

Musikalische Akustik
Instrumentenkunde
Neue Musiktechnologien

ein Scriptum
von
Wolfgang Martin Stroh

Neubearbeitung, Oldenburg 2008

Das Scriptum wird zum Druckkostenpreis abgegeben.

Alle Rechte etc. bei Wolfgang Martin Stroh, iii-twickenstudio oldenburg 2008
www.uni-oldenburg.de/musik-for und www.twickenstudio.de

Inhalt

Inhalt	3
Vorwort	5
Kapitel 1: Musikalische Akustik	6
Kapitel 2: Schallintensität und Lautstärke.....	11
2.1. Schallintensität	11
2.2. Dezibel.....	13
2.3. Phon	15
2.4. Lautstärke, Ohr und Schwerhörigkeit	18
Kapitel 3: Schwingung und Tonhöhe.....	21
3.1. Schwingungen allgemein.....	21
3.2. Tonhöhe und Frequenz	26
3.3. Schwebungen	28
3.4. Die Tonhöhenunterscheidungsfähigkeit des Ohrs.....	31
3.5. Hörtheorien.....	33
3.6. Der Verdeckungseffekt.....	35
Kapitel 4: Analog und digital	37
4.1 . Analoge Speicherung von Musik	38
4.2. Digitalisierung akustischer Schwingungen	39
4.3. Logistik digitaler Speicherung	42
4.4. Technik digitaler Speicherung	44
Kapitel 5: Schwingungserzeugung durch Saiten	49
5.1. Allgemeines zur Instrumentenkunde.....	49
5.2. Eigenschaften der Saite als Schwingungserzeuger	50
5.3. Im Innern der „Black Box“ Saite	54
5.4 Funktionen des Instrumentenkörpus bei Saiteninstrumenten.....	56
Kapitel 6: Fourieranalyse und der Klangcharakter von Musikinstrumenten	59
6.1. Flageolett und Teiltöne	59
6.2. Der Satz von Fourier, Obertöne und Spektrum	61
6.3. Klangfarbe und Klangcharakter	64
6.4. Formanttheorie	67

Kapitel 7: Schwingungserzeugung durch Luftsäulen	70
7.1. Grundlegendes zu Schallwellen.....	70
7.2. Eigenschaften von Luftsäulen als Schwingungserzeuger	73
7.3. Im Innern der „Black Box“ Luftsäule	75
7.4. Funktion des Instrumentenkorpus und spieltechnische Eigentümlichkeiten von Luftinstrumenten	79
Kapitel 8: Tonsysteme	82
8.1. Abendländische Tonsysteme: aus der Obertonreihe abgeleitet	82
8.2. Temperierte Tonsysteme	85
8.3. Außereuropäische Tonsysteme	88
8.4. Kosmische Tonsysteme	92
Kapitel 9 Zwei- und dreidimensionale Schwingungserzeuger	95
9.1 Eine Membran als Schwingungserzeuger	95
9.2 Dreidimensionale Schwingungserzeuger (Festkörperinstrumente)	99
9.3. Die menschliche Stimme als Schwingungserzeuger	103
Kapitel 10: Elektronische Musikinstrumente	105
10.1. Vorformen des Synthesizers	105
10.2. Analoge Synthesizer	107
10. 3. Digitale Synthesizer	112
Kapitel 11: Der Computer als Musikinstrument	117
11.1. MIDI und die Synthesizer-Computerverbindung	117
11.2. Zusammenspiel MIDI- und Audio-Daten.....	122
11.3. Effektgeräte - elektronische Musik in Raum und Zeit.....	124
11.4. Das Heimstudio als Musikinstrument	127
11.5. Oldenburger Projekte elektronischer Livemusik	128
Anhang	132
Lehr- und Nachschlagewerke	132
Frequenztafel der 12-temperierten Skala	133

Vorwort

Definition: Das vorliegende Scriptum ist ein Begleitpapier zu meinen Kursen „Musikalische Akustik, Instrumentenkunde und Neue Musiktechnologien“, die im Stil einer experimentalphysikalischen Vorlesung angelegt sind: In der Lehrveranstaltung selbst werden Experimente vor- und durchgeführt sowie akustische Demonstrationen dargeboten. Die dabei erläuterten theoretischen Gesichtspunkte sowie der nackte Wissensstoff sind im Scriptum versammelt und sollten nachgearbeitet werden.

Neubearbeitung 2008: Einige Experimente sind im Laufe der vergangenen Jahre durch Computeranimationen ersetzt worden, einige sind aber so geblieben, wie es sich für eine Instrumentenkunde gehört: Anfassen, Ausprobieren, Experimentieren und Nachdenken. Dennoch gab es in den vergangenen Jahren eine immer größer werdende Nachfrage nach der „digitalen“ Dokumentation der Musikbeispiele (mp3), Abbildungen (ppt, jpg) und Spezial-Software (exe). Ich habe auf diese Nachfrage bislang mit einer CD-ROM reagiert, die mehr oder minder den einschlägigen Ordnerinhalt meines Laptops widerspiegelte. Die Zeit für eine multimediale Lernumgebung, in der alle Materialien und der vorliegende Text integriert und interaktiv bedienbar sind, ist jetzt gekommen. Aus Erfahrung weiß ich aber, dass sowohl ein Live-Kursbesuch als auch ein Papier-Scriptum, in das man zeichnen und das man im Bus lesen kann, nicht ohne Qualitätseinbußen ersetzt werden können.

Inhalt: Wie die Lehrveranstaltung so ist auch das vorliegende Scriptum für den Musikstudiengang an der Universität Oldenburg zugeschnitten. Die Inhalte des Scriptums sind so ausgewählt, dass sie als Grundlage der Oldenburger *Medienmusikpraxis*, des Studienschwerpunkts *Musik und Medien* sowie der *Musiken der Welt* zu gebrauchen sind. Das bedeutet, dass sich der Text an MusikerInnen wendet und nicht an bildungsbürgerliche Laien, Szene-Freaks oder Ingenieure. Es wird versucht, den Blick auf das aktuelle Musikleben zu richten und dabei die Musik der Welt mit einzubeziehen. Es wird die LeserInnen auch nicht wie es bei professioneller Musiksoftware heute noch immer üblich ist für musiktheoretisch dumm verkauft. Und schließlich wird der technisch-mathematische Aufwand so zurück genommen, dass das gerade noch Notwendige ohne die unter MusikerInnen verbreitete Mathematik-Aura-Bildung übrig bleibt.

Besonderheiten: Gegenüber den derzeit auf dem Markt befindlichen Akustik-Lehrbüchern dürfte eine Besonderheit des vorliegenden Scriptums sein, dass es von Anfang an die Probleme neuer Musiktechnologien so berücksichtigt, wie sie sich modernen MusikerInnen stellen. Eine weitere Besonderheit, die sich aus meinen Lehrerfahrungen ergeben hat, ist eine relativ starke Einbeziehung hörpsychologischer Gesichtspunkte. Ferner ist die didaktisch und nicht systematisch begründete Anordnung der Kapitel ungewöhnlich. Und schließlich wird nicht verschwiegen, dass ich nicht nur Musikwissenschaftler sondern auch experimenteller Musiker bin. Erstmals berichte ich in dieser Neubearbeitung explizit über eigene künstlerisch-wissenschaftliche Projekte.

Hoffnung: Das hochschuldidaktische Konzept hinter Kurs & Scriptum soll MusikstudentInnen zu einer neugierigen, experimentierfreudigen und kritischen Einstellung dem naturwissenschaftlichen Denken und Argumentieren sowie den neuen Musiktechnologien gegenüber befähigen. Das Konzept ist als aufklärerisches gegen das gerichtet, was Hanns Eisler die „Dummheit in der Musik“ nannte. Die am weitesten verbreitete Musik-Dummheit erwächst aus einer Mischung von Wissen aus Dritter Hand („amerikanische Wissenschaftler haben bewiesen, dass...“) und Mystizismus („Musik macht alles: sozial, intelligent, friedfertig...“). Solcherart Dummheit sagt das vorliegende Scriptum den Kampf an.



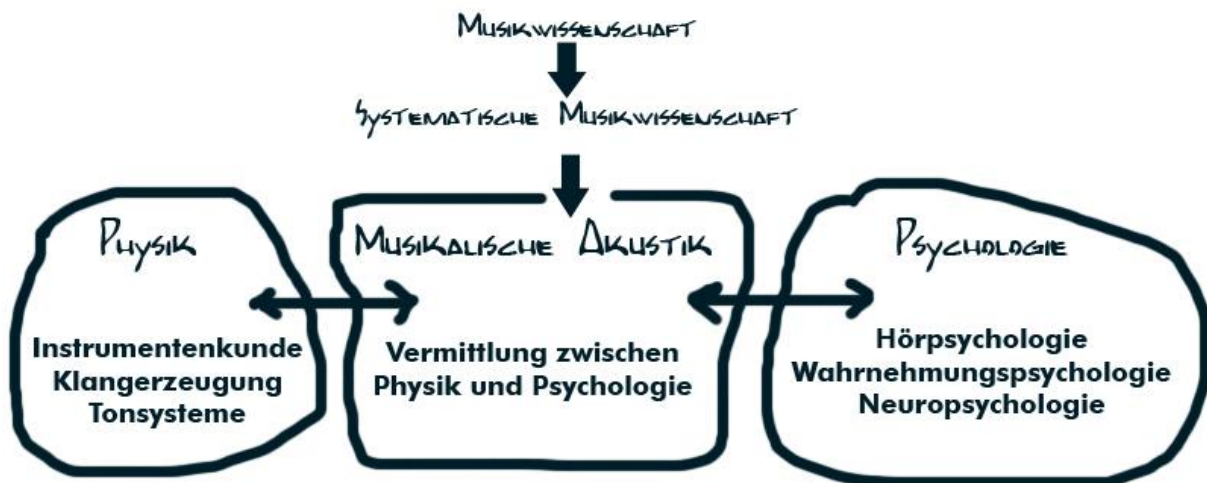
Joachim Ernst Berendt schrieb: „Amerikanische Wissenschaftler haben Planetenumlaufbahnen in einen Synthesizer gespeist...“ und Peter Schleuning hat dies Phänomen kommentiert.
Was haben diese Amerikaner wohl wirklich gemacht?

Kapitel 1: Musikalische Akustik

In den Oldenburger Musikstudiengängen gibt es die vier Studienbereiche

- Musikpraxis
- Musiktheorie
- Musikwissenschaft
- Musikvermittlung

und die Musikalische Akustik kommt hier als Teil der Musikwissenschaft, nicht der Musiktheorie vor. Diese Positionierung ist systembedingt und nicht nur ein Ergebnis von Nachlässigkeit. Musikalische Akustik hat, sobald der Akzent auf Instrumentenkunde und Neuen Technologien liegt, Züge einer Handwerkslehre, in der mit der Emphase von Objektivität gesagt wird „so ist es“ und „nur wenn Du so handelst, wirst Du erfolgreich sein können“. Liegt der Akzent auf Tonsystemen, so reicht die Musikalische Akustik weit in ideologieträchtige Legitimationsprobleme musikalischer Praxis hinein, die nur mit kritischen musikwissenschaftlichen Methoden durchschaut werden können. (Und dasselbe gilt dann auch für die Musiktheorie im Sinne der Elementaren Musiklehre.) Interessiert allerdings das „Musikalische“ an der Akustik, so ist die Disziplin Musikalische Akustik so zu lokalisieren, wie es das folgende Schaubild zeigt:



Nach dieser Auffassung, der das vorliegende Scriptum im wesentlichen folgt, vermittelt Musikalische Akustik zwischen der Physik, die „objektive“ Sachverhalte registriert und mathematisch beschreibt, und der Psychologie, die Empfindungen und deren Entstehung untersucht. Es kann diesem Schema folgend die zentrale Fragestellung der Musikalischen Akustik so formuliert werden:

„Welche physikalisch beschreibbare (objektive) Ursache hat welche psychologische (subjektive) Wirkung?“

oder mit den klassischen Worten der Sinnespsychologie:

„Welcher Reiz löst welche Empfindung aus?“

Die Idealvorstellung der Musikalischen Akustik ist somit die, dass man auf der objektiven Seite physikalische Größen vermessen und mittels mathematischer Formeln bestimmte physikalische Vorgänge - z.B. die Bewegung eines Doppelrohrblattes einer Oboe - beschreiben und sodann auf der subjektiven Seite irgendwelche Empfindungen definieren, vermessen („skalieren“) und mit den objektiven Größen und Vorgängen in kausale Beziehung setzen kann.

Dass dies hier zugegebenermaßen etwas kompliziert ausgedrückte Phänomen durchaus den Alltag von MusikerInnen bestimmt, kann man bereits an der Terminologie feststellen. Da sagt jemand „die Tonhöhe des Kammertons hat 440 Hz“. Diese Aussage wirkt im Alltag verständlich und ist praktikabel. Sie ist aber keineswegs korrekt, denn nicht die Tonhöhe (= subjektive Seite), sondern die Schwingung, die die Tonhöhenempfindung auslöst, „hat“ eine Frequenz (= objektive Seite). Frequenz ist ein Begriff aus der Physik, eine definierbare und messbare Größe. Tonhöhe ist ein musikalisches oder psychologisches Phänomen, über dessen Vorhandensein man sich ja auch streiten kann (zum Beispiel bei einem Gong oder einer Bass Drum). „Messbar“ wird die Tonhöhe nur, wenn zuvor durch Instrumentenbau oder die musikalische Praxis ein Tonsystem festgelegt worden ist - was aber nicht immer der Fall zu sein braucht. Richtig wird der Satz übrigens, wenn man sagt : „Die Frequenz des Kammertons beträgt 440 Hz“ - dies ist eine physikalische Aussage über ein musikalisches Phänomen, wobei das musikalische Phänomen „Kammerton“ den hörpsychologischen Aspekte „Ton(höhe)“ und den soziologischen Aspekt „Kammer“ (= internationale Normierung der Tonhöhe durch Frequenzangabe) enthält.

In der folgenden Tabelle sind einige Begriffe aufgeführt und den jeweiligen Disziplinen bzw. Betrachtungsweisen zugeordnet:

Physik	MUSIKALISCHE AKUSTIK	PSYCHOLOGIE
Frequenz	Tonhöhe	hoch/tief in der Wahrnehmung
Saitenlängenverhältnis	Intervall	Kosonanz/Dissonanz
Schwingung	Ton	Musik, Melodie, Harmonie
Spektrum	Klangfarbe	scharf, voll, grell, dumpf usf. als Empfindungs-Metaphern

Durch akustische Reize ausgelöste musikalische Empfindungen stehen nicht ein für alle Male fest, sie werden vielmehr in einer Musikkultur herausgebildet. Das gilt nicht nur für Empfindungsqualitäten wie „traurig“ oder „fröhlich“, „aktivierend“ oder „beruhigend“, sondern auch für das System der musikalischen Basis-Parameter. Begriffe wie Tonhöhe, Intervall, Melodie, Harmonie, Rhythmus, Lautstärke, Klangfarbe usw. werden ja nicht in allen Kulturen verwendet. Sie bezeichnen in der einen Kultur Parameter, die eine andere gar nicht kennt. Freilich kann eine musikalische Empfindung sich nur im Rahmen von objektiven Bedingungen herausbilden. Und solche Bedingungen sind sowohl durch die physikalische „Natur“ des Klingenden, als auch durch biologische Eigenschaften des Gehörs festgelegt. Ob es so etwas wie „Archetypen“ in der Musik gibt, ist derzeit in der Musikwissenschaft stark umstritten. Vorgeschlagen für solche Archetypen im Sinne von Urformen musikalischen Seins *aller* Menschen wurden Rhythmus und Klang (als Ausformungen von Energie in der Zeit), aber auch Skalen, die Pentatonik und Diatonik genannt.

Die im vorliegenden Scriptum ausgebreitete Musikalische Akustik ist weitgehend eine Reflexion der mitteleuropäisch-abendländischen Musikpraxis. Daher wird recht genau untersucht, wie Instrumente Tonhöhen hervorbringen und einen Klangcharakter entwickeln oder wie Musik elektronisch konserviert und verarbeitet werden kann. Bedenkt man, dass weltweit Musik dazu eingesetzt wird, verändertes Bewußtsein zu schaffen oder Menschen eine Erfahrung von Transzendenz zu vermitteln, so fragt man sich zu Recht, warum sich die Akustik und Instrumentenkunde nicht mit den bewusstsverändernden Kräften monotoner Rhythmen oder der besonderen Wirkung einer Trommel beschäftigt, deren Fell von einem Tier stammt, das bei Vollmond erlegt worden ist. Die Antwort auf diese Frage muss lauten: Die Musikalische Akustik beschäftigt sich mit solchen Fragen nicht, weil sie die Paradigmen der abendländischen naturwissenschaftlichen Aufklärung voraussetzt, für die es keine messbare Bedeutung für einen Rhythmus haben kann, in welcher Mondphase ein Trommelfell gewonnen worden ist. Theoretisch, so würde zugestanden werden, kann es zwar einen Zusammenhang zwischen den Lebenskräften eines Tieres bei Vollmond, der chemischen Zusammensetzung des Fells, dem Trommelklang und der bewusstsverändernden Wirkung geben. Praktisch ist dieser Zusammenhang aber vernachlässigbar klein gegenüber den anderen Parametern Tondauer, Lautstärke usw. Zudem ist er enorm schwer messbar.

Letztendlich ist die Musikalische Akustik eine Disziplin, die solche Fragen bearbeitet, die leicht zu beantworten sind. Die musikbezogene Phänomene untersucht, die möglichst gut messbar sind. Die Fragestellungen vernachlässigt, die unserem Musikverständnis fremd sind. Die so tut, als ob die Situation (z.B. der Stand des Mondes), in der ein Ding hergestellt wird, für die späteren Eigenschaften des Dings keine Bedeutung hätte. - Das ist nicht schlimm! Aber es ist wichtig, dies zu wissen.



Schamanenzeremonie (3. Jtsd. v. Chr.) :
Wo ist der Schaman, wo sein trommelspielender Gehilfe?
Was bedeuten die kleinen schwarzen Kreise, was die Tiere,
was die Menschen, was die "Sonne"?

Kapitel 2: Schallintensität und Lautstärke

„Lautstärke“ gehört, folgt man dem Schema von Kapitel 1, auf die Seite der psychologischen Begriffe, sie bezeichnet eine Empfindung. Es erhebt sich die Frage: Gibt es eine der Lautstärke entsprechende physikalische Größe? Welche Eigenschaft des Reizes „Musik“ bedingt die Lautstärke? Wenn ja, wie misst man die? Und lässt sich hieraus ein Maß für die Lautstärke ableiten?

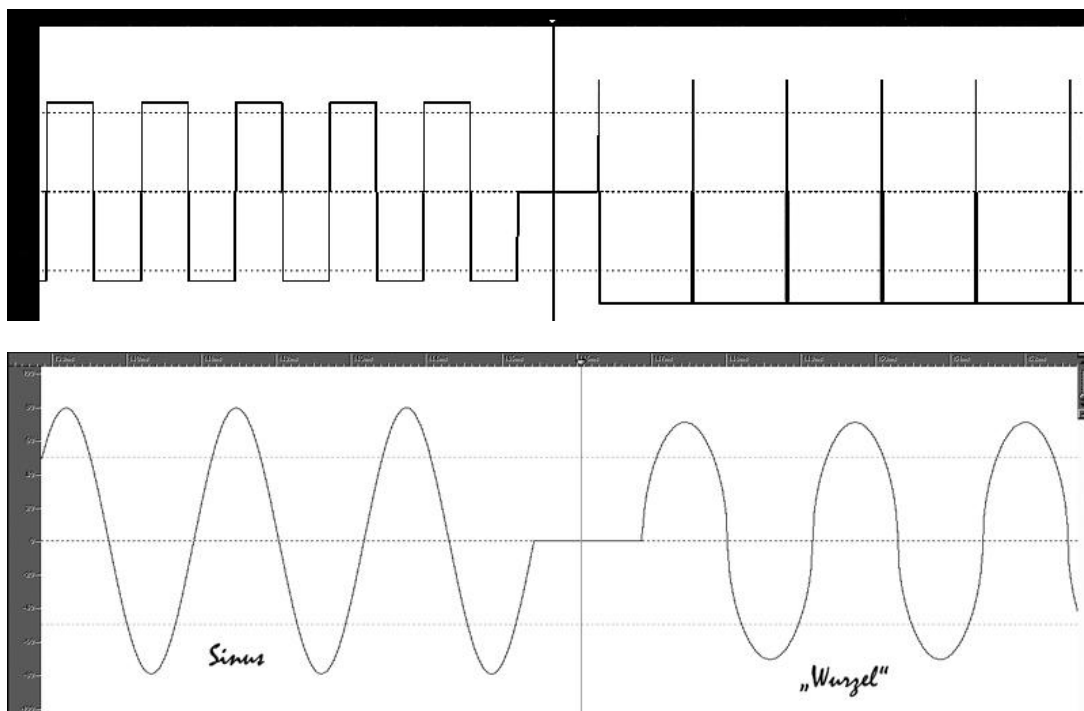
2.1. Schallintensität

Experiment 2.1. Amplitude und Lautstärkenempfindung

Es werden je zwei unterschiedliche Schallsignale gespielt und das jeweilige Schwingungsbild betrachtet. Die Hörer/innen werden gefragt, welches der beiden Schallsignale eines Pairs als „lauter“ erscheint. Übereinstimmend werden bei den folgenden Schallsignalen dasjenige mit der kleineren Amplitude als „lauter“ bezeichnet:

Schallsignal 1	Schallsignal 2	Amplitude größer	Empfindung lauter
Sinus	Rechteck	Sinus	Rechteck
hoher Sinuston	tieferer Sinuston	tieferer Ton	höherer Ton
Rechteck	Puls (10%)	Puls	Rechteck
weißes Rauschen	farbiges Rauschen	farbiges Rauschen	weißes Rauschen
Sinus	„Wurzel“	Sinus	„Wurzel“

Zur Veranschaulichung und Erläuterung der genannten Schallsignale/Schwingungsformen (im Vorgriff auf einige Begriffe, die später noch genauer erläutert werden) Abbildung 2.1:



Das Experiment zeigt zweierlei:

- Die Lautstärkenempfindung ist von der Schwingungsform abhängig und kann bei kleinerer Amplitude sogar größer sein. Die Schulregel „je größer die Amplitude umso lauter der Ton“ ist falsch!
- Ursache für das Auseinanderklaffen von Amplitudengröße und Lautstärkenempfindung kann sein: Die „Eckigkeit“ der Schwingungsform (Paar 1), die Frequenz/Tonhöhe (Paar 2), die Fläche, die die Schwingung einschließt (Paar 3), die Klangfarbe (Paar 4) oder etwas Unerklärliches (Paar 5). Erst eine Fourieranalyse kann in den meisten hier vorliegenden Fällen ein klein wenig weiter helfen gemäß der Faustregel „je mehr Obertöne umso lauter“, aber diese Regel versagt auch gelegentlich (Paar 2 und 4). Bei Paar 2 spielt das menschliche Ohr eine Rolle (siehe unten Stichwort „Phonkurven“).

Die Schulregel gilt in einem ganz speziellen Fall: Wenn die Frequenz und die Schwingungsform gleich sind, dann ist die Lautstärkenempfindung proportional zur Amplitude.

Gibt es ein besseres physikalische Maß für die Lautstärkenempfindung als die Amplitude der Schwingung? Die Sinnesphysiologie macht hier einen Vorschlag: Eine geeignete physikalische Größe für Sinnesempfindungen ist die Energie, die pro Zeiteinheit auf eine gewisse Menge Sinneszellen einwirkt. Physikalisch also: Energie pro Zeit und Fläche oder gleichbedeutend Leistung (= Energie pro Zeit) pro Fläche (zum Beispiel Fläche des Trommelfelles). Diese physikalische Lautstärke ist dann die Menge von Energie, die in einer gewissen Zeit auf das Ohr trifft. Diese physikalische Größe nennt man **Intensität**, in unserem Falle **Schallintensität**.

Die genaue Definition von Schallintensität lautet:

$$\text{(Schall-) Intensität} = \text{(Schall-) Leistung} / \text{Fläche}$$

wobei die Leistung definiert ist als „Energie pro Zeit“. Das Maß der Leistung ist Watt, sodass die Intensität in Watt/m^2 gemessen wird. Die Größe „Watt“ ist aus dem Alltag vertraut: eine Glühlampe verbraucht 60 Watt, ein Heizofen 2000 Watt. An die EWE wird aber für die Energie bezahlt, d.h. für „Kilowattstunden“ (also Leistung mal Zeit = Energie!).

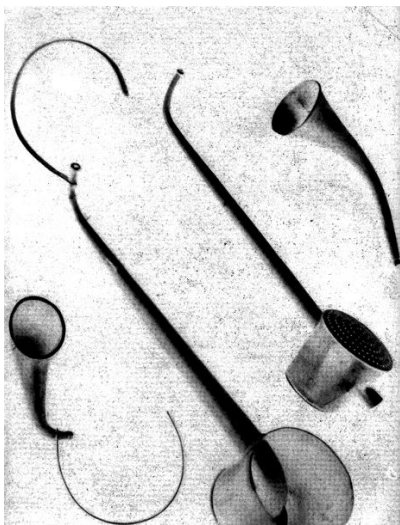


Abb. 2.2 Beethovens Hörgerätepark

Für die Empfindung „Lautstärke“ ist die Leistung relevant, die auf unser Ohr trifft, nicht die, die ein Instrument abstrahlt. Strahlt ein Instrument seinen Schall sehr gebündelt und nicht in alle Himmelsrichtungen ab und hat jemand wie Beethoven einen Trichter, um die abgestrahlte Energie einzufangen und auf das Ohr zu lenken (Abbildung 2.2), so ist die Übertragung optimal. Bei einem Open Air Konzert ist's zum Glück anders: da strahlen die Lautsprecher in alle Himmelsrichtungen und den einen Quadratzentimeter unseres Ohres erreicht nur ein minimaler Bruchteil.

Strahlt die Lautsprecherbox eine Viertel Kugeloberfläche aus, so bestrahlt sie in der Entfernung L (= „Länge“) eine Kugeloberfläche von $(4\pi L^2)/4 = \pi L^2$. Die Schallintensität nimmt also mit dem Quadrat der Entfernung von der Schallquelle ab. - Dieser Umstand und nicht so sehr die Absorption von Schallenergie durch die Luft ist maßgeblich dafür verantwortlich, dass Musik in der Ferne leiser als in der Nähe klingt.

Es zeigt sich - und das ist wegen der Kleinheit des Ohrs auch plausibel -, dass die musikalisch relevanten Schallintensitäten recht gering sind. Die Schmerzschwelle liegt bei ca. 1 Watt/m^2 ($= 0,000 01 \text{ Watt/cm}^2$) und die Hörgrenze bei $0,000 000 001 \text{ Watt/m}^2$.

2.2. Dezibel

Experiment 2.2. Dezibel

Es sollen bis zu 16 exakt gleich laute Schallquellen „addiert“ werden. Wir benutzen einen Soundmodul mit „General Midi“-Norm (es könnte auch eine GM-Soundcard eines PC's sein). Ein Computer schaltet die maximal 16 gleichzeitig erklingenden Sounds mit exakt gleicher Lautstärke („volume“) nacheinander ein. Die Schallintensität nimmt „linear“ zu, weil jedes neu hinzukommende Instrument seinen eigenen Anteil an Energie liefert. Wie laut wird die lineare Zunahme der Schallintensität empfunden?

Ergebnis dieses Hörexperiments: Das Hinzutreten eines neuen Instruments wird als sehr geringer Lautstärkenzuwachs empfunden und nicht als „Verdoppelung“; die Lautstärkenzunahme ist anfangs größer als später; wenn man überhaupt von einer „Verdoppelung“ der Lautstärkenempfindung sprechen kann, dann ist diese ungefähr bei der 10-fachen Schallintensität. Kurz: die Lautstärkenzunahme ist –geometrisch gesprochen - nicht linear sondern verläuft „abgeflacht“. Abbildung 2.3 (unten) entspricht ungefähr dem Höreindruck:

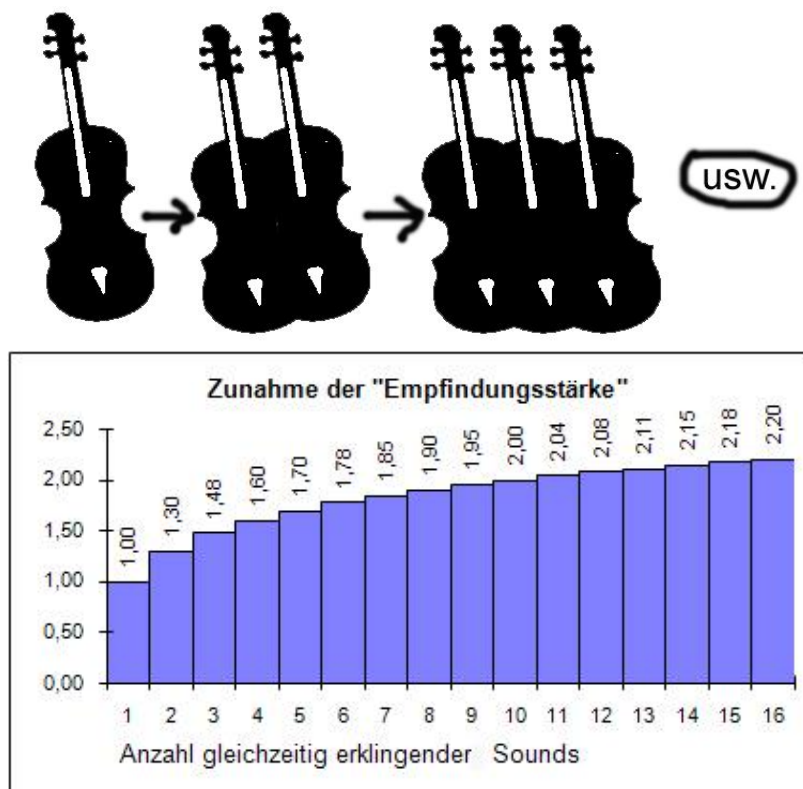


Abb. 2.3 Zunahme der Lautstärkenempfindung

Konsequenzen: Da der Mensch einen Schall der 10-fachen Intensität als „etwa doppelt so laut“ empfindet, nimmt die Schallintensität in viel schnellerem Tempo zu als die Lautstärkenempfindung. Die ersten drei Spalten der folgenden Tabelle zeigen das ganze Ausmaß dieser „Katastrophe“ :

falls N positiv ist, und eine 0 mit $N-1$ Stellen hinter dem Komma, wenn N negativ ist. Man sieht, dass die Antwort auf die obige Frage lautet: In der Band müssten 20 Personen spielen – und die Geigenfraktion eines Sinfonieorchesters (vom Typ A) spielt um ca. 18 dB lauter als eine einzige Geige.

2.3. Phon

Experiment 2.3. Phonkurven 1

Vom Computer gesteuert wird ein Ton unterschiedlicher Tonhöhe gesendet. Mit einem Dezibel-Messgerät (oder einem zuvor geeichten Voltmeter am Synthesizerausgang) wird kontrolliert, dass die Schallintensität aller Töne gleich ist. Deutlich ist zu hören, dass die Töne leiser werden, wenn die Frequenz kleiner wird.

Die Empfindungsgröße „Lautstärke“ hat zwei unangenehme Eigenschaften:

- Zwei Schalle von unterschiedlichem Klangcharakter werden bei gleicher Schallintensität oft als unterschiedlich laut empfunden (z.B. der Schlag einer Bass Drum und ein hoher Geigenton),
- zwei Töne desselben Musikinstruments werden bei unterschiedlicher Tonhöhe und gleicher Schallintensität oft als unterschiedlich laut empfunden.

Beide Arten von Unterschieden schwanken von Person zu Person und sind bei ein und derselben Person zudem noch von der „Tageskondition“ (Müdigkeit, Nervosität usw.) abhängig. Ein schwerhöriger Mensch benötigt beispielsweise 40 dB, um überhaupt einen 1000 Hz-Ton zu hören, obgleich die offizielle Hörschwelle bei 0 dB liegt.

Um diese subjektiven Faktoren wenigstens im einfachsten Fall genauer beschreiben zu können, ist in der Audiometrie die Bestimmung von „Kurven gleicher Lautstärkenempfindung“ für Sinustöne eingeführt worden. Hier wird bestimmt, bei welcher Schallintensität oder welcher Dezibel-Größe zwei (Sinus-)Töne unterschiedlicher Tonhöhe als gleich laut empfunden werden. Beginnend bei 1000 Hz

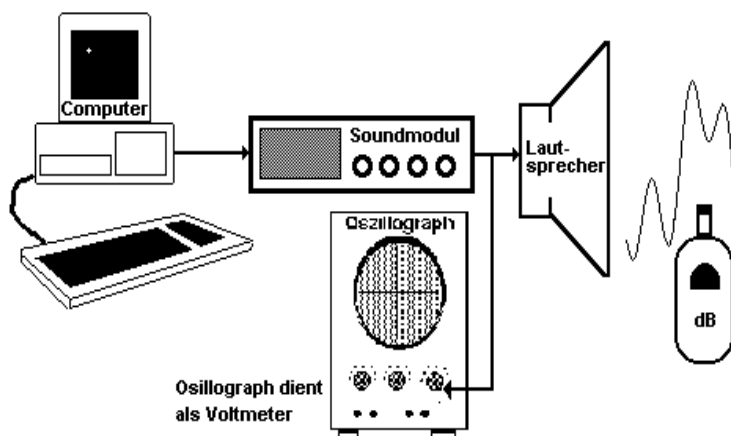


Abb. 2.4 Phonkurven-Versuch

und einer bestimmten dB-Größe schreitet die Versuchsperson langsam zu niedrigeren oder höheren Frequenzen fort und stellt an einem dB-Regler die Intensität so ein, dass die Lautstärkenempfindung sich nicht verändert. Ein Querschnitt durch einige hundert solcher Messreihen ist normiert worden. (ISO 226:2003 hat in jüngster Zeit diese Kurven aus den 30er Jahren etwas revidiert.) Abbildung 2.4 zeigt die alten Kurven gleicher Lautstärkenempfindung, die folgendermaßen zu lesen sind: Ein Ton mit der Schallin-

tenazität 60 dB und der Frequenz 100 Hz wird ebenso laut empfunden wie ein Ton von 1000 Hz und 40 dB. Für beide Empfindungen sagt man „40 Phon“ oder – musikalisch – „pianissimo“. - Die unterste Kurve dieses Diagramms (die Hörschwelle) besagt, dass ein 1000 Hz-Ton bei Normalhörigen gerade noch wahrgenommen werden kann, ein 100 Hz-Ton aber bereits ca. 36 dB benötigt, um wahrgenommen zu werden.

