Notebook* oder *Tablet-Computer* bis hin zum *Smartphone* – hat sich ebenso verändert wie der Umgang mit diesen Gerätschaften und unsere Beziehung zu ihnen. Der Computer ist zu einem ständigen Begleiter bei den alltäglichen, beruflichen, wissenschaftlichen und künstlerischen Tätigkeiten geworden. Besonders unter sozialen Gesichtspunkten hat sich die digitale Technologie zu einem umfassenden Kommunikationswerkzeug entwickelt.

In dieser fast schon chamäleonartigen Vielseitigkeit zeigt sich eine Stärke des Computers: Er ist eine universelle Gerätschaft, die durch Software immer neu definiert werden kann. Ob Texte, Bilder und Grafiken, Musik und Filme, alle uns zur Verfügung stehenden Medien können durch entsprechende Software mit einem Computer generiert, verarbeitet und mittels entsprechender Peripheriegeräte wie Bildschirme, Drucker und Lautsprecher ausgegeben werden. Ein Computer als reine Hardware ist ohne Software nicht funktionstüchtig. Dies unterscheidet ihn von seinen analogen Vorläufern, der Schreibmaschine, den Musikinstrumenten, Fotoapparaten sowie den Filmkameras und Filmprojektoren, die als reine Hardware

die ihnen zgedachten Funktionalitäten erfüllen konnten. Die Trennung in Hardware und Software, das Zusammenspiel beider notwendigen Komponenten, stellt die Grundvoraussetzung der digitalen (Musik-)Technologie dar: Erst durch eine Interaktion von Hardware und einer Softwareanwendung wird ein Computer „lebendig“, wobei es der menschliche Anwender verstehen muss, die Software nach seinen Kenntnissen anzuwenden.

Allgemein formuliert kann ein Computer als Behältnis für unser geistiges Eigentum gesehen werden. Wir vertrauen ihm unsere Texte, Bilder, Filme und auditiven Ereignisse an, in der Gewissheit, dass durch die hierfür verwendete Software unsere Inhalte so archiviert werden, dass sie jederzeit wieder abrufbar sind. Diese Archivierung unterschiedlicher Inhalte, die alle in demselben binären Code vorliegen, findet für uns im Unsichtbaren statt und wird heute vermehrt aus den physisch vorhandenen Geräten in „Clouds“ ausgelagert, wodurch unsere Inhalte orts- und geräteungebunden jederzeit zur Verfügung stehen. Diese Dezentralisierung und insbesondere die universelle Verwendungsmöglichkeit eines Computers führen zu einer Durchlässigkeit der Grenze zwischen beruflichem und privatem Alltag.

Die Computer sind nicht mehr an einen festen Ort gebunden, sie können unsere allgegenwärtigen Begleiter sein und ermöglichen das Arbeiten wie auch das Freizeitvergnügen an jedem denkbaren Ort. War einst die Musikproduktion an feste Studios gebunden, so ist mit den mobilen Notebook-Studios die Aufnahme und Bearbeitung von Musik überall durchführbar. War die Musikproduktion früher einigen Spezialisten vorbehalten, die durch eine mehrjährige Berufsausbildung die notwendigen Kenntnisse hierfür erwerben mussten, so kann heute jeder, der die entsprechende Software benutzt, Musik aufnehmen, verarbeiten und auf einem geeigneten Endgerät speichern bzw. ausgeben. Dass eine Software für Musikproduktion, Bild- oder Textverarbeitung aus den Anwendern keine professionellen Musiker, Fotografen oder Schriftsteller werden lässt, sollte sich dabei von selbst verstehen. Nur durch die Kenntnisse, wie eine entsprechende Produktionsumgebung richtig (oder gezielt falsch) einzusetzen ist, wird aus dem Anwender keinesfalls ein Profi, auch wenn dies manche einschlägigen Bücher zu versprechen meinen.

Ein heutiger Computer beinhaltet von sich aus bereits die Hardwarekomponenten, die zur Aufnahme und Wiedergabe auditiver Ereignisse benötigt werden, sie entsprechen jedoch nicht einer professionellen Studioqualität. Hier sind zusätzliche Geräte notwendig, die eine optimale Klangqualität und mehr als nur zwei (Stereo-)Ein- und Ausgänge zur Verfügung stellen. Ebenso können über einen USB- oder FireWire-Anschluss Geräte für die Klangsteuerung (Keyboard, Controller, optische und andere Sensoren) angeschlossen werden. Bei den existierenden musikalischen Produktionsumgebungen ist zwischen einfachen und komplexen Anwendungen für den Studiobetrieb zu unterscheiden, ihre Verwendung ergibt sich aus den Anforderungen an die jeweiligen Produktionsaufgaben. Derart ausgestattete Computer werden als *Digital Audio Workstation* (DAW) bezeichnet, laut Wikipedia „ein computergestütztes System für Tonaufnahme, Musikproduktion, Abmischung und Mastering, das sich durch eine hohe Integration von Komponenten innerhalb des Systems auszeichnet“ [179].

Durch die Verwendung verschiedener Betriebssysteme (Mac OS, Windows, Linux) ergeben sich einige Unterschiede beim übergreifenden Datenaustausch sowie dem In- und Output der Audiosignale. Wenngleich die meisten Produktionsumgebungen sowohl für Mac OS als auch Windows zur Verfügung stehen, sind die notwendigen Audiotreiber vom jeweiligen Betriebssystem abhängig: Core Audio für Mac OS, ASIO für Windows und ALSA für Linux (siehe Kapitel 8.3).

## 1.2 Der Computer als Digital Audio Workstation (DAW)

Prinzipiell ist heute fast jeder Computer als *Digital Audio Workstation* (DAW) zu verwenden, es bedarf dazu lediglich entsprechender Softwareanwendungen und bestimmter externer Hardwareerweiterungen.

Der Computer als ein universelles digitales Audiogerät kann als Mikrocomputer die Datenverarbeitung in digitalen Effektgeräten und Mischpulten, in Smartphones und PDAs sowie im MP3-Player steuern, und er kann als Computer mit geeigneter Software und geeigneten Audio-Schnittstellen als eine selbstständige DAW verwendet werden. Solcherart kann eine DAW sämtliche Studiogeräte ersetzen (Mehrspur-Bandmaschine, Mischpult, Effektgeräte, Synchronizer, Synthesizer und Sequenzer). Die Signalverarbeitung wird ausschließlich von der Software durchgeführt, bei der Hardware haben nur der A/D- und der D/A-Wandler (Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler) einen Einfluss auf die Signalqualität; die Hardware bestimmt nur die Leistungsfähigkeit, aber nicht die Funktionalität einer DAW.

Die **Struktur** eines Computers folgt auch heute noch dem Konzept mit Hardware (Prozessor, Speicher, Ein- und Ausgabe) und Software (Programme, Daten), das 1944/45 von John von Neumann (1903–1957) konzipiert wurde [114]: Ein oder mehrere Prozessoren sind über einen oder mehrere Datenbusse mit dem Arbeitsspeicher (RAM, Random-Access Memory) und einem Massenspeicher (HD, Hard-Disc) verbunden. Die Ein- und Ausgabe erfolgt mittels Tastatur, Maus, Trackpad, Bildschirm, Drucker, Lautsprecher und weiterer Peripherie. Der Hauptprozessor (CPU, Central Processing Unit) besteht aus dem Steuerwerk zur Ausführung der Programmbefehle und dem Rechenwerk für die mathematischen Operationen sowie Daten- und Befehlspuffer. Hinzu kommen weitere Hilfsprozessoren wie die MMU (Memory Management Unit), der DMA (Direct Memory Access) für die Beschleunigung und Vereinfachung der Speicherverwaltung, sowie eine FPU (Floating Point Unit) für die Gleitkommaarithmetik. Entscheidend für eine DAW ist die Qualität des DSP (Digital Signal Processor), der integriert oder auf Soundkarten die digitale Datenverarbeitung akustischer Signale übernimmt. Diese Hilfsprozessoren verlieren bei zunehmender Leistung der Hauptprozessoren an Bedeutung, eine „native“ oder „generische“ Audio-Software ist heute ohne DSP lauffähig. Die Prozessoren und Busse sind getaktet, d. h. jeder Prozess wird in zeitdis-

kreten Schritten ausgeführt. Die Taktfrequenz (ein Rechenschritt pro Taktfrequenz) ist das Maß für die Schnelligkeit eines Computers, wobei die Taktfrequenz nur innerhalb einer Prozessorfamilie vergleichbar ist. Bei der Digitalisierung von Schallwellen (siehe Kapitel 5) müssen die Rechenoperationen in kürzerer Zeit ausgeführt werden als die Abtastzeit des eintreffenden Signals beträgt; trotzdem können beim Signalfluss Latenzen (Verzögerungen) entstehen, diese sollten jedoch definiert und von konstanter Dauer sein.