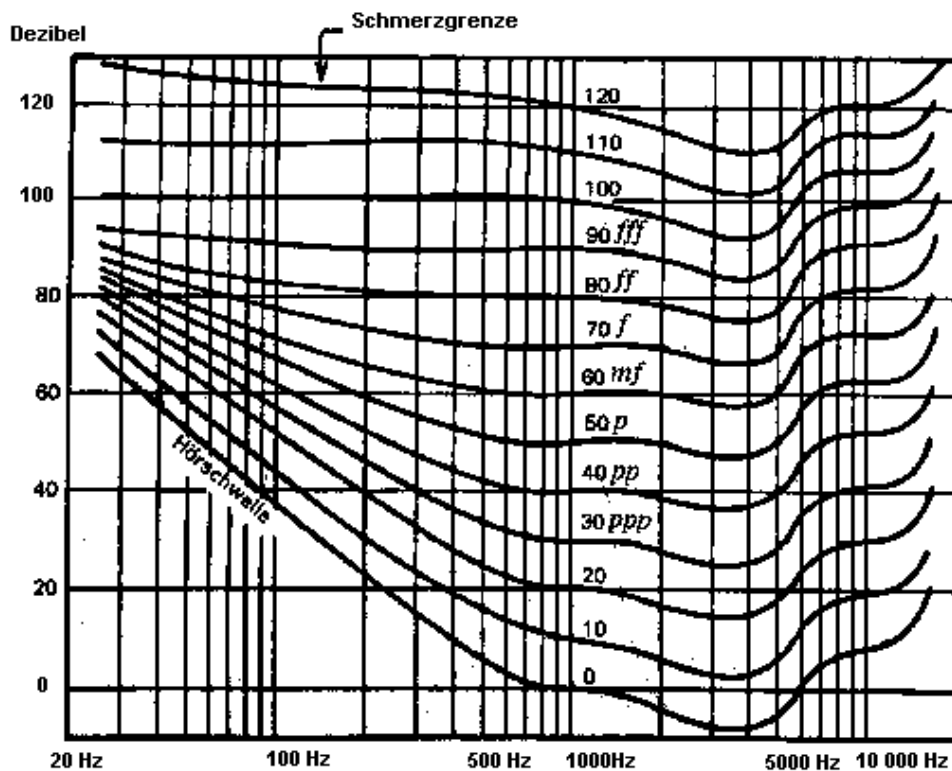


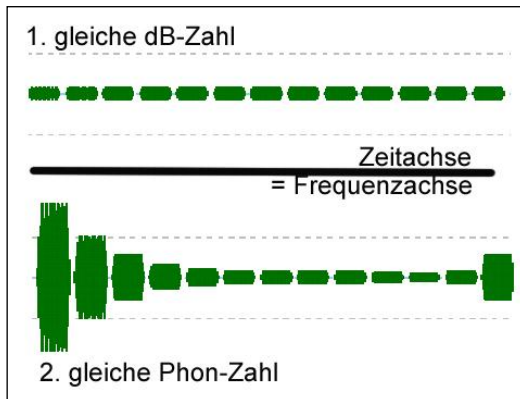
Abb. 2.5 Kurven gleicher Lautstärkenempfindung (Phon-Kurven)

Die Kurven gleicher Lautstärkenempfindung haben zur Definition der Maßeinheit **Phon** geführt. Entlang jeder der hier gezeichneten Kurven herrscht dieselbe Phon-Stärke. Ein 100 Hz-Ton mit 40 Phon hat also 62 dB und wirkt gleich laut wie ein 40-dB-Ton von 1000 Hz. Normierte Phonkurven werden auch als dB(A) bezeichnet. Viele Dezibel-Messgeräte können zwischen dB und dB(A), also „echtem“ dB und normiertem Phon, umschalten. Die Messwerte ändern sich immer dann, wenn der gemessene Schall starke Tiefen besitzt.

Einige Konsequenzen:

- Um in den Tiefen dieselbe (subjektive) Lautstärke zu erzielen wie in der Höhe müssen MusikerInnen oder Musikanlagen erheblich mehr **Energie** aufwenden.
- Ein Tonträger (LP, MC, CD usw.) wird so eingespielt, dass er bei relativ hoher Lautstärke in Höhen und Tiefen ausgewogen klingt. Stellt jemand seine Abspielanlage leiser als diese „optimale Einspiellautstärke“, so wirken die Höhen stärker und die Tiefen schwächer. Durch eine sog. „**Loudness-Taste**“ an vielen Verstärkern kann dieser Schaden wieder kompensiert werden: die Taste hebt die Bässe „physiologisch richtig“ an.
- Die **Datenreduktion** vor allem bei der Fraunhofer’schen MPEG, zum Beispiel „**mp3**“, beruht zum Teil auf der These, dass es nicht nötig ist, Frequenzen zu speichern und zu übertragen, die außerhalb des „Hörfeldes“ (eingegrenzt durch Schmerz- und Hörschwelle) liegen. Da der gesamte musikalisch relevante Lautstärkenbereich bei tiefen Frequenzen nur etwa halb so groß ist wie bei mittleren und hohen, kann man sich bei digitaler Speicherung enorm viel Speicherplätze sparen, wenn man das Signal vor der Speicherung erst einmal in „Frequenzbänder“ aufteilt (siehe unten Kapitel 4.3).

Experiment 2.4. Phonkurven 2



Ein Sinuston gleicher dB-Zahl erklingt von tief nach hoch (oberer Teil der Abbildung). In der Tiefe klingt der Ton leise, in der Mitte laut. Erst, wenn die dB-Zahl des Sinustons in der Tiefe wie im unteren Teil des Bildes dargestellt, angehoben wird, erscheint der Ton in allen Höhenlagen gleich laut.

Abb. 2.6 Experiment 2.4 visualisiert

Experiment 2.5. Klavierlautstärke



Die musikalische **Information** „das Orchester spielt laut“ ist nicht in der Schallintensität des Orchesters codiert. Man kann mit großer Sicherheit auch bei leise eingestellten Wiedergabeeinrichtungen feststellen, ob ein Orchester laut oder leise spielt. Ein „lautes Orchester“ erkennt man offensichtlich an einem charakteristischen Klang, der von der Schallintensität weitgehend unabhängig

ist. Bei einem (Hammer-)Klavier ist die Lautstärkenempfindung eine Funktion des Geräuschs, das der Hammer beim Aufprall auf die Saite produziert.

Die gespielte Passage hat drei Teile (1. Darbietung). Bei der 2. Darbietung wird die Pianostelle um 10 dB auf die Lautstärkenempfindung der Forte-Stelle angehoben, bei der 3. Darbietung die Fortestelle um 10 dB auf die Lautstärkenempfindung der Pianostelle abgesenkt. Effekt: die angehobene Pianostelle klingt „dumpf“ und nicht wie ein lautes Klavier, die abgesenkte Fortestelle klingt wie ein lautes Klavier in weiter Ferne.

Experiment 2.6. Lärm

Auch der Begriff „**Lärm**“ ist als komplexes psychologisches Phänomen nur bedingt mit der Schallintensität korreliert. Lärm, definiert durch Begriffe wie „Lästigkeit“ oder „Störung“, hängt bei geringer Schallintensität davon ab, ob die Schallquelle unbekannt, moralisch verabscheuungswürdig, unvorhergesehen, ideologisch abzulehnen, kulturell oder sozial erwünscht usw. ist. Motorräder, schreiende Kinder, Staubsauger, Rasenmäher, Techno-Musik, eine singende Walküre oder ein klavierspielender Junge werden im Hinblick auf Lärmbelästigung recht unterschiedlich bewertet. Selbst autonome physiologische Reaktionen (Herzklopfen, Schweißabsonderung, Blutdruck, Körpertemperatur, Adrenalinausschüttung usw.) treten in Abhängigkeit von solchen Faktoren auf. Erst ab 80 bis 90 Phon tritt weitgehend unabhängig von solchen Faktoren eine Lärmstörung zusammen mit der entsprechenden physiologischen Reaktion ein. Die Lärm-Gesetzgebung kümmert sich allerdings weniger um Lärm im Sinne einer Belästigung, sondern zumeist im Sinne einer Gesundheitsschädigung. So gibt es Gesetze

für den „Arbeitsplatz Diskjockey“, nicht jedoch für die Komsumfläche „Diskothek“. Dass „Lärm“ viel mit Moral und ästhetischer Wertung zu tun hat, sieht man an den Titeln und Inhalten vielverkaufter Bücher, in denen Lärm und Geräusch gleichgesetzt werden.

In einem Experiment werden 18 Schallsignale mit *genau gleicher Schallintensität* (dB) vorgespielt. Die Hörer/innen sollen sagen, wie „laut“ und wie „lästig“ sie den Schall einschätzen. Die Lautstärke korreliert *nicht* mit der Lästigkeit. Und diese kann von vielen Faktoren abhängen. 40 Teilnehmer/innen eines Hörpsychologieseminars im Februar 2008 kreuzten wie in der Tabelle dargestellt an (Auswertung durch Axel Kassner):

Klang	Belästigungsgrad			
	nicht	ein wenig	etwas	sehr
Wellenrauschen	11	19	7	3
Babie schreien	1	1	12	25
Auto-Brems-Quietschen	1	9	25	5
WC-Spülung	17	16	3	3
Hund bellt	2	8	17	13
Dusch-Geräusch	23	14	2	0
E-Git. Akkorde	10	14	4	11
Flugzeug	2	10	19	7
Kirchengeläut	9	11	13	6
Vogelgezwitscher	10	11	4	13
Orchester stimmt	9	9	17	6
Orchester spielt	16	8	5	9
Schulhof-Kinder	1	13	17	11
verzerrender Synthesizer	1	1	4	33
Telefonklingeln (alt)	3	11	9	14
Fußballspiel im Stadion	15	9	10	4
Tür-Gong	3	10	11	13
knarrende Tür (langsam)	2	8	15	12
Gesamtempfindung	136	182	194	188

2.4. Lautstärke, Ohr und Schwerhörigkeit

Die Phon-Kurven (= Kurven gleicher Lautstärkenempfindung) sind weitgehend eine Folge des Baus des menschlichen Ohres, während das bereits erwähnte „logarithmische Gesetz des Hörens“ eher einen allgemeinen Mechanismus der Reizverarbeitung durch das Nervensystem abbildet. Denn nicht nur beim Gehör-, sondern auch beim Tast-, Gesichts- und Geruchssinn gilt das „logarithmische Gesetz“. Die Tatsache, dass unterschiedliche Frequenzen bei gleicher Schallintensität als unterschiedlich laut empfunden werden, kann wie folgt erklärt werden: Der Schall wird von den Ohrmuscheln „eingefangen“ (Beethoven-Effekt) und versetzt die Luft im Gehörgang in Schwingung. Aufgrund der Resonanzfrequenz des Gehörganges wird die Energie tiefer Frequenzen schlecht übertragen. Dadurch wird das Trommelfell durch tiefe Frequenzen nicht so gut erreicht. Die durch die Luft im Gehörgang angeregte Schwingung des Trommelfells wird sodann durch die drei Gehörknöchelchen an das Schwingungssystem „Innenohr“ adaptiert. Auch dieser Vorgang ist frequenzabhängig. Der letzte Gehörknöchel sitzt auf dem „ovalen Fenster“ des Innenohrs. Von hier aus wird die Flüssigkeit im Innenohr in Bewegung gesetzt (siehe „Hörtheorien“ in Kapitel 3). Die Flüssigkeitsbewegung reizt im Endeffekt die Sinneszellen.

Würde der Luftschall direkt auf die Innenohrflüssigkeit treffen, so würde fast alles reflektiert. Andererseits aber ist der hier skizzierte Adaptionsvorgang stark frequenzabhängig. Nicht zu vernachlässi-

gen ist die Schallübertragung durch die Schädelknochen-substanz. Dies merkt man beispielsweise beim Unterwasserhören, bei dem man sich ohne irgendeinen Effekt die Ohren verstopfen kann. (Ich empfehle einen Besuch in der Unterwassermusik-Therme von Bald Sulza!)

Außenohr → Mittelohr → Innenohr → Zentralnervensystem

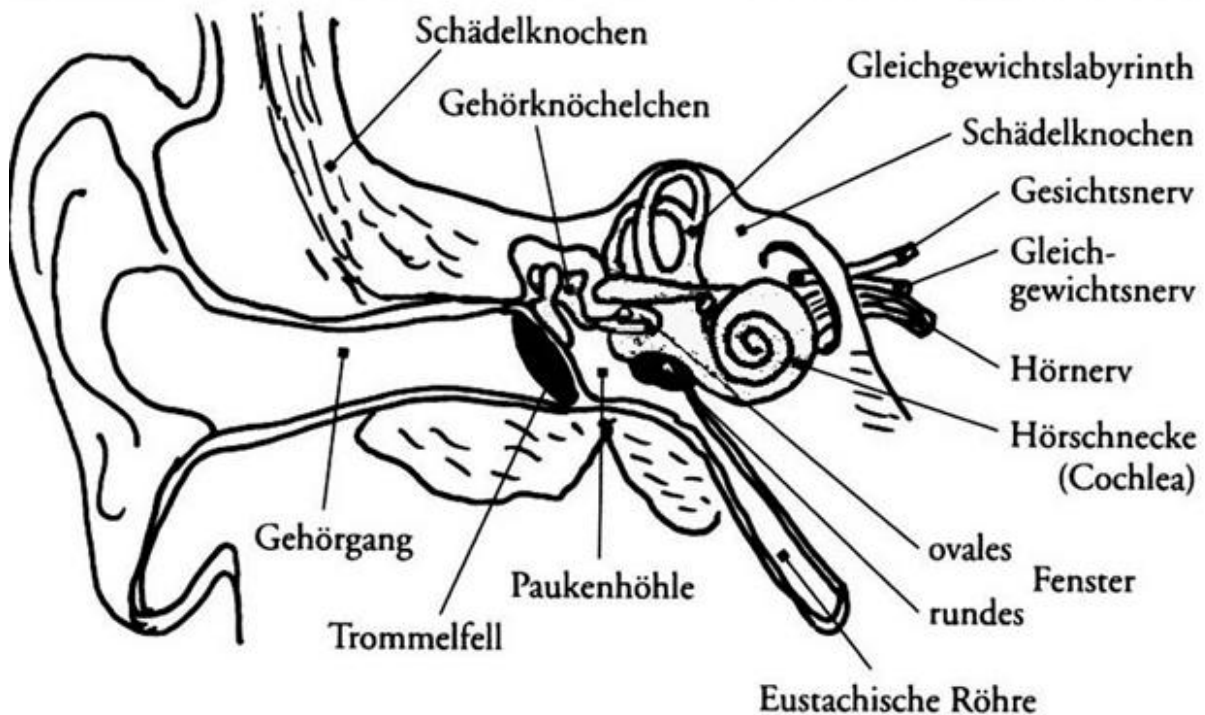


Abb. 2.7 Anatomie des menschlichen Ohrs

Bei **Schwerhörigkeit** liegt in Abbildung 2.5 die Hörschwelle höher als dort angegeben. Oft besteht Schwerhörigkeit nur in einem gewissen Frequenzbereich - zum Beispiel zwischen 500 und 2000 Hz. Das bedeutet, dass die Hörschwelle teilweise „angehoben“ ist. Die Volkskrankheit Schwerhörigkeit kann mehrere Ursachen haben. Hierzu einige Stichworte:

Das *Außen- oder Mittelohr* ist verwachsen, verknorpelt oder verstopft. Beweglichkeit der Gehörknöchelchen ist eingeschränkt, auch Entzündungen. Chirurgische Eingriffe sind hier möglich. Grundsätzlich ist Hören auch ohne Trommelfell/Gehörknöchelchen möglich, freilich sehr eingeschränkt.

Im *Innenohr*: (1) Vorübergehende Beeinträchtigung der Haarzellen (Versteifung, chemischer Kurzschluss) zum Beispiel nach einem sehr lauten Konzert oder bei lauter Arbeit. Die Härchen erholen sich hierbei nach einer gewisser Zeit wieder. Wenn die Erholung Schwierigkeiten bereitet, hilft „Klangmassage“ oder bessere Durchblutung (z.B. durch „Verflüssigung“ des Blutes durch Infusionen oder bei der Tomatis-Methode). (2) Irreversible Zerstörung der Haarzellen, „Haarausfall“ tritt bei plötzlich eintretenden lauten Schallen oder bei hoher Dauerbelastung ein („Ohrfeige“, „Knalltrauma“). Diese irreversible Beschädigung betrifft oft nur einen gewissen Frequenzbereich. Wenn hohe Frequenzen „fehlen“, dann haben die Betroffenen oft den Eindruck, die Menschen sprächen undeutlich. Dies liegt daran, dass klare Artikulation (Konsonanten) mit hohen Frequenzen arbeitet.

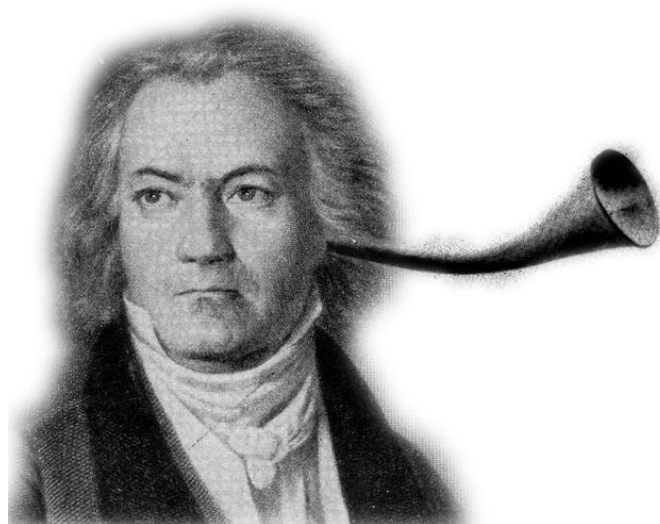
Im *Nervensystem* (Gehörnerv, Hörzentrum, Gehirn). Da hier ausschließlich chemisch-elektrische Prozesse eine Rolle spielen, können hier exogene oder endogene Drogen Heilung bringen. „Exogen“ = von außen zugeführte Chemikalien, „endogen“ vom Körper durch bestimmte Übungen selbst er-

zeugte Chemikalien. Der Einfluss der endogenen Drogen wird u.a. daran deutlich, dass Hörsturz oder Tinnitus „psychisch bedingt“ sind und vor allem bei hohem Stress-Pegel auftreten.

Eine einfache Methode, die eigene Hörschwelle jenseits von Ohrenarzt oder Hörzentrum zu vermessen, ist folgende: Es werden Sinustöne mit den Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz und 8000 Hz dargeboten. Jeder Sinuston erklingt 10 mal hintereinander mit in 5 dB-Schritten abnehmender Schallintensität. Beim Ablauf des Experiments zählt man, wie viele Töne man hört und trägt das Ergebnis auf einem Blatt ein...

Hz→	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1							
2							
3							
4	X						
5							
6		X					
7							
8			X				X
9				X			
10					X	X	

Teste Dein Gehör!



Eine mp3-Datei mit diesem Experiment, bei dem jedes Ohr einzeln getestet werden kann und das andere mit einem leisen Rauschen „betäubt“ wird, befindet sich im Internet unter www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download. Ein Justierungston zu Beginn soll dazu verwendet werden, die Lautstärke am Wiedergabegerät so niedrig wie möglich einzustellen. Jede 10er-Reihe erklingt zwei Mal.

Kapitel 3: Schwingung und Tonhöhe

Die Übertragung musikalischer Information spielt sich im Normalfall so ab, dass Energie in Gestalt von Schallwellen an das menschliche Ohr gelangt. („Normalfall“, weil es denkbar ist, dass das Gehörzentrum des Menschen auch direkt elektrisch oder chemisch gereizt werden könnte...) Energie, wie sie in Kapitel 2 abgehandelt wurde, ist im wesentlichen *Träger* der musikalischen Information. Die Information steckt in der spezifischen **Schallstruktur** der Energie. Ohne Energie gibt es keine musikalische Information, aber nicht jede Energie enthält musikalische Information. Die Menge der Energie ist für die transportierte Struktur nicht von großer Bedeutung, wie folgendes Beispiel zeigt:



Abb. 3.1 Energie und Struktur bei der E-Gitarre

Die Schwingungsenergie der abgebildeten Saiten ist nicht sehr groß, sie beträgt einen Bruchteil der Finger-Bewegungsenergie der Spieler. Die an die Luft abgestrahlte Schallenergie der E-Gitarre ist noch viel geringer. Der Tonabnehmer nimmt Bruchteile der Saiten-Schwingungsenergie auf. Im Verstärker „verformt“ dieser kleine Energie-Anteil die erheblich größere Energiemenge, die aus der Steckdose in den Verstärker gelangt: die Gitarren-Energie prägt ihre Struktur der Steckdosen-Energie auf. Die derart „verformte“ Steckdosenenergie erregt die Membran eines Lautsprechers, der nun - im Gegensatz zur E-Gitarre - seine Schwingungsenergie optimal als Schallenergie an die Luft abgeben kann. Für die musikalische Information ist die Zusatzenergie aus der Steckdose nicht von qualitativer Bedeutung, Spielfehler können nicht durch die Elektrizitätswerke korrigiert werden.

3.1. Schwingungen allgemein

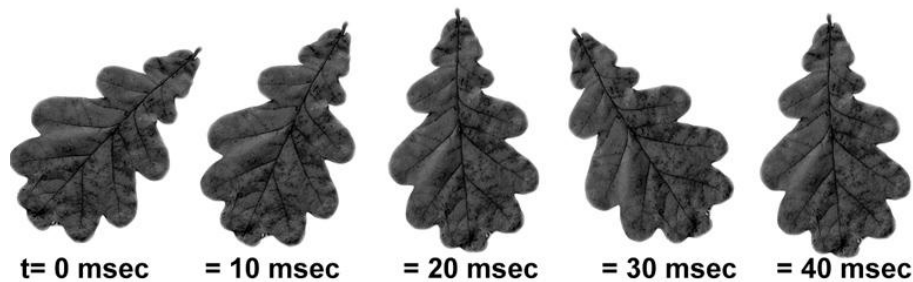
Ziel des Musikmachens ist es, das Trommelfell in mechanische **Schwingung** zu versetzen. Das Trommelfell soll sich so hin- und her bewegen, dass im Gehirn „Musik“ entsteht. Zwischen Trommelfell und Schallquelle, einem Musikinstrument, einem sonstigen Klangerzeuger oder Lautsprecher, befindet sich in der Regel nur Luft. Sobald sich die Schallquelle, die mit der Luft Berührung haben muss, schwingt, wird der chaotischen Bewegung der Luftmoleküle eine gewisse Ordnung aufgezwungen (sofern die Musik ordentlich ist). Diese „Ordnung“ pflanzt sich von der Schallquelle bis zum Trommelfell hin fort (wie in Abschnitt 7.1 genauer untersucht werden wird). Dabei bleiben die Luftmoleküle,

mit denen die Schallquelle Berührung hat, in der Nähe der Schallquelle, und die Luftmoleküle, die sich im Gehörgang befinden, im Gehörgang. Die musikalische Informationsübertragung ist nicht mit einem Transport von Luftmolekülen oder sonstiger Materie verbunden. (Denn sonst entstünde beim Verschicken von Schallwellen ein Wind.) Sehr langsame und starke Schallschwingungen kann man als Vibration spüren. Die meisten musikalisch relevanten Schwingungen sind aber klein und schnell. Man benötigt Hilfsmittel, um sie sichtbar zu machen. Im vorliegenden Kapitel beschäftigen wir uns aber zunächst nur mit Schwingungen und noch nicht mit der Fortpflanzung von Schwingungen im Raum (den Wellen).

Definition

Von **Schwingung** spricht man, wenn sich eine physikalische Größe im Laufe der Zeit periodisch oder nicht-periodisch so ändert, dass sie um einen gewissen Ausgangspunkt („Ruhelage“) oszilliert. Ein am Baum hängendes, im Winde wehendes Blatt „schwingt“, während ein abgerissenes und vom Wind weit weg getragenes Blatt nicht mehr „schwingt“. Beide Male findet zwar eine Veränderung der physikalischen Größe „Ort“ statt, doch nur im ersten Falle gibt es so etwas wie ein Oszillieren.

Bei der Verbildlichung des zeitlichen Vorganges „Schwingung“ bedient man sich in der Regel eines Koordinatensystems, bei dem zeitlich hintereinander vorkommende Ereignisse räumlich nebeneinander dargestellt werden. Eine abendländische Konvention lautet dabei: „die Zeitachse verläuft von links nach rechts“. Zum Beispiel:



In dieser Darstellung sind 5 Zeitpunkte explizit abgebildet. Einfacher wäre es, nur die physikalische Größe „Auslenkung“ aus der Ruhelage (die bei 20 msec eingenommen wird) in cm oder mm anzugeben, wie das im folgenden Diagramm geschieht:

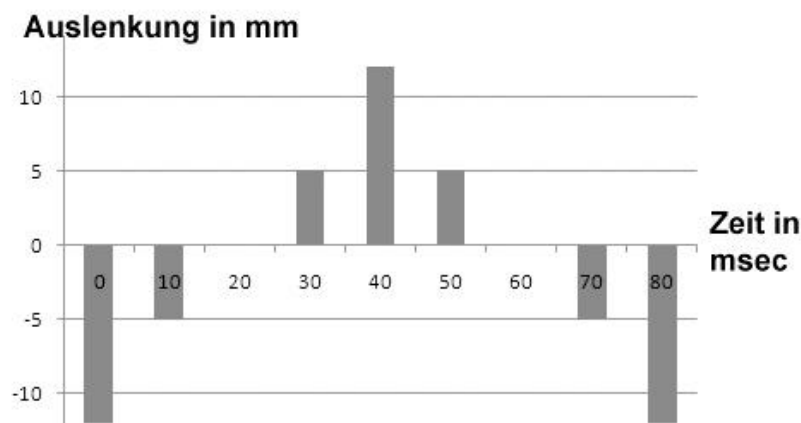


Abb. 3.2 Schwingung des Eichenblattes als Diagramm

Periodisch ist eine Schwingung dann, wenn sich nach immer gleichen Zeiträumen (= „Perioden“) ein Schwingungsablauf genau wiederholt. Ist dies nicht der Fall, so ist die Schwingung **nicht periodisch**. Beispiele periodischer Schwingungen: Bewegung der Erde um die Sonne (Periode = 1 Jahr), Ebbe und Flut (Periode = ein paar Stunden), Kolbenbewegung eines Automotors bei gleichbleibender Geschwindigkeit (Periode = Bruchteile von Sekunden). Nicht-periodische Schwingungen: Bewegung einer Schwingtür in einem Kaufhaus, Bewegungen einer Wetterfahne, Bewegung der Elektronen auf der Sonne. Die letztgenannten Beispiele zeigen, dass ganzheitlich betrachtet nicht-periodische Schwingungen durchaus sinnvolle Information enthalten können („Besucherstrom“ im Kaufhaus, Windböen, „weißes Licht“ der Sonne). Musikalisch sinnvoll sind periodische *und* nicht-periodische Schallschwingungen.

Die grafische Darstellung von periodischen Schwingungen ist relativ einfach, da es genügt zu wissen, wie sich die interessierende physikalische Größe innerhalb einer Periode verändert:

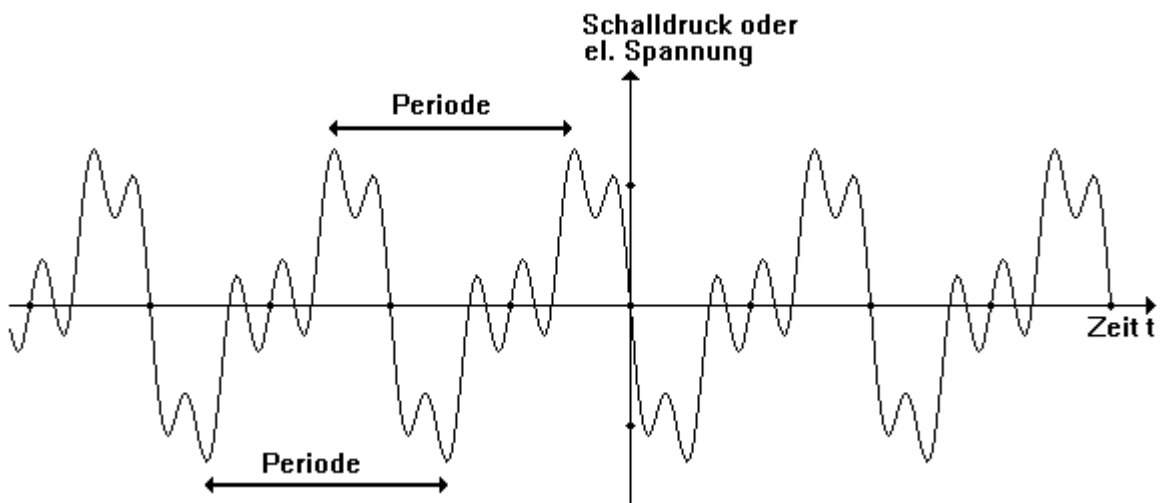


Abb. 3.3 Kontinuierliche Darstellung einer periodischen Schwingung (Posaune)

Während die Zeit („X-Achse“) stets von links nach rechts verläuft, können in der vertikalen Richtung („Y-Achse“) recht unterschiedliche physikalische Größen stehen. Musikalisch relevant sind unter anderem: Luft- oder Schalldruck an einer Stelle, die elektrische Spannung (beispielsweise im Lautsprecherkabel), die Auslenkung einer Saite, die Schwärzung eines Films (beim Lichttonverfahren des Kinos), der Zahlenwert eines Speicherplatzes auf einer CD-ROM usw.

Die Periode wird in Sekunden (sec) gemessen und mit T bezeichnet. Die Anzahl der Perioden pro Zeit heißt **Frequenz** und wird entsprechend in $1/\text{sec}$ gemessen, was auch Hertz („Hz“) heißt.

Frequenz = Anzahl der Perioden pro Zeit

$$f = 1/T \quad (\text{in } 1/\text{sec} = \text{Hz})$$

Nach Abbildung 2.5 kann der Mensch Schallschwingungen zwischen 16 Hz und 12000 bis 20000 Hz hören. Die obere Hörgrenze sinkt mit dem Alter auf ca. 12 000 Hz.

Frequenzmessungen

Heute kann jede Computerbesitzerin einfache Frequenzmessungen im Bereich, den Mikrofon und Soundcard „zulassen“, durchführen (oft zwischen 50 und 8 000 Hz). Man lässt sich das Schwingungsbild grafisch darstellen (siehe auch Kapitel 4) und versucht, die Zeiteinheit auf der Zeitachse zu erkennen, was je nach verwendetem Programm mehr oder minder einfach ist.

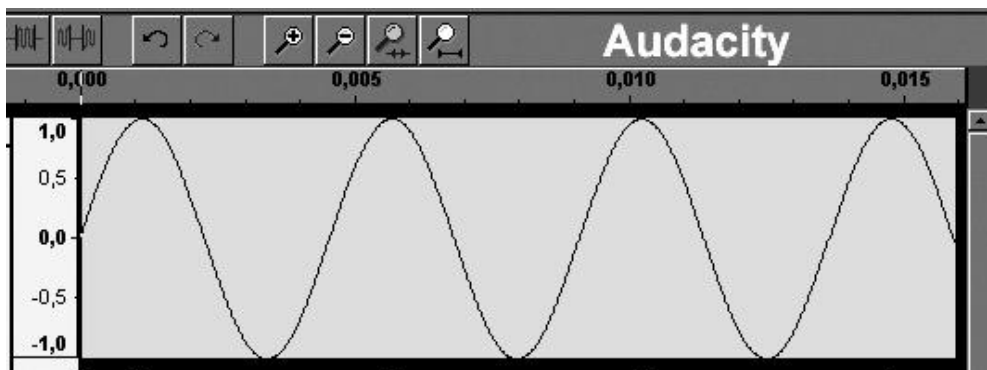


Abb. 3.4 Frequenzbestimmung am Computerbildschirm

Abbildung 3.4 zeigt eine mit dem kostenlosen Audiorecordingprogramm „Audacity“ aufgenommene und dargestellte Sinusschwingung. Der Zeitmaßstab ist hier explizit mit abgebildet. Eine Periode hat die Dauer von $T = 0.0045$ sec. Daraus folgt für die Frequenz $F = 1/0.0045 = 222$ Hz.

Eine ungewöhnliche, aber durchaus durchführbare Frequenzmessung kann an Vinyl-LP's durchgeführt werden, deren Rillen man mit der Lupe betrachten und die Perioden pro Zentimeter Rillenzahl auszählen kann (Abbildung 4.3). Aus Umdrehungsgeschwindigkeit (33 U/min) und Rillenzahl pro Umdrehung ($2\pi R$) kann die Zeit bestimmt werden, in der das ausgezählte Rillenzahlstück von der Nadel des Plattenspielers überstrichen wird.