In seiner **Funktion** verarbeitet ein Computer Daten nach der Vorschrift eines Programms. Das elementare Programm ist das Betriebssystem, das vom Boot-Programm in den Arbeitsspeicher geladen wird. Alle Daten und Programme sind auf dem Massenspeicher und müssen zur Ausführung ebenfalls in den Arbeitsspeicher geladen werden; dieser ist sehr schnell, aber flüchtig und verliert beim Ausschalten des Rechners seinen Inhalt. Der Unterschied zwischen Programmen und Daten wird durch entsprechende Datei-Endungen gemäß der unterschiedlichen Betriebssysteme angezeigt, die Dateien werden geöffnet, verarbeitet, gespeichert und geschlossen.

Als **Massenspeicher** werden Festplatten in Form einer *Hard Disc* (HD) oder Halbleiterspeicher in Form einer *Solid State Disc* (SSD) als permanenter Programm- und Datenspeicher verwendet. Eine Festplatte besteht aus einem Stapel magnetisch beschichteter Aluminium- oder Keramikscheiben, die sich mit konstanter Geschwindigkeit drehen. Die Speicherung erfolgt magnetisch, einen Löschvorgang gibt es nicht, so werden nicht mehr verwendete Daten mit neuen Daten überschrieben. Diese Technologie erlaubt einen direkten Zugriff auf die Daten, im Gegensatz zu einem sequentiellen Zugriff bei einem Bandspeichergerät. Die Daten werden in konzentrisch angeordneten kreisförmigen Spuren geschrieben und dabei in kleine Spurbereiche zerlegt (Blöcke). Übereinander liegende Spuren werden als Zylinder, übereinander liegende Blöcke als Sektoren bezeichnet. Die logische Ordnung der Daten erfolgt in Verzeichnissen, wobei eine Datei über ihre Speicheradresse angesprochen wird. Ein Verzeichnis ist ein adressierbarer Speicherbereich, in dem die Adressen der im Verzeichnis gespeicherten Daten enthalten sind. Beim Verschieben von Dateien werden nur die Adressen verändert, beim Kopieren von Dateien werden die kompletten Daten übertragen. Beim Löschen von Dateien können freie Adressbereiche danach überschrieben werden. Eine Datei kann in nicht zusammenhängende Blöcke geschrieben werden, diese Fragmentierung erhöht die Zugriffszeit, daher ist eine Fragmentierung bei Audiodaten nicht sinnvoll; für die Audiodatenaufzeichnung sollte die Festplatte defragmentiert sein. Die heute bereits vermehrt verwendete *Solid State Disc* (SSD) ist ein nichtflüchtiger Speicher, der vom Betriebssystem wie eine Festplatte behandelt wird. Ohne mechanische Bauteile erhöht sich die Zugriffszeit auf die Daten, die in Form von elektrischen Ladungen gespeichert werden.

Bei den **Schnittstellen** (Interface) gilt es zwischen den computerspezifischen Schnittstellen und den musikspezifischen Schnittstellen zu unterscheiden. Bei den **computerspezifischen Schnittstellen** stellt die Tastatur die älteste und konventionellste Schnittstelle dar, sie dient zur Eingabe von Kommandos, Parametern und Programmcode. Die Maus ist für die graphische Benutzungsoberfläche vorgesehen, sie dient zum Bedienen von Reglern und Fadern, zur

Steuerung von Parametern und – unter musikspezifischen Gesichtspunkten – zum Verschieben von einzelnen Noten oder ganzen musikalischen Strukturen sowie zur Verbindung zwischen musikalischen Objekten. Mit *MusicMouse* (siehe Kapitel 22.2.1) wurde relativ früh ein interaktives Programm zum Musizieren konzipiert, das ausschließlich mit Tastatur und Maus bedient wird. Bei den **musikspezifischen Schnittstellen** (siehe Kapitel 21) steht die Klaviatur (Keyboard) im Vordergrund, die Tonauslösung wird durch das Niederdrücken und Loslassen der Tasten hervorgerufen; wichtige Parameter sind hierbei die Velocity (Anschlagsdynamik) und der Aftertouch, der sich auf den Druck der gehaltenen Taste bezieht. Die Klaviaturen sind darüber hinaus mit weiteren Controllern ausgestattet, die benutzerdefiniert zur Ton- und Klangkontrolle eingesetzt werden. An eine Klaviatur lassen sich ein Fußpedal und ein Fußschalter anschließen. Darüber hinaus kommen weitere Controller (siehe Kapitel 22.2) zum Einsatz, da die Musikprogramme durch umfangreiche Parameter eine hohe Komplexität aufweisen.

Gerade diese hohe Komplexität setzt durchdachte **Interaktionskonzepte** voraus. Bei der Menüauswahl – hierbei sind die Elemente nach der Art und Anforderung des Programms geordnet – erfolgt Auswahl und Aktivierung eines Elementes aus einer Liste zusammengehöriger Elemente durch Anklicken mit der Maus; diese Aktivierung kann ebenfalls über ein Tastaturkürzel oder über eine Funktionstaste geschehen. Je nach Kontext existieren zusätzliche Pull-Down- oder Pop-Up-Menüs sowie Auswahlboxen, Checkboxes oder Radiobuttons. Die Qualität dieser Interaktionskonzepte sowie die Gestaltung der Benutzungsschnittstellen sind anhängig von programminternen Strukturen, sie sind geräteunabhängig. Hierfür werden oft bestimmte Metaphern verwendet, die aus einer Übernahme von Modellen aus der realen Umgebung beruhen – wie die Modellierung von virtuellen Instrumenten nach einem realen Vorbild (siehe Kapitel 14.2) –, ein Vorgehen, das unter digitalen Benutzungskriterien nicht unbedingt sinnvoll sein muss. Dem gegenüber stehen die programmabhängigen Bedienungsregeln, die sich auf ein syntaktisches Wissen bezüglich des Programmes zurückführen lassen und auch geräteabhängig sein können. Weitere Kriterien sind die Ausführungsgeschwindigkeit und die Lernzeit bei der Arbeit mit dem Programm; diese können weitgehend selbsterklärend oder durch eine unübersichtliche Komplexität gekennzeichnet sein.

## 1.3 Historische Computer und Musik

Ein Computer oder Rechner ist und war zunächst nicht für musikalische Anwendungen gedacht. Auch wenn – wie die Historie zeigt – immer wieder musikalische Aspekte in der Computerentwicklung auftauchen, waren Musiker oder Komponisten daran nicht unmittelbar beteiligt. Vielmehr waren es Informatiker und Techniker, die neben ihrem eigentlichen Berufsfeld musikalische Ambitionen hegten und diese mit ihren informationstechnologischen Tätigkeiten zu verbinden versuchten. Dieses geschah oftmals in der Freizeit und führte zu einem „Missbrauch“ der vorhandenen Hardware. Es liegt in der Ironie der wissenschaftli-

chen Auseinandersetzung mit der Musik, dass das Thema „Musik und Computer“ heute noch im deutschsprachigen (universitären) Wissenschaftskanon keinen eindeutigen Ort hat (siehe hierzu Kapitel 1.5).

Als die Vorläufer des Computers werden ab dem 17. Jahrhundert die ersten Entwicklungen von mechanischen Rechenmaschinen angeführt, sie beherrschten die vier Grundrechenarten und blieben fast allesamt Unikate [85]. Die mechanische Ausführung von komplexen, frei programmierbaren Regeln war zu Beginn des 19. Jahrhunderts nicht den Rechenmaschinen, sondern dem von Joseph Marie Jacquard (1752–1834) gebauten Webstuhl vorbehalten, der sich perfekt mit Lochkarten steuern ließ, sodass er im gewebten Endprodukt das Bild seines Erfinders darstellen konnte. Von diesem Verfahren ließ sich der englische Mathematikprofessor Charles Babbage (1791–1871) inspirieren, der nach der Erfindung seiner *Difference-Engine* – einer Rechenmaschine, die Logarithmen zuerst berechnen und dann ausdrucken konnte –, eine frei programmierbare Maschine plante, die er *Analytical Engine* nannte. Mangels feinmechanischer Präzision zu dieser Zeit wurde diese Maschine lediglich theoretisch entworfen, wobei die wichtigsten Strukturelemente des Computers definiert wurden.