Nicht-periodische Schwingungen lassen sich nicht so einfach darstellen wie periodische. Man begnügt sich meist mit zeitlich begrenzten Ausschnitten und einem „qualitativen“ Überblick. Eine „Frequenz“ gibt es definitionsgemäß nicht. Eine nicht periodische Schwingung sieht am Computerbildschirm folgendermaßen aus (der Computer greift aus der analog nicht darstellbaren Schwingung nach einer inneren „Uhr“ Werte heraus, deren Abfolge eine Zufallsverteilung abgeben):

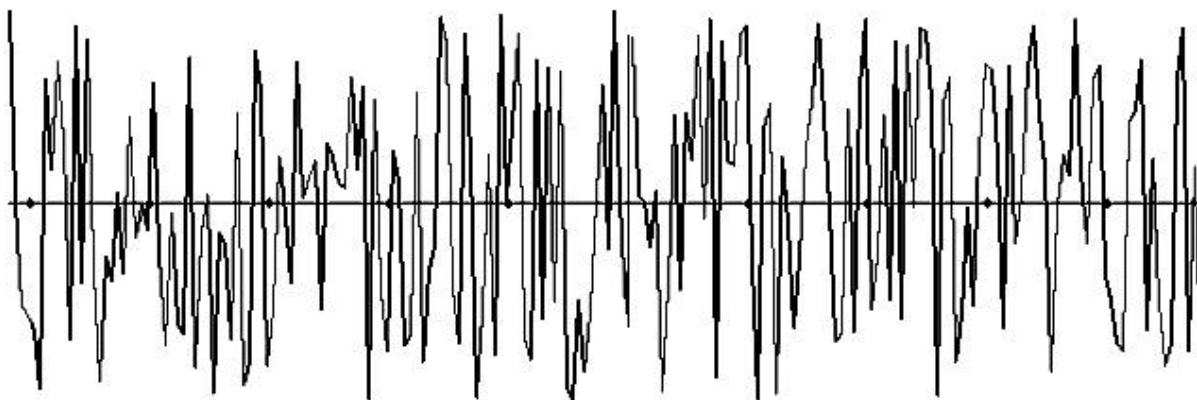


Abb. 3.5 Computerbild einer unperiodischen Schwingung

Der Höreindruck einer Schwingung dieser Art ist eine Art „Rauschen“. Das stimmlose „sch“ erzeugt ein *weißes* Rauschen, bei dem statistisch ausgedrückt alle Frequenzen nach einer Normalverteilung gleich wahrscheinlich sind. Wird diese Wahrscheinlichkeit auf einen Frequenzbereich eingeschränkt, so hört man *farbiges* Rauschen. - Unperiodische Schwingungen kommen beim Musizieren häufig vor. Die deutsche Sprache hat einen sehr hohen Rauschanteil, auf Hawaii dagegen kann es Folgen von 6 oder 8 Vokalen (periodischen Schwingungen) ohne dazwischenliegendes Rauschen (Konsonanten) geben. Weil die menschliche Stimme alle ihre Laute aus periodischen Schwingungen (der Stimmbänder) und Rauschen (des Luftstroms) zusammensetzt, hat bis in die 70er Jahre hinein die elektronische Musik mit der Hypothese gearbeitet, es gäbe keine weiteren Schwingungstypen neben „periodisch“ und „streng unperiodisch“. Indessen bevorzugen 2- und 3-dimensionale Schwingungserzeuger (vgl. Kapitel 9) sog. „quasiperiodische“ Schwingungen, die Regelmäßigkeiten aufweisen, ohne im strengen Sinne periodisch zu sein. Und in den 80er Jahren hat die „FM-Synthese“ für Aufregung gesorgt, deren Schwingungen sich ebenfalls nicht ins bisherige Schema pressen ließen (vgl. Abbildung 10.12). - Hier das Schwingungsbild einer tibetischen Klangschaale:

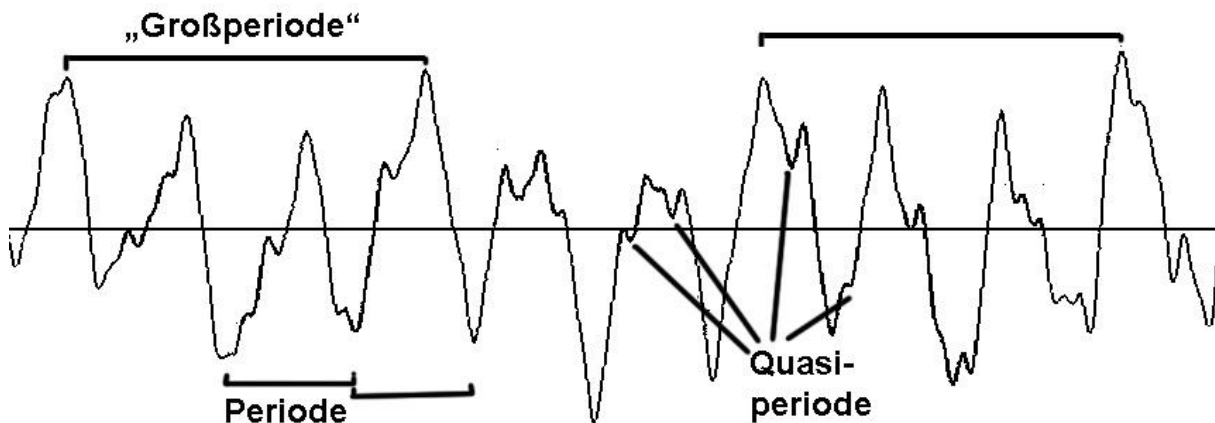


Abb. 3.6 Quasiperiodische Schwingung einer Klangschaale

Weitere Beispiele von Schwingungstypen vor allem bei Sprachlauten und Perkussionsinstrumenten folgen in den jeweiligen Kapiteln. Durch die elektronische Musik sind einige Schwingungsformen besonders „populär“ geworden:

- Die *Sinusschwingung*, definiert als eine Schwingung, bei der die rücktreibende Kraft des schwingenden Partikels proportional der Auslenkung ist.
- Die *Rechteckschwingung*, bei der eine „Klappe“ auf und zu geht („Klarinettenmundstück“).
- Die *Sägezahnschwingung*, bei der auf eine „langsame“ Auslenkung ein „schnelles“ Zurückschnellen erfolgt („Streichinstrumente“).
- Die *Dreiecksschwingung*, bei der ein „eckiges“ Hin und Her erfolgt („Posaune“).
- Der *Puls*, bei dem das Rechteck unsymmetrisch ist (siehe Kapitel 2!).

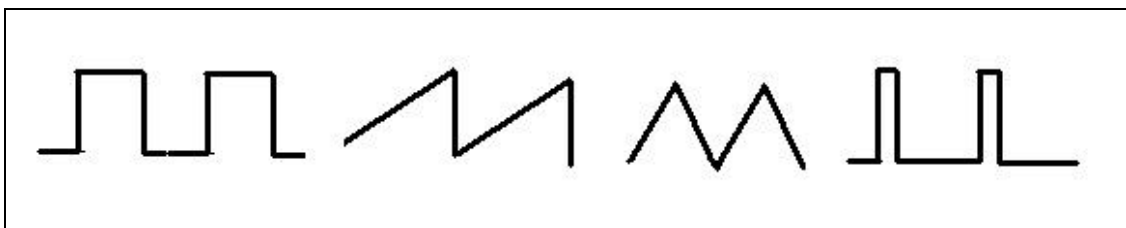


Abb. 3.7 Rechteck, Sägezahn, Dreieck, Puls

3.2. Tonhöhe und Frequenz

In der Musikpraxis gibt es merkwürdige Phänomene: So stimmt ein Schlagzeuger seine Toms sorgfältig in der Anordnung HiTom-MidTom-LowTom als Quint-Terz-Grundton, um hernach bedenkenlos in C-Dur *und* D-Dur zu spielen, ohne dass es irgendjemanden stört. Das menschliche Ohr ist offensichtlich in der Lage, die Abfolge „HiTom-MidTom-LowTom“ in unterschiedlichen Tonarten als „passenden“ Dreiklang zu hören. Ähnliches gilt für Instrumente wie Bass Drum, Glocken, Gongs usw.

Experiment 3. 1. „Hat das Schallsignal eine Tonhöhe?“

Es werden **Samples** (= digital gespeicherte Naturklänge) unterschiedlicher Percussionsinstrumente (z.B. die 64 Percussionsinstrumente einer PC-Soundcard in GM-Norm) gespielt und gefragt: „Hat dies Instrument eine Tonhöhe?“. – Sodann werden einzelne Instrumente beschleunigt oder verlangsamt abgespielt und gefragt: „ändert sich die Klangfarbe oder die Tonhöhe?“

Das Ergebnis dieses Hörexperiments ist:

1. Die Musikpraxis kennt offensichtlich drei Arten von Instrumenten:
 - solche mit genau fixierter Tonhöhe (Klavier, Trompete, Vibraphon),
 - solche mit unterschiedlich interpretierbarer Tonhöhe (Toms, Glockenspiele, Xylophone),
 - solche ohne Tonhöhe (Snare, Triangel, Becken).

2. Bei einigen Instrumenten gehen die (Hör-)Meinungen, ob das Instrument eine Tonhöhe hat oder nicht, auseinander. Die Frage „Hat dieser Klang eine Tonhöhe?“ wird beim Experiment so beantwortet, dass die HörerInnen versuchen, den Klang laut oder leise oder innerlich mitzusingen. Gelingt dies befriedigend, so antworten sie mit „ja“. Die Feststellung „Tonhöhe ja oder nein?“ wird also durch ein individuelles Vergleichsexperiment getroffen.

3. Relativ eindeutig ist die Feststellung, dass gewisse Instrumente beim „Transpoieren“ nur ihre Klangfarbe, andere Tonhöhe und Klangfarbe verändern. „Keine Tonhöhenänderung“ findet selbstverständlich dort statt, wo man auch „keine Tonhöhe“ hört – dennoch sind die Antworten hier eindeutiger als bei Punkt 2.

Experiment 3. 2. Beschreibung der Schwingungsstruktur

Wir sehen die Schwingungsbilder der in Experiment 3.1 verwendeten Klänge an einem **Speicheroszilloskop** oder am Bildschirm eines Computers an.

Ergebnis: Je deutlicher die Periode einer Schwingung ausgeprägt ist, umso klarer erkennt man beim Hören eine Tonhöhe. Alle Instrumente mit klarer Tonhöhe besitzen periodische Schwingungsbilder. Alle ohne Tonhöhe haben strikt unperiodische Schwingungsbilder. Die übrigen Fälle „unklarer“ oder „mehrdeutiger“ Tonhöhe können unklare oder mehrdeutige Periodizität zeigen, zum Beispiel:

- Quasiperiodizitäten (vgl. Abbildung 3.6),
- Periodizitäten, die nicht-periodischen Schwingungen „übergestülpt“ sind (vgl. Abb. 3.8 und 9.5),
- periodische Schwingungen, die so kurz sind, dass das Ohr keine Periodizität feststellen kann (was bei der Bass Drum und stimmhaften Plosivlauten wie „b“ oder „d“ der Fall ist, vgl. Abb. 9.2),
- Mischungen von periodischen und unperiodischen Anteilen.

Diese Aufstellung ist rein deskriptiv. Wir werden später sehen, welche Ursachen deutliche und undeutliche Tonhöhereindrücke haben können: Ursachen, die im Bau der Instrumente oder in der Obertonstruktur begründet sind. Dass HörerInnen bei einigen Klängen unterschiedlicher Meinung sein können, kann daran liegen, dass sich das „Ohrenmerk“ stärker auf die periodischen Anteile eines Klanges richten kann oder eben nicht.

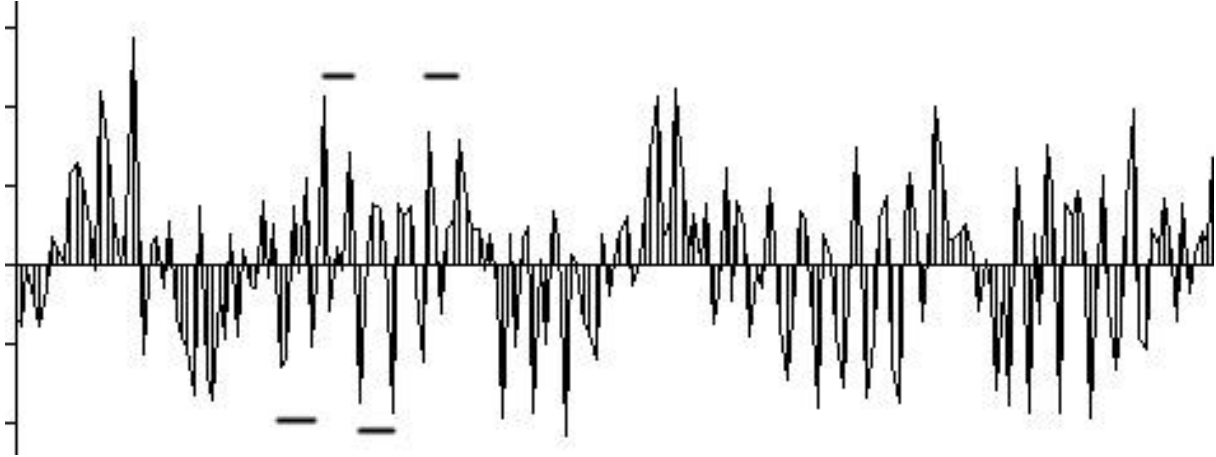


Abb. 3.8 Schwingungsbild eines Tambourins

Die Dimension „Tonhöhe“ spielt bekanntlich in der abendländischen Musik eine große Rolle. Eine klar erkennbare Tonhöhe ist die Voraussetzung für klar erkennbare Melodien und Harmonien. Instrumente mit undeutlichen Tonhöhen haben es daher im Laufe der abendländischen Musiktradition schwer gehabt. Das Erkennen von Tonhöhen ist nicht nur durch die Periodizität der den Höreindruck hervorrufenden Schwingungen, sondern auch durch kulturelle Lernleistungen bedingt. Kinder bezeichnen unterschiedlich hohe Töne oft als „hell - dunkel“ oder „spitz - stumpf“ und verquicken Klangfarbe und Tonhöhe. Dies ist keineswegs „falsch“! Und dennoch muss man in der Grundschule lernen, dass Töne tief und hoch und nicht hell und dunkel sind. - Worin besteht der „Witz“ der folgenden Abänderung eines bekannten Comic von Uli Stein?



Abb. 3.9 Missverständnis bei der Bezeichnung „hoch“ und „tief“

Das Witze-Schema Uli Steins in seinen beiden Bänden „Pisa-Alarm“ besteht darin, dass der Schüler aus seiner Sicht im Recht ist, der Lehrer jedoch etwas anderes meint oder verlangt. Das Pisa-Problem, so Uli Stein, bestehe nicht in der Dummheit der Schüler sondern in der „interkulturellen Kommunikation“ im Klassenzimmer.

Die Metaphorik „hoch - tief“ ist nicht in allen Sprachen des Abendlandes verbreitet: so bezeichnen die Engländer zu hoch oder zu tief gestimmte Instrumente mit „sharp - flat“. Zu hoch oder zu tief singen heißt im Italienischen *crescere* bzw. *calare*.

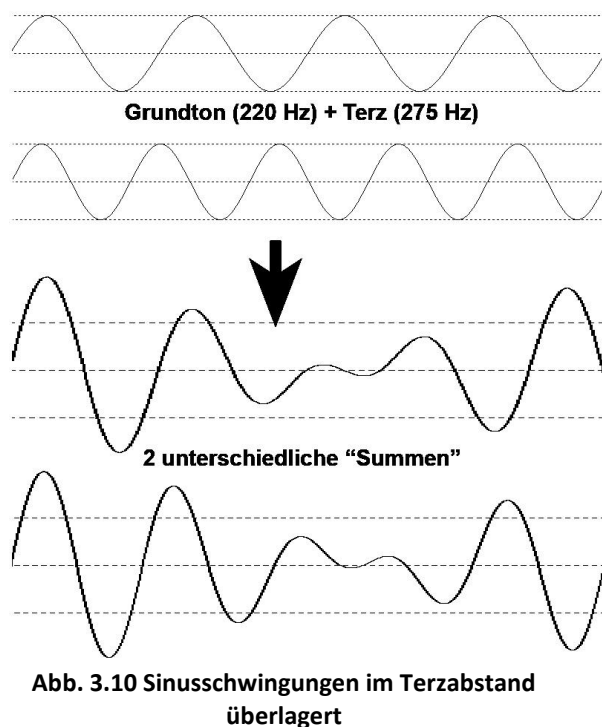
Nachbemerkung:

Nach DIN 1320 wird mit „Ton“ die durch eine Sinusschwingung ausgelöste Hörempfindung bezeichnet, also das, was MusikerInnen „**Sinuston**“ nennen. MusikerInnen bezeichnen mit „**Ton**“ jede Empfindung, die eine Tonhöhe hat, d.h. durch eine periodische Schwingung ausgelöst wird. Solch ein (umgangssprachlicher) „Ton“ soll nach DIN 1320 eigentlich als „Klang“ bezeichnet werden. Was MusikerInnen als „**Klang**“ bezeichnen, nennt DIN 1320 „Klanggemisch“.

3.3. Schwebungen

Spielt ein Instrument mehrere Töne oder spielen mehrere Instrumente zusammen, so überlagern sich im Instrument oder in der Luft die einzelnen Schwingungen zu einer Gesamtschwingung. Die Amplitude (z.B. die Abweichung des Luftdrucks vom mittleren Luftdruck) der Gesamtschwingung ist zu jedem Zeitpunkt die Summe der Amplituden aller Einzelschwingungen. In Abbildung 3.10 sind zwei Sinusschwingungen abgebildet, deren Frequenzen sich wie 4:5 verhalten (auf 4 Perioden des oberen Bildes kommen 5 des unteren). Musikalisch gesprochen liegt eine Durterz vor. Die Gesamtschwingung, die durch Addition der Amplituden zu jedem Zeitpunkt entsteht, zeigt das dritte Schwingungsbild. Setzt die Schwingung der Terz um eine Viertel Periode später ein, so ergibt sich das unterste Gesamtschwingungsbild.

Der Hörpsychologie gibt die Überlagerung von Schwingungen einige Rätsel auf:



- Wie erkennt der Mensch, dass bei der „Gesamtschwingung“ zwei unterschiedliche Sinustöne vorliegen?
- Warum merkt der Mensch den Unterschied zwischen dem vorletzten und letzten Schwingungsbild von Abbildung 3.10 nicht? (Mit anderen Worten: Warum spielt die Phasenlage der Einzelschwingungen keine Rolle?)

Und, wir greifen voraus: Warum erkennt der Mensch bisweilen derartige harmonische Sinustonüberlagerungen als „Klangfarbe“ eines *einigen* Tons?

Experiment 3. 3. Schwebungen

Wir überlagern zwei Sinusschwingungen, halten die Frequenz f_1 der einen Schwingung konstant und verändern die Frequenz f_2 der zweiten Schwingung kontinuierlich. Technisch verwenden wir das „Pitch-Bend“ eines Synthesizers, mit dem

üblicherweise glissando-Effekte erzielt werden. Der Computer spielt auf Synthesizer 1 den Bezugston der Frequenz f_1 und spielt auf Synthesizer 2 denselben Ton, dessen Frequenz f_2 mittels Pitch-Bend leicht verschoben wird. Am Bildschirm kann man die Werte von f_1 und f_2 in Hz ablesen.

Fall 1: Überlagerung in der Luft (d.h. Addition der akustischen Schwingungen) . Die beiden Töne erklingen aus zwei unterschiedlichen Lautsprechern.

Fall 2: Überlagerung im Instrument (d.h. Addition der elektrischen Schwingungen). Die summierten Schwingungen erklingen als Gesamton aus einem Lautsprecher (Abbildung 3.11).

Fall 3: Überlagerung im Gehirn des Menschen. Die beiden Töne werden stereophon getrennt über Kopfhörer an die beiden Ohren gesendet.

Ergebnis des Schwebungsexperiments für Fall 1: Der Höreindruck „zerfällt“ in drei recht unterschiedliche Bereiche.

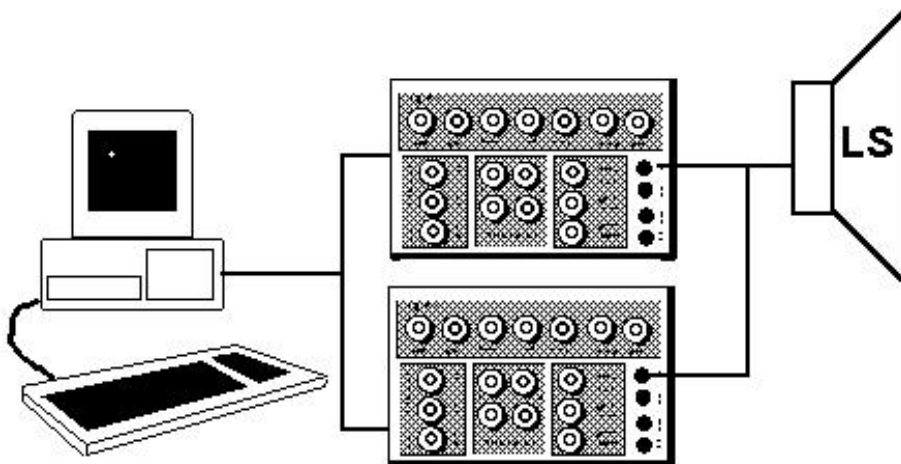


Abb. 3.11 Versuchsanordnung Fall 2

- Bereich 1: Bei geringen Frequenzunterschieden (bis ca. 10 Hz) hört man einen einzigen (Sinus-) Ton, dessen Amplitude sinusförmig schwankt. Dies ist der *Schwebungsbereich* im engen Sinn.
- Bereich 2: Bei etwas größeren Frequenzunterschieden hört man den Übergang zur Zweitonempfindung, wobei die („glatte“) Schwebung in ein raues Knattern übergeht.
- Bereich 3: Vergrößert sich der Frequenzunterschied, sodass die Sinustöne mehr als 20 Hz auseinander liegen, so wird die Zweiton-Empfindung glatt und die Rauigkeit geht in einen „Differenzton“ über. (Ein „Knattern“ von 32 Hz ist hörbar als ein 32 Hz-Ton.)

Bei Fall 2 kann ein Oszilloskop direkt an die Synthesizer angeschlossen und somit die elektrische Überlagerung gezeigt werden. Man hört alle drei Bereiche von Fall 1. Das Bild am Oszillografen ist das einer **amplitudenmodulierten Schwingung** (siehe Abbildung 3.12). Dies Bild ist unabhängig davon, in welchem Schwebungsbereich wir uns befinden. Es bleibt auch dann erhalten, wenn wir bereits zwei „glatte“ Einzeltöne hören. Das Bild sieht bei phasengleichen und gleichstarken Sinustönen, die um ca. 4% gegeneinander verstimmt sind, wie in Abbildung 3.12 aus.

Der Fall 3 („**binaurale Schwebungen**“) ist qualitativ von den Fällen 1 und 2 unterschieden. Bei fast allen Personen ändert sich die Schwebung qualitativ, sie verschwindet jedoch nicht. Der Ton scheint jetzt mit der Schwebungsfrequenz im Kopf zu rotieren. Diese Rotation ist als „Phasing“ bekannt und tritt sogar dann auf, wenn eine minimalistische Tonfolge binaural so dargeboten wird, dass die Tonfolge des einen Kanals um ein paar hundertstel Sekunden gegenüber derjenigen des anderen Kanals verschoben wird. Da im Nervensystem Töne nicht als Schwingungen sondern (digital) als Impulsfolgen kodiert sind, ist es nahe liegend, bei diesen „binauralen Schwebungen“, deren Existenz vor 50 Jahren noch geleugnet worden ist, von einer akustischen Täuschung zu sprechen. Der Mensch kennt diesen künstlichen Effekt nur von der Raumbewegung her, also projiziert er ihn auf eine solche...

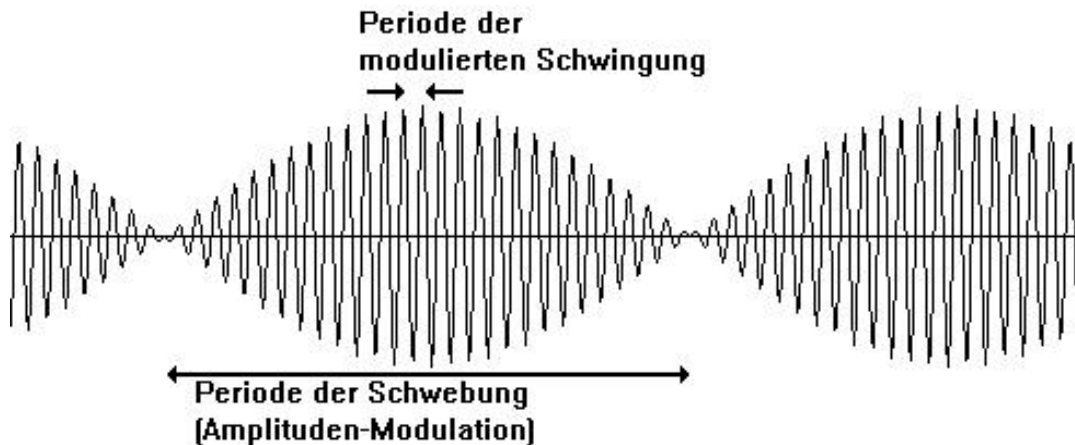


Abb. 3.12 Schwebungsbild: Amplitudenmodulation

In allen drei Fällen ist eindeutig festzustellen, dass die Schwebung im Bereich 1 (Frequenzdifferenz kleiner als 10 Hz) eine Frequenz hat, die genau der Differenz der beiden Sinustöne entspricht, also

$$f_{\text{Schwebung}} = f_1 - f_2$$

(falls f_1 größer als f_2) beträgt. Die Frequenz des gehörten Tons, der schwebt, ist

$$f_{\text{Träger}} = (f_1 + f_2)/2$$

(d.h. das arithmetische Mittel aus den beiden überlagernden Frequenzen).

Anwendung der Schwebungen:

In **Stimmgeräten** wird eine eintreffende Schwingung der Frequenz (f_2) einer im Stimmgerät einprogrammierten Schwingung der Frequenz (f_1) überlagert. Wenn die Schwebung verschwindet, sind beide Frequenzen gleich groß.

Schwebungen zwischen zwei **Blockflöten** führen dazu, dass diese Instrumente im Duo sehr penetrant „flattern“ können. Fröhliche Weihnacht!

Die Schwebungsfrequenz kann auch in den hörbaren Bereich fallen. Es treten in diesem Falle „Kombinationstöne“ auf. Beim Stimmen einer Geige hat Tartini entdeckt, dass bei einer reinen Quint dieser „Kombinationston“ mit einem der beiden zu stimmenden Saitentönen übereinstimmt. (Allerdings ist „Kombinationston“ eine allgemeinere Bezeichnung, Schwebungstöne sind die einfachsten „Kombinationstöne“.) Als Ersatz tiefer Orgelpfeifen können ebenfalls zwei höhere (und billigere) zur Schwebung gebracht werden.

In elektronischen Musikinstrumenten der 20er Jahre (Ondes Martenot, **Theremins Ätherophon** [siehe Abbildung 3.13], Magers Sphärophon) wurden zwei Hochfrequenzschwingungen von ca. 100 000 000 Hz (= 100 MHz = UKW-Wellenbereich) erzeugt. Die eine der beiden Schwingungen wurde ganz geringfügig durch Handbewegungen in der Luft verändert, zum Beispiel um 0,001% auf 100,001 MHz. Wurden beide hochfrequente Schwingungen einander überlagert, ergab sich eine Schwebungsfrequenz im hörbaren Bereich. Im Beispiel: 100 001 000 Hz - 100 000 000 Hz = 1000 Hz.

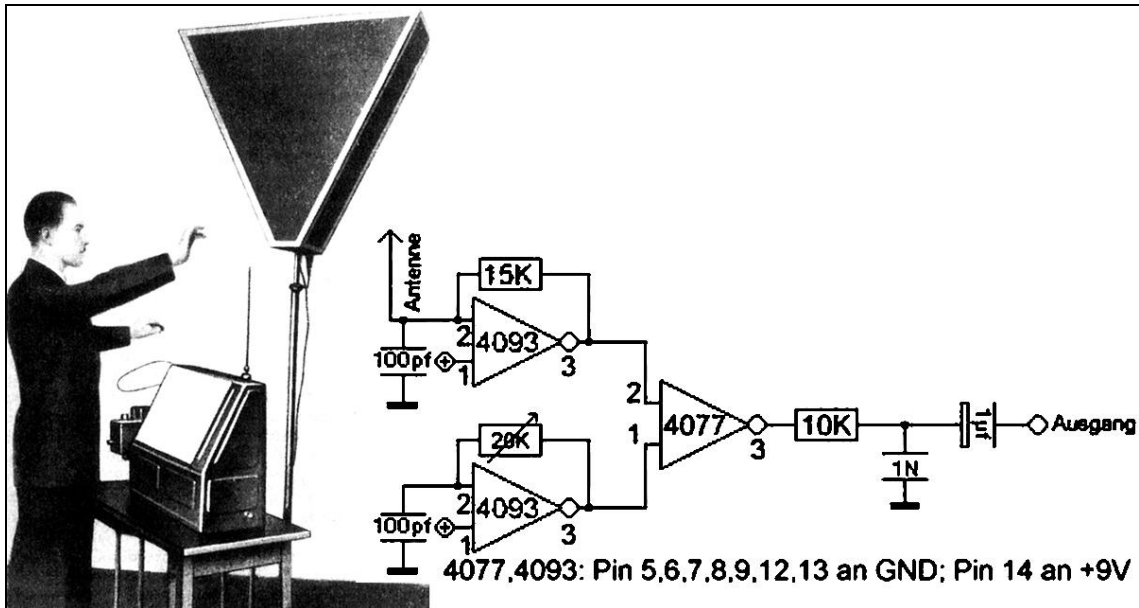


Abb. 3.13 Hinter dem Theremin (links dessen Erfinder) verbirgt sich eine einfache elektronische Schaltung, die man mit wenigen Bauteilen eines Elektronikshops nachahmen kann

Mathematisch sind Schwebungen leicht erklärbar: Addiert man zwei Sinusfunktionen unterschiedlicher Frequenz, so erhält man nach dem „Additionstheorem“ der Trigonometrie eine einzige, amplitudenmodulierte Sinusfunktion.

Die Schwingungen haben die Gleichungen $Y_1 = A \sin(2\pi f_1 t)$ und $Y_2 = A \sin(2\pi f_2 t)$. $Y_1 + Y_2 = A(\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)) = 2A \cos(\pi(f_1 - f_2)t) \times \sin(\pi(f_1 + f_2)t)$. [Additionstheorem: $\sin(\alpha) + \sin(\beta) = 2\cos((\alpha - \beta)/2) \times \sin((\alpha + \beta)/2)$.] Dies ist eine Sinusschwingung der Frequenz $(f_1 + f_2)/2$, deren Amplitude mit der Frequenz $(f_1 - f_2)/2$ cosinusförmig schwankt.

Das Oszilloskop gibt in Fall 2 das mathematische „Additionstheorem“ wieder, es macht keinen Unterschied zwischen Schwebungen kleiner oder großer Frequenz. Die Mathematik kann daher nicht erklären, warum der Mensch einmal die Schwebungen mit „Mittelton“, das andere Mal aber zwei getrennte Töne hört. Dies ist Aufgabe der „Hörtheorien“.

3.4. Die Tonhöhenunterscheidungsfähigkeit des Ohrs

Gleichzeitig erklingende und leicht gegeneinander verstimmete Töne oder Intervalle erkennt man an den Schwebungen. Wie steht es aber mit hintereinander erklingenden Tönen? Zur Feinuntersuchung verwenden wir das Pitch-Bend eines Synthesizers oder einer Soundcard. Pitch-Bend unterteilt den temperierten Ganzton in 64 Schritte. Dies entspricht einem Frequenzverhältnis (Intervall) von ca. 0,3827%. Wir nennen ein solches Intervall im folgenden „1 Bend“.

1 Bend = 0,3827% ist die „Default“- oder Standardeinstellung von GM-Soundcards. Meist lässt sich Pitch-Bend noch feiner (kleiner) einstellen. Die Standardeinstellung rührt daher, dass mit dem Bend-Rad am Keyboard aus der Mittelstellung heraus nach oben und unten ein glissando von maximal einem Ganzton möglich sein soll. Dies reicht für übliche diatonische Skalen ja aus. Der maximale Umfang der halben Radbewegung kann aber in der Regel auf bis zu 2 Oktaven vergrößert (Bend also vergrößert) oder auf einen Halbton verkleinert (Bend also verfeinert) werden. Im letztgenannten Fall

wäre 1 Bend = 0,19135%. Hi-End-Cards oder -Synthesizer unterteilen die gesamte Bend-Rad-Bewegung nicht in 128, sondern $128 \times 128 = 16\,384$ Teile. Dann wird 1 Bend = 0,00299%.

Experiment 3.4. Mini-Intervalle

- Wir spielen eine Abfolge von Sinustönen, deren Frequenz sich um 1 Bend voneinander unterscheiden. Nach 64 Tönen haben wir einen Ganzton erreicht.
- Wir spielen Zweitonintervalle (z.B. Quinten) hintereinander, deren Größe um jeweils 1 Bend zunimmt.
- Wir spielen einen Sinuston, dessen Frequenz um 1, 2, 3 usw. Bends moduliert wird. Diese Frequenzmodulation ist ein echtes „Vibrato“ im Gegensatz zur Amplitudenmodulation der Schwebung. Die Frequenzänderung findet 1 mal pro sec, d.h. mit 1 Hz statt.

Außer im Falle des Vibratos scheinen die Bends unterhalb der Hörbarkeitsgrenze zu liegen. Gefühlsmäßig nimmt man noch ein Ansteigen wahr, rational jedoch lässt sich dies nicht feststellen.