Babbages Mitarbeiterin, Übersetzerin und Kommentatorin seiner Schriften zur *Analytical Engine*, Lady Ada Byron, Countess of Lovelace (1815–1852), nahm die Anregung durch Jacquard auf, indem sie dieser Maschine attestierte: „Sie webt algebraische Muster wie ein Jacquard-Webstuhl Blüten und Blätter“ ([102], S. 252). Bemerkenswert ist auch ihre Vision von derartigen Maschinen, die ihrer Meinung nach einst Musik komponieren, Graphiken produzieren und sowohl das soziale als auch das tägliche Leben grundlegend verändern werden.

Bezogen auf die Musik sollte diese Utopie für etwas mehr als 100 Jahre gelten, denn die praktische Entwicklung von Computern nach Alan Turings (1912–1954) grundlegender Schrift „On Computable Numbers, with an Application to the „Entscheidungsproblem““ von 1936 [145] widmete sich anderen Aufgaben.

### **Großrechner**

Obwohl die *Z1* von Konrad Zuse (1910–1995) aus dem Jahr 1937 noch ein mechanisches Rechenwerk besaß, enthielt sie bereits die meisten Elemente der uns bekannten Computer (eine Kontrolleinheit, einen Speicher und die Verwendung von Mikrobefehlen einschließlich der Fließkommaberechnung) [161]. Die *Z1* war lochkartengesteuert und dadurch programmierbar.

Die *Z3*, ebenfalls von Zuse entwickelt, entsprach dem Bild vom Computer, das sich die Allgemeinheit bis in die 1970er Jahre von diesen „Maschinen“ machte: mit einem Gewicht von knapp einer Tonne, einem Stromverbrauch von 4000 W für 2000 Relais und einer Taktfrequenz zwischen 5 und 10 Hertz konnten jedoch erstmals Programme abgearbeitet werden. Die *Z3* verstand sich auf das Addieren, das Differenzieren und das Radizieren. Dies alles



geschah mit einer Geschwindigkeit, die uns heute mehr wie eine Super-Slow-Motion vor-  
kommt: so nahm eine einfache Multiplikation fast 3 Sekunden in Anspruch [161].

Auch der *ENIAC* (Electronic Numerical Integrator and Computer), der 1946 seine Arbeit  
aufnahm, überbot an Größe und Ausstattung die Z3. Mit Elektronenröhren ausgestattet, be-  
gann mit ihm eine neue Zeit der Elektronenrechner. Bei einer Fläche von 170m<sup>2</sup>, einem Ge-  
wicht von 27 Tonnen, ausgestattet mit fast 17500 Röhren, 7200 Dioden, 1500 Relais, 70000  
Widerständen und 10000 Kondensatoren und einem Stromverbrauch von 174 kW nahm eine  
Multiplikation nur noch 2,8 ms in Anspruch [54].

Die Erfindung des Transistors im Jahre 1947 gilt bis heute als Grundstein für die Computer-  
technologie. Einer der ersten Computer dieser Serie war der *IBM 7090*, der mit seinen über  
50000 Transistoren die Leistung des Z3 um das 100 bis 500fache übertraf. Mit diesem Rech-  
nertypus wurden die ersten digitalen Töne erzeugt (siehe Kapitel 11.1).

Vom Zusammenschluss von Transistoren zu Integrierten Schaltungen führte der Weg zu den  
Mikroprozessoren und den ersten Rechnern, die wir heute mit dem Begriff „Computer“ ver-  
binden.

### Homecomputer

Als in den 1970er Jahren mit dem *Apple I* und besonders mit dem *Apple II* die ersten indu-  
striell gefertigten Personal Computer – Geräte für den Endverbraucher – auf den Markt ka-  
men, verlief für die nächsten 20 Jahre die Weiterentwicklung der Computer, die unter musi-  
kalischen Gesichtspunkten von Bedeutung ist, zweigleisig: Auf der einen Seite der *IBM-PC*  
mit seinen kompatiblen Nachbauten für den Businessbereich und auf der anderen Seite die  
despektierlich als Homecomputer bezeichneten Entwicklungen, mit denen künstlerisch gear-  
beitet wurde. Gerade die Entwicklung des *Commodore C64*, des *Atari ST* und auch des  
*Commodore Amiga* sowie des *Apple Macintosh* waren für die musikalische Softwaretechno-  
logie von entscheidender Bedeutung. Die ersten Sequenzer (siehe Kapitel 18.1), Notensatz-  
(siehe Kapitel 18.2) und Kompositionsprogramme (siehe Kapitel 20.2.2) wurden für diese  
Rechner entwickelt, und noch heute bauen die aktuellen Programme auf den damaligen Ent-  
wicklungen auf. Die kompositorische Ästhetik war zu dieser Zeit von den aus heutiger Sicht  
vorliegenden Beschränkungen bestimmt. Dies gilt insbesondere für die digitale Klangsynthe-  
se, denn bereits in dieser Computergeneration waren – wenn auch nicht auf dem vergleichba-  
ren qualitativen Stand wie heute – bereits Soundchips integriert, deren Steuerung von einem  
Computer übernommen wurde.

Seit dieser Zeit ist der Computer sowohl ein Kompositionsinstrument wie auch ein Musikin-  
strument für elektronische Klangsynthese. Die digitale Schallaufzeichnung ermöglichte mit  
dem Sampling schließlich die Nutzung des Computers als ein musikalisches Universalgerät.

## 1.4 Computer und Musik als Allgemeingut

Auf der reproduktiven Seite ist die Verbindung von Musik und Computer heute zu einem Allgemeingut geworden. Was mit den mobilen Medien wie dem Walkman und dem Trägermedium Musik-Cassette begann und mit dem Discman und dem Trägermedium CD fortgesetzt wurde, findet mit dem MP3-Player seinen vorläufigen Höhepunkt. Gerade durch das MP3-Datenformat (siehe Kapitel 7.5), wurde der Musikkonsum und die Musikdistribution zu Beginn des neuen Jahrtausends revolutioniert. Seit mit *Napster* der Internetvertrieb von Musik auf illegale und später legale Weise begann, führte dies zu völlig neuen Distributionswegen von Musik, über die bis heute unter urheberrechtlichen wie ökonomischen Gesichtspunkten nicht nur vor Gerichten heftig gestritten wird. Für Komponisten, Musiker, Produzenten, die ganze Musikindustrie [122] und auch für die Konsumenten bedeutet dies eine tiefgreifende Veränderung im Umgang mit Musik.

Inzwischen ist ein persönliches Speichermedium (wie ein MP3-Player) für Musikdateien nicht mehr notwendig, da ein großer Teil der Musik über private wie öffentliche Clouds online zur Verfügung steht. Das Musik-Streaming aus dem Netz und eigene Speicherung von Musik in der Cloud bieten damit einen universellen Zugriff und lösen sich vom physikalischen Datenträger. Gerade das Musik-Streaming mit Plattformen wie *Last.fm*, *Spotify*, *Simfy* sowie *YouTube* und vielen anderen, verändern den Besitz von Musik grundlegend: der Moment des materielosen Hörens beginnt, die handhabbaren CDs, die sorgsam in den Player eingelegt wurden und sich in diversen Regalen stapelten, zu verdrängen. Über den persönlichen Musikgeschmack gibt nicht mehr die CD-Sammlung, sondern die Playlist im Computer, auf dem Smartphone oder in der Cloud Auskunft.

Dabei ist zu beachten, dass die akustische Qualität der Musikdaten durch ihre verlustbehaftete Komprimierung in Dateiformate wie MP3 oder ACC (siehe Kapitel 7.2) mit dem gewohnten Hi-Fi-Standard nichts mehr gemein hat. Auch wenn die Unterschiede zwischen unkomprimierten und komprimierten Audiodaten offensichtlich nicht mehr wahrnehmbar sind, wird erst die Zukunft zeigen, ob und wie sich das komprimierte Hören auf unsere Sinnesorgane auswirken wird.

Auf der produktiven Seite kann bei der Verbindung von Musik und Computer in gewissen Grenzen eine Demokratisierung der Musikproduktion festgestellt werden. Da die Produktionsumgebungen für den Studiobereich heute allgemein zugänglich sind, kann jeder Computer als professionelles Musikstudio definiert werden. Allein eine genaue Kenntnis der Materie vermag hier im Umgang mit diesen Produktionsmitteln die Grenzen zu setzen: so ist eine gezielte berufliche Qualifikation immer noch notwendig, um die technologischen Anteile einer Musikproduktion professionell durchzuführen. Auch wenn sich hier – wie in den Bereichen der Printmedien – die Berufsbilder durch die Digitalisierung grundlegend geändert haben, sind bestimmte Ausbildungsgänge durchaus angebracht.

Dies trifft für einfachere Anwendungen jedoch nicht zu. Gerade das Beispiel der Digitalisierung von Vinylplatten oder älteren Tonbändern und Musik-Cassetten zeigt die Bandbreite der Anwendungen. So ist es für den privaten Gebrauch absolut ausreichend, mit einer passenden Softwareanwendung eine Vinylplatte zu digitalisieren, in die einzelnen Tracks zu zerlegen, ja sogar mit voreingestellten oder selbst erstellten Algorithmen zur Rauschunterdrückung und der Entfernung von Störgeräuschen das akustische Ergebnis zu beeinflussen und eine CD zu erstellen. Für die professionelle Restaurierung alter Aufnahmen (siehe Kapitel 8.13) bedarf es jedoch spezieller Softwareanwendungen und bestimmter ästhetischer Voraussetzungen in den Bereichen der historisch gewachsenen Klangqualität, eines geschulten Hörempfindens und eines Wissens um die technologischen Grundlagen der Signalverarbeitung.

Vergleichbar dem Umgang mit der Musik, der gerade durch die mobilen Medien einen tiefgreifenden Wandel erfährt, hat sich durch die musikalischen Applikationen (Apps) für mobile devices eine neue musikalische Kultur herausgebildet, die sowohl spielerische als auch professionelle Elemente gleichermaßen einschließt. Sie decken ein breites Feld von spielerischer Unterhaltung bis hin zu Softwaresynthesizern älterer und neuerer Bauart sowie Softwareanwendungen zur Musikproduktion ab. Es mutet fast schon wie zu Zeiten der Softwareentwicklung für die „Homecomputer“ an, wenn von einzelnen Entwicklern oder kleinen Gruppen innovative Synthesizer, Controller oder völlig neuartige Interfacetechnologien zum digitalen Musizieren gestaltet werden (siehe Kapitel 23).

## 1.5 Digitale Musik und Musikwissenschaft

Die Antwort auf die Frage, in welchem (universitären) Wissenschaftsbereich das Thema *Musik und Computer* angesiedelt ist, fällt nicht eindeutig aus. Während in der anglo-amerikanischen *musicology* naturwissenschaftlich-musikalische Themen und historisch-musikalische Themen gleichberechtigt nebeneinander stehen, ist es in der deutschsprachigen Musikwissenschaft durch die Trennung zwischen einem historischen und einem systematischen Zweig schwierig, eine genaue Verortung dieses Themenbereiches zu finden. Die historische Musikwissenschaft befasst sich primär mit notierten Kompositionen, während sich die deutlich unterrepräsentierte systematische Musikwissenschaft mit „Randbereichen“ und anderen *Hilfswissenschaften* wie der Psychologie, Soziologie, Pädagogik, Philosophie (mit der Ästhetik) oder Akustik widmet. Eine Auseinandersetzung mit musikalischen Medien, die sowohl auf historischer wie auch systematischer Seite geführt werden sollte, ist daher eher in einem musikwissenschaftlichen Niemandsland angesiedelt. Zudem fällt der Musikwissenschaft als einer Geisteswissenschaft der für diese Thematik wichtige Bezug zu den Naturwissenschaften – allen voran der Informatik – besonders schwer.

In der Enzyklopädie *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, die inzwischen in zwei Auflagen aus den Jahren 1949–1976 und 1994–2007 vorliegt, findet sich im Supplementband 2

aus dem Jahr 1976 [10] kein Artikel über die damals bereits 20 Jahre alte *Computermusik*. Ganz dem damaligen deutschen Sprachgebrauch verhaftet, wird diese Thematik in dem Artikel *Elektronische Datenverarbeitung* abgehandelt. Dabei stehen ausdrücklich die Notation und ihre Umsetzung in einen maschinenlesbaren Code im Vordergrund. Kleinere Nebenthemen beziehen sich auf die Musikanalyse mittels Computereinsatz, verbunden mit der Frage nach den Methoden und Zielen einer Analyse, auf die Computerkomposition, deren Quellen in der Elektronischen und Seriellen Musik gesehen werden, sowie ganz rudimentär auf die Klangsynthese.

In der Ausgabe aus dem Jahr 1996 [11] existiert dagegen ein eigener Artikel zum Thema *Computermusik*. Ausgehend vom Begriff des Algorithmus werden die damals gängigen digitalen Klangsynthesarten vorgestellt und auf die Partitursynthese eingegangen, wobei zu dieser Zeit die Trennung zwischen Partitur- und Klangsynthese bereits obsolet war; hier war offensichtlich das Primat der Notation themengebend. Weiterhin werden historische hybride Systeme beschrieben, die Partitur- und Klangsynthese verbinden, sowie interaktive Systeme und die künstliche Intelligenz, die als eine Disziplin der Informatik gilt. Aus einer wissenschaftlichen Sicht mag die Computermusik damit weitgehend erfasst sein, aus einer produktiven musikalischen Sicht sicherlich nicht.

Wenn die Gestaltung von akustischen oder musikalisch-künstlerischen Ereignissen wissenschaftlich behandelt wird, schwingt neben den rein technologischen Gesichtspunkten auch eine ästhetische Betrachtung mit und impliziert damit eine subjektive Wertung. Generell ist es schwierig, ja fast unmöglich, die mit einem Computer generierte Musik unter einer spezifischen Ästhetik zu subsumieren. Schließlich ist es (oder sollte es sein) vom „Werkzeug“ Computer sowie seinen speziellen Produktions- und Programmierumgebungen unabhängig, welche Art von Musik hervorgebracht wird. Dass diese Sichtweise innerhalb der deutschsprachigen Musikwissenschaft jedoch nicht unbedingt gegeben ist, zeigt ein Blick in die jüngst erschienene Publikation *Handbuch Musik und Medien* [132], der den problematischen Umgang mit einer mit digitalen Medien erstellten Musik offenkundig werden lässt.

Unter der Rubrik „Musik in auditiven und audio-visuellen Medien“ wird im Artikel *Computermusik* ([132], S. 277–296) eine Verschwommenheit dieses Begriffes attestiert, der „durch die massenhafte Verwendung von Musikcomputern in den verschiedensten Bereichen populärer Musikproduktion“ herrührt. Als Alternative wird der Terminus *Computerkomposition* vorgeschlagen, um die uneinheitliche und gar widersprüchliche Verwendung dieses ursprünglichen Begriffes zu präzisieren. Die musikalischen Anwendungsbereiche des Computers werden in den Bereichen der Komposition, Klangerzeugung, Klangsteuerung und Klangspeicherung gesehen, wobei die Verwendung des Computers in drei Anwendungsbereiche unterteilt wird:

- Verwendung beim Komponieren mit elektronischen Mitteln im Studio
- Verwendung innerhalb der Live-Elektronik
- Verwendung beim Komponieren für traditionelle Instrumente

Als Werkzeuge hierfür sind die frei erhältlichen Programmierumgebungen *Csound*, *PureData* und *Common Music* genannt (siehe Kapitel 20.3), ebenso die *MIDI-Technologie* (siehe Kapitel 17), die als ein universelles Werkzeug „nicht nur für die Produktion von Popmusik“ eingestuft wird. Im Bereich der Live-Elektronik wird auf die kommerzielle interaktive Programmierumgebung *Max/MSP* (siehe Kapitel 20.4.1) verwiesen. Abschließend wird bemerkt, dass sich „seit einigen Jahren ein starker Trend zu immer mehr Interaktivität“ abzeichnet. Die dezidierte Einbindung in den historischen Kontext der Computerkomposition zeigt, dass die genannten Werkzeuge mit einer ästhetischen Ausrichtung der Musik verbunden werden, einer Musik, die in der Tradition der artifiziellen Avantgarde-Musik steht. Durch die begriffliche Abgrenzung zu einer Computermusik oder einer – heute ebenfalls völlig anders verstandenen – elektronischen Musik ist das musikalische Resultat zwischen „traditionellen Tape-Kompositionen bis hin zu audiovisuellen Installationen“ angesiedelt.