Experiment 3.4. Quantitativer Teil

Teil 1: Es werden hintereinander zwei Instrumentaltöne (z.B. Klavier) gespielt, die um wenige Bends gegeneinander verstimmt sind. Es soll festgestellt werden, ob der 2. Ton tiefer, gleich oder höher als der 1. Ton ist.

Teil 2: Es werden hintereinander je zwei um wenige Bends gegeneinander verstimmte Intervalle gespielt. Es soll festgestellt werden, ob das 2. Intervall kleiner, gleich oder größer als das 1. Intervall ist. Das Experiment wird für unterschiedlich hohe und laute Töne durchgeführt:

- erster Ton „leise“ und $f = 440$ Hz,
- erster Ton „leise“ und $f = 1720$ Hz,
- erster Ton „laut“ und $f = 440$ Hz.

Mit Experimenten dieser Art kann empirisch festgestellt werden, wann die HörerInnen nur raten (d.h. die Tonhöhenunterschiede nicht bemerken) und ab wann eine signifikante Menge von HörerInnen dieselbe (richtige) Aussage trifft. Die Stelle, an der die richtigen Aussagen signifikant zunehmen, wird als Schwellenwert Pitch-JND („just noticeable difference of pitch“) bezeichnet. Es ist der Wert, bei dem ein Tonhöhenunterschied gerade noch wahrgenommen werden kann, es ist die Quanteneinheit der Tonhöhenunterscheidungsfähigkeit des menschlichen Ohrs. Für diese Einheit kann festgestellt werden:

- Die Pitch-JND ist von der Tonhöhe und Lautstärke abhängig: sie ist bei ca. 1000 Hz am kleinsten, ist bei 1720 Hz kleiner als bei 440 Hz; sie ist bei lauterem Tönen kleiner als bei leiseren.
- Die Pitch-JND liegt im optimalen 1000 Hz-Bereich bei ca. 0,5%. Bei einigen 100 Versuchen mit MusikstudentInnen hat sich ein Schwellenwert von 1 bis 2 Bend herausgestellt.

Die Tatsache, dass die Pitch-JND bei ca. 0,5% liegt, bedeutet, dass man die Stufen des Pitch-Bend-Rades am Synthesizer bzw. an der Soundcard (0,38%) gerade nicht mehr erkennt, dass also die stufenförmige Bewegung eines Bend-Rades als kontinuierliches glissando erlebt wird. Dies stimmt gut mit den Erfahrungen überein. - Ergebnisse von Untersuchungen nach der „Vibrato“-Methode von Eberhard Zwicker 1982 ergeben ein noch differenzierteres Bild:

- Bis ca. 500 Hz ist die Pitch-JND konstant 3,6 Hz (also nicht als Intervall in Prozent ausdrückbar).
- Ab ca. 1500 Hz ist die Pitch-JND ziemlich konstant 0,71%.

- Bei 1000 Hz ist die Pitch-JND 5 Hz entsprechend 0,5%.

Dies kann bedeuten, dass der Mensch zwei „Strategien“ beim Tonhöhenunterscheiden hat, eine für niedrige, eine für höhere Frequenzen. Diese Arbeitsteilung ist in der Tat neurophysiologisch zu finden. Dennoch stellen die sehr kleinen Pitch-JND-Werte eine Herausforderung an die Hörpsychologie dar: Wie schafft es das kleine und mit Sinneszellen grob bestückte Ohr, solch feine Unterschiede wahrzunehmen?

3.5. Hörtheorien

Die Antwort auf diese Fragen versuchen die sog. „Hörtheorien“ zu geben, die sich seit Mitte des 19. Jahrhunderts immer weiter verfeinert haben. Zunächst zur „**Anatomie**“ des Ohres. Wenn der Schall wie in Abbildung 2.5 dargestellt, aufs Trommelfell trifft, dieses in Bewegung setzt und diese Bewegungen dann über die Knöchelchen ans ovale Fenster des Innenohrs, das wie eine Schnecke aussieht, gelangen, dann ist das Terrain der Hörtheorien erreicht. Das Innenohr ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, die wie jede Flüssigkeit (Stichwort hydraulisches Bremsystem beim Auto) weitgehend nicht komprimierbar ist. Das ist ein großer Unterschied zur Luft!

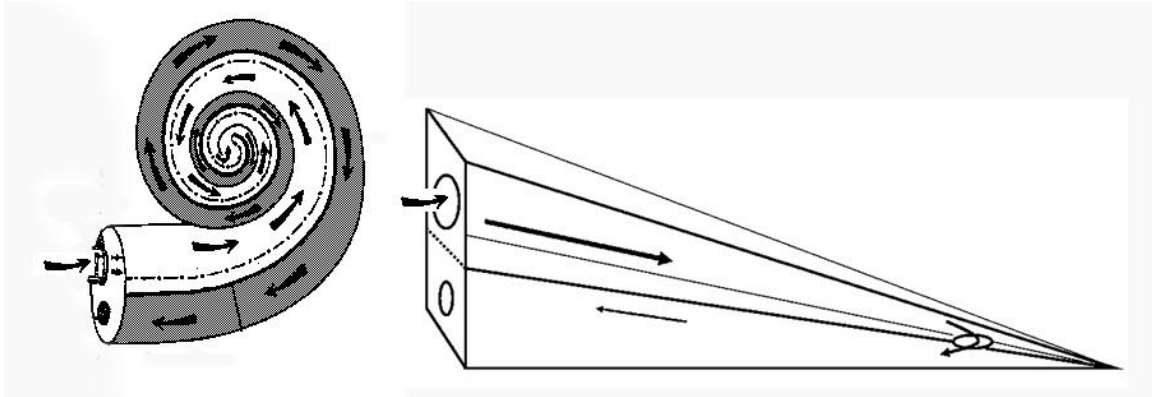


Abb. 3.14 Innenohr schematisch (engerollt und aufgerollt)

Die Länge der (aufgerollten) Schnecke ist ungefähr 3,2 cm. In der Mitte ist sie unterteilt durch das Corti'sche Organ, das aus diversen Membranen besteht, zwischen denen sich Härchen unterschiedlicher Stärke befinden, an denen die Hörnerven sitzen. Mechanisches Basis des Hörvorgangs ist, dass die Flüssigkeit im Innenohr bewegt wird (Pfeilrichtung) und dabei die Härchen „irgendwie“ in Bewegung geraten, was die Nerven reizt. Über die Details dieses Vorganges gibt es folgende Theorien:

1. Orts- und Wanderwellentheorie im Innenohr

Nach der Ortstheorie ist die Frequenzbestimmung eine Frage des Orts maximaler Erregung der Basilarmembran. Bei der Wanderwellentheorie kommen weitere Faktoren hinzu, die eine raffinierte (aber erklärbare) Arbeitsweise des Gehörnervensystems implizieren. Der eintreffende Schall löst eine Wanderwelle aus, die ein raum-zeitliches Erregungsmuster entlang der Basilarmembran erzeugt und dabei die Haare (unterschiedlich stark und zeitlich versetzt) bewegt. Diese Wanderwelle gelangt nicht bis ans Ende des Innenohrs, weil sie unterwegs „absorbiert“ wird. Folgende Parameter werden von den Sinneszellen „abgegriffen“ und zwecks Weiterverarbeitung ans Nervensystem geleitet:

- Ort der maximalen Erregung der Basilarmembran (Ortstheorie nach **Helmholtz**).
- Ort, an dem die Wanderwelle durch Absorption zum Erliegen kommt (Ortstheorie nach **Békésy**).
- Wellengeschwindigkeit entlang der Basilarmembran (Sinneszellen werden hintereinander gereizt). Physikalisch: Wellengeschwindigkeit ist frequenzabhängig.

- Erregungsstärke und Größe der erregten Fläche (ist nicht nur von der Lautstärke abhängig, sondern z.B. auch vom Absorptionsvermögen der Innenohrflüssigkeit). Physikalisch: Absorption ist frequenzabhängig.

Die Orts- und Wanderwellentheorie wird durch folgende Modell-Bilder veranschaulicht:

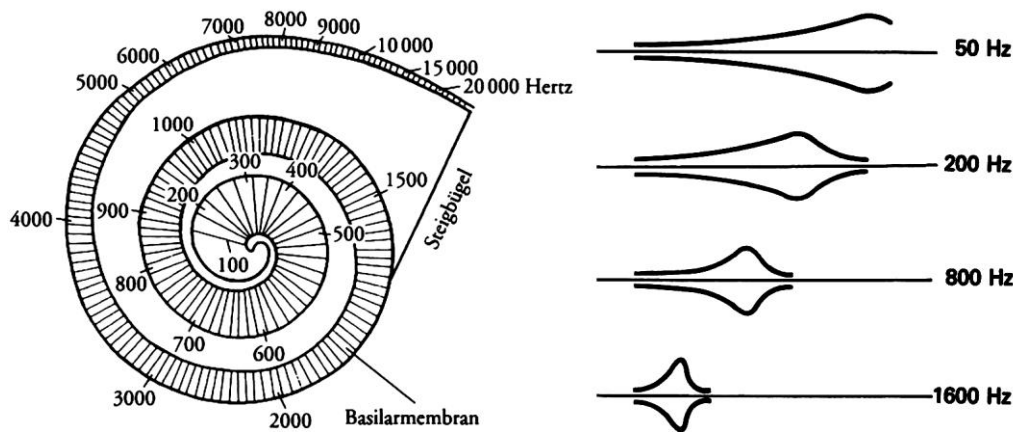


Abb. 3.15 Veranschaulichung der Orts- und Wanderwellentheorie

2. Kodierung durch verschiedene Neuronen

Physiologische Basis: In den Neuronen können Impulse unterschiedlicher Frequenz abgefeuert werden. Neben einer statistischen Grunderregung gibt es signifikante Impuls-Frequenzen. Folgende Parameter könnten eine Information über Frequenzen ans Gehirn weiterleiten:

- Änderung der Neuronenimpulsfrequenz („**Frequenztheorie**“).
- Arbeitsteilung mehrerer Neuronen bei der Kodierung höherfrequenter Schwingungen („**Volley-Prinzip**“).
- Anzahl und Ort der erregten Neuronen/ der nicht erregten Neuronen („**Ortstheorie**“).
- Faserlänge („Empfindlichkeit“) oder frequenzabhängige Reizschwellenwerte der Neuronen (sog. „**Bestschalltheorie**“).

Die beiden Theorien 1 und 2 können „arbeitsteilig“ eingesetzt werden. Für niedrige Frequenzen kann eher Theorie 2, für hohe Frequenzen Theorie 1 eingesetzt werden.

3. Resonanz und Beweglichkeit der Haarzellen

In jüngster Zeit wird eine Theorie diskutiert, wonach die Haarzellen je nach Beweglichkeit in Eigenschwingung (Resonanz) geraten und dadurch auf die Basilarmembran und deren Schwingung rückwirken. Die Beweglichkeit der Haarzellen und damit die Resonanzfähigkeit ist vom psychischen Zustand (Stress!) von endogenen oder exogenen Drogen, von der akustischen Belastung usw. abhängig. Die Resonanzfrequenz ist sehr genau, während der Ort maximaler Erregung ungenau ist.

4. Verarbeitung durch die synaptische Struktur der Nervenleitung

Die Nervenfasern (Neuronen) sind an „Synapsen“ miteinander verbunden. Diese Synapsen sind als logische Netze konstruiert und arbeiten (via Botenstoffe, Transmitter) chemisch abhängig. Es wird festgestellt, dass synaptische Schaltungen beispielsweise den Ort der Basilarmembran „fokussieren“

und damit die Frequenzbestimmung präzisieren. Die synaptische Struktur der Nerven zwischen Innenohr und Gehirn ist in mehreren Stufen organisiert. So ist zum Beispiel jene Stufe wichtig, auf der die Nerven der beiden Ohren miteinander verbunden sind, weil frühestens hier ein Richtungshören möglich ist.

Die hier zitierten Hörtheorien geben auf die Fragen nach dem Schwebungsphänomen (Abschnitt 3.3) und nach dem guten Auflösungsvermögen (Pitch-JND) teilweise Auskunft. Wir nehmen noch ein weiteres Phänomen hinzu, das das Ohr auch qualitativ vom Auge unterscheidet: das (geschulte) Ohr kann sehr genau Intervalle hören, also Frequenzverhältnisse „messen“, während das Auge nicht in der Lage ist, Längen- oder Raumverhältnisse exakt zu messen. Alle Hörtheorien, die Aussagen darüber machen, dass eine frequenzabhängige Verarbeitung oder Zubereitung des akustischen Signals im Ohr stattfindet, helfen zu erklären, warum ein zusammengesetzter Klang im Ohr quasi wieder zerlegt werden kann. Für die Ortstheorien spricht, dass dabei Phasenunterschiede keine Rolle spielen. Das Schwebungsphänomen besagt, dass erst ab ca. 10 Hz unterschiedliche und voneinander unabhängige Innenohrbereiche Frequenzunterschiede registrieren können.

Das gute Auflösungsvermögen des Ohrs ist durch die Menge der Sinneszellen und die Mechanik des Innenohrs nicht erklärbar, denn es gibt 12 bis 19 000 „innere“ und 3 500 „äußere“ Härchen. In dem 2-Oktavenraum zwischen a^1 und a^3 gibt es ca. 200 gerade noch unterscheidbare Tonhöhenstufen (JND's) und etwa 1350 Härchen, sodass für jede JND ungefähr 7 Härchen „zuständig“ wären – ein absolut undenkbares Phänomen bei einem derart „wogenden“ Haarenfeld. Erst durch die „Frequenztheorie“, die „Resonanztheorie“ und/oder die synaptische Präzisierung des akustischen Signals wird diese Fähigkeit tendenziell erklärbar.

3.6. Der Verdeckungseffekt

Der gewisse Grundkonsens der Hörtheorien kann einige Effekte erklären, die für die Musik wichtig sind. Dazu gehört der Verdeckungseffekt, wonach man ein Schallsignal dann nicht mehr hören kann, wenn ein anderes intensiver ist und „in seiner Nähe“ liegt.

Experiment 3.5. Verdeckungseffekt

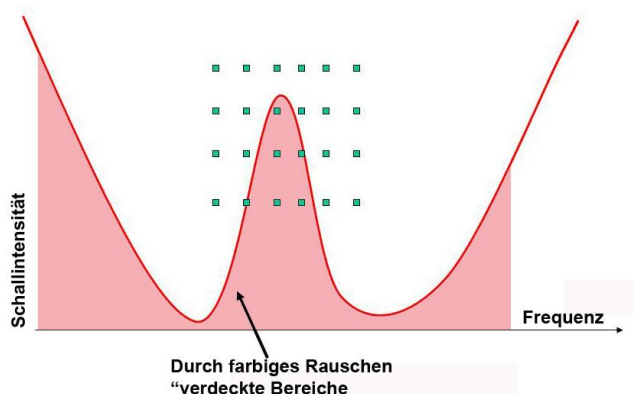


Abb. 3.16 Experiment zum Verdeckungseffekt

Ein Synthesizer erzeugt ein schmalbandiges Rauschen im Bereich um 1000 Hz (grau schraffiert in der Abbildung). Es werden Sinustöne von gleicher Schallintensität und unterschiedlicher Frequenz gespielt. In Abbildung 3.15 stehen die kleinen Quadrate für je einen Sinuston. - Ergebnis des Hörexperiments ist, dass die Sinustöne innerhalb des Bereichs des Bandrauschens nicht hörbar sind. Das Rauschen „verdeckt“ den Sinuston. Erklärt wird der Effekt dadurch,

dass das „farbige Rauschen“ (= des verdeckende Schallsignal) jenen Bereich des Innenohrs betäubt („beschäftigt“), in dem der Sinuston (= das verdeckte Schallsignal) gehört werden müsste.

Der Verdeckungseffekt ist in der musikalischen Praxis nicht unwichtig:

Der Verdeckungseffekt ist in der musikalischen Praxis nicht unwichtig:

Spielen **zwei Musikinstrumente** gleichzeitig, so kann das eine das andere so verdecken, dass letzteres nicht hörbar ist. Verdeckt wird dann, wenn beide Instrumente im gleichen Frequenzbereich operieren, soll andererseits eine SängerIn ein Opernorchester übertönen, so muss die Stimme der SängerIn in einem Frequenzbereich „stark“ sein, in dem das Orchester „schwach“ ist (Abbildung 3.17). Ist dies nicht der Fall, ist die SängerIn unhörbar. In der Tat trainieren OpernsängerInnen sog. **Formantbereiche**, die bei den Orchesterinstrumenten nur schwach ausgeprägt sind. Dasselbe gilt für Soloinstrumente in einem Sinfonieorchester.

Bei der Datenreduktion durch „mp3“ wird der Verdeckungseffekt ebenfalls ausgenutzt. Kurz gesagt: alles, was ohnedies nicht gehört weil verdeckt wird, wird einfach weggelassen. (Die Kunst ist aber, wie dies technisch geschehen soll!) Siehe hierzu ausführlich Kapitel 4.3!

Der Pavarotti-Effekt

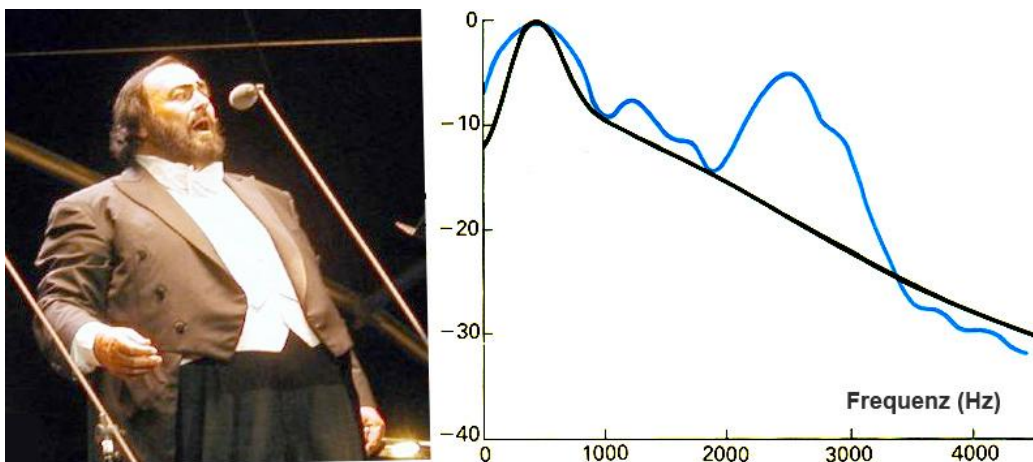


Abb. 3.17 Der Pavarotti-Effekt (nach John R. Pierce): Was bedeuten die Kurven im rechten Diagramm? Welche Art Stimmbildung hat Pavarotti genossen?

Kapitel 4: Analog und digital

Digitalisierung ist die Eingrenzung („Abbildung“) eines „von Natur aus“ unendlichen und kontinuierlichen („analogen“) Materials auf eine endliche und somit diskontinuierliche Menge. Das gebräuchlichste Beispiel ist der an sich kontinuierliche Tonhöhenvorrat der menschlichen Stimme und die „Abbildung“ dieses Kontinuums auf 12 Töne pro Oktav im temperierten Tonsystem. So kann die menschliche Stimme als „analog“, das temperierte Klavier als „digital“ bezeichnet werden. Tonsysteme, wie sie in Kapitel 8 behandelt werden, sind spezifische „Digitalisierungen“ von Musik. Diese Art der Digitalisierung ist in der Musikpraxis fest verankert, auch wenn es schöne Abweichungen gibt: die Blue Note, das Glissando eines Zigeunergeigers, die Stimmmodulationen einer arabischen Sängerin usw. Die in der Musikpraxis verankerte Digitalisierung ist erlernbar und hörbar - ganz im Gegensatz zur Digitalisierung von Musik, wie sie das digitale Zeitalter kennt.

Die Digitalisierung von Musik im digitalen Zeitalter ist im Grund ein Zwischenstadium, ein Problem der Musikspeicherung und Übertragung. Die Musik selbst ist nach wie vor analog, weil das menschliche Trommelfell ausschließlich analoge Schallwellen verarbeiten kann. Im strengen Sinne gibt es keine digitale Musik, sondern nur Musik, die einen digitalen Speicherungs- und Übertragungsprozess durchlaufen hat. Das folgende Schaubild zeigt den Prozess der Analog-Digitalwandlung, wie er für das digitale Zeitalter charakteristisch ist.

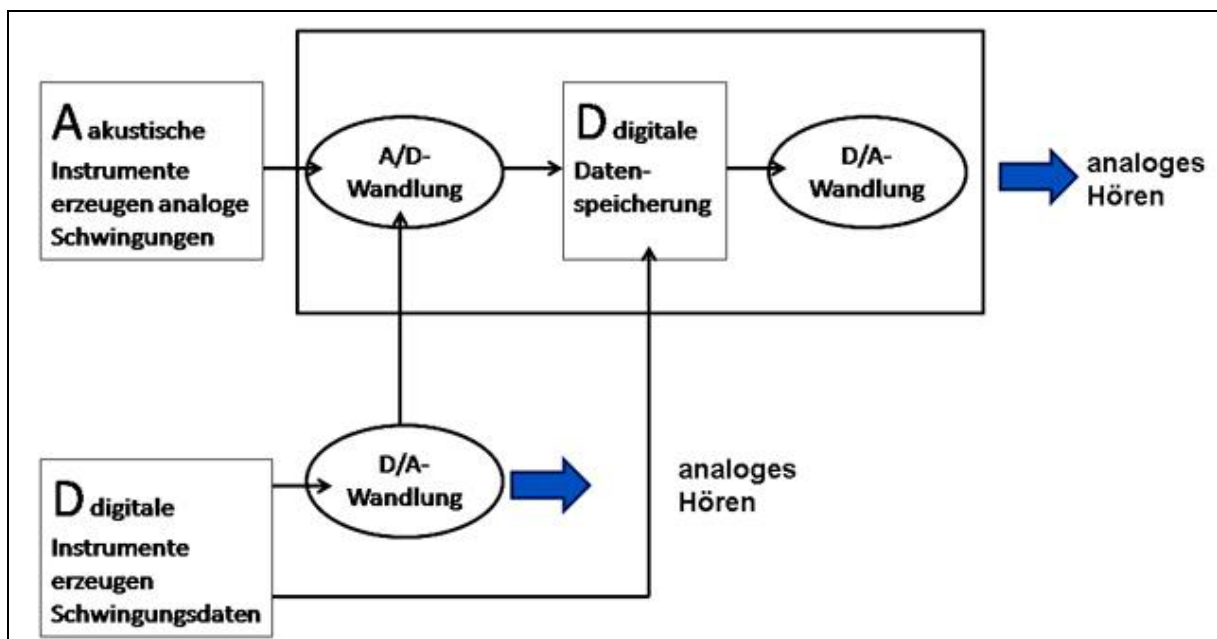


Abb. 4.1 Stationen der digitalen Musikspeicherung

A→A/D. „Akustische Instrumente“ erzeugen analoge Schwingungen, die mittels analoger Mikrofone einem Wandler (A/D-Wandler) zugeführt werden.

D. Nur „digitale elektronische Instrumente“ können Klänge rein digital erzeugen. Auch eine PC-Soundcard tut dies, allerdings hat sie (neben der rein digitalen FM-Synthese) in der Regel „gesampelte“ Analogklänge „an Bord“ (= digital gespeicherte Klänge analoger Instrumente).

D→D/A. Wenn man die Klänge eines digital-elektronischen Instruments hören oder aufnehmen will, so muss man den digital erzeugten Klang erst „analogisieren“. Eines der ersten digital-elektronischen

Instrumente, der Synthesizer „Yamaha DX 7“, hatte wie alle seine Nachfolger einen analogen Ausgang, an den dann ein (analoger) Kopfhörer oder Lautsprecher angeschlossen wurde.

A/D→D. Der analog erzeugte oder rückverwandelte Klang muss „digitalisiert“ werden (A/D-Wandlung). Jetzt kann ein Computer ihn verarbeiten, er kann auf HDD, CD, DV oder DVD gespeichert werden. Er kann ein digitales Mischpult durchlaufen, ein Hallgerät usw.

D→D. Es gibt einen „Seitenzweig“ bei solchen digital-elektronischen Instrumenten, die einen „Digitalausgang“ haben (was zu Zeiten des „DX 7“ noch nicht möglich war). Hier kann der Analogisierungsschritt D→A übersprungen und der digitale Klang sofort digital gespeichert werden.

D→D/A→A. Am Ende des ganzen Prozesses steht der Hörer mit seinem (analogen) Trommelfell. Um das in Schwingung zu versetzen, müssen (analoge) Schallwellen erzeugt werden. Dies machen Lautsprecher, egal ob sie analog oder digital arbeiten (D/A-Wandlung).

Beim *CD-Produktionsprozess* kann die Digitalisierung mehr oder weniger früh einsetzen. So heißen die Abkürzungen auf dem Cover einer CD:

DDD = Digitale Aufnahme, digitale Abmischung, digitales Mastering (CD-Pressung). Dies ist bei Neuproduktionen meist der Fall.

ADD = Analoge Aufnahme, digitale Abmischung, digitales Mastering. Dies ist der Fall, wenn eine alte analoge Produktion neu abgemischt werden kann und dies digital geschieht.

AAD = Analoge Aufnahme, analoge Abmischung, digitales Mastering. Dies ist der Fall, wenn eine analog produzierte Schallplatte (LP) neu als CD herausgebracht und dabei das alte (analoge) Masterband verwendet wird.

4.1 . Analoge Speicherung von Musik

Unter „analoge Speicherung“ von Musik versteht man jede Speicherung, bei der versucht wird, die originale Schwingung, die eine Schallwelle am Trommelfell erzeugt, so gut und getreu wie möglich fest zu halten. Stets muss dabei ein zeitliches Hintereinander in ein räumliches Nebeneinander verwandelt werden. Die analoge Speicherung ist historisch gesehen relativ jung, während die digitale Speicherung sehr alt ist: man denke an Drehorgeln, bei denen eine von Hand in Bewegung gesetzte „Lochkarte“ die Töne auslöst. Eines der bekanntesten digitalen Musikinstrumente ist hat Athanasius Kirchner 1650 in der „Musurgia Universalis“ abgebildet: eine Art „Stiiftwalze“ bedient Pfeifen einer (Wasser-)Orgel und tanzende Tiere.

Es gibt drei heute noch gebräuchliche analoge Speicherungsverfahren:

- die Speicherung mittels fotografischer Streifen, die „analog“ belichtet wurden (Lichttonverfahren im Kino, Abbildung 4.3 – Bemerkung: es gibt auch digitalen Lichtton, wo die fotografische Schwärzung beispielsweise mit dem PCM-Code [siehe unten] vonstatten ging),
- die Speicherung mittels Schallplatten, bei denen in einen Festkörper (z.B. Vinyl) Rillen so eingraviert wurden, dass sie kleinen Analogschwingungen gleichen. Die Abspielnadel schwingt, wenn sich diese Rille an ihr entlang bewegt, so, wie die Membran des Mikrofons es getan hat, als die Platte aufgenommen worden ist (Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite),

- die Speicherung mittels eines in eine Gelatinemasse eingelegten magnetisierbaren Pulvers. Dies Verfahren benutzen die herkömmlichen Tonbandgeräte, die MC's und die Musikspuren der VHS-Bänder (Abbildung 4.3).

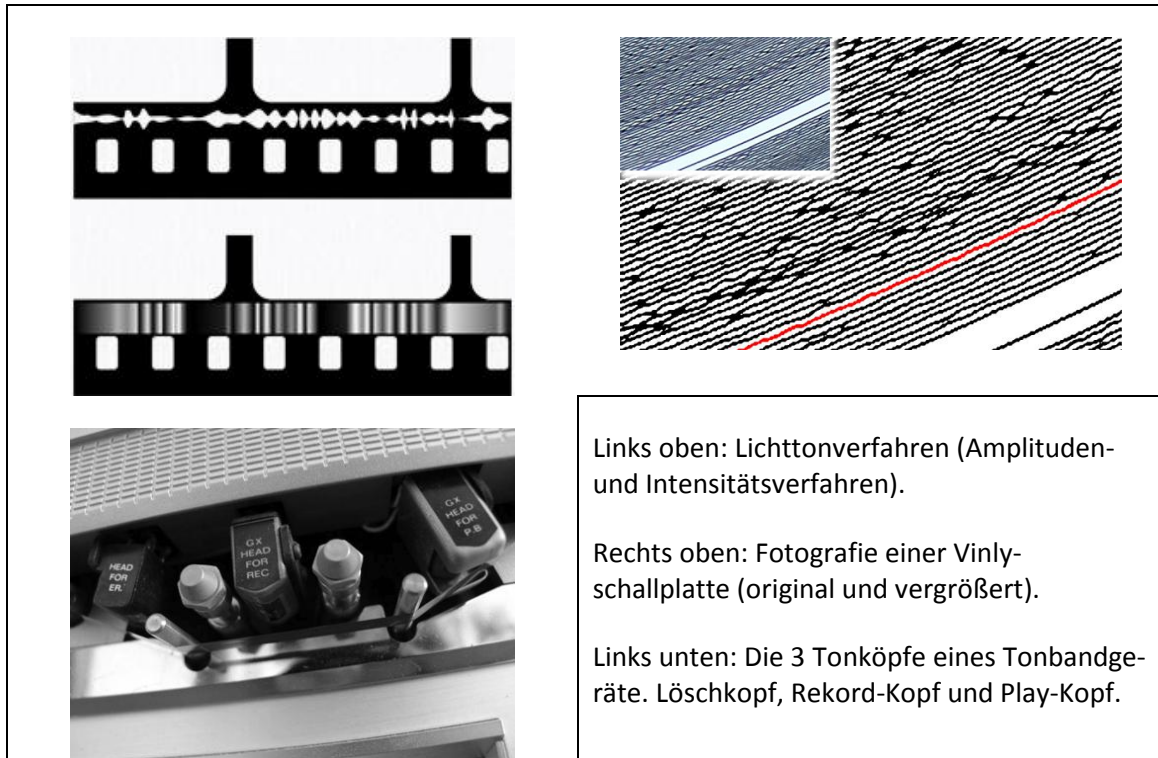


Abb. 4.3 Analoge Musikspeicherung

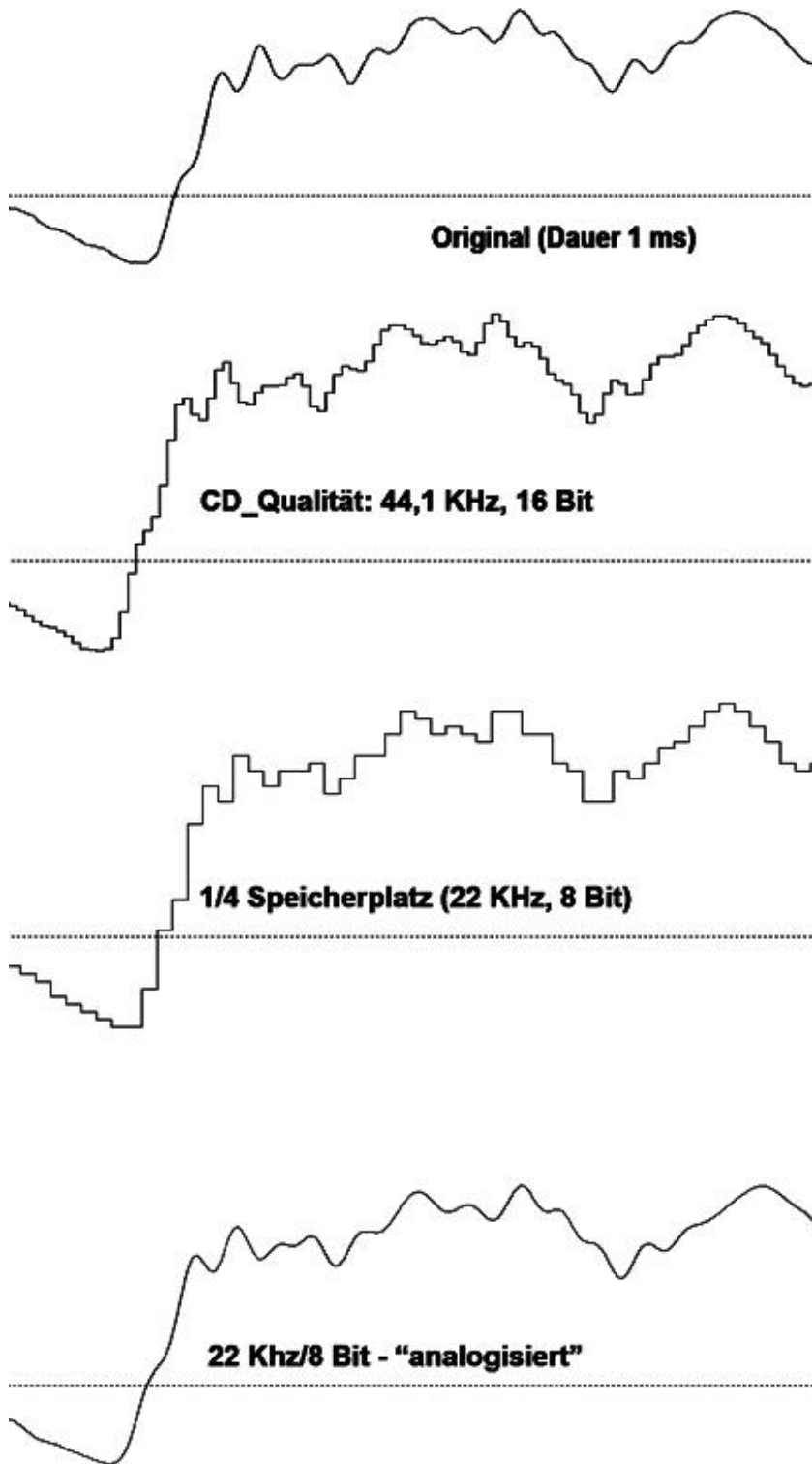
Die *Nachteile* der analogen Musikspeicherung sind, dass sich das Material abnutzt (d.h. ein „Rauschen“ entsteht) und dass die Aufzeichnung nie 1:1 passiert. Die realen Amplitudenschwankungen sind größer und schneller als das Medium „abbilden“ kann. Dies bedeutet Verlust der Dynamik und des Frequenzganges – auch ohne Rauschen und Beschädigung. Nach heutiger Erkenntnis und Erfahrung ist jedoch die analoge Datenspeicherung *sicherer* als die digitale. Digitalen Datenträgern wird eine Lebenszeit von 3 Jahren garantiert, Optimisten gehen davon aus, dass auch 30 Jahre Haltbarkeit möglich sind. Der Hersteller der robuster ZIP-Disketten hat als Einziger eine Garantie von 10 Jahren Haltbarkeit gegeben. Tonbänder, VHS-Cassetten oder MC's haben die vergangenen Jahrzehnte bisher zu 95% gut überstanden. Und, geringe Fehler führen nicht zum Totalausfall der Wiedergabe! Ein hörbares Kratzgeräusch ist erträglicher als ein CD-Laufwerk, das eine angekratzte CD gar nicht mehr erkennt.