Unter der Rubrik „Komposition und Produktion unter dem Einfluss von Medien“ wird in dem Beitrag „Komposition und Produktion von ‚U-Musik‘ unter dem Einfluss technischer Medien“ ([132], S. 495–530) hauptsächlich auf die Produktion von Pop- und Rockmusik eingegangen. Neben der Begriffsklärung von *Track*, *Take*, *Part*, *Backing Tracks*, *Overdub* und *Bounce*, werden nach einer Beschreibung der konventionellen Komposition und Produktion die „Digitalisierung und Computerisierung der Musik“ behandelt. Das *MIDI-Protokoll* (siehe Kapitel 17.5) und die Technologie des *Sequenzers* (siehe Kapitel 18.1) sowie die digitalen Klangsyntheseverfahren (siehe Kapitel 13) werden ebenso berücksichtigt wie, in einem Seitenblick, die Musikdistribution. Eine bestimmte Typologie musikalischer Computerprogramme wie auch die spezifischen Studiogerätschaften werden mit musikalisch-ästhetischen Kriterien verbunden, die bestimmten Werkzeugen einen bestimmten musikalischen Stil zurechnen.

Es ist sicherlich richtig, dass sich bestimmte musikalische Computerprogramme in ihrer Struktur an den traditionellen Produktionsprozessen von Musik orientieren, sich aber unabhängig davon für eine generelle Musikproduktion einsetzen lassen. Eine mit solchen Zuordnungen implizierte ästhetische Wertung von musikalischen Werkzeugen verstellt den Blick nicht nur für historische Zusammenhänge, sondern auch für eine mögliche Anpassung an spezielle musikalische Bedürfnisse. Seit Friedrich Nietzsche wissen wir zwar, dass „unser Schreibzeug ... an unseren Gedanken [mitarbeitet]“ (zit. nach [88], S. 293) – so Nietzsche im Jahre 1882 in einem Brief an Peter Gast, über die Verwendung seiner Schreibmaschine sinnierend. Allein durch die digitalen Medien sind wir heute weitgehend in der Lage, die verwendeten Werkzeuge unseren ästhetischen Bedürfnissen anpassen zu können, zumal sich alle Musiker und Komponisten in der Vergangenheit an die technischen Unzulänglichkeiten des vorhandenen Instrumentariums (siehe Kapitel 10.1) anpassen mussten.



# 2 Musik

Der Versuch, eine Antwort auf die Frage „Was ist Musik“ zu geben, wurde seit mehr als 2000 Jahren in unzähligen Schriften unternommen. Während unter historischen Gesichtspunkten bei den Begriffsbestimmungen und definitiven Aussagen durch die letzten Jahrhunderte grundlegende Wandlungen sichtbar werden (siehe hierzu auch Kapitel 2.5), lassen sich die technischen Gesichtspunkte relativ einheitlich fassen; sie spiegeln sich in den digitalen Produktionsumgebungen wider.

## 2.1 Die wahrnehmungsphysiologischen Grundlagen der Musik

Musikhören, das ist die Fähigkeit, Schallwellen zu registrieren, sie wahrzunehmen und als Musik zu analysieren und zu erkennen. Generell gilt dies für das Hören und Zuordnen jeder Schallquelle. Diese Form der Reizaufnahme und -verarbeitung durch das Ohr kann bezüglich ihrer Grundlagen auf eine lange Forschungsgeschichte zurückblicken [29], [63]. Die zunehmende Schwierigkeit bei der Wahrnehmung und Analyse von einzelnen Tönen und Tonfolgen bis hin zu Melodien und komplexen Akkorden hängt zudem auch von der musikalischen Erfahrung des Hörers ab.

Die Begriffe, die für die Beschreibung der musikalischen Elemente verwendet werden, haben je nach Betrachtungsweise eine unterschiedliche Bedeutung. Diese ist von der musikalischen oder physikalischen Definition eines Klangereignisses abhängig.

### 2.1.1 Beschreibung der gehörten Musik

Die einzelnen Teile von Musik sind Strukturen, die sich aus spezifischen Elementen zusammensetzen. Vergleichbar der Mengenlehre werden diese Elemente zu höheren Ordnungen zusammengefasst und zu einem bestimmten Musikstück zusammengesetzt: sie werden „komponiert“.

Das kleinste Element der Musik ist der Ton mit seinen Parametern Tonhöhe, Tondauer und Tonstärke. Die Klangfarbe ist dem Ton nicht inhärent, sie resultiert aus der Verwendung bestimmter klangerzeugender Verfahren. Werden Töne in der Horizontalen – im Ablauf der

Zeit – aneinandergereiht ergeben sich Motive, Melodien oder Themen. Je nach Abfolge der Einsatzzeiten dieser Tonfolgen – ob regelmäßig oder unregelmäßig – ergeben sich rhythmische Strukturen. Die thematischen Strukturen lassen sich durch (variierte) Wiederholung zu Takten und ganzen Taktgruppen zusammenfassen, die ihrerseits wieder übergeordnete Strukturen ergeben. Dieses führt zur Ausbildung von Formteilen, die je nach angestrebter Form für den Ablauf eines Musikstückes kennzeichnend sind.

Diese Strukturen werden traditionell durch die Notenschrift dargestellt und müssen von Musikern entsprechend klingend umgesetzt werden. Sie können jedoch auch mit mathematischen Beschreibungsmethoden erfasst und in ein Format transferiert werden, das von einem Computer mit entsprechender Software erkannt und weiterverarbeitet wird. Bei der näheren Betrachtung dieser zeitgenössischen musikalischen Produktions- wie Reproduktionstechniken spielen angewandte Informationstheorien und Informationstechnologien, deren Grundlagen mathematische Prozesse bilden, eine sehr große Rolle. Das Spannungsfeld „Musik bzw. Musikwissenschaft und Mathematik“ erhält somit eine Bedeutung (siehe Kapitel 2.5), die über die bisherige problematische Beziehung dieser beiden Wissenschaften weit hinausgeht [137].

Ganz allgemein kann ein einzelnes musikalisch-akustisches Ereignis mit signifikanten Parametern klassifiziert werden.

- **Tonhöhe**

Die Tonhöhe ist das Resultat aus der Geschwindigkeit der Schwingungen eines Schallereignisses: langsame Schwingungen werden als tiefe, schnelle Schwingungen als hohe Töne wahrgenommen. Bei besonders tiefen Tönen beschränkt sich die Wahrnehmbarkeit nicht nur auf das Gehör, sondern wird auf den ganzen Körper ausgeweitet.

- **Klangfarbe**

Die Klangfarbe ist das Resultat von unterschiedlichen Schwingungsmustern, die durch das Obertonspektrum (siehe Kapitel 9.1.1) beeinflusst wird. Dieses Obertonspektrum hängt bei akustischen Instrumenten von der Bauform, Größe, dem Material und der Tonerzeugung ab. Bei der digitalen Klangsynthese hängt die Klangfarbe von der speziellen Art der verschiedenen Klangsynthesearten (siehe Kapitel 13) ab.

- **Dynamik**

Die Dynamik bestimmt, in welcher Lautstärke ein Schallereignis hörbar ist. Weitere Komponenten sind der zeitliche Verlauf der dynamischen Ausprägung (die Hüllkurve, siehe Kapitel 12.3.5), wie schnell die Lautstärke ansteigt (Einschwingvorgang), wie lange sie auf ihrem Maximalpegel bleibt, wann der Abklingvorgang einsetzt und wie lange er dauert. Je nach Klangerzeugung kann der Einschwingvorgang einen erheblichen Einfluss auf die Klangfarbe haben.

Bereits die Dynamik wird durch den zeitlichen Verlauf eines einzelnen Schallereignisses bestimmt, Schallereignisse – mithin Musik – sind ohne eine zeitliche Komponente nicht denkbar. Dies gilt auch für die Aufeinanderfolge von Schallereignissen, die durch eine zeitli-



che Abfolge geregelt werden. Diese rhythmische Abfolge ist ein entscheidender Faktor, um aus einzelnen Klangereignissen Musik entstehen zu lassen.