4.2. Digitalisierung akustischer Schwingungen

Durch die Digitalisierung wird Musik der Speicherung und Verarbeitung durch Computer zugänglich gemacht. Da Computer nur Zahlenfolgen speichern und verarbeiten können - dies allerdings sehr schnell und genau - muss die akustische Schwingung in eine dem Computer zugängliche Zahlenfolge verwandelt werden. Dies ist die A/D-Wandlung. Am Ende der digitalen Verarbeitung der Musik muss eine Rückverwandlung in ein analoges Signal stattfinden. Dies ist die D/A-Wandlung.

Die **A/D-Wandlung** erfolgt so, dass in schneller Abfolge der Wert der (analogen) Schwingungsamplitude bestimmt und dieser Wert als Zahl ausgegeben und/oder gespeichert wird. Es ist klar, dass die

Digitalisierung dem analogen Original umso näher kommt, je häufiger ein Wert bestimmt und gespeichert wird. Diese Häufigkeit heißt **Sampling-Rate** (von „sample“ = Stichprobe) und wird als **(Abtast-) Frequenz** angegeben. Die handelsüblichen Audio-CD's verwenden eine Sampling-Rate von 44 100 Werten pro Sekunde, also einer Abtastfrequenz von 44 100 Hz. Bei der Studioproduktion verwendet man höhere Abtastfrequenzen, z.B. 96 000 Hz oder 192 000 Hz. Videos verwenden überwiegend 48 000 Hz.



Die Abfolge von Amplitudenwerten ist dieselbe, ob eine „glatte“ Kurve abgetastet wird oder Treppenkurven, wie sie die Abbildungen 4.4 zeigen. Der A/D-Wandler erzeugt mit dem „Sample & Hold“-Mechanismus eine Treppenfunktion der Spannung, der Computer speichert aber nur Zahlen. Ein Computer kann zwischen einer „glatten“ Kurve und einer Treppenkurve nicht unterscheiden.

Die musikalische Bedeutung von Abtastfrequenz („Sampling-Rate“) ist folgende:

Ist die *Abtastfrequenz* größer, so lassen sich feinere Frequenzunterschiede digital festhalten. Um beispielsweise überhaupt feststellen zu können, dass eine Schwingung der Frequenz f vorliegt, müssen mindestens 2 Werte pro Periode ermittelt werden. Das heißt, dass mit der Abtastfrequenz $2f$ gerade noch die Existenz einer Schwingung der Frequenz f festgestellt werden kann - aber nicht mehr, wie diese Schwingung aussieht („**Nyquist-Theorem**“).

Zu Abb. 4.4: Ein Ausschnitt aus einer Gesangspassage, gesungen mit 108 Hz. Der Ausschnitt ist 1 ms groß. Die

Abb. 4.4 Verschiedene Digitalisierungs-Standards

beiden Digitalisierungen zeigen daher jeweils 44 bzw. 22 Sample-Werte (der Deutlichkeit halber als Treppenstufen gezeichnet). Wenn das mit nur 22 KHz abgetastete Signal einen D/A-Wandler durchläuft, werden die Stufen „verschmiert“ und es entsteht ein sehr gutes Abbild der Originalschwingung. (Alle scheinbar „analoge“ Zeichnungen sind mit 192 KHz und 32 Bit abgenommen, im Grund aber auch digital – was man aber auf dem vorliegenden Papier nicht sehen kann!)

Mit der für CD-Qualität üblichen Abtastfrequenz von 44 100 Hz können Frequenzen bis zu 22 050 Hz festgestellt werden. Sind im Signal, das digital mit 44 100 Hz gespeichert werden soll, höhere Frequenzen enthalten, so reagiert der Abtastmechanismus so, dass er von dieser Frequenz nur gelegentlich eine Probe entnimmt. Die Gesamtmenge dieser Proben stellt eine im Ursprungssignal nicht vorhandene „Information“ dar (sog. „**Aliasing**“). Bei Sinusschwingungen ist dies eine zusätzliche, niederfrequente Schwingung. Dieser Effekt, der wie ein „Phasing“ klingt, wird bisweilen künstlich erzeugt, ist jedoch bei Hi-Fi-Aufnahmen unerwünscht. Dem A/D-Wandler muss ein Filter vorgeschaltet, der nur Frequenzen bis 22 050 Hz durchlässt. Da analoge Filter nie ganz „exakt“ abschneiden, kann man durch Tricks (Oversampling, Resampling) diese heikle Arbeit auf digitale Filter verschieben.

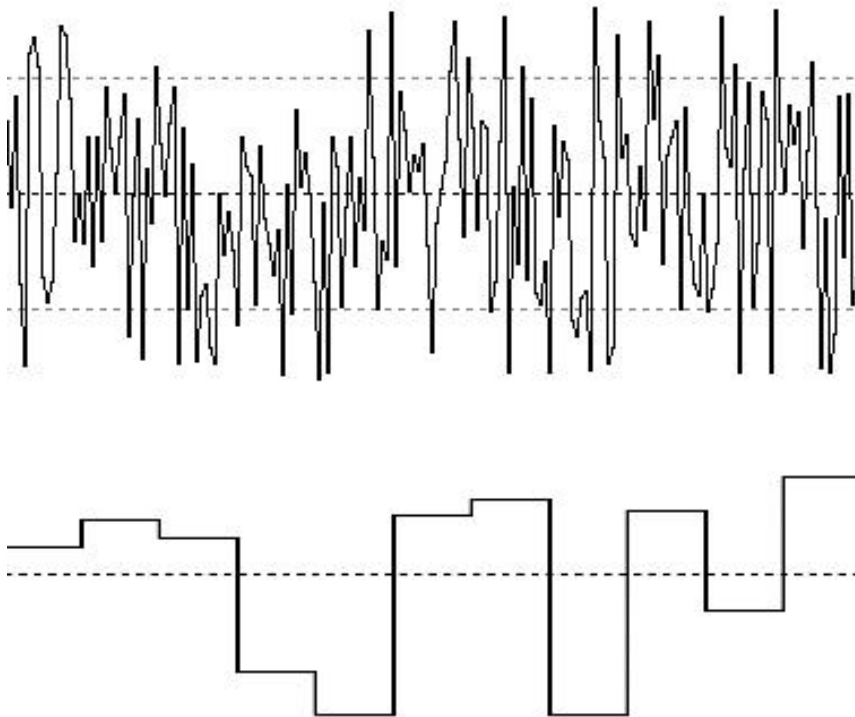


Abb. 4.5 Sample and Hold von Rauschen ergibt eine Zufallsfolge

Das „Abtasten“ und „Probe entnehmen“ wird auch als „**Sample & Hold**“ bezeichnet und jenseits der originalen Musikdigitalisierung bereits bei Analogsynthesizern verwendet. Ist die Abtastrate im Sekundenbereich und wird beispielsweise ein weißes Rauschen abgetastet, so erhält man eine Zufalls-Zahlenfolge. Solche Zufallsgeneratoren waren in Synthesizern der 70er Jahre eingebaut (Abbildung 4.5).

Der durch Aliasing hervorgerufene Phasingeffekt kommt sehr häufig vor, wenn man Audiodateien für die Übertragung im Internet auf eine sehr niedrige

Sampling-Rate „herunter setzt“ (vgl. unten Experiment 4.1). Neben diesem Effekt bewirkt eine geringe Abtastrate, dass weniger „Höhen“ übertragen werden können: der Klang wird „dumpher“.

Neben der Abtastfrequenz (Sampling-Rate), spielt für die Qualität der digitalen Speicherung und Wiedergabe auch eine Rolle, wie genau („mit wie vielen Stellen hinter dem Komma“) diese Werte bestimmt werden. Diese Genauigkeit heißt „**Auflösung**“. Der Computer „misst“ die Wertegenauigkeit in Größe des Speicherplatzes, der für die Speicherung des jeweiligen Wertes notwendig ist. Bei 16 Speicherplätzen pro Wert können $2^{16} = 65\,536$ unterschiedliche Werte gespeichert werden. Man spricht in diesem Fall von 16 Bit Auflösung. (17 Bit wären doppelt so viel Werte wie 16 Bit.) Anschaulich ist einleuchtend, dass, je höher die Auflösung, umso größer der Dynamikbereich („**Rauschspannungsabstand**“), der übertragen werden kann. Der wichtige Fall von 16 Bit Auflösung (= „CD-Qualität“) führt zu einem Dynamikbereich von 97,8 dB.

4.3. Logistik digitaler Speicherung

Speicherplatz. Trotz des Preiszerfalls im Bereich von Speicherplatz ist immer noch ein Problem, dass bei der Musikdigitalisierung enorme Menge von Daten anfallen. Eine Minute Musik in CD-Qualität benötigt ca. 10 MB Speicherplatz.

In CD-Qualität werden pro Sekunde 44 100 Werte gespeichert, wofür 16 Speicherplätze (bits) zur Verfügung stehen. Da 16 bit = 2 Byte sind, bedeutet das $44\ 100 \times 2 = 88\ 200$ Byte = 88,2 KB für 1 sec Mono-CD-Musik. 1 Minute Musik in Stereo-CD-Qualität (unkomprimiert) benötigt $2 \times 60 \text{ mal } 88,2 \text{ KB} = 10.584 \text{ KB}$ (entsprechend 10,3 MB).

Es gibt zwei Möglichkeiten, in puncto Speicherplatz Kosten zu sparen: Entweder werden die Daten „komprimiert“ oder es werden alternative Digitalisierungsverfahren entwickelt. Zum Letzten: Bei der „**Delta-Modulation**“ werden nicht die gesampelten Zahlenwert in ihrer vollen Größe abgespeichert, sondern jeweils die Differenz zum vorhergehenden Wert. Als „*Differential Interpolation*“-Synthesis setzt Roland ein solches Verfahren in seinem Sampler S 760 ein und kann dann 1 Minute Musik in CD-Qualität mit 4,5 MB speichern. Eine noch radikalere Überlegung liegt der „**1 Bit-Technologie**“ zugrunde, die die Samplingfrequenz so lange steigert, bis es genügt, bei jedem Sample nur noch festzustellen, ob es sich vom vorigen um 1 Bit nach oben, unten oder gar nicht unterscheidet. Diese Geräte, die für Studienzwecke auf dem Markt sind, erfordern eine vollkommen eigene Hardware und produzieren Daten, die kein handelsüblicher CD-Player „lesen“ kann. Die Abtastfrequenz beträgt beispielsweise 2,822 MHz = 2 822 KHz, also das 64-fache der CD-Abtastfrequenz von 44,1 KHz. Zur Speicherung von 1 Sekunde Musik benötigt man dann $2\ 822\ 000 \text{ Bit} = 352\ 750 \text{ Byte} = 0,35275 \text{ MB}$, für 1 Minute Stereo also $2 \times 60 \times 0,35275 \text{ MB} = 42,33 \text{ MB}$. Das ist mehr als CD-Qualitäts-Speicherplatz aber weniger als Studioqualitäts-Speicherplatz (96 KHz bei 24 Bit: 138 MB pro Minute).

Da heute wegen der Entwicklung preiswerter „Massenspeicher“ (z.B. 4 GB auf einer Speicherkarte und auf der iPod-„Festplatte“ oder 4,7 GB auf einer DVD) weniger der Speicherplatz „an sich“, sondern eher der „Datenfluss“, d.h. Daten pro Zeit, eine Rolle spielt, sind Datenkomprimierungsverfahren immer noch ein heißes Thema. Hier einige rechnerische Richtwerte für den Datenfluss im Internet:

Bezeichnung	Übertragungsrate	Audioqualität	Datum
V.29 Modem	9 600 Bit/sec	keine mp3 -Qualität	vor 1997
V.90 56K-Modem	56 000 Bit/sec	schlechte mp3 -Qualität	1997
ISDN (integrated service digital network)	2 mal 64 000 Bit/sec	gute mp3 -Qualität	1999
DSL (digital subscriber line)	768 000 Bit/sec (download)	„halbe CD-Qualität“	1999

Umrechnung der üblichen Angaben „Abtastfrequenz/Auflösung“ in „Übertragungsrate“ am Beispiel der CD-Qualität: 44 100 Hz bei 16 Bit bedeutet $16 \times 44\ 100 \text{ Bit/sec} = 705\ 600 \text{ Bit/sec}$, bei Stereo doppelt so viel, also $1\ 411\ 200 \text{ Bit/sec}$. CD-Qualität bedeutet also doppelt so viel wie DSL zu leisten vermag. Im folgenden Experiment wird „überprüft“, dass eine **mp3**-Kompression auf 128 000 Bit/sec (also um den Faktor 10) faktisch „CD-Qualität“ beinhaltet. Und dies entspricht der Übertragungsrate bei ISDN, wenn beide Kanäle genutzt werden.

Experiment 4.1 mp3-Datenkompression

Dasselbe Musikstück wird in unterschiedlichen **mp3**-Kompressionsstufen abgespielt. „CD-Qualität“ wird bei 128 kbps („128 KB per second“) angegeben – was immer das heißt! Immerhin, erst bei 48 oder 32 kbps bemerkt man den bereits erwähnten „Phasingeffekt“. Abbildung 4.5 zeigt ein Schallsignal, das bei Übertragung durch ein Modem erkennbare Qualitätseinbußen erleidet:

„**mp3**“ ist das älteste, im Prinzip bereits 1982 entwickelte Musik-Daten-Kompressionsverfahren. „**mp3**“ ist die Abkürzung für „MPEG Layer 3“, wobei MPEG („moving picture expert group“) überwiegend Verfahren zur Videokompression sind. Die Audiokompression war ein Abfallprodukt. Die Kompression beruht auf einer Reihe hörpsychologischer Effekte (siehe Kapitel 3) und verfährt – grob

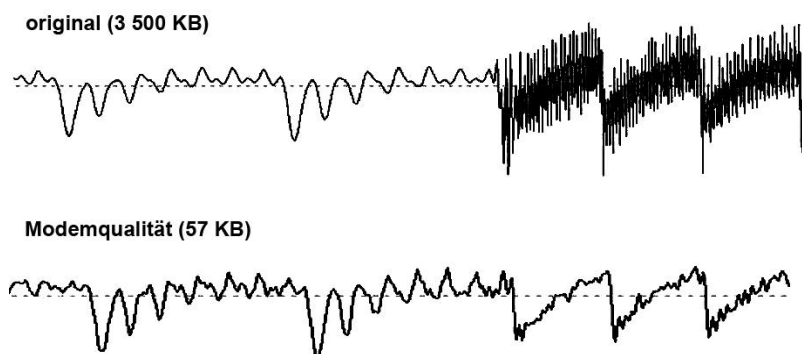


Abb. 4.6 Veränderung der Schwingungsform bei extremer Komprimierung

gesagt – so, dass das Schallsignal in Frequenzbänder unterteilt und für jedes Frequenzband der geringst mögliche Speicherbedarf ermittelt wird. Der Kompressionsfaktor hängt daher von der Art des Schallsignals ab und beträgt ca. 1:10. Das Verfahren ist mit Verlusten behaftet, d.h. Information geht verloren und kann nicht wieder her gestellt werden. Insofern ist **mp3** etwas qualitativ anderes wie das „Zip“-Verfahren

beim Computer, wo Daten verlustfrei komprimiert werden. (Ein „Zippen“ von Audiodaten bringt fast keinen Gewinn!)

Da die Original-Musikdaten bei der **mp3**-Kompression „umgerechnet“ werden, spricht man von „Algorithmen“ (Rechenverfahren). In der aktuellen Computerterminologie haben die originalen Musikdaten die Endung „**wav**“ (Windows) oder „**au**“ (Apple), die komprimierten beispielsweise die Endung „**mp3**“. *Encoder* sind Programme, die **wav**- in **mp3**-Dateien verwandeln und *Decoder* verwandeln **mp3**- in **wav**-Dateien. Der Algorithmus selbst heißt daher „**Codec**“.

Heute sind sowohl Weiterentwicklungen von **mp3** als auch alternative Komprimierungsverfahren auf dem Markt, einige sind „open source“, andere sind sorgsam geschützt (ausführlicher über <http://de.wikipedia.org/wiki/Audiodatenkompression>):

- **AAC** (advanced audio coding) wird von Apple („iTunes Store“) und Real Media (rm-Player) eingesetzt. Die meisten Online-Radios verwenden AAC. So entspricht 96 Kbit/sec von AAC in etwa der UKW-Qualität. Diverse Handys setzen AAC ein und seit Dezember 2007 ist auch Nintendo (Fernseh-Spielkonsole „Wii“) auf AAC umgestiegen. Die Kompressionsrate von AAC ist in der Regel größer als bei **mp3**, etwa 1:16.
- **WMA** (windows media audio) ist eine stark an **mp3** angelehnte Kompression von Microsoft, die – wie immer – „aggressiv“ um den Markt kämpft. Das Format ist flexibel („variable Bitrate“, Surround-Wiedergabe u.a.) und enthält die Möglichkeit zum Kopierschutz! Es gibt auch eine Version „nur für Stimme“ mit sehr kleiner Übertragungsrate.
- **OGG** (Ogg-Vorbis – ein Kunstname) ist patentfrei und daher für Programmierer einsehbar. Qualitativ ist ogg mit aac vergleichbar, aber weniger verbreitet. Heute spielen die meisten Player – auch der Windows Media Player! – ogg-Dateien ab. Das Deutschlandradio sendet mit ogg, weil ogg „streamingfähig“ ist.

- **ATRAC** (Adaptive TRansform Acoustic Coding) war zur Zeit, als die letzte Auflage des vorliegenden Scriptums (1997) erschien, noch ein Marktführer von Komprimierung, den Sony für die Minidisk 1992 entwickelt hatte. Heute hat sich auch Sony von atrac abgemeldet, die Minidisk-Player laufen aber immer noch hervorragend und werden beispielsweise von Rundfunkleuten gerne verwendet. Erst seit 2 Jahren machen ihnen tragbare Harddiskrecorder Konkurrenz (Abbildung 4.9).

Zwischen einer **Audio-CD**, die in einem herkömmlichen CD-Player abgespielt werden kann, und einer **CD-ROM**, die Musikdaten im Format **wav**- oder **au**- oder **mp3**- etc. enthält und nur über einen Computer oder entsprechend konfigurierten DVD-Player abgespielt werden kann, muss unterschieden werden! Im Prinzip sind die Daten auf einer Audio-CD mit „**wav**“ identisch (unkomprimiert 1 : 1), sie haben aber einen speziellen „Kopf“ und die CD ist „finalisiert“, so dass sie nicht mehr weiter bearbeitet werden können.

Um die Musikdaten einer Audio-CD auf einer Festplatte als wav- oder au-Daten zu speichern und eventuell dann in mp3 zu verwandeln, muss man die Audio-CD mittels spezieller Programme „ripen“ (d.h. den „Kopf“ und die Finalisierung abstreifen). Man erhält dann eine wav-Datei, die (manchmal in einem Durchgang) in mp3 gewandelt werden kann. Herkömmliche CD-Player können nur Audio-CD's wiedergeben. Es gibt aber auch (vor allem in Ghetto-Blastern eingebaute) CD-Player, die mp3-Dateien von einer CD-ROM (=Daten-CD) abspielen und/oder sogar mp3 und wma über einen USB-Eingang direkt von einer Festplatte oder einem „Stick“ lesen können. Die meisten **DVD-Player** sind in der Lage nicht nur (finalisierte) DVD's und Audio-CD's, sondern auch mp3 und wma auf CD-ROM's oder DVD-ROM's (also CD's oder DVD's mit Computerdateien) wieder zu geben.

Ein **mp3-Player** oder **iPod** enthält neben einem Speichermedium für mp3- oder aac-Dateien einen Decoder und einen D/A-Wandler zur analogen Ausgabe der Musik. Über einen digitalen Ausgang (USB oder iPod-spezifisch) können die mp3-/aac-Daten auch direkt an einen Computer übergeben oder auf einem DVD-Player mit USB-Eingang gespielt werden. Für den spezifischen digitalen iPod-Ausgang gibt es zudem Spezial-Player im entsprechenden i-Design.

Während die mit „unhörbaren“ Verlusten behafteten Kompressionsverfahren bei CD-Qualität den Faktor 1 : 10 erreichen, kommen *verlustfreie* Kompressionsverfahren wie MLP (meridian lossless packing) oder PPCM (packet puls code modulation) auf Komprimierung mit dem Faktor 1: 2,5 . Verwendung finden solche Verfahren bei qualitativ hochwertigen Übertragungen von Mehrkanal-Musik (z.B. 5.1-Dolby) oder bei der sagenumwobenen Audio-DVD, die mit Studiowerten 96 000 Hz/24 Bit aufwartet und sich bislang auf dem Markt nicht durchsetzen konnte. Man erreicht durch diese Kompression, dass selbst bei Mehrkanal-Audio 74 Minuten auf eine DVD-Scheibe passen.

4.4. Technik digitaler Speicherung

Alle Musikdaten, ob unkomprimiert oder komprimiert, können nach denselben Verfahren gespeichert werden. Hier ein kleiner Einblick in die Technik der Digitaldatenspeicherung:

Analoge Speicher- und Übertragungsmedien

„Tonbänder“ (DV, DAT, VHS-Video, Telefonkabel, RS232) werden zur Speicherung oder Übertragung von digitalisierter Musik (oder allgemeiner: Computerdaten) verwendet. Das Telefonkabel ist ein analoges Kabel und überträgt bekanntlich massenhaft digitale Daten. Bisweilen sind die „digitalen Daten“ noch akustisch hörbar, beispielsweise bei der Einwahl eines Modems . Hier werden – ähnlich wie beim Strichcode im Supermarkt – in gewisser Reihenfolge „0 oder 1“ als „Pieps oder Ruhe“ oder „schwarz oder weiß“ oder „hoch oder tief“ usw. gesendet. Freilich können die „Sendefrequenzen“ bei einer Übertragungsrate von 96 000 Bit/sec nicht mehr im hörbaren Bereich sein.

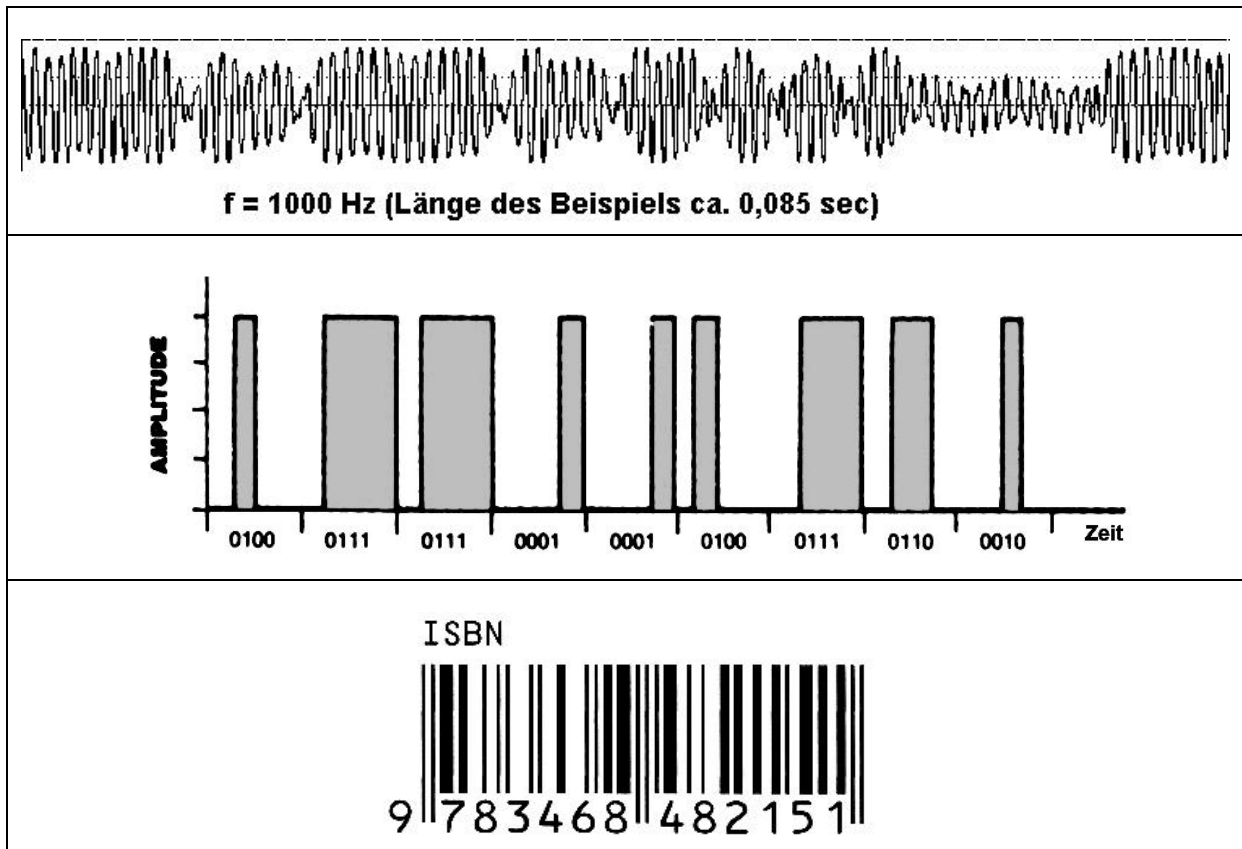


Abb. 4.7 Digitale Daten auf analogen Medien gespeichert: die Tonfolge bei der Einwahl eines Modems (hier 779010 für die Uni Oldenburg) - Darstellung von Zahlen zwischen 0 und 15 - Strichcode im Buchladen

Im mittleren Beispiel werden 16 Zahlen zwischen 0 und 15 ($2^4 = 16$) übertragen. Je nach Position der „1“ innerhalb eines Viererpakets kommen unterschiedliche Ziffernfolgen und somit Zahlen zustande. (Dualzahlensystem: 0100 = $0+4+0+0 = 4$, 0111 = $0+4+2+1 = 7$, ... 1010 = $8+0+2+0 = 10$.)

DAT-Bänder sind analog arbeitende digitale Speichermedien von hoher Kapazität. Sie sind (ähnlich den DV-Bändern im Videobereich) sehr robust und preiswert. Da die „Navigation“ etwas umständlich ist, sind DAT-Recorder heute nur noch in Studios und zur Archivierung von Endabmischungen oder als Sicherheitskopie zu finden.

Digitale Speichermedien.

Zu den genuin digitalen Speichermedien gehört die CD und gehören alle Arten von Computerdisketten, CD-ROM's, DVD's und Speicherkarten. Auch „Festplatten“ mit einer rotierenden Scheibe gehören hierher (es sind faktisch „optimierte CD-Player“). Die digitale Information wird auf all diesen Medien „eingeschnitten“ und danach wieder „ausgelesen“.

Zu Abbildung 4.8: Die Erhebungen („pits“) werden von einem Laserstrahl abgelesen. Bei der CD hat dieser die Wellenlänge 780 nm und ist 2,1 μm dick, bei der DVD wird die kleinere Wellenlänge 650 nm und ein dünnerer Strahl von 1,3 μm verwendet. (nm = Nanometer = ein Millionstel Millimeter; μm = Mikrometer = ein Tausendstel Millimeter.)

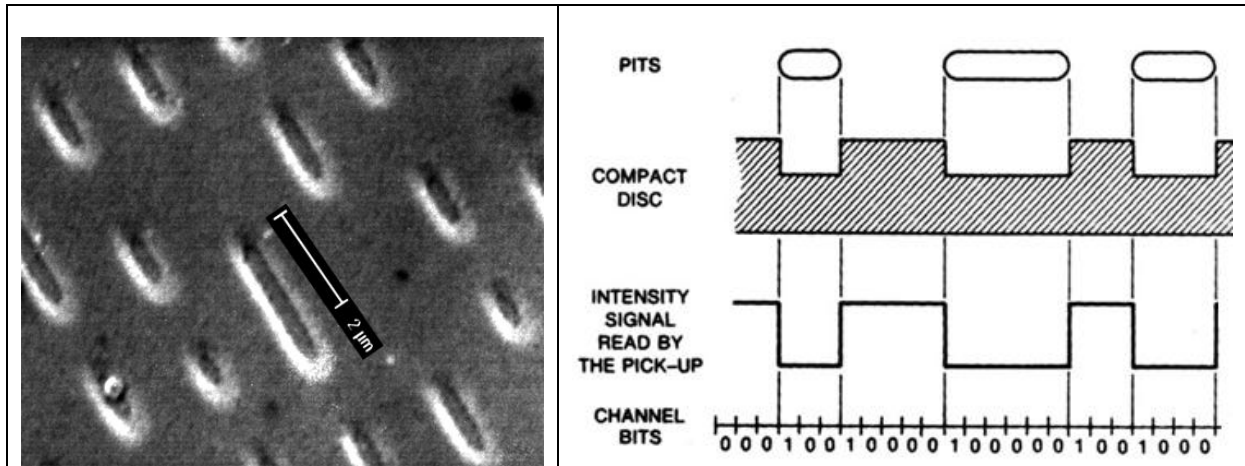


Abb. 4.8 CD unter dem Mikroskop und schematisch

Harddiskrecording

Ein meist computergesteuertes Verfahren zur Aufnahme, zum „Schneiden“, Mischen, Kopieren und Wiedergeben digitalisierter Musik, bei der das Musikmaterial vorübergehend auf einer Festplatte abgelegt ist, heißt heute Harddiskrecording. Es gibt verschiedene Modelle:

Modell 1: Ein Computer ist über eine seiner Schnittstellen (i-Link, SCSI oder USB 2) mit einem externen Analog-Digital-Wandler verbunden, der die Aufgabe hat, analoge akustische Schwingungen zu digitalisieren. Die Audio-Ein- und -Ausgänge des Systems befinden sich an diesem externen Wandler. Der Computer ist mit einem Programm versehen, das in der Lage ist, die über seine Schnittstelle ankommenden digitalen Musikdaten ordentlich auf seiner Festplatte zu speichern und zu verwalten.

Modell 2: Das System Computer/Wandler wird zum alleinigen Zweck des Harddiskrecordings in einem „Stand alone“-Gerät zusammengefasst. Solch ein Gerät genau wie ein Mehrspurtonbandgerät mit Mixer aus und wird auch so bedient. Die Musikdaten werden auf einer im Gerät befindlichen Festplatte gespeichert und können auch an einen Computer „ausgegeben“ werden.

Modell 3: Das externe Wandler-System der ersten Lösung wird als Karte in den Computer hinein verlegt. Macht man Qualitätsabstriche, so können die Analog-Digital-Wandler einer Multimedia-Soundcard verwendet werden. Dann ist Harddiskrecording ein „Kinderspiel“ (im doppelten Sinne!) und kostet als „MAGIX Music Makers“ nur noch 49 Euro.



Abb. 4.9 Links der erste Mini- Harddiskrecorder (von Microtrack). Rechts das Innere einer Festplatte, das wie ein Schallplattenspieler aussieht.

Modell 4: Ein kleines handliches Gerät enthält A/D-Wandler, Mikrofon, Speicherkarte und einfachste Bedienelemente zur Aussteuerung einer Stereoaufnahme. Aufgenommen werden **wav**- oder **mp3**-Dateien, teilweise sogar in Studioqualität. Zur Weiterverarbeitung der Musikdaten muss man dieselben einem Computer mit einem Programm von Modell 2 oder 3 übergeben. Das Gerät enthält aber auch einen D/A-Wandler, so dass man die (nicht bearbeitete) Musik auch analog ausgeben und anhören kann.

Die Arbeit mit einem Harddiskrecordingprogramm verläuft „intuitiv“. Bei „einstimmigen“ Aufnahmeprogrammen wie dem unter „Windows-Zubehör“ befindlichen **Audiorecorder** kann man Klänge aufnehmen, schneiden und (vorwärts oder rückwärts) abspielen sowie neue Klänge dazu mischen (Abbildung 4.10). Bei „mehrstimmigen“ Programmen ähnelt der Bildschirm einer Partitur (vgl. Abbildung 11.4) von links nach rechts verläuft die Zeitachse und alle untereinander stehenden „Stimmen“ (= digitale Musikdateien) erklingen gleichzeitig. Werden diese Stimmen bearbeitet (geschnitten, verdoppelt, gemischt mit Effekten versehen usw.), so geschieht dies alles rein „logistisch“ und nicht real. Die zu Grunde liegenden Musikdateien bleiben unangetastet und ein „Schnitt“ an der Stelle X bedeutet nur, dass der Computer sich die Information merkt: „gehe in der Datei nicht bis ans Ende, sondern nur bis zum Schnittpunkt X“ (Prinzip der Nicht-Deaktivität).