- **Rhythmus**

Der Rhythmus ergibt sich aus der Anordnung verschiedener Klangereignisse im Ablauf der Zeit. Entscheidend ist dabei, wie schnell und in welchen Abständen die einzelnen Ereignisse aufeinander folgen.

Mehrere Klangereignisse können nicht nur sukzessiv, sondern auch simultan wiedergegeben werden, die Intervalle (zwei Klangereignisse) und Akkorde (mehr als zwei Klangereignisse) ergeben in sukzessiver Folge harmonische Verläufe. Auch hierfür ist der zeitliche Verlauf eine wesentliche Komponente, sodass mit Karlheinz Stockhausen (1928–2007) gesagt werden kann: „Musik stellt Ordnungsverhältnisse in der Zeit dar“ [141].

Diese horizontalen (rhythmischen) und vertikalen (harmonischen) Verläufe werden durch die Notenschrift festgelegt, ein zu erlernender Zeichencode, der die zeitlichen Abläufe jedoch nicht physikalisch exakt, sondern in symbolischer Form durch proportionale Größen wiedergibt. Daher besteht ein Unterschied zwischen der symbolischen Notation und ihrer physikalischen Umsetzung.

## 2.1.2 Musikalische und physikalische Beschreibung der Musik

Bei der Benennung bestimmter musikalischer Ereignisse bestehen Differenzen zwischen den musikalischen und physikalischen Begriffen.

	<b>musikalisch</b>	<b>physikalisch</b>
<b>Ton</b>	ein Schallereignis, mit einer bestimmten Tonhöhe sowie einer Lautstärke, Dauer und Klangfarbe  die Tonhöhe wird durch seine Grundschwingung definiert, die Klangfarbe durch die Struktur der Obertonzusammensetzung	ein obertonfreier Ton, der mit akustischen Instrumenten nicht produziert werden kann  eine reine Sinusschwingung, die nur mit einem elektrischen Klangerzeuger generiert werden kann
<b>Klang</b>	der Klang eines bestimmten Instrumentes oder der Zusammenklang mehrere Instrumente	ein Schallereignis, das aus mehreren reinen Schwingungen zusammengesetzt wird und dadurch eine spezifische Klangfarbe erhält

### Musikalische Beschreibung

Unter musikalischen Gesichtspunkten lehnt sich die Beschreibung von Schallereignissen an ihre Verschriftlichung an:

- **Tonhöhe**  
Die konkrete Empfindung von „Höhe“ oder „Tiefe“ eines Tones wird musikalisch durch Tonbuchstaben (c, d, e, fis, as etc.) und die Oktavlage bezeichnet (c, c', c'', C, C etc.).
- **Lautstärke**  
Die „Stärke“ oder „Intensität“ eines Tones wird musikalisch durch verbale dynamische Angaben (p, pp, mf, f, ff etc.) bezeichnet.

Die Bezeichnungen für die Tonhöhe und Lautstärke bilden ein in sich geschlossenes proportionales System aus, das über die physikalische Eigenschaft eines akustischen Ereignisses keine Auskunft gibt.

- **Klangfarbe**  
Die Klangfarbe eines Tones wird durch Vielfalt der verschiedenen Instrumente bestimmt.

Ein Schallereignis, dem diese drei Eigenschaften nicht zugeordnet werden können, wird als Geräusch bezeichnet. Ein Geräusch entzieht sich einer konkreten Tonhöhen- und Klangfarbenempfindung, aber nicht einer Lautstärkeempfindung.

### Physikalische Beschreibung

Während musikalisch ein Ton durch die Benennung der Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe nur approximativ in dem eigens gewachsenen proportionalen Notensystem festlegt wird, kann mithilfe von physikalischen Größen ein Ton exakt bestimmt werden:

- **Frequenz**  
Von der Grundfrequenz (Wiederholungshäufigkeit der Schwingung pro Zeiteinheit) eines Tones hängt die Empfindung der Tonhöhe ab.  
Die Frequenz  $f$  ist der Kehrwert der Schwingungsdauer  $T$ :  $f = 1 / T$ , sie definiert die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die Maßeinheit hierfür ist Hertz (Hz).  
Je größer die Frequenz ist, umso höher wird der Ton empfunden.
- **Schallintensität (Amplitude)**  
Der Schallpegel und die Schallintensität hängen von der Druckänderung der auf das Ohr eintreffenden Schallwelle ab [60].  
Die Schallintensität wird in Dezibel (dB) gemessen, die Hörschwelle liegt bei 0 dB, die Schmerzgrenze bei 120 dB.  
Je größer die Amplitude ist, umso lauter wird ein Ton empfunden.

- **Wellenform**

Durch unterschiedliche Wellenformen werden unterschiedliche Klangfarben repräsentiert, diese Schwingungsformen entstehen durch die verschiedenen Obertonspektren unserer Musikinstrumente (siehe Kapitel 9.1.1).

Alle Schallereignisse, die ein harmonisches Obertonverhältnis gemäß der Teiltonreihe aufweisen, werden als Klänge bezeichnet. Diese Obertonzusammensetzung ergibt die Klangfarbe eines jeweiligen Instrumentes. Besteht das Obertonverhältnis aus keinen ganzzahligen Frequenzverhältnissen, sprechen wir von Geräuschen. Eine exakte Tonhöhenangabe ist bei Geräuscherzeugern (z.B. bei einigen Schlaginstrumenten) nur sehr schwer oder nicht mehr möglich.

Für die Klangcharakteristik eines Instrumentes muss darüber hinaus das unterschiedliche Ein- und Ausschwingverhalten eines Tones berücksichtigt werden, denn die Hüllkurve (das zeitliche Verhalten der Amplitude einer Wellenform, siehe Kapitel 12.3.5) hat entscheidenden Anteil an der Ausprägung der Klangfarbe.

### **Die Fixierung der Musik**

Seit der Entwicklung der Verschriftlichung von Musik ist die Notenschrift (siehe Kapitel 2.3.6) das Medium der Musiküberlieferung. Die notierte Musik benötigt für die klangliche Realisierung immer einen oder mehrere Interpreten. Erst im Laufe des 20. Jahrhunderts begann sich dieses Primat aufzulösen, rückte bei einigen musikalischen Stilen die Improvisation (z.B. beim Jazz), oder die reine klangliche Fixierung der Werkgestalt (z.B. bei elektronischer Musik) in den Vordergrund. Sowohl die Digitalisierung der Notation (siehe Kapitel 15.2), die rein klangliche Fixierung von musikalischen Strukturen (siehe Kapitel 4) als auch von Improvisations-Strukturen spiegeln sich in den unterschiedlichen digitalen Produktionsumgebungen wider.

Die Notenschrift ist eine Anweisung zum Hervorbringen von Tönen; sie schreibt vor, wie die Musik realisiert werden soll. Gleichzeitig ist die Notenschrift eine Schrift, welche die Struktur eines musikalischen Werkes darstellt. Sie ist Aktionsschrift und gleichzeitig gestalteter Werkcharakter, ein musikgestaltendes Medium. Zwischen diesen beiden Polen spannt sich der Werkbegriff auf. Nach Roman Ingarden (1893–1970) manifestiert sich das Werk allein weder im Notat, das nur Zeichen des Werkes ist, noch in der Ausführung, die immer wieder anders und nie mit sich identisch ist; Werk-Musik entsteht erst in der zuhörenden und/oder wertenden Instanz [78]. Oder um es mit Vilém Flusser (1920–1991) zu sagen, so viele Leser ein Text hat, so viele Bedeutungen hat er [48].

Durch die klangliche Aufzeichnung verliert die Musik ihren ursprünglichen Textcharakter. Die Musik wird anders verschriftet: die Symbolschrift wird zur Klangschrift. „Das Werk‘ im alten Sinn verschwindet ... Das schöpferische Werk ist nicht mehr Endergebnis, sondern ein Modell, und die Kreation trennt sich von der Realisation.“ [110]. Gleichzeitig verschwin-

det der Interpret in seiner Leibhaftigkeit hinter dem Tonträger, sichtbar bleibt er in der Regel nur noch als fotografisches Abbild auf dem Plattencover.