Experiment 4.2. Windows „Audiorecorder“

Das musikalische Herz des Computers ist die **Soundcard** (Klangkarte), die im Computer eingebaut ist und alle musikalischen Arbeiten erledigen kann. Sie tritt beim Harddiskrecording ebenso in Aktion wie beim Abspielen einer Audio-CD, beim Internettelefonieren oder beim Abspielen eines Videos mit Ton.



Abb. 4.10 Audiorecorder aus dem Windows-Zubehör

Die heute gebräuchlichen Multimedia-Soundcards enthalten, wie schon angedeutet, ein einfaches Harddiskrecordingssystem und meistens auch noch einen „Soundchip“ (d.h. das Herzstück eines Synthesizers). Um die Soundcard vom Computer aus bedienen zu können, muss ein Programm DSP (digital sound processing) gestartet werden. Der Bildschirm zeigt eine Art Tonbandgerät mit PLAY, STOP und REC (Abbildung 4.10). Oft arbeitet dies Gerät aber auch unsichtbar im Hintergrund. Aktiviert man REC, so werden alle an der Soundcard eintreffenden analogen Schwingungen („line“ oder Mikrofon) im A/D-Wandler digitalisiert

und vom DSP-Programm entweder im Arbeitsspeicher (RAM) gespeichert oder sofort auf Festplatte übertragen. Im RAM oder auf Festplatte liegen die digitalen Daten in einem bestimmten Format, bei Windows, wie nicht anders zu erwarten, als **wav**, bei Apple als **au**.

Hat man im DSP-Programm eine bestimmte **wav**-Datei ausgewählt und aktiviert PLAY, so wird diese Datei gegebenenfalls von Festplatte in den RAM geholt und dort dem D/A-Wandler übergeben, der die analogen Ausgänge der Soundcard mit elektrischen Schwingungen versorgt, die ein Kopfhörer, eine HiFi-Anlage oder ein Kassettenrecorder „verstehen“. Die Datei kann aber auch übers Internet als „Datenstrom“ („streaming“) während des Vorgangs der D/A-Wandlung oder von einem USB-Stick oder **mp3**-Player via USB „live“ eingeflogen kommen. In jedem Fall: will man Musik hören, so muss die Soundcard eine D/A-Wandlung durchführen.

Dass eine Soundcard auch eine MIDI-Sektion mit einem (normierten) Speichervorrat an Digitalklängen hat, mit der ohne großen Datenaufwand Musik gemacht werden kann, wird in Kapitel 10 abgehandelt.

Nun zum Experiment: Mit dem Windows Audiorecorder lassen sich Musikdateien „schneller“ und „langsamer“ abspielen. Dabei wird die ursprüngliche Abtastfrequenz erhöht oder erniedrigt. Es ist interessant subjektiv zu beobachten, wie sich Instrumentalklänge verändern, wann Sprachlaute nicht mehr zu erkennen sind usw. Da man die Dateien auch rückwärts abspielen kann, kann auch untersucht werden, welche Klänge „umkehrinvariant“ sind.

Ergebnis: Bei Tempoveränderungen bleibt die Verständlichkeit der Sprache erhalten, der Charakter der Sprechenden Person verändert sich (z.B. Mickeymaus-Effekt oder Opa-Stimme). Bei Instrumentalklängen werden Melodie/Harmonie „transponiert“, die Klangfarbe des Instruments kann sich ändern (genauer in Experiment 4.7). Beim Rückwärtsabspielen der Sprache geht die Verständlichkeit verloren, der Charakter des Sprechenden bleibt aber erhalten. Bei Instrumentalklängen geht wegen der „falsch sitzenden“ Einschwingvorgänge der Charakter des Instruments verloren.

Mit diesen Experimenten ist eine Problematik des Soundsampling angeschnitten:

Ein **Soundsampler** ist ein als Musikinstrument optimiertes Harddiskrecordingsystem. Klänge sind digital gespeichert. Sie können von den Tasten eines Keyboards aus abgerufen werden. Im Idealfall gibt es für jede Taste und jede denkbare Lautstärke (oder Klangfarbe) ein eigenes Sample. Im Normalfall ist dies aber zu kostspielig. Man nimmt einen Sound nur wenige Male auf und „transponiert“ ihn je nach gedrückter Keyboard-Taste dadurch, dass die Musikdatei mit einer größeren („höhere Taste“) oder kleineren („tiefer Taste“) Abtastfrequenz ausgelesen wird als es aufgenommen worden ist. Neben der Frequenz (Tonhöhe) ändert sich dabei auch die Dauer des Samples und die Klangfarbe. Das Dauernproblem wird dadurch gelöst, dass ein möglichst einfacher und charakteristischer Teil der Gesamtschwingung als Schleife („loop“) sofort wiederholt wird, bis die Taste losgelassen wird. Das Klangfarbenproblem ist grundsätzlich nicht optimal lösbar, wie wir in Kapitel 6 sehen werden.

Backward-Masking?



Untersuche einige finstre „backward-masking“-Botschaften durch erneutes Rückwärtsabspielen auf dem Windows-Audiorecorder (Beispiele wie „Revolution 9“ der Beatles auf www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download)!

Kapitel 5: Schwingungserzeugung durch Saiten

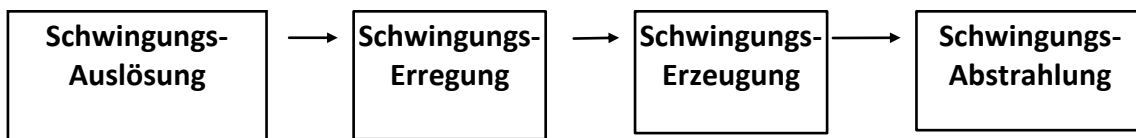


In den bisherigen Kapiteln sind akustische Schwingungen *beschrieben* und die Möglichkeiten von deren Verarbeitung im menschlichen Ohr und in Computern diskutiert worden. Nun stellt sich die Frage, wie akustische Schwingungen *entstehen* und wie Instrumente gebaut sein oder bedient werden müssen, damit musikalisch brauchbare Schwingungen hinaus in die weite Welt gesendet werden können.

5.1. Allgemeines zur Instrumentenkunde

Gewisse Menschen oder Menschengruppen werden im Musikerjargon oft mit Worten wie „Holzbläser“, „Schlagzeuger“, „Streicher“, „Blech“ oder „Keyboarder“ bezeichnet. Das Saxophon gehört zum „Holz“, das Alphorn zum „Blech“. Pianistinnen sind keine „Schlagzeugerinnen“ und ein Cembalo steht nicht bei den Zupfinstrumenten. Dass in der Windharfe Saiten geblasen oder im Clavichord Saiten geschlagen werden, ist für die Alltagsterminologie fast ebenso uninteressant wie die Tatsache, dass eine Maultrommel dem Akkordeon näher steht als der Trommel. Kurzum: im Alltag werden Tätigkeiten (wie zupfen, streichen, blasen und schlagen), Baumaterialien (wie Blech oder Holz, nicht jedoch Darm oder Nylon) oder äußeres Aussehen (wie Keyboard = Brett mit Tasten [„keys“]) oder Ähnlichkeit mit dem Klang anderer Instrumente (wie Maultrommel) oder Beschimpfungen (wie im Schlagzeug) munter durcheinander gemischt. Die Terminologie ist verständlich und begründbar. So ist die Bezeichnung „Blech“ deshalb gebräuchlich, weil Blech vor wenigen Jahrhunderten teuer war und der Besitz von Blechblasinstrumenten daher ein feudales Privileg gewesen ist. „Blasen“ durfte ein Dorfmusikant, nur eben nicht auf Blechinstrumenten.

In der musikalischen Akustik ist man um eine Terminologie bemüht, die nicht historische und sozial-psychologische, sondern physikalische Gegebenheiten widerspiegelt. Diese Terminologie weicht daher teilweise von der des Alltags ab. Sie beruht auf folgendem Funktionsschema aller Musikinstrumente:



Am **Klavier** illustriert: Die Saite ist der Schwingungserzeuger, der vom Hammer erregt wird. Der Hammer wird durch die Taste ausgelöst. Die Saite, die in einen gusseisernen Rahmen eingespannt ist, überträgt ihre Schwingung über den Steg auf den sog. Resonanzboden, der sie abstrahlt. Die Musikalische Akustik sieht im Schwingungserzeuger den „Kernbestand“ eines Instruments. Nicht nur, weil hier die Schwingung *entsteht*, sondern auch, weil für alle Instrumente mit genau definierter Tonhöhe ein Gesetz gilt, wonach die *Tonhöhe allein vom Schwingungserzeuger* (und nicht von der Erregung oder Abstrahlung) abhängt. Dies Gesetz wird später an allen konkreten Einzelfällen überprüft werden. Es ist evident, dass es eine wichtige Basis der Musikpraxis ist, denn nur aufgrund dieses Gesetzes kann eine GitarristIn beliebig stark und mit unterschiedlichen Gerätschaften an ihrer Saite zupfen, die Tonhöhe bleibt immer dieselbe.

Die Schwingungserzeuger werden nach ihrem Materialtyp und nach ihrer Dimensionalität eingeteilt. **Materialtypen:** elastische Saiten, Luft(rohre), schwingende Elektronen(zustände), Festkörper aus Holz oder Metall. **Dimensionen:** eindimensional (Saiten, Luftrohre, elektrische Schwingkreise), zwei-dimensional (Membrane, dünne Platten), dreidimensional (Festkörper wie dicke Gongs, Xylophonplatten, Triangel). Der Unterschied zwischen ein- und mehrdimensionalen Schwingungserzeugern liegt vor allem in der Struktur der abgestrahlten Schwingung. Sie ist nur bei eindimensionalen Schwingungserzeugern periodisch und somit Ausgangspunkt eindeutiger Tonhöhenempfindungen. - Da immer wieder das Wort „elastisch“ auftaucht, hier eine kurze Definition: wird ein elastisches Material durch Einwirken einer Kraft verformt (z.B. eine Saite ausgelenkt), so wirken Gegenkräfte, die nach Aufhören der verformenden Einwirkung die Ursprungsform wiederherstellen. „Elastische Körper“ müssen also eine „Form“ haben. Gase haben dies nur, wenn sie sich in einem „Rohr“ befinden, weshalb in der Musikpraxis nicht Luft an sich, sondern eine in ein Rohr eingeschlossene Luftsäule als elastischer Körper behandelt wird.

Das folgende Schema ist als Fazit der akustischen Überlegungen die Basis der Terminologie einer „systematischen Instrumentenkunde“:

	1-dimensional			2-dimensional	3-dimensional
	Saiteninstrumente	Luftinstrumente	Elektronische Instrumente	Membraninstrumente	Festkörperinstrumente
<i>Schwingungserzeugung</i>	Saite	Luftsäule (Luftrohr)	elektronische Schwingkreise	elastische Membranen	teil-elastische Festkörper
<i>Schwingungserregung</i>	streichen	blasen durch Lippen	analog	schlagen	schlagen
	zupfen	blasen durch Rohrblatt	digital	blasen	zupfen
	schlagen	blasen durch Schneide		reiben	reiben, streichen
	blasen				

Abb. 5.1 Systematik der Instrumente

Beispiele: Saite streichen (Geige), zupfen (Gitarre), schlagen (Hammerklavier), blasen (Windharfe). Luftrohr durch Lippen (Trompete), durch Rohrblatt (Oboe), durch Schneide (Flöte) blasen. Membrane schlagen (Trommel), blasen (Kazoo), reiben (Becken mit Bogen). Festkörper schlagen (Xylophon), zupfen (Sanza), reiben, streichen (Klangschale mit Bogen).

5.2. Eigenschaften der Saite als Schwingungserzeuger

Experiment 5.2a. Saite und Tonhöhe

Eine Saite wird (a) auf unterschiedliche Art und Weise erregt und (b) die Schwingung der Saite selbst, des Instrumentenkörpus und der angeregten Luft miteinander verglichen. Wir messen jeweils die Frequenz und die Form der Schwingung. Ersteres quantitativ mittels eines Frequenzmessgeräts, letzteres qualitativ über ein Oszilloskop. Zur qualitativen Kontrolle wird auch unser musikalisches Ohr eingesetzt.

Ein Kontaktmikrofon (das ausschließlich Festkörperschwingungen aufnimmt) ist am Korpus des Saiteninstruments angebracht, es überträgt die Schwingung des Teils, an dem es befestigt ist. Ein (Luft-)Mikrofon nimmt die abgestrahlten Schallwellen auf.

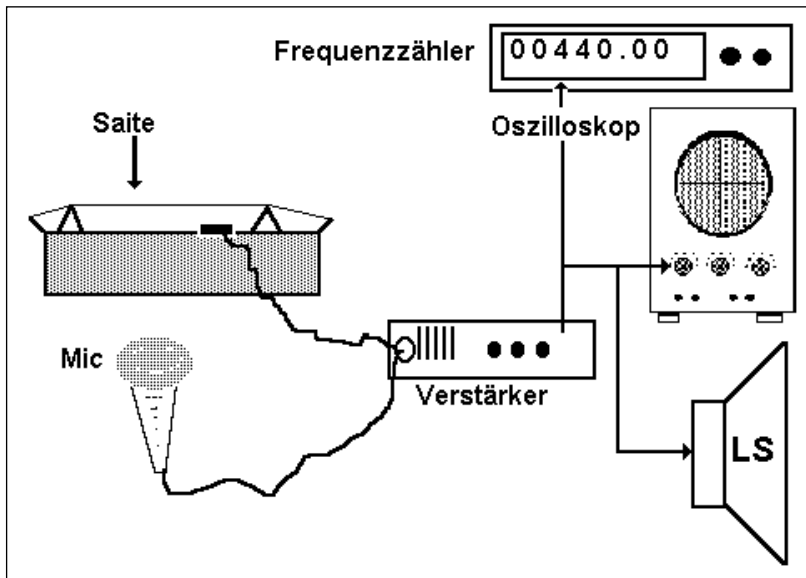


Abb. 5.2 Versuchsaufbau

Ergebnis des Experiments:

- Die Frequenz der Schwingungen ist an *allen* in diesem Experiment zugänglichen Stellen dieselbe: an allen Orten des Instruments *und* in der Luft. Auch mittels Ohr kann überprüft werden, dass stets dieselbe Tonhöhe erzeugt wird.
- Diese Frequenz (und damit die Tonhöhe) ist nicht von der Art der Saitenerregung abhängig, auch nicht von der Intensität.
- Unterschiedliche Erregungen erzeugen lediglich andere Schwingungsbilder. An

den unterschiedlichen Stellen des Instruments werden ebenfalls unterschiedliche Schwingungsbilder - bei stets gleichbleibender Frequenz - festgestellt.

- Erregungsart und Art der Abstrahlung haben Auswirkungen auf die Dauer und den Verlauf des gehörten Tons.

Wir werfen einen propädeutischen Blick in ein **Hammerklavier**: die tiefsten Saiten bestehen aus einem mit Kupfer- oder Eisendraht umspinnenen Stahldraht, die nächst höheren aus dickem Draht, ca. Mitte bestehen alle aus gleich dickem Draht. Von der Tiefe bis zur Mitte wird also neben der Saitenlänge auch die Dicke der Saite variiert. Ab Mitte wird nur noch die Länge variiert. Wir können zwar nicht überprüfen, wie groß die Spannungen der jeweiligen Saiten sind, durch deren Variation KlavierstimmerInnen das Klavier stimmen, nehmen aber - zu Recht - an, dass diese bei gleichem Material für alle Saiten ziemlich gleich ist. (In der Tat hat ein bestimmtes Material eine bestimmte Spannung, bei der die Saite optimal schwingt. JedeR weiß das, die/der einmal versucht hat, einer Gitarre eine „falsche“ Saite aufzuziehen! Die Materialien der Gitarrensaiten sind auf die jeweilige Tonhöhe/Spannung hin optimiert.) Beim Klavier werden also die folgenden Parameter einer Saite variiert:

- Länge (bei allen Saiten),
- Dicke oder Querschnitt oder Masse (vornehmlich bei den tiefen Saiten),
- Spannung (nur in kleinen Grenzen beim Stimmen).

Experiment 5. 2b. Saitenlänge und Frequenz

Wir untersuchen zunächst an einem Kontrabass den Zusammenhang von Länge einer Saite und Frequenz des erzeugten Tons. Bleiben während des Versuchs Dicke, Querschnitt, Masse und Spannung der Saite unverändert, so bekommen wir nach Experiment 5. 2a Aussagen, die allgemein gültig sind.

Ergebnis:

Für ein und dieselbe Saite gilt: Je kürzer die Saite, umso größer die Frequenz und umso höher der Ton.

Unabhängig von der Frequenz des Grundtons (Schwingung der unverkürzten Saite) sind die Frequenzverhältnisse bei denselben Längenverhältnissen zweier Saiten stets gleich. Ein bestimmtes Längenverhältnis (zum Beispiel 2:3) führt stets zum selben Frequenzverhältnis, also bei dünnen, langen, schlaffen, rotgrünen Saiten, Stahl- oder Nylonsaiten.

Der Zusammenhang von Längen- und Frequenzverhältnis wird durch die Formel beschrieben:

$$\text{Länge}_1 : \text{Länge}_2 = \text{Frequenz}_2 : \text{Frequenz}_1$$

(„Längen und Frequenzen verhalten sich umgekehrt proportional“.) Unser musikalisches Gehör verbindet mit bestimmten Frequenzverhältnissen bestimmte musikalische Intervalle. (Man kann auch sagen: gewisse Intervalle sind durch die Frequenzverhältnisse definiert.) Abbildung 5.3 zeigt das Gesamtsystem der abendländischen Intervallik.

Bei den meisten Saiteninstrumenten werden die Saitenlängen dadurch verändert, dass auf einem Griffbrett die Saitenlängen „abgegriffen“ werden. Dies geschieht nach folgender Arithmetik:

Grundton (1:1)	
Oktav (1:2)	1:2
Quinte (2:3)	1:3
Quarte (3:4)	1:4
große Terz (4:5)	1:5
kleine Terz (5:6)	1:6
---	1:7
(großer) Ganzton (8:9)	1:8
(kleiner) Ganzton (9:10)	1:9
usw.	
(chromatischer) Halbton (15:16)	

Abb. 5.3 Die musikalischen Intervalle und die Saitenlängenverhältnisse

Erläuterung am Beispiel der großen Terz: bei $1/5$ Saitenlänge wird „abgegriffen“, die Saite wird um $1/5$ verkürzt, so dass nur noch $4/5$ der Saite schwingen. Der höhere Ton ($4/5$ Saitenlänge) ist um eine große Terz höher als der tiefer Ton (ganze Saite). Verkürzte „Terz-Saite“ verhält sich zur ganzen „Grundton-Saite“ wie 4 zu 5. Das Intervall der großen Terz entspricht dem Längenverhältnis 4 : 5 oder (gleichbedeutend) dem Frequenzverhältnis 5 : 4.

Anwendung: „aus Addition wird Multiplikation“

Umgangssprachlich sagt man „eine große Terz *und* eine kleine Terz sind eine reine Quint“ und es herrscht die Vorstellung des Notenbildes, dass Intervalle „addiert“ werden. „Quint + Quart = Oktav“ usw. Die entsprechenden Längen oder Frequenzverhältnissen jedoch können nicht zusammengezählt, sondern müssen miteinander multipliziert werden.

<i>Sprachgebrauch</i>	<i>Saitenlängenverhältnisse</i>	<i>Frequenzverhältnisse</i>
Quint + Quarte = Oktav	$(2:3) \times (3:4) = (1:2)$	$(3:2) \times (4:3) = (2:1)$
gr. Terz + kl. Terz = Quint	$(4:5) \times (5:6) = (1:2)$	$(5:4) \times (6:5) = 3:2$
usw.	usw.	usw.

oder bildlich/schematisch dargestellt:

Oktav 1:1			
Quinte 2:3		Quarte 3:4	
gr. Terz 4:5	kl. Terz 5:6	kl. Terz 5:6	Ganzton 9:10
Ganzton 8:9	Ganzton 9:10		

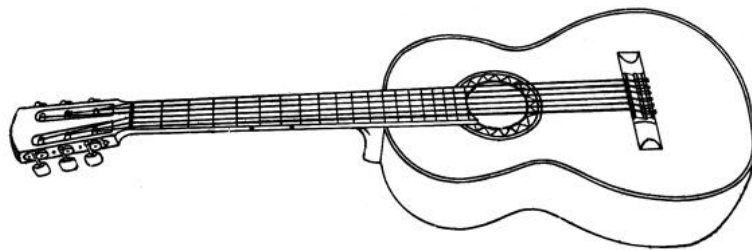


Abb. 5.4 Bünde der Gitarre

Die Begründung für diese „Additions-/Multiplikationsregel“ ist folgende Überlegung am Beispiel „Quint + Quart“: kürzt man eine Saite erst um $\frac{1}{3}$, so entsteht die Quinte über dem Grundton;

kürzt man diese kürzere Saite (mit der Länge $\frac{2}{3}$) nochmals um $\frac{1}{4}$, so erhält man die Quarte über der Quinte, als $\frac{3}{4}$ der kürzeren Saite von $\frac{4}{5}$, das heißt $\frac{3}{4}$ von $\frac{4}{5}$ oder $\frac{3}{4} \times \frac{4}{5}$. Auch rein rechnerisch ist nachzuvollziehen, dass $(2:3) \times (3:4) = (2/3) \times (3/4) = 2/4 = (1:2)$ ist, während $(2:3) + (3:4) = 17/24$ und nicht $1/2$ ist.

Diese Additions-Multiplikationsregel ist auch ein Grund dafür, dass die Bünde auf einer Gitarre kontinuierlich kleiner werden. Und die Tatsache, dass musikalisch empfundene Differenzen mathematisch-physikalisch betrachtet Verhältnisse sind, kommt uns schon bekannt vor: genau so war es bei der Schallintensität kurz vor der Einführung von Dezibel (Kapitel 2.2).

Alle hier festgestellten musikalischen Verhältnisse gelten nur für „gute“ Saiten - MusikerInnen wissen hiervon ein Lied zu singen. Ist eine Saite nicht absolut homogen, z.B. unterschiedlich dick, so sind die gegriffenen Intervalle ebenfalls verstimmt. Es gibt eine Formel, mit der sich die Frequenz aus Materialeigenschaften bestimmen lässt, sie lautet:

$$f = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{s}{\rho F}}$$

Dabei ist L die Saitenlänge, S die „Spannung“ (Kraft), ρ die Dichte des Materials und F die Querschnittsfläche. (Streng genommen muss noch ein konstanter Faktor hinzugenommen werden, der aber bei den Verhältnissen [Intervallen] keine Rolle spielt.)

5.3. Im Innern der „Black Box“ Saite

Überlegung 1

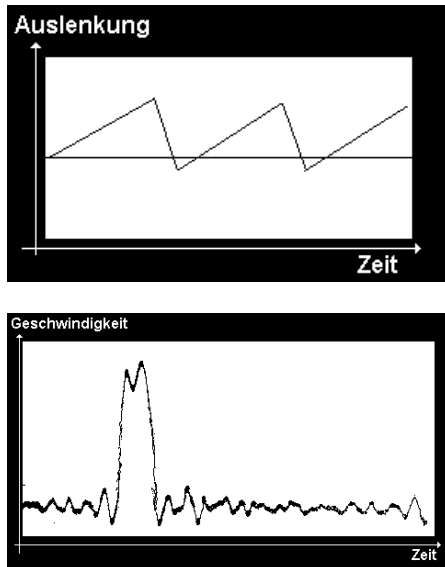


Abb. 5.5 Saitenbewegung beim Streichen

Wird eine Saite mittels Bogen gestrichen, so passiert folgendes: Der Bogen haftet an der Saite und nimmt, indem er sich bewegt, die Saite ein Stück weit mit, lenkt sie aus. Wenn die rüctreibende Kraft der elastischen Saiten stärker als die Haftreibung Bogen-Saite ist, dann gleitet die Saite am Bogen entlang zurück in ihre Ruhelage (oder darüber hinaus), wird aber gleich wieder durch den sich stetig weiter bewegenden Bogen gebremst bis die Saite wieder haftet. Der zeitliche Verlauf der Saitenauslenkung ist dann der von Abbildung 5.5 oben (der waagrechte Strich kennzeichnet die Ruhelage der Saite): In der Tat hat die von einer Saite und den Saiteninstrumenten abgegebene Schwingung große Ähnlichkeit mit einer Sägezahnschwingung. Die Saite hat dabei kurzfristig (während der Rückbewegungsphase) eine sehr hohe, ansonsten eine relativ geringe Geschwindigkeit. Im unteren Teil von Abbildung 5.5 sieht man die Geschwindigkeitsänderungen, die von einer periodischen Verdrillung der Saite herrühren.

Überlegung 2

Hiernach ist zu erwarten, dass das Hin- und Her der Saite, das ja letztendlich für die Frequenz der Saitenschwingung verantwortlich ist, von der Geschwindigkeit und den Hafteigenschaften des Bogens abhängt. Dies ist aber nicht der Fall! Weder spielt für die Frequenz der Saitenschwingung eine Rolle, wie gut der Bogen haftet (d.h. mit Kolophonium eingerieben ist), noch wie schnell er bewegt wird. Die Saitenfrequenz ist beim Streichen dieselbe wie beim Zupfen der Saite - sie hängt nur von „internen“ Eigenschaften der Saite ab, nicht von der Erregung.

Die Bogenbewegung muss die Saite zu „Eigenschwingungen“ anregen, die so stark und dominant sind, dass die Haft- und Gleitreibung beim Streichen keine Rolle spielen. Was ist die „Eigenschwingung“ einer Saite? Um die „Eigenschwingung“ der Saite - gedanklich - zu testen, zupfen wir und betrachten zunächst nur *einen einzigen Saitenpunkt*: Die Saite wird einmalig aus der Ruhelage gebracht, nach Loslassen der auslenkenden Kraft wirkt die rüctreibende Kraft, die Saite schnell über ihre Ruhelage hinaus bis sie durch entgegengesetzt rüctreibende Kräfte wieder zurückgeholt wird usf. Ist die rüctreibende Kraft der Auslenkung proportional, so entsteht - wie bei einer Schaukel - eine periodische Schwingung, die aufgrund von Energieverlust durch Reibung gedämpft ist.

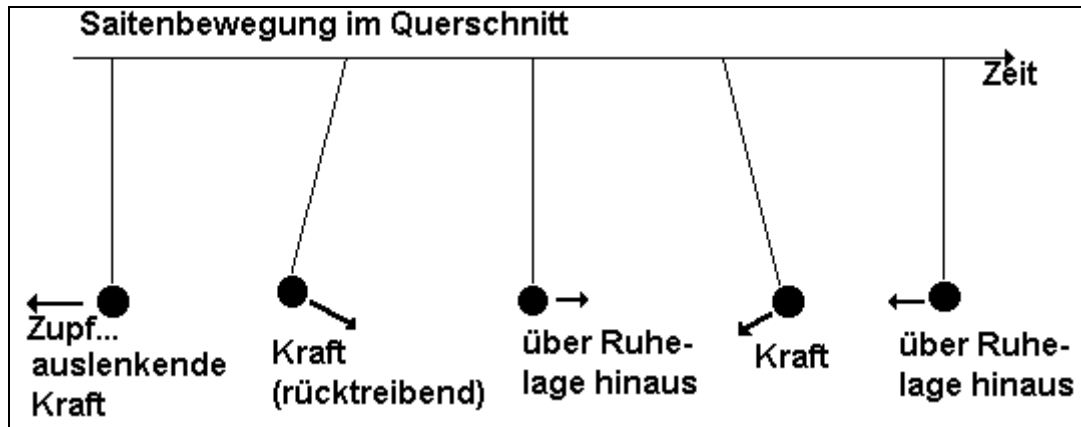


Abb. 5.6 Bewegung eines isolierten Saitenpunktes (Querschnitt)

Überlegung 3

Nun besteht die Saite aber aus elastisch miteinander verbundenen Einzelteilen. Wird an einer Stelle ausgelenkt, so braucht es eine gewisse Zeit, bis sich diese Auslenkung auf die anderen Saitenteile ausbreitet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die „Wellengeschwindigkeit“ in der Saite. Die folgenden Bilder geben einen Eindruck, wie die Auslenkung am einen Ende eine „Wanderwelle“ auslöst, die am andere Ende entweder absorbiert oder reflektiert wird:

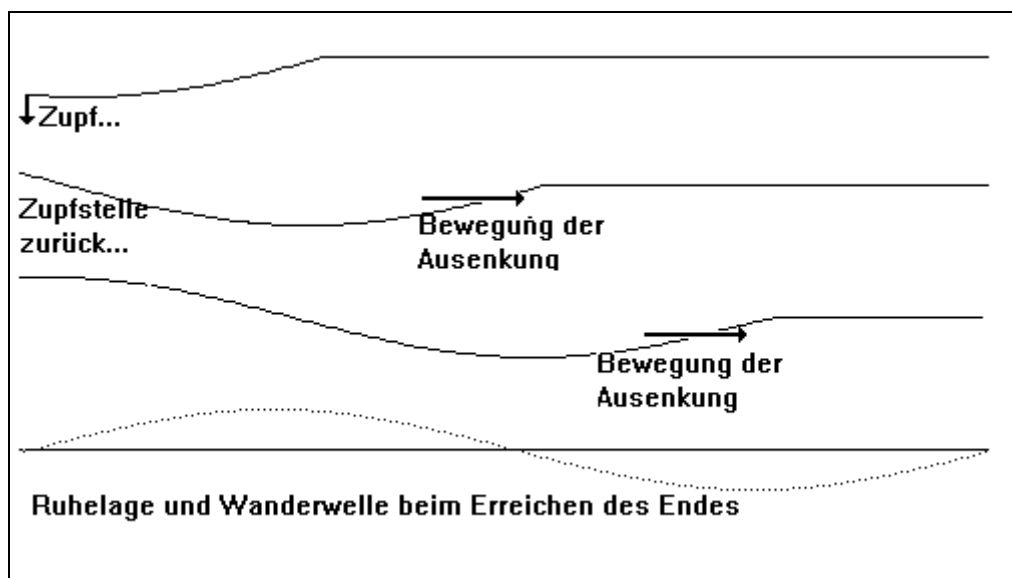


Abb. 5.7 Wanderwelle in der Saite

Nach der Reflexion überlagern sich die ursprüngliche und die reflektierte Welle. Alles läuft sehr schnell ab. Soll die Saite dauerhaft schwingen, so müssen ein paar 100 Hin- und Herbewegungen stattfinden. Es bilden sich also Zustände aus, die einigermaßen stabil sind, und solche Zustände können nur dann eintreten, wenn die materialbedingte Wellengeschwindigkeit und die Länge in einem solch „harmonischen Verhältnis“ stehen, dass hin- und herlaufende Wellen regelhafte Knoten und Bäuche bilden. Was hier plausibel gemacht wird, kann in Experimenten gezeigt, in Simulationen demonstriert und mathematisch hergeleitet werden. Im Kurs verwenden wir zur Demonstration ein sog. *Seilwellengerät*, mit einem die Saite anregenden Motor und einer 60 cm langen Schnur. Es zeigt folgende Bilder je nach Spannung der Schnur:

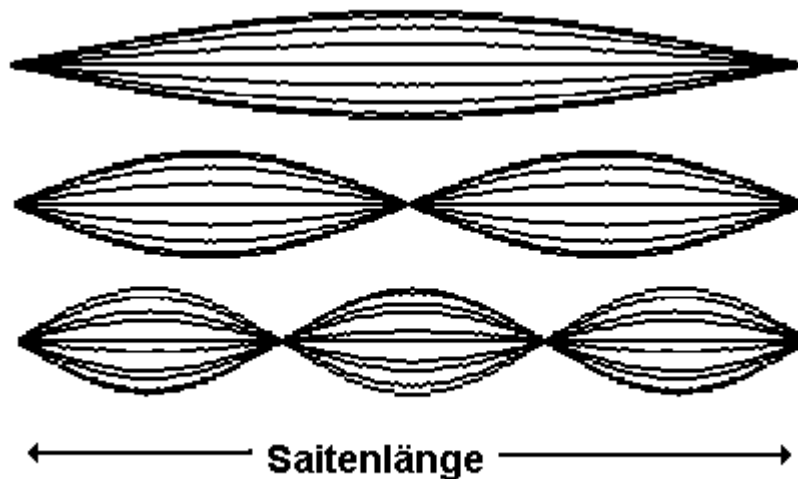
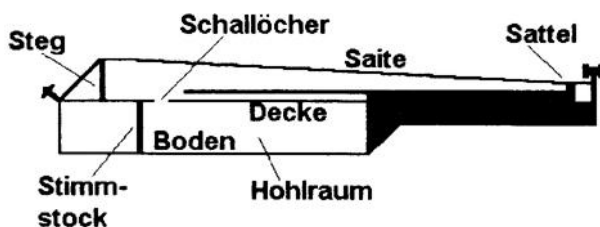


Abb. 5.8 Stehende Wellen am Modell

Zusammenfassung: Durch einmaliges Zupfen oder durch Streichen mit einem Bogen wird die Saite zu Eigenschwingungen erregt, die einigermaßen stabil sind. Technisch lässt sich das Phänomen der Eigenschwingung als „stehende Welle“ oder Überlagerung stehender Wellen erklären, was wiederum eine Folge der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Saite ist. Bei ein und derselben Saite ist diese Ausbreitungsgeschwindigkeit immer gleich (d.h. von der Frequenz unabhängig) und die Größe der Knoten und Bäuche und damit die Frequenz der stabilen Zustände hängt nur noch von der Saitenlänge ab.

5.4 Funktionen des Instrumentenkorpus bei Saiteninstrumenten

Eine Saite kann noch so gut schwingen, hören kann man das Saiteninstrument nur, wenn die Saite die Luft zu Schwingungen anregt, die sich zum menschlichen Ohr fortpflanzen. Hat die Saite eine nicht oder kaum schwingungsfähige Befestigung wie bei E-Gitarren oder E-Bass, so werden nur wenige Luftmoleküle durch die Saitenschwingung erregt. Man hört fast nichts. Daher Abbildung 3.1! Die Saitenschwingung muss aber, wenn nicht elektrische Tricks eingesetzt werden sollen, auf Körper übertragen werden, die Schwingungen besser abstrahlen, d.h. an die Luft abgeben können. Bei einer Geige sieht der entsprechende Mechanismus folgendermaßen aus:



Die Saite überträgt ihre Schwingungen nicht auf den Sattel, aber auf den Steg (der somit streng genommen nicht ein „Ende“ der Saite ist). Der Steg überträgt seine Schwingungen auf die Decke der Geige, die gut abstrahlt, von dort über den Stimmstock auf den Boden der Geige, der ebenfalls gut abstrahlt, und über Decke und Boden auf den Luftraum im Innern

der Geige, der durch die Schalllöcher mit der Außenluft in Berührung steht.

Die akustische Bedeutung sämtlicher hier genannten Bestandteile kann man einerseits dadurch testen, dass man deren Schwingungsverhalten stört (Dämpfer auf den Steg setzen, Decke oder Boden mit der Hand dämpfen, die Schalllöcher abdichten), oder aber dadurch, dass man die entsprechenden Stellen mit Kontakt- oder Luftmikrofon „ausmisst“. Boden und Decke der Geige sind zwar keine idealen Lautsprechermembranen, die alle Frequenzen gleichmäßig abstrahlen, aber sie schwingen in sog. „Moden“ auf recht chaotisch-schöne Weise und bei sehr merkwürdigen Frequenzen:

Auch der Hohlraum im Inneren hat Resonanzfrequenzen. Sind diese zu stark, so hört man bei einigen Frequenzen einen Klangfarbenwechsel („Wolf“). Das Besondere der Geige ist aber, dass zwar jeder einzelne Bestandteil ausgeprägte Eigentümlichkeiten aufweist, insgesamt aber das Schwingungsverhalten der Geige relativ ausgeglichen ist - vorausgesetzt, es handelt sich um eine Stradivari.

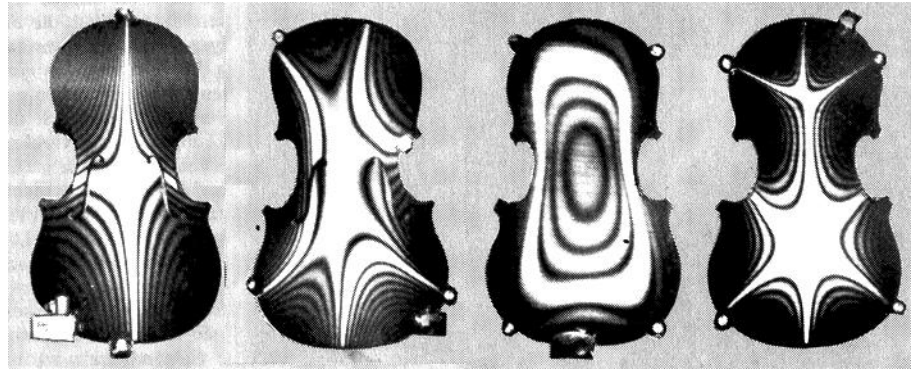


Abb. 5.10 Schwingungsformen von Decke (1 und 2) und Boden (3 und 4) der Geige

Bei vielen Saiten-Zupfinstrumenten (indische Sitar, zahlreiche Lauten oder Leiern) gibt es „Resonanzsaiten“, die nicht gezupft werden, aber mitschwingen. Sie begünstigen letztendlich nur die Abstrahlung, ohne jedoch dem gesamten Spielvorgang neue Energie zuzuführen. Die gesamte Schallenergie kommt aus der Handbewegung der SpielerIn (also der Verbrennung von Nahrung in den Muskeln des Menschen) - unterschiedliche Lautstärken sind ausschließlich Folge der mehr oder weniger guten Abstrahlung.

Ein besonderes Instrument ist die **Windharfe**, bei der ca. 6 gleich gestimmte Saiten vom Wind zur Schwingung angeregt werden. Die von der Oldenburgerin Jutta Kelm rekonstruierten und nachgebauten rein-akustischen Windharfen haben einen Korpus, der im Gegensatz zu anderen Saiteninstrumenten eine ausgeprägte Resonanzfrequenz besitzt, die mit der Grundfrequenz der Saiten identisch ist. Der Wind erregt je nach Richtung, Geschwindigkeit und Intensität eine der möglichen stehenden Wellen der Saite. Es gibt eine sich selbst verstärkende Rückkopplung zwischen Saitenschwingung und Korpus-Resonanzschwingung. Bei Änderung des Windes ändern sich die angeregten stehenden Wellen. Man hört harmonikale „Obertonmelodien“.



Abbildung 5.11 Berimbau (rechts unten) und die möglicherweise älteste Abbildung eines Musikinstruments („Jagd-Mundbogen“) in der französischen Grotte des Trois-Frères (1912 entdeckt).

Bei der **Berimbau** (ein aus Afrika stammendes Instrumente, das heute in Brasilien zur Begleitung von Capoeira verwendet wird) wird ein Stahldraht als Saite über einen Holzbogen gespannt. Die Saite wird mit einem Stock geschla-

gen. Durch spezielle Schlagtechniken und die Wahl unterschiedlicher Anschlagsorte wird erreicht, dass einige der stehenden Wellen der Saite verstärkt werden, die durch eine Kalebasse durch Resonanz noch verstärkt werden können. Kalebassen-Resonanz und Saitengrundfrequenz sind aufeinander abgestimmt. - Ähnliche Effekte können sich auch beim präparierten Klavier nach John Cage ergeben. Hier können gewisse Schwingungsmöglichkeiten einer Saite (durch Radiergummi etc.) unterdrückt oder (durch Nägel etc.) verstärkt werden. Werden zudem Reißnägeln auf die Hämmer gesteckt, so klingt das Klavier wie ein Berimbau. Beliebt ist auch der Resonanzeffekt, bei dem die Dämpfung der Klaviersaiten gelöst wird und diese dann durch ein akustisches Signal von außen zu Eigenschwingungen angeregt werden.

Wer stimmt die Saz?



Die hier abgebildete Saz hat sehr merkwürdige Bünde! Wer kann sie stimmen?

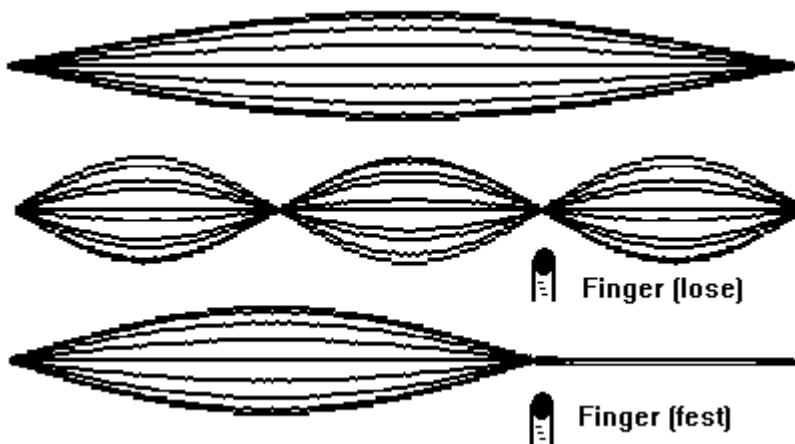
Kapitel 6: Fourieranalyse und der Klangcharakter von Musikinstrumenten

6.1. Flageolett und Teiltöne

Experiment 6.1a Seilwellengerät

Das Seilwellengerät (Abbildung 5.8) wird auf die „Grundschiwingung“ eingestellt. Berührt man das schwingende Seil an einem Knotenpunkt, so springt die Schwingungsform schlagartig in einen Typ stehender Welle über, der an der entsprechenden Stelle einen Knoten hat (Abbildung 6.1 „Finger (lose)“):

Auffallend an diesem Experiment ist, dass zusätzliche Knoten an Stellen entstehen, die gar nicht von Fingern berührt werden. Ein Schwingungsbild mit unterschiedlich großen Bäuchen, die nicht möglich.



Wir übertragen das „makroskopische“ Experiment 6.1a auf die „mikroskopischen“ Vorgänge einer musikalischen Saite. Dabei können wir die Knoten und Bäuche nicht sehen, wir können aber deren Existenz und Größe hörend nachvollziehen: denn eine Saite, deren Schwingung 2-, 3-, 4- usf. Mal so viele Bäuche wie die Grundschiwingung aufweist, sendet nach der „Längenformel“ von Ab-

Abb. 6.1 Knotenpunkte am Seilwellengerät

schnitt 5.2 die 2-, 3-, 4- usw. fache Frequenz aus.

Experiment 6.1b Flageolett beim Cello

Wir verwenden ein Cello und spielen zunächst ein *glissando*: die Saite wird durch Fingerdruck verkürzt, der Finger kontinuierlich bewegt, sodass sich die Saitenlänge kontinuierlich ändert. Nun bewegen wir den Finger wie beim *glissando*, drücken die Saite aber nicht aufs Griffbrett, sondern berühren sie nur. Man hört eine kunterbunte Abfolge von „Flageolett“-Tönen, ohne jede erkennbare Reihenfolge, hoch-tief im ständigen Wechsel, aber in erkennbaren Intervallfolgen ohne jeden *glissando*-Effekt.

Zwischenergebnis: Wir haben mit dem Finger nacheinander unterschiedliche Knoten der Saite hergestellt, wobei es gemäß Experiment 6.1a ja durchaus vorkommen kann, dass erheblich mehr als zwei Knoten entstehen und somit die gehörte Tonhöhe weit über die beim „richtigen“ Greifen erwartete hinausgeht. Die Klangfarbe der flageolett-Töne ist matter („sinusförmiger“) als die der normalen Töne. In der Abbildung 6.2 sind Beispiele von Flageolett-Stellen und -Tönen. Wenn die Saite (nur) in der Lage wäre, die abgebildeten flageoletts zu erzeugen und ein Finger von links außen nach rechts bewegt und die Saite rechts gestrichen würde, so würde man die Tonfolge e'' , e' , c' , e'' , g , e' , c ... hören.

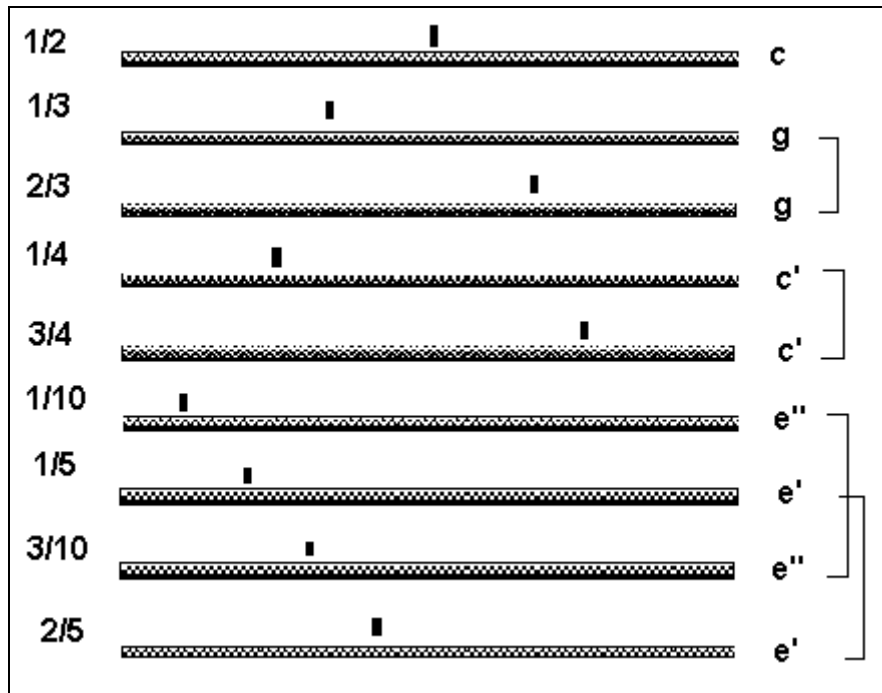


Abb. 6.2 Flageolett-Stellen auf einer Saite

Gesamtergebnis:

Wird die Saite an einer der Stellen $1/N$, $2/N$, $3/N$ bis $(N-1)/N$ berührt, so erklingt immer derselbe Ton, da stets dieselbe stehende Welle entsteht. So erklingt zum Beispiel die vierfache Frequenz (= doppelte Oktav) beim Berühren an der $1/4$ und $3/4$ Stelle. Die $2/4$ -Stelle ist mit $1/2$ identisch. Bei der $1/10$ -Teilung erhält man für $1/10$, $3/10$, $7/10$ und $9/10$ dieselbe stehende Welle, bei $2/10$, $4/10$, $6/10$ und $8/10$ diejenigen der $1/5$ -Teilung und bei $5/10$ diejenigen von $1/2$.

Rechts in Abbildung 6.2 sind für den Grundton C die jeweils erkennbaren Tonhöhen angegeben. Die Klammern kennzeichnen identische Tonhöhen, die durch Berührung an unterschiedlichen Stellen hervorgerufen werden. - Die Menge der durch flageolett gewonnenen „ganzahligen Teiltöne“ kann man in der Reihenfolge ihrer Tonhöhe aufzeichnen. Man erhält dann eine Abfolge, die in der uns gebräuchlichen Notenschrift näherungsweise wie folgt aussieht:



Abb. 6.3 Die Teiltonreihe bis zum 32. Glied in Annäherung

Die ganzzahligen Teiltöne sind hier in Gruppen so angeordnet, dass immer eine Gruppe innerhalb einer Oktav liegt. In der untersten Oktav liegt ein Teilton, in der 1. Oktav liegen 2 Teiltöne, in der 2. Oktav liegen 4 Teiltöne, in der 3. Oktav 8 Teiltöne usw. (In der N-ten Oktav liegen 2^N Teiltöne.) Die in der Abbildung umrahmten Teiltöne sind durch die vorliegende Notation ungenau wiedergegeben. Unser „natürliches“ abendländisches Tonsystem ist aus den Teiltönen der Ordnungszahlen 1,(2,) 3, (4,) 5, (6, 8,) 9, (10, 12,) 15 zusammengebastelt. Die eingeklammerten Teiltöne sind bereits Oktavierungen tiefer liegender. Mehr hierüber in Kapitel 8.

6.2. Der Satz von Fourier, Obertöne und Spektrum

Pythagoras hat, wie sein Biograf Iamblichos sagte, „die Musik erfunden“, indem er entdeckt hat, dass gewisse in der Musikpraxis seiner Zeit als „schön“ anerkannten Intervalle mit den einfachsten ganzzahligen Saitenteilungstönen erzeugt werden können. Bis ins 19. Jahrhundert war die Herleitung und Legitimation des aus gewissen Teiltönen zusammengesetzten abendländischen Tonsystems eine Sache der Religion: denn schließlich musste man „glauben“, dass ganze Zahlen musikalisch „schön“ sind. Diese Glaubensfrage änderte sich mit der Entdeckung Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), der ganz allgemein für periodische Schwingungen nachwies, dass diese sich stets auf eindeutige Weise aus Sinusschwingungen, deren Frequenz ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind, zusammensetzen lassen. Dies bedeutet *mathematisch* ausgedrückt:

- Jede periodische Schwingung ist zusammensetzbar aus Sinusschwingungen.
- Die Frequenzen dieser Sinusschwingungen sind *ganzzahlige Vielfache* der Frequenz der Ausgangsschwingung.
- Die Zusammensetzung ist *eindeutig*, d.h. die Amplituden der Sinusschwingungen, aus denen sich die Ausgangsschwingung zusammensetzt, sind eindeutig bestimmt, wenn alle Sinusschwingungen gleiche Phase haben.

Musikalisch ausgedrückt:

- Jeder Ton ist zusammensetzbar aus „harmonikalen“ Sinustönen, aus „Teiltönen“ (im Sinne des vorigen Abschnitts). Diese Zusammensetzung ist eindeutig.
- Die pythagoreischen Teil(ungs)töne werden zu „**Obertönen**“.

Unter „**Fourieranalyse**“ versteht man die eindeutige Zerlegung einer Schwingung in die Sinusschwingungen „mit ganzzahligen Frequenzen“ [lasch ausgedrückt]. Unter „**Fouriersynthese**“ versteht man die Zusammensetzung einer Schwingung aus lauter Sinusschwingungen „mit ganzzahligen Frequenzen“. Die Zusammensetzung kann bei extrem künstlichen Schwingungen (wie „Rechteck“ oder „Dreieck“) sehr, sehr viele Sinusschwingungen erfordern - im Extremfall unendlich viele. Allerdings ist die dabei auftretende unendliche Summe „konvergent“ im Sinne recht weit gefasster Maßbegriffe. Der Satz von Fourier war in doppelter Hinsicht ein über 150 Jahre nachwirkendes Ereignis in der Geschichte der Musikphilosophie. Hermann Helmholtz hat ihn auf die Musik angewendet und damit die Musikphilosophie/-ästhetik endgültig von der (naturwissenschaftlichen) Musikalischen Akustik abgetrennt („Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“ von 1862).

Was Pythagoras, Johannes Kepler und Johann Sebastian Bach nur durch die Kraft des Glaubens geschafft haben - *die Welt ist Zahl, die Welt ist Klang* -, ist nach Fourier eine notwendige Folge der „Natur des Tones“. Die Teiltonreihe und damit die harmonikale Basis der abendländischen Musik ist nicht nur eine Zahlenspekulation, sondern erklingt immer, sobald auch nur ein Ton ertönt.

Der Satz von Fourier ist ein mathematischer Satz und bezieht sich daher auf alle Arten periodischer Schwingungen. Er ist *universell* in dem Sinne, dass jegliche periodische Erscheinung in „harmonikale Elementarschwingungen“ zerlegt werden kann. Wenn heute Musikphilosophen wie Joachim Ernst Berendt oder Hans Kayser angesichts dieses Universalismus in Erstaunen geraten, so wundern sie sich eigentlich über die in der abendländischen Neuzeit paradigmatisch angenommene universelle Gültigkeit mathematischer Gesetze in der Natur.

Rein technisch ist die Vielfalt der musikalischen Töne danach eindeutig katalogisierbar: jeder Ton besteht aus Obertönen, und die jeweilige Amplitude der entsprechenden Oberschwingungen ist ein eindeutiges „Maß“ eines jeden Tons. Die Gesamtdarstellung dieser Amplituden nennt man (Fourier-) **Spektrum** des Tons.

Einige Warnungen:

- Der Satz von Fourier gilt nur für periodische Schwingungen. Klangereignisse, die auf *nicht periodische* Schwingungen zurückzuführen sind, haben keine harmonikalen Obertöne, haben kein (Fourier-) Spektrum etc.
- Der Satz von Fourier gilt streng genommen nur für *unendlich ausgedehnte* Schwingungen. Ist eine Schwingung nur kurz, so ist der Vorgang des Anfangens und Aufhörens - auch für das menschliche Ohr - oft wichtiger als der Ton selbst.
- Dennoch wird der Begriff „Oberton“ und „Spektrum“ bisweilen auch *auf nicht-ganzzahlige Obertöne* und/oder nicht-stabile Obertöne angewendet. Auch wir tun dies in Kapitel 9.
- Der Begriff „Spektrum“ ist nur sinnvoll, wenn ein „stationärer Klang“ vorliegt. Weder die Klangfarbe, noch die Tonhöhe dürfen sich ändern. Ändert sich die Klangfarbe, was ja in der Tat bei jedem Musikinstrument der Fall ist, so muss ein sich zeitlich veränderndes Spektrum angegeben werden.

Experiment 6.2 Fourieranalyse der Rechteckschwingung

Wir demonstrieren mittels eines Tricks, wie sich eine Rechteckschwingung aus harmonischen Sinusschwingungen zusammensetzt. Dazu schicken wir eine elektrische Rechteckschwingung durch ein Tiefpass-Filterssystem, dessen Durchlassbereich veränderbar ist. Der Tiefpass lässt, wie der Name sagt, nur Schwingungen bis zu einer (einstellbaren) „cut-off-frequency“ durch.

Die „cut-off-frequency“ f kann am Synthesizer kontinuierlich erhöht werden. Wir hören und beobachten am Oszilloskop, wie die durchgelassene Schwingung aussieht. Abbildung 6.4 zeigt einige Schwingungsbilder. Verwendet man statt eines Tief- ein Bandpassfilter (ein Filter, der nur einen engen, ca. eine Terz großen Frequenzbereich passieren lässt), so hört man zumindest die ersten 6 bis 8 Obertöne der Rechteckschwingung in der Abfolge von Abbildung 6.4.

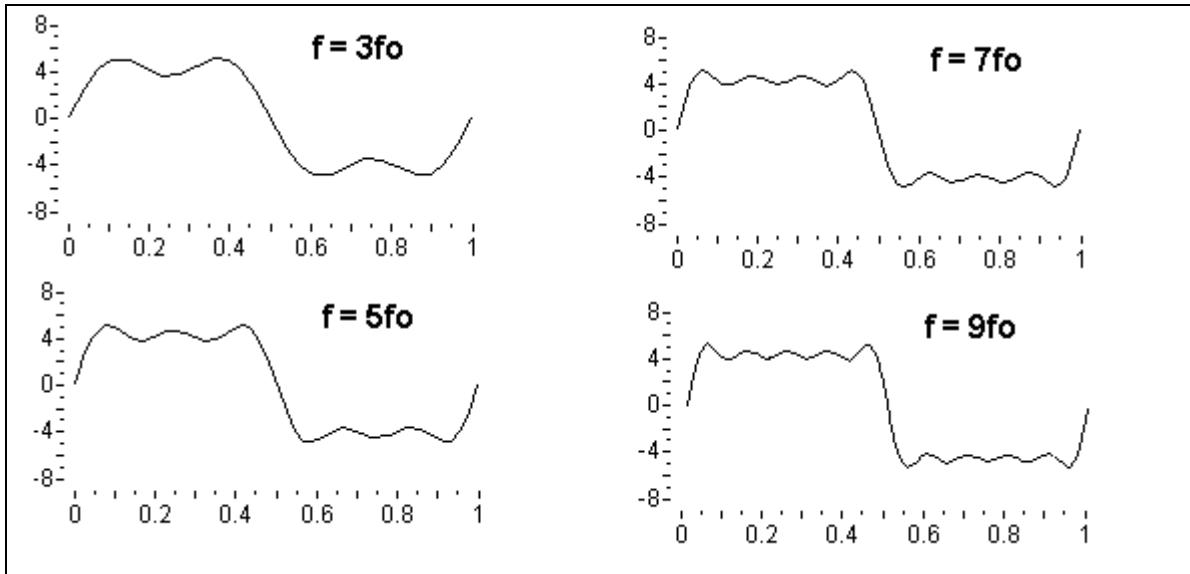


Abb. 6.4 Rechteck- als Summe ungeradzahliche Sinusschwingungen (experimentell gezeigt)

Die Filter-Experimente zeichnen das musikalisch nach, was in der mathematischen Theorie der Fourierreihen rein rechnerisch hergeleitet werden kann: eine Rechteckschwingung lässt sich als unendliche (aber konvergierende) Summe von ungeradzahlichen Sinusschwingungen mit den Amplituden $1, 1/3, 1/5, 1/7$ usw. darstellen!

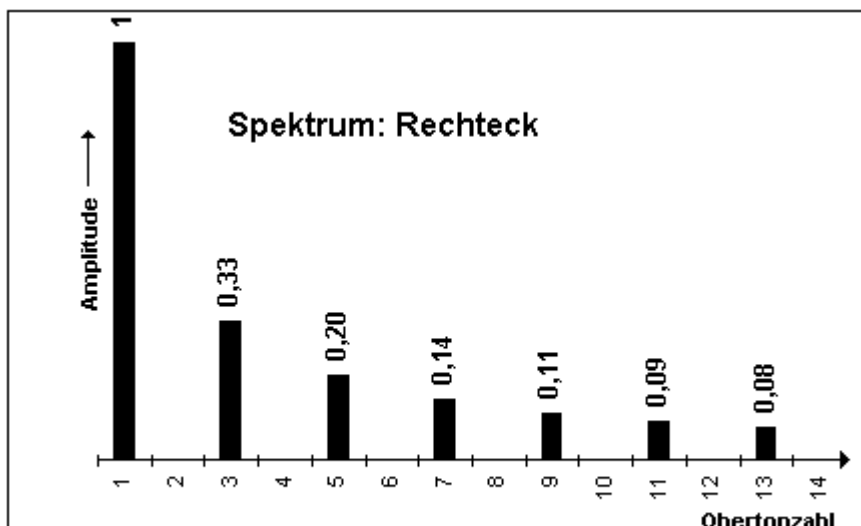


Abb. 6.5 Rechtschwingung als Spektrum dargestellt

Das Ergebnis von Experiment 6.2 lässt sich auch als „Spektrum“ darstellen.

Experiment 6.2 ist ein

qualitatives Experiment, das die Existenz von Obertönen nachweist und grobe Vorstellungen über deren Verteilung vermittelt. Helmholtz hat sich bei seinen „Spektralanalysen“ ebenfalls einer qualitativen Methode bedient, der „Resonanzmethode“ der Fourieranalyse. Dabei ging er davon aus, dass die Obertöne entsprechende Resonatoren zum Mitschwingen anregen. Ein Resonator der Frequenz 900 Hz kann also beispielsweise dann in Schwingung versetzt werden, wenn ein Ton der Frequenz 100 Hz einen 9. Oberton (der Frequenz 900 Hz) besitzt. Helmholtz verwendete als Resonatoren Glasgugeln, die eine Öffnung zum Eindringen des zu analysierenden Schalls und eine „Ohröffnung“ hatten.

Die **Resonanzmethode (der Fourieranalyse)** wird gelegentlich in klangfarbenorientierter Klaviermusik angewandt: Durch Niederdrücken der Taste eines Obertons wird die Dämpfung der entsprechenden Saite gelöst. Schlägt man den Grundton kurz an, so hört man, wie die Saite des Obertons nachschwingt. Offensichtlich ist sie durch einen im Grundton enthaltenen Oberton in Resonanzschwingung versetzt worden. (Gut hörbar beim 5. Oberton - zum Beispiel Grundton C und Oberton e'.)

Experiment 6.2a Schwebungsmethode

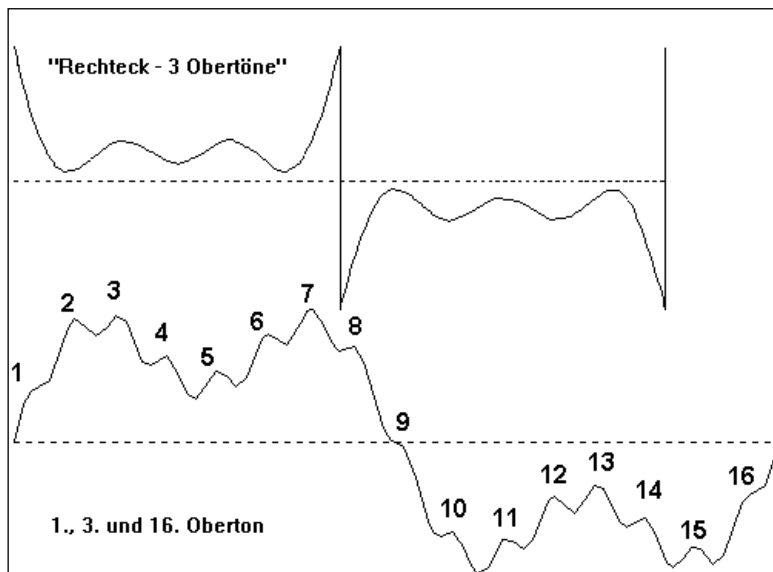


Abb. 6.6 Die "Augen-Fourieranalyse"

Eine äußerst präzise Methode Obertöne zu finden und nachzuweisen ist die „**Schwebungsmethode**“. Hierbei wird dem zu untersuchenden Ton mit der Grundfrequenz f_0 ein Sinuston („Suchton“) veränderbarer Frequenz f überlagert. Sobald Schwebungen gut hörbar sind, befindet sich der Suchton in der Nähe eines Obertons und, sobald diese Schwebungen verschwinden, hat der Suchton die Frequenz (und Amplitude) des jeweiligen Obertons.

Eine zur praktischen Orientierung recht brauchbare Fourieranalyse kann man auch mit bloßem Auge

am Schwingungsbild durchführen. Die Überlagerung einfacher Teilschwingungen drückt sich unmittelbar in entsprechenden Tälern und Bergen des Oszilloskopbildes aus. Abbildung 6.6 zeigt eine Rechteckschwingung, der die drei Grundschwingungen fehlen sowie einen Grundton dem der 16. Oberton (kleine Kräuselungen) und der 3. Oberton (größerer Wellengang) überlagert wurden.

6.3. Klangfarbe und Klangcharakter

Wenn wir fragen, woran der Mensch erkennt, dass ein Hammerklavier, ein Didgeridoo oder eine Bachtrompete erklingt, dann fragen wir nach dem **Klangcharakter** des Instruments. Es setzt sich derzeit allmählich die Terminologie durch, die „Klangfarbe“ vom Klangcharakter zu unterscheiden und unter Klangfarbe jene Eigenschaft zu verstehen, die durch das Spektrum (die Obertonstruktur des stationären Klanges) bestimmt ist. Der Begriff des „Spektrums“ ist nur sinnvoll, wenn ein stationärer Ton vorliegt. Er hat wenig Sinn bei üblichen Instrumentalklängen, die Geräuschanteile haben, oft einen charakteristischen Einschwingvorgang besitzen und deren Spektrum stark von der Lautstärke und Tonhöhe abhängig ist.

Experiment 6.3 Klangcharakter von Musikinstrumenten

In einem empirischen Experiment lassen wir einige Instrumente bestimmen, wenn der **Einschwingvorgang** weggeschnitten ist. Wenn die Fehlerquote 50% beträgt, wurde geraten, d.h. das Instrument war nicht mehr zu erkennen. Bessere Erkennbarkeit hängt an spezifischen Eigenschaften des stationären Klanges, z.B. Luftgeräusche bei der Flöte, ein gewisses Schmettern bei der Posaune oder die „quasiperiodische Schwingung“ bei der Klangschale:

Instrument	Posaune	Flöte	Geige	Gitarre	Klangschale	Klavier	Fender-Rhodes
Fehlerzahl	30%	10%	60%	20%	10%	50%	50%

So gut wie gar nicht zu erkennen sind Klavier, und die Geige auch schlecht. Ein Klavier ohne Ein-

schwingvorgang hinterlässt einen fast sinusförmig-ätherischen, beinahe elektronischen Eindruck. Unter www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download ist ein Beispiel, bei dem der Einschwingvorgang eines Klaviers kontinuierlich schwankt, sodass alle Übergänge zwischen mit/ohne Einschwingvorgang zu hören sind.

Beim Klavier haben wir schon festgestellt, dass der Klangcharakter stark von der Lautstärke abhängt, weil letztere den Einschwingvorgang beeinflusst (Experiment 2.5). Aber auch bei Instrumenten wie der Posaune, wo der Einschwingvorgang nicht so wichtig ist, ändert sich das Spektrum stark mit der Lautstärke: der Klang wird "heller", "schmetternder", weil bei größerer Lautstärke höhere Obertöne hervortreten:

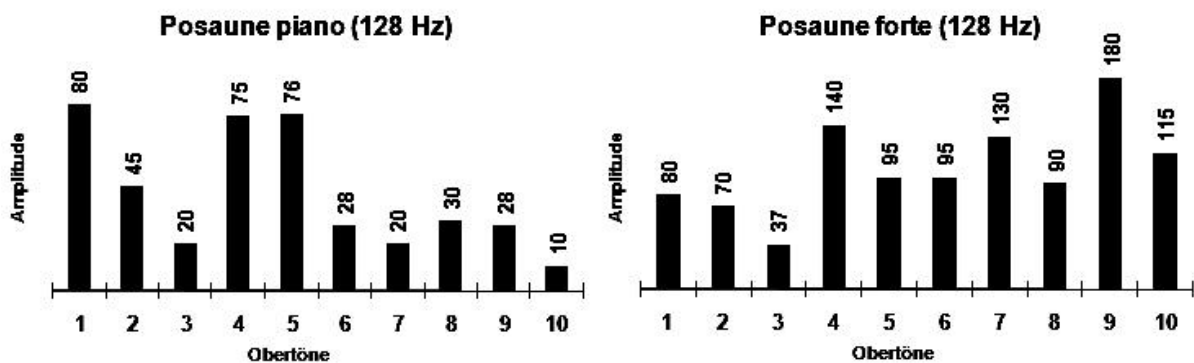


Abb. 6.7 Spektrum der Posaune bei unterschiedlichen Lautstärken

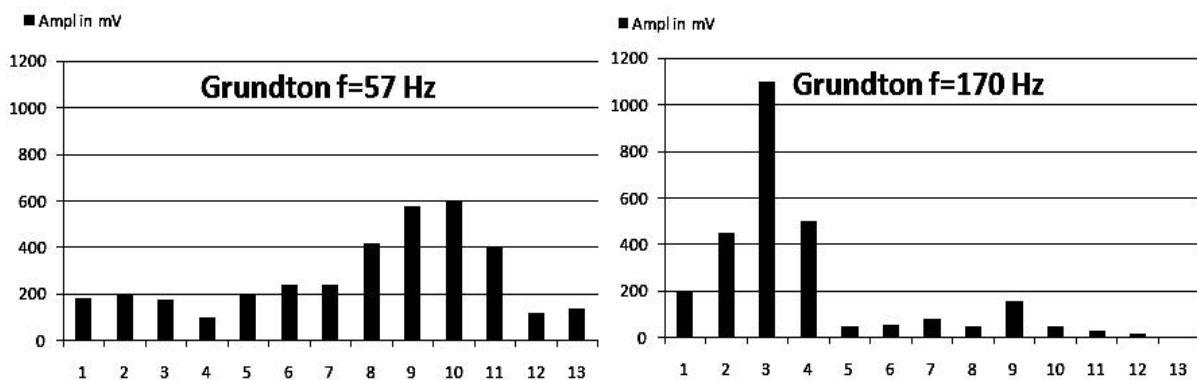


Abb. 6.8 Fagott-Spektrum bei 2 Grundtönen

Schließlich hat jedes Musikinstrument einen "**Formantbereich**", d.h. einen Frequenzbereich mit starken Obertönen unabhängig von der Grundtonhöhe. Dieser Bereich ist durch den Bau des Instruments bestimmt und spiegelt das Resonanzverhalten wider. Der Abbildung 6.8 ist zu entnehmen, dass das Fagott bei 500-600 Hz starke Obertöne hat: beim Grundton 57 Hz liegen dies um den 10. Oberton, bei Grundton 170 Hz und den 3. Oberton. Der Bereich 500-600 Hz ist der Formantbereich des Fagotts. Hier liegen unabhängig vom Grundton starke Obertöne.