Bei der Digitalisierung der Musik, der Erstellung von digitalen Abbildern unseres Instrumentariums in Form von Samples, wird die Musik selbst zum Material. Dieses Material kann vom Rezipienten, der auch noch zum Komponisten avanciert, neu zusammengefügt werden, und es stellt sich die Frage, ob angesichts dieser Techniken die Musik wieder zu einem lebendigen Kulturgut werden kann [129].

Durch die inzwischen allgemeine Verfügbarkeit der musikalischen Produktionsumgebungen für digitale Medien kann nicht nur jeder sein eigener CD- und DVD-Replikator werden, sondern auch zum eigenen Komponisten, Arrangeur und Interpreten avancieren.

### 2.1.3 Analoge und digitale Elemente in der Musik

Die Begriffe *digital* bzw. *Digitalisieren* existierten bereits vor der Einführung der Computertechnologie [49], sie bezogen sich begrifflich anders gefasst nur auf andere Bereiche, wie

- in der Drucktechnik das *Rastern* und
- in der wissenschaftlichen Arbeit das *Sortieren*.

Die Entwicklung der Schriftsprachen mit der Festlegung und Zuordnung von Schriftzeichen für gesprochene Laute stellt ebenfalls einen digitalen Prozess dar.

<b>analog</b>	<b>digital</b>
kontinuierlich	diskret
gleitende Übergänge	Abstufungen
Entsprechung	Definition
	Tonmaterial des abendländischen Musiksystems (punktuelle Lokalisation der Töne)

Zur näheren Verdeutlichung seien zwei Beispiele aus der Musik angeführt: So stehen den – analogen – kontinuierlichen dynamischen Übergängen des *crescendo* oder *decrescendo* die – digitalen – Abstufungen *piano*, *mezzopiano*, *mezzoforte* oder *forte* gegenüber (die sogenannte Terrassendynamik in der Barockmusik).

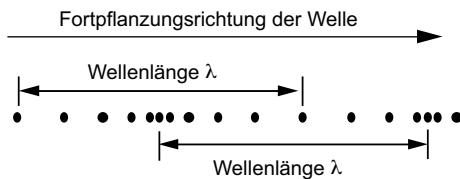
Anhand der Entwicklung der Notenschrift unserer abendländischen Musik und der Interface-technologie einiger unserer gebräuchlichen Musikinstrumente sind ebenfalls analoge und digitale Elemente zu beobachten.

## 2.2 Die physikalischen Grundlagen auditiver Ereignisse

Jedes Schallereignis verursacht Druckschwankungen der Luft, die von unserem Ohr als akustische Reize wahrgenommen werden. Das Ohr leitet mit Hilfe von komplexen Vorgängen [60] diese Empfindungen an das Gehirn weiter, der Stelle, an der die eigentliche Verarbeitung der eintreffenden Schallwellen stattfindet: Das Gehirn interpretiert durch einen komplexen kognitiven Prozess die ankommenden Schallempfindungen als bedeutungsvolle Ereignisse. Die Positionsbestimmung der Schallquelle im Raum ergibt sich durch deren Laufzeitunterschiede, die das Gehirn vom Ohr empfängt.

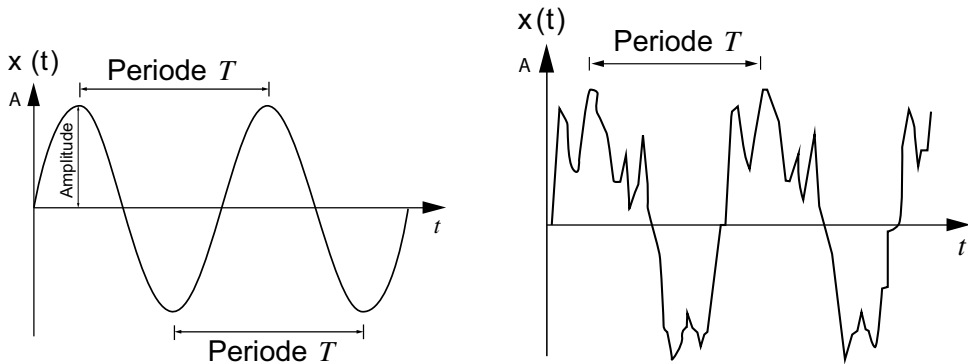
Während die Druckschwankungen der Luft nicht sichtbar sind, lassen sich (Schall-)Wellen an einer Wasseroberfläche oder anhand sich bewogender Seile bzw. schwingenden Saiten beobachten. Schwingungen sind periodisch hin- und hergehende Bewegungen.

Die Schwingungsbewegung entlang der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle wird als Längs- oder Longitudinalwelle bezeichnet; die Druckschwankungen der Luft verändern sich längs der Ausbreitung der Welle. Der Abstand zwischen zwei gleichen Schwingungszuständen (z. B. der Verdichtungen) wird als Wellenlänge  $\lambda$  bezeichnet.



**Abbildung 2.1** Longitudinalwelle

Die Schwingungsbewegung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle wird als Quer- oder Transversalwelle bezeichnet.



**Abbildung 2.2** Sinusschwingung und komplexe Schwingung

Der räumlich konstante Abstand zwischen zwei gleichen Schwingungszuständen wird hier ebenfalls als Wellenlänge  $\lambda$  bezeichnet. Der zeitlich konstante Abstand manifestiert sich in der Schwingungsdauer oder Periode  $T$ , die Amplitude  $A$  bestimmt die maximale Auslenkung von der Ruhelage. Diese Größen sind hier an einer reinen Sinusschwingung in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Eine solche Schwingung ist nur mit Hilfe von elektronischen Tongeneratoren zu erzeugen und dient hier als mathematische Darstellungshilfe. Schallwellen, die von akustischen Instrumenten erzeugt werden, ergeben ein wesentlich komplexeres Bild.

Auch diese Schwingungen weisen eine Periodizität auf und lassen sich gemäß des Satzes von Jean Baptiste Fourier (1768–1830) aus dem Jahr 1811 in einzelne Sinusschwingungen zerlegen (siehe Kapitel 8.12); im Umkehrschluss lässt sich jede noch so komplexe periodische Schwingung als Überlagerung einzelner Sinusschwingungen darstellen.

Diese naturwissenschaftliche Auseinandersetzung mit allgemeinen klanglichen Phänomenen wird in der Akustik, einem Fachbereich der Physik, geführt. Spezielle Unterbereiche haben spezifische musikalische Phänomene oder die Raumakustik zum Inhalt (siehe [60] und [117]). Ein besonderer Bereich stellt dabei die Psychoakustik dar, die sich mit der menschlichen Wahrnehmung und Verarbeitung von Schallereignissen auseinandersetzt. Dies geschieht in einem Spannungsfeld von objektiven, messbaren physikalischen Fakten und subjektiven Kriterien der Wahrnehmung, der Beurteilung von und der Reaktion auf Schallereignisse. Die Erkenntnisse der Psychoakustik sind ein wesentlicher Bestandteil der Kompression von auditiven Ereignissen (siehe Kapitel 7.4.3).

### 2.2.1 Wahrnehmung und Maßeinheiten

Die vom Ohr wahrgenommenen Schallwellen breiten sich je nach Material und Temperatur in unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Die Schallgeschwindigkeit hängt von der Zusammensetzung bzw. der Molekularstruktur des schwingenden Materials ab.

<b>Material</b>	<b>Schallgeschwindigkeit m/sek</b>
Luft (20° C)	344
Wasser (über 0° C)	1410
Stahl	5100
Blei	1210
Glas	4000 (je nach Art des Glases)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist unabhängig vom Schallpegel, ein höherer Schallpegel sorgt lediglich für einen größeren Wahrnehmungsradius.

Die Maßeinheit für die Tonhöhe ist Hertz (Hz), der Wahrnehmungsbereich bei Menschen liegt zwischen 20 Hz und 20.000 Hz (20 kHz), wobei die obere Wahrnehmungsgrenze mit zunehmendem Alter abnimmt.

Die unterschiedlichen Lautstärkegrade werden in Dezibel (dB), der Maßeinheit für den Schallpegel, angegeben. Die Dezibel-Einheiten sind keine absoluten Werte, sondern beziehen sich stets auf das Verhältnis zwischen zwei Schallereignissen. Zur Messung des Schallpegels eines Schallereignissen bedarf es immer eines Vergleichswertes.

Schallquelle	Schallpegel (dB)	
keine	0	unhörbar
fallende Stecknadel	10	im musikalischen Bereich
Flüstern	20	
ruhiges Zimmer	30	
sprechender Mensch	40	
lautes Zimmer	50	
fahrendes Auto	60	
Stadtverkehr	70	
Fabrik	80	
U-Bahn	90	
Maschinenhalle	100	
Rockmusik-Konzert	110	
startender Düsenjet	120	Schmerzgrenze

Ein Unterschied um 10 dB bedeutet, dass ein Schallereignis zehnmals so laut wahrgenommen wird.

Obwohl zwischen 10 dB und 100 dB der Schallpegel von musikalischen Ereignissen anzusetzen ist, sind Pegel von unter 50 dB nur selten anzutreffen; ein Pegel von 40 dB ist in einem Konzertsaal nahezu unhörbar.

## 2.2.2 Besonderheiten bei der Wahrnehmung

Die Wahrnehmung der Tonhöhe und der Lautstärke sind aneinander gekoppelt, Klänge mit gleicher dynamischer Intensität und verschiedener Höhe können eine unterschiedliche Wahrnehmung ihrer Lautstärke bewirken. Dies basiert auf dem Phänomen, dass das Gehör mit wachsendem Schalldruck immer empfindlicher gegen Amplitudenänderungen wird.

Eine weitere Besonderheit ist die unterschiedliche Wahrnehmung einiger Frequenzbänder, die durch Maskierung abgedeckt werden. Die Unterteilung des hörbaren Frequenzspektrums in kritische Frequenzbänder richtet sich nach dem Auflösungsverhalten des menschlichen Ohres. Der wahrgenommene Frequenzumfang wird in 27 kritische Frequenzbänder unterteilt. Die Bandbreiten sind unterschiedlich, bei den tieferen Frequenzen werden sie geringer, bei den höheren Frequenzen steigen sie an. Diese Frequenzbänder werden bei der Kompression von Audiosignalen nachgebildet (siehe Kapitel 7.4.3).



## 2.3 Die musikalischen Grundlagen auditiver Ereignisse

Die Beschreibung der Bestandteile von Musik folgt einem ganz speziellen Vokabular, das sich über einige Jahrhunderte entwickelt hat, in einer kulturellen Tradition steht und heute noch seine Gültigkeit besitzt. Dieses Vokabular ist – an die jeweiligen sprachlichen Unterschiede angepasst – weltweit gültig, solange es sich um musikalische Grundlagen handelt, die sich im europäischen Raum seit über 1000 Jahren ausgebildet haben.

### 2.3.1 Töne und Noten

Die musikalische Bezeichnung eines auditiven Ereignisses bestehend aus einer einzigen Grundfrequenz wird *Ton* genannt und durch eine einzige *Note* schriftlich repräsentiert. In seinem zeitlichen Verlauf ist ein Ton durch seine Einsatzzeit (dem Beginn des Erklingens) und seine Dauer (der Länge des Erklingens, die Zeitspanne des Hörens) definiert. In seinem räumlichen Verlauf wird ein Ton durch seine Tonhöhe definiert, die sich über seine vertikale Position im Notensystem (siehe Kapitel 2.3.6) manifestiert.

Die Notation als ein System für die Tonhöhe benötigt zu ihrer konkreten Definition zwei Referenzen, die Position einer Note auf einer oder zwischen zwei der fünf Linien und den Schlüssel (Violin- oder Bass-Schlüssel) als Bezugstonhöhe.

Die Grundfrequenz eines Tones nehmen wir als seine Tonhöhe wahr. Jeder Ton beinhaltet neben dieser Grundfrequenz weitere sogenannte Obertonschwingungen, die in einem harmonischen (ganzzahligen) Verhältnis zum Grundton stehen und als Klangfarbe wahrgenommen werden. Eine besondere Bedeutung kommt der Verdoppelung dieses Verhältnisses zu, das als *Oktave* bezeichnet und als „gleich klingend“ empfunden wird.

Innerhalb einer Oktave hat sich in der abendländischen Musiktradition eine Teilung in sieben diatonische bzw. in zwölf chromatische Töne respektive die *Halbtöne* etabliert, die mit den ersten sieben bzw. acht Buchstaben des Alphabets bezeichnet werden. Diese Bezeichnung wiederholt sich innerhalb jeder Oktave, bei jeder Tonbezeichnung ist daher ihre Oktavlage zu vermerken. Die Bezeichnungen der Töne und der Oktavlage unterscheiden sich je nach sprachlichem und technischem Kontext.

Im anglo-amerikanischen Sprachraum wird der letzte Ton innerhalb einer Oktave mit dem Buchstaben *B* bezeichnet, sodass sich eine kontinuierliche Folge der ersten sieben Buchstaben des Alphabets ergibt; im deutschen Sprachraum wird dieser Ton mit dem Buchstaben *H* bezeichnet.

The diagram shows a musical staff with pitch classes from sub-contra to 8th octave. The notes are labeled as follows:  $\text{A}^{\text{H/a0}} - \text{h}^0$ ,  $\text{C}^{\text{H}} - \text{h}^1 / \text{c}^1 - \text{h}^1$ ,  $\text{C} - \text{H} / \text{c}^2 - \text{h}^2$ ,  $\text{c} - \text{h} / \text{c}^3 - \text{h}^3$ ,  $\text{c}^1 - \text{h}^1 / \text{c}^4 - \text{h}^4$ ,  $\text{c}^2 - \text{h}^2 / \text{c}^5 - \text{h}^5$ ,  $\text{c}^3 - \text{h}^3 / \text{c}^6 - \text{h}^6$ ,  $\text{c}^4 - \text{h}^4 / \text{c}^7 - \text{h}^7$ , and  $\text{c}^5 / \text{c}^8$ . Below the staff, octave types are labeled:  $\text{S}^{\text{H}}$  Kontra-Oktave, große Oktave, kleine Oktave, eingestrichene Oktave, zweigestrichene Oktave, dreigestrichene Oktave, and viergestrichene Oktave. The  $\text{S}^{\text{H}}$  and  $\text{H}^{\text{S}}$  labels are positioned above the first two notes.

Abbildung 2.3 Tonbezeichnungen und Oktavlagen

Die Oktavlage ergibt sich bei den musikalischen Bezeichnungen durch hinzugefügte tief- oder hochgestellte Ziffern, ab der kleinen Oktave aufwärts auch als *eingestrichene*, *zweigestrichene Oktave* (usf.) gekennzeichnet. Nach der *USA Standards Association* werden die Oktavlagen *durchgehend nummeriert*, beginnend mit der Subkontraoktave als Nummer 0 und endend mit der fünfgestrichenen Oktave als Nummer 8; das  $\text{c}'$  (eingestrichenes  $\text{c}$ ) wird als  $\text{C}^4$  bezeichnet.

Auch die Bezeichnung der Halbtöne differiert im deutschen und anglo-amerikanischen Sprachraum.

The diagram compares German and English notation for sharps and flats. On the left, German notation is shown:  $\text{c sharp}$  (cis),  $\text{d sharp}$  (dis),  $\text{f sharp}$  (fis),  $\text{g sharp}$  (gis),  $\text{a sharp}$  (ais). On the right, English notation is shown:  $\text{d flat}$  (des),  $\text{e flat}$  (es),  $\text{g flat}$  (ges),  $\text{a flat}$  (as),  $\text{b flat}$  (b). The notes are shown on a musical staff with arrows pointing to the corresponding German and English labels below. The German labels are: dt. c, d, e, f, g, a, h; engl. c, d, e, f, g, a, b. The English labels are: c, d, e, f, g, a, h; c, d, e, f, g, a, b.

Abbildung 2.4 Halbtöne, Notation und Klaviatur

In der deutschen Sprache wird bei der Erhöhung um einen Halbton ein „is“, bei der Erniedrigung ein „es“ an die Notenbezeichnung angehängt; eine Ausnahme bildet das  $\text{h}$ , das zu  $\text{b}$  wird. In der englischen Sprache wird bei der Erhöhung um einen Halbton ein „sharp“ (für das Zeichen #) bei der Erniedrigung ein „flat“ (für das Zeichen  $\text{b}$ ) an die Notenbezeichnung angehängt.

Im Laufe der Musikgeschichte haben sich aus mehreren unterschiedlichen Tonskalen, den sogenannten Kirchentonarten, zwei Skalen herauskristallisiert, welche die Grundpfeiler für