Zusammenfassung:

- Einschwingvorgang: Dauer, Geräusch ← Eigenschaften der Schwingungserregung
- Dauerklang: (1) Spektrum: Obertongehalt (scharf/weich, hell/dunkel) ← Eigenschaften des Schwingungserzeugers, (2) Formant: Vokalcharakter ← Eigenschaften des Instruments, (3) Modulation: Vibrato ← Abbild der Spieltätigkeit.
- Ausklingen: Dauer, Klangfarbenänderung ← Eigenschaften des Instruments und des Schwingungserzeugers.

Zeitlicher Verlauf des Spektrums

Ein Spektrum kann sich auch ohne Änderung von Tonhöhe oder Lautstärke im Verlauf der Zeit ändern. Ein „Wah-wah“-Klang beispielsweise verändert die Intensität der Obertöne vom Bereich 400 Hz bis 3000 Hz (entsprechend dem Vokalcharakter u-o-a) kontinuierlich (Abbildungen 6.9 und 6.10).

Perspektivische 3D-Darstellung eines Spektrums:

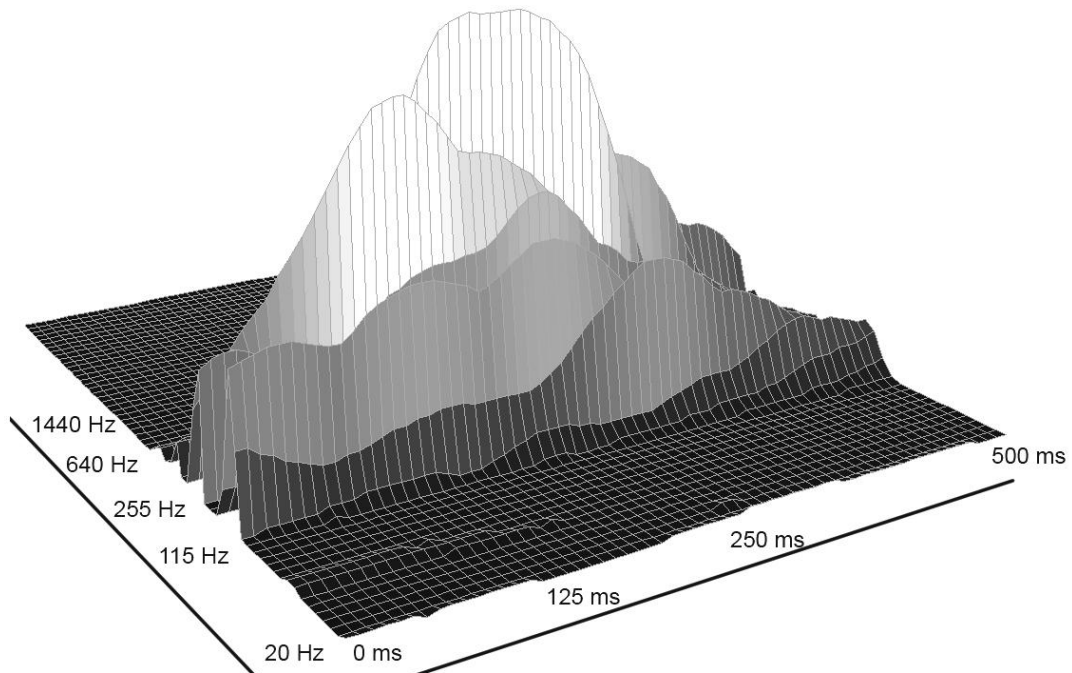


Abb. 6.9 3-D-Darstellung eines Wah-Klages

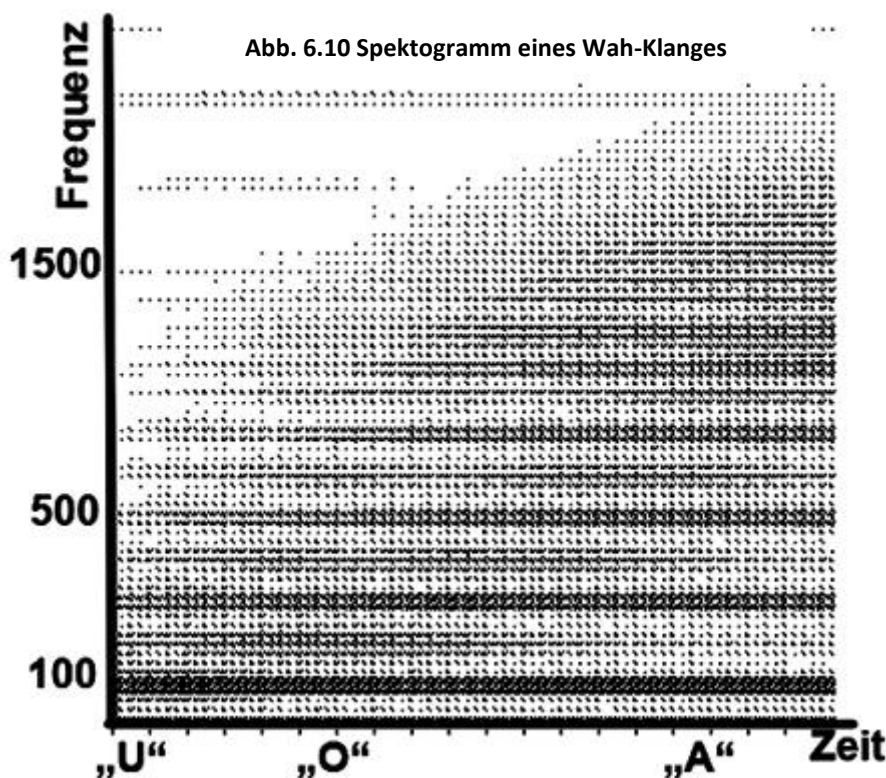


Abb. 6.10 Spektrogramm eines Wah-Klages

Bei der 3-dimensionalen erhält man das Spektrum zu einem bestimmten Zeitpunkt dadurch, dass man sich einen Schnitt durch diese „Wellenberge“ denkt. Bei 0 msec („U“) liegt die höchste Amplitude bei 455 Hz, bei 400 MS („A“) über 1440 Hz.

Im „Spektrogramm“ wird die 3. Dimension der Amplitude durch die Schwärzungsintensität angegeben: je schwärzer ein Bereich, umso größer die Intensität in diesem Bereich. Es ist auch hier deutlich

zu sehen, dass „A“ Obertöne in höheren Frequenzbereichen besitzt als „U“. – Das sehr suggestive und einfach zu lesende Spektrogramm liefert freilich nur ungefähre Richtwerte und keine genauen Ergebnisse (daher „analoge“ Darstellung).

6.4. Formanttheorie

Im musikalischen Alltag findet eine (tendenzielle) Fourieranalyse immer dann statt, wenn ein musikalischer Klang von einem Resonator verändert wird. Wenn ein obertonreicher Ton einen Resonator durchläuft, dann werden einige Obertöne verstärkt, andere abgeschwächt. Der Mund-Rachenraum des Menschen ist der wichtigste Resonator der musikalischen Alltagspraxis. Die menschliche Vokalstimme ist nach folgenden Schema aufgebaut:

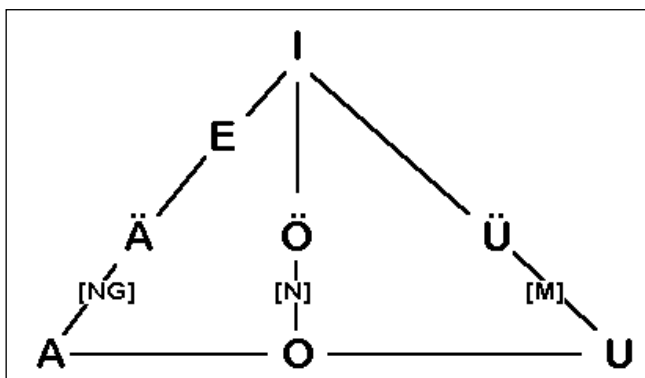
- die Energie stammt aus der Lunge und erregt als Luftstrom die Stimmbänder,
- die Frequenz bestimmen die Stimmbänder (Spannung etc.),
- den Vokalcharakter bestimmt der Resonator Mund-Rachenraum,
- die Abstrahlung die Öffnung des Mundes.

(Die Konsonanten funktionieren nach einem anderen Prinzip, vgl. Kapitel 9.)

Die **Vokale der menschlichen Stimme** werden also dadurch hervorgebracht, dass die Stimmbänder einen obertonhaltigen (schnarrenden) Ton erzeugen, der durch den Mund-Rachenraum gefiltert wird. Je nach Stellung von Zunge, Lippen, Gaumen etc. ändert sich der Resonanzbereich und werden unterschiedliche Obertöne verstärkt. Diese Bereiche heißen „**Vokal-Formanten**“.

U	200-400			
O		420-480		
A			900-1000	
Ö		400-500		1200-1400
Ü	200-400			1600-1800
Ä		300-800		1800-2100
E		300-600		2100-2500
I		300-500		2500-3000
	1. Oktav	2. Oktav	3. Oktav	4. Oktav

Experiment 4.6 Das Vokaldreieck



Wir versuchen in einer bequemen Tonlage singend von einem „u“ ohne zu unterbrechen zu einem „i“ zu gelangen. Auf dem Weg zwischen „u“ und „i“ erzeugen wir, ohne es zu wollen, andere Vokale, „ü“, oder „o“ oder/und „a“ usw. Der kontinuierliche Übergang von der Mund-Rachenstellung des „u“ zu der des „i“ erfolgt über Mund-

Abb. 6.11 Das Vokaldreieck

Rachenstellungen anderer Vokale. Für deutsche Menschen gibt es drei Wege vom „u“ zum „i“, wie das „Vokaldreieck“ zeigt.

Versucht man nun, einen dieser Wege mehrfach und langsam hin- und her zu gehen und mit dem angegebenen Konsonanten zu beginnen, so kann es passieren, dass wir den Eindruck haben, dass sich nicht nur die Klangfarbe des Grundtons ändert, sondern dass tatsächlich Quint- oder Terzschritte in der „Klangbewegung“ zu vernehmen sind. Diese Schritte zeugen von den durch die jeweiligen Vokalformanten angesprochenen Obertönen des Grundtons.

Die Formanttheorie hat auch schöne Seiten: die Obertonmusik. Am berühmtesten ist der Oberton- gesang, bei dem ein Mensch zweistimmig zu singen scheint. Die ObertonsängerIn produziert mit ihren Stimmbändern einen obertonreichen und möglichst tiefen Bordunton. Den Mund-Rachenraum stellt sie als sehr engen Bandpassfilter ein. Nun kann es vorkommen - und nach vielen Jahren intensiven Übens kommt es immer häufiger vor -, dass aus dem Bordunklang ein einziger Oberton „herausgeholt“ werden kann, wobei eine Art Rückkopplung genau diesen Oberton verstärkt und alle übrigen unterdrückt. Der Oberton klingt sinusförmig. Die in Abbildung 6.11 eingezeichneten Konsonanten geben Hilfestellungen bei solch einem „Obertontraining“. Beginnt man mit ihnen und fährt dann zum nächst höheren Vokal fort, so erschließen sich die Obertöne einfacher.

Experiment 4.7 Die Formanten von Musikinstrumenten

Wenn ein Instrumentalklang einem Vokal ähnelt, so bedeutet das, dass er in dem zu diesem Vokal gehörenden Formantbereich starke Obertöne besitzt. Viele Musikinstrumente haben solche Formantbereiche, d.h. also Frequenzbereiche mit starken Obertönen unabhängig von der jeweils gespielten Tonhöhe. Wir nehmen Instrumentalklänge analog oder digital auf und spielen sie in anderer Geschwindigkeit ab. Dadurch werden die Frequenzen sämtlicher Obertöne um denselben Faktor verändert, sodass sich am Spektrum, das ja nur Frequenzverhältnisse angibt, nichts ändert. Der Klangcharakter des Instrumentaltons ändert sich aber, da der Formantbereich transponiert wird. Es kommen die in der Tabelle wieder gegebenen qualitativen Ergebnisse zustande.

<i>1 Oktav tiefer</i>	<i>original</i>	<i>1 Oktav höher</i>
Panflöte	Panflöte	Panflöte
Posaune	Posaune	Trompete
Waldhorn	Waldhorn	Trompete oder Oboe
Bass-Klarinette	Klarinette	Klarinette
Engl.-Horn	Oboe	Violine
Oboe	Violine	Violine
Engl.-Horn	Engl.-Horn	Trompete

Qualitativ lässt sich dies Ergebnis so deuten, dass der Formantbereich des einen Instruments durch die Oktavierung auf den Formantbereich eines anderen Instruments gerückt ist mit dem Effekt, dass das ursprüngliche Instrument mit dem anderen verwechselt wird. Eine Violine hat Formantbereiche um c^6 und c^7 , während die der Oboe bei e^5 und e^6 liegen. Die Verschiebung des Oboen-Spektrums um (knapp) 1 Oktave bedeutet, dass die Oboen-Formanten sich mit denen der Violine (fast) decken. Ähnliches gilt von Posaune und Trompete. Die Panflöte hat keine ausgeprägten Formanten, weshalb sie beliebig „transponiert“ werden kann.

Ersichtlich setzt die „Formanttheorie“ der Samplingtechnologie (Abschnitt 4.4) enge Grenzen. Denn Soundsampler beruhen auf dem Prinzip, dass ein Instrumentalklang unterschiedlich schnell abgespielt (mit unterschiedlichen Abtastfrequenzen ausgelesen) werden kann. Der Ursprungsklang soll so transponiert werden, als ob das Instrument selbst höher oder tiefer spielen würde. Sobald sich aber die jeweiligen Formanten zu sehr verschieben, entsteht der berühmte „Mickeymaus-Effekt“.

Obertongesang

<i>Bezeichnung</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Stimmtechnik</i>
sygyt	Imitation einer milden Sommerbrise, de Gesang des Vogels	Obertongesang, vorn im Mund gebildet: üü
chömii	Wind, der zwischen den Felsen wirbelt	Obertongesang, weiter hinten gebildet: uu
kargyraa	heulender Winterwind - oder der Schrei eines Mutterrindes, das ihr Kind verloren hat	Untertongesang mit vagierenden Formanten: u-o-a
borbangnadyr	die rollenden Stromschnellen eines Flusses	Lippen- oder andere Triller
ezenggileer	dahintrottelndes Pferd („ezer“ = Sattel)	pulsierender Luftstrom
chylandyk	singende Kröten („chylandyk“ = Kröte)	Verbindung von sygyt und kargyraa

Höre ein Musikbeispiel aus dem fernen Tuva und „lokalisier“ die hier beschriebenen Effekte!
(Musik auf www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download.)

Kapitel 7: Schwingungserzeugung durch Luftsäulen



Abb. 7.1 Luftdruck- und Tonerzeugung bei der Orgel

Im vorliegenden Kapitel dreht sich alles um die „Blasinstrumente“. Die Musikalische Akustik nennt sie „Luftinstrumente“ (siehe Abbildung 5.1), da der Schwingungserzeuger aus einer durch ein Rohr begrenzten Luftsäule besteht. Der elastischen, eindimensionalen Saite (siehe Kapitel 5) entspricht die elastische, eindimensionale Luftsäule. Wie die Saite ist sie zwar auch dreidimensional, ein Wesen in Raum und Zeit, aber die musikalisch relevante Schwingung ist (nur) als eindimensionale gut berechenbar und vorhersehbar.

Während die Saite ein materiell gut von der sie umgebenden Luft abgegrenztes Gebilde ist, ist eine Luftsäule als Schwingungserzeuger von der sie umgebenden Luft durch ein Rohr abgegrenzt. Das Rohr selbst schwingt nicht oder nur unwesentlich. Dies

Rohr ist nicht mit dem Korpus eines Saiteninstrumentes zu vergleichen! Denn das Rohr ist nur zur Begrenzung der Luftsäule und nicht zur Abstrahlung da. Legt man die Hand auf den Korpus eines Saiteninstrumentes, so verändert sich sofort die Abstrahlung und der gehörte Klangcharakter, beim Saxophon, bei der Posaune oder beim Alphorn ändert sich durch Handauflegung nichts.

7.1. Grundlegendes zu Schallwellen

Schwingt ein Körper so, dass die Luft zu Schwingungen erregt wird, die auf das menschliche Ohr treffen, um dort Gehörsempfindungen auszulösen, so spricht man von Schall. Die Luft überträgt diesen Schall in Form von Schallwellen. Die Luftmoleküle bewegen sich im Luft-Ruhezustand wild durcheinander, allerdings statistisch gut verteilt. Dies Bewegungsdurcheinander kann man indirekt sehen, wenn Staubpartikel als in „Brown’scher Molekularbewegung“ hin- und hergeschubst in einem Sonnenstrahl erscheinen. Gemessen wird diese interne Bewegung indirekt als Luftdichte oder Luftdruck, der sich mit der Temperatur und der geographischen Lage ändert. Wenn sich die Luft als „Wind“ in eine bestimmte Richtung bewegt, so heißt das, dass das statistische Durcheinander als Gesamtpaket seine Lage im Raum ändert. Abbildung 7.1 soll nochmals verdeutlichen, dass der Blasebalg einer Orgel „Luftdruck“, aber keinen „Wind“ erzeugt...

Befindet sich in dieser Luft ein schwingender, materieller Körper, der die ihn unmittelbar umgebenden Luftmoleküle anstößt, so breitet sich eine entsprechende Störung aus. Von einem Punkt geht eine kugelförmige Welle aus. Die dadurch hervorgerufenen Schwankungen der Luftdichte bzw. des Luftdrucks an irgendeiner Stelle des Raumes überlagern sich der statistischen Luftmolekülbewegung und gegebenenfalls auch dem Wind. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Störung bei Windstille ausbreitet, heißt Schallgeschwindigkeit. Sie ist mit ca. 330 m/sec (1200 km/h) relativ hoch und wird von der Windgeschwindigkeit, wie man ja aus dem Alltag weiß, nur mäßig beeinträchtigt .

Luftdruckschwankungen beeinflussen die Schallgeschwindigkeit und damit das Ausbreitungsverhalten. Bei Inversionswetterlagen, wenn zwei Schichten unterschiedlichen Luftdrucks übereinander liegen, wird der Schall an der Übergangsstelle teilweise reflektiert. In der Innenstadt von Oldenburg kann man dann die Autos des Autobahnringes so hören, als ob sie direkt an einem vorbeifahren würden.

Den Vorgang der Ausbreitung einer Schallwelle veranschaulicht Abbildung 7.2:

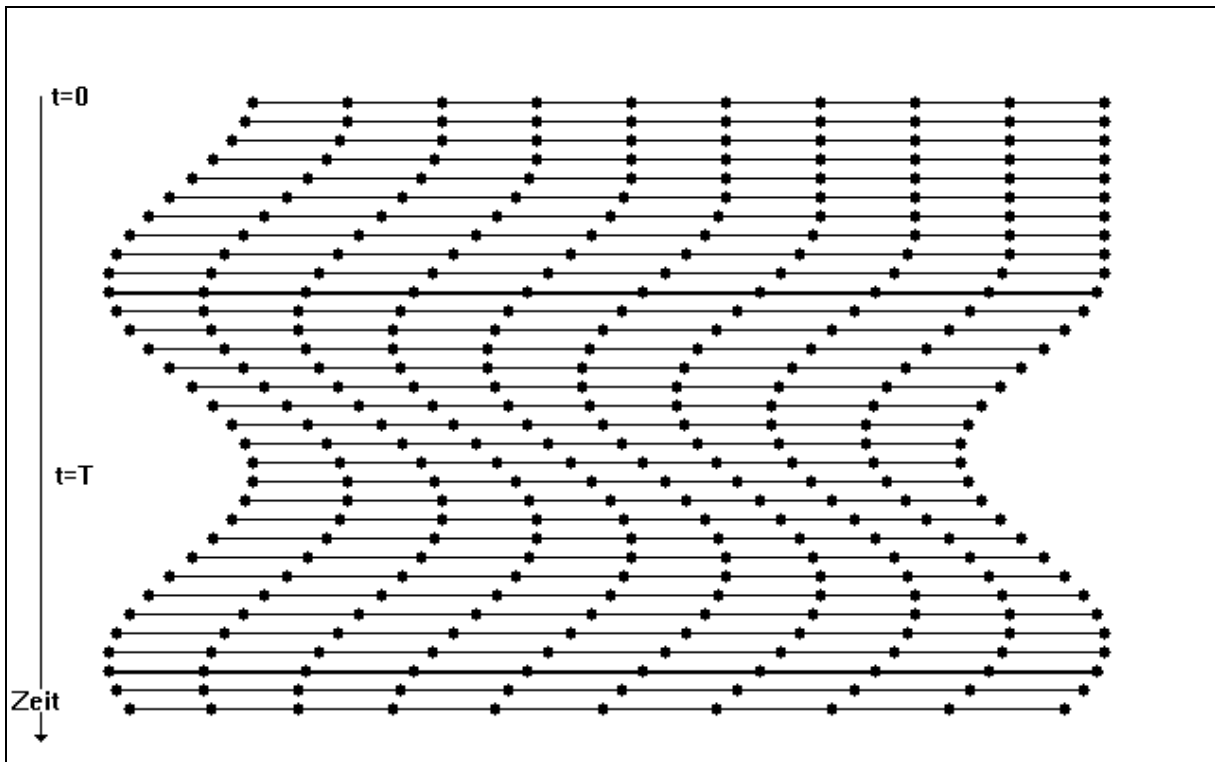


Abb. 7.2 Modell einer (1-dimensionalen) Schallwellenausbreitung

Gezeichnet sind 20 Momentaufnahmen der Moleküllage pro Periode T der anregenden Schwingung. Die statistische Bewegung der Moleküle wird vernachlässigt und wir tun so, als ob alle Moleküle wie Perlen an einer elastischen Schnur nebeneinander aufgereiht wären. Wenn das Molekül links außen sinusförmig hin- und herbewegt wird, so ergibt sich die dargestellte „Kettenreaktion“. Da die Moleküle elastisch und nicht entlang einer starren Stange miteinander verbunden sind, überträgt sich die Bewegung des Moleküls links außen nicht sofort auf alle anderen Moleküle. Diese folgen vielmehr erst nach einer gewissen Zeit der Bewegung. Hat das Molekül links außen eine ganze Periode T zurückgelegt, so ist die „Welle“ um eine Wellenlänge nach rechts gewandert, hat aber noch keineswegs alle Moleküle erreicht.

Es gibt in Abbildung 7.2 - wie bei allen Wellen - zwei Betrachtungsweisen: entweder man betrachtet alle Zustände eines festen Zeitpunkts (hier: die Lage der Moleküle entlang *einer* horizontalen Linie) oder man betrachtet die Bewegung der Moleküle an einem festen Ort (hier die Sinusbewegung in vertikaler Richtung). Für das menschliche Ohr ist die letztgenannte Betrachtungsweise von Bedeutung. Die Abbildung suggeriert den Tatbestand, dass die Schwingungen an jedem Ort dieselben wie an der Schallquelle sind, dass sie dort aber zu einem anderen (späteren) Zeitpunkt stattfinden. Die Verspätung ist durch die Schallgeschwindigkeit bedingt. Wir können den Vorgang von Abbildung 7.2 überprüfen:

Experiment 7.1 Messung der Schallausbreitung

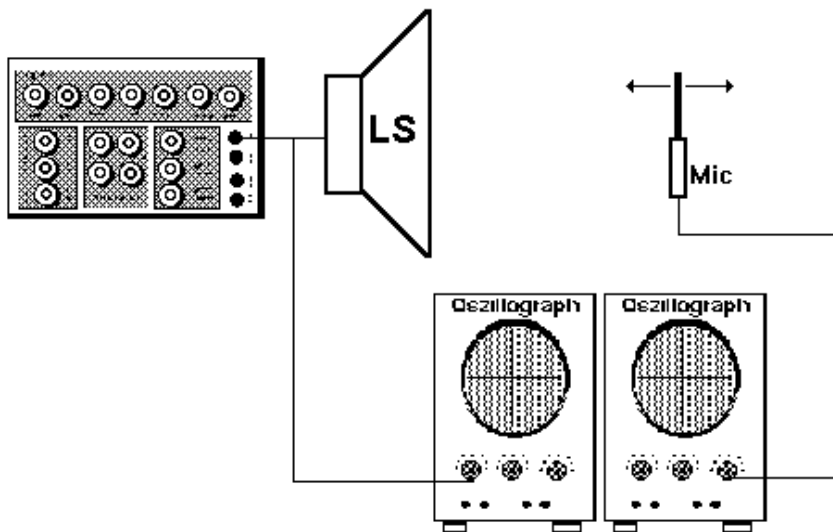


Abb. 7.3 Experiment zur Schallausbreitung

Am linken Oszillographen wird die Schwingung gezeigt, die die Lautsprechermembran vollführt, am zweiten die Schwingung, die an einer bestimmten Stelle in der Luft herrscht. Bewegt man das Sondenmikrofon (das sehr dünn ist und die Schallwelle wenig beeinflussen soll) von links nach rechts, so wandert am zweiten Oszillographen das

Schwingungsbild. Man kann ausmessen, wie groß der Abstand zwischen zwei Stellungen des Sondenmikrofons ist, bei denen die beiden Schwingungen übereinstimmen. Dieser Abstand ist dann eine Wellenlänge.

Einige weitere *Ergebnisse* des Experiments:

- Die Form der Schwingung ändert sich nicht zwischen Lautsprecher und Mikrophon und auch nicht zwischen den unterschiedlichen Stellen des Raumes. Lediglich die Amplitude wird kleiner.
- Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional der Frequenz. Sie ist von der Temperatur (und damit von der Schallgeschwindigkeit) abhängig. Dies ist nach Abbildung 7.2 auch logisch - genauer: zwischen Schallgeschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Periode T (bzw. Frequenz f) besteht die Beziehung $c = \lambda/T = \lambda f$.
- Die Schallgeschwindigkeit ist unter den hier herrschenden Bedingungen nicht erkennbar von der Frequenz und der Schwingungsform abhängig.

Das Phänomen der endlichen Schallgeschwindigkeit gibt es nicht nur in Luft, sondern in allen Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. In Festkörpern ist die Schallgeschwindigkeit ca. 10 Mal, in Flüssigkeiten ca. 5 Mal so groß wie in Gasen. Da Schall stets reflektiert wird, wenn Substanzen unterschiedlicher Geschwindigkeit aufeinander stoßen, spielen die Unterschiede der Schallgeschwindigkeit verschiedener Hölzer oder Metalle eine große Rolle für die Praxis des Instrumentenbaus. Hier eine Übersicht über einige **Schallgeschwindigkeiten** (nächste Seite).

Schallwellen benötigen einen *materiellen Träger*, zum Beispiel Luft oder Holz. Im Vakuum kann sich kein Schall ausbreiten. Daher hört man nichts von der Sonne oder den Pulsaren. Die Pulsare senden periodische elektromagnetische Strahlung in einem Frequenzbereich zwischen 0,25 und 625 Hz aus. Fängt man diese Schwingungen über Teleskope/Kameras ein und setzt sie in akustische Schwingungen um, so kann man diese „kosmische Musik“ real hören. Elektromagnetische Wellen (zu denen Licht- Radio-, Röntgen- usw. Wellen gehören) benötigen, um sich auszubreiten, keine Materie.

Substanz	Temp. in	sonstiges	c in m/sec
Luft	-100	1 at	263
	-10		325,3
	0		331,8
	10		337,8
	20		343,8
	30		349,8
H ₂	18	1 at	1301
O ₂	0	1 at	315,4
H ₂ O (Seewas-	0	1 at	1440
	0	in 3000 m Tiefe	1467
Eis	-4 ⁰ C		3232
Buche		Stäbe	3400
Eiche		Stäbe	4310
Eisen		Stäbe	5170

Die Wellenlängen bei Zimmertemperatur (20 Grad) und kalter Außentemperatur (-10 Grad) verhalten sich wie $343,8 : 325,3 = 1,05687$. Als „Intervall“ gesehen ist dies Verhältnis fast das eines temperierten Halbtons von 1,05946. Die Auswirkungen dieses Sachverhalts auf das „Kurrendeblasen“ an Weihnachten sind fatal, weil Choräle, die im „divertissanten und prächtigen“ B-Dur eingeübt wurden, urplötzlich im „mehr zu klagenden und traurigen Personen neigenden“ A-Dur erklingen (Angaben nach Mattheson/Wustmann).

Tabelle der Schallgeschwindigkeiten in diversen Medien

Während die Schallgeschwindigkeit in der Luft bei 340 m/sec liegt, liegt die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen (= Lichtgeschwindigkeit) bei ca. 300 000 km/sec. Anwendung: Sieht man bei Gewitter den Blitz und hört 2 sec später den Donner, so war der Blitzeinschlag 2×340 m entfernt. Das Licht ist „sofort“ da, der Donner braucht länger. Die Wellenlängen der Schallwellen kann man nach der bereits zitierten Formel aus der Frequenz berechnen: $\lambda = c/f$. Sie liegen also zwischen $340/16 = 21,25$ m und $340/16000 = 0,02125$ m.

7.2. Eigenschaften von Luftsäulen als Schwingungserzeuger

Experiment 7.2

Wie in Abschnitt 5.2 beginnen wir mit einem Black-Box-Experiment. Wir nehmen eine Zugposaune zur Hand und messen den „Auszug“ für einige musikalische Intervalle. Die gesamte Verlängerung des Rohres einer Posaune ist 2 Mal der „Auszug“. Hier die *Messergebnisse*:

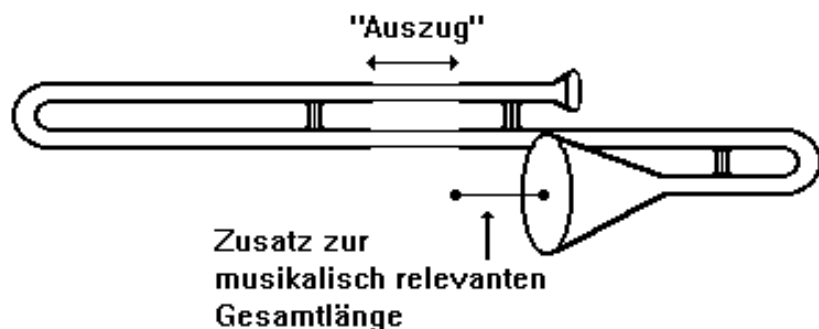


Abb. 7.4 Experiment zur Intervallbestimmung

Längenunterschied	gehörtes Intervall	Frequenzverhältnis	$\Delta L / (I - 1)$ berechnet
$2 \times 48 = 96$ cm	Quart	4:3	288 cm
$2 \times 36 = 72$ cm	gr. Terz	5:4	288 cm
$2 \times 29 = 58$ cm	kl. Terz	6:5	290 cm

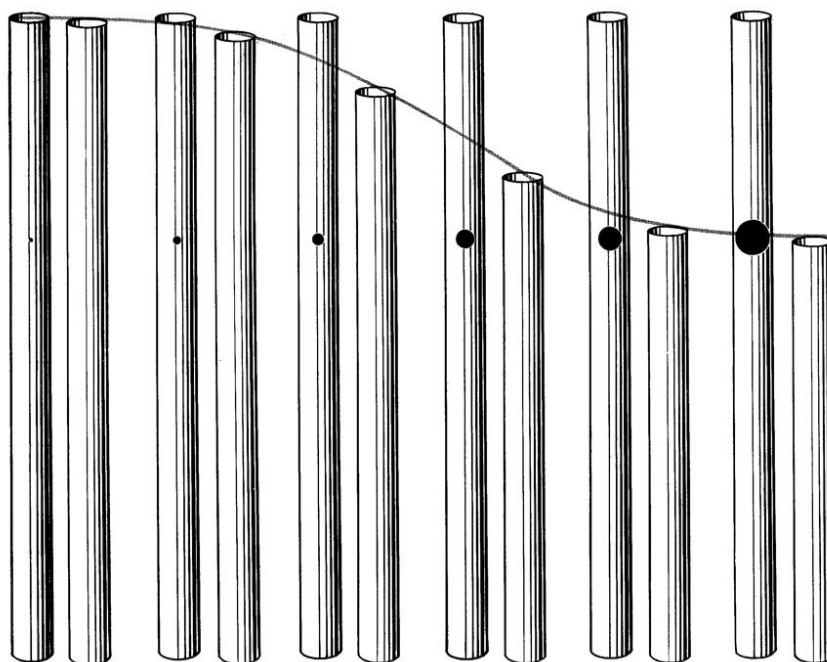
Die Größe $\Delta L / (I - 1)$ der letzten Spalte gibt die Länge der Grundschwingung an. Nennen wir diese L_0 , so gilt ja $(L_0 + \Delta L) : L_0 = I$ und nach L_0 aufgelöst $L_0 = \Delta L / (I - 1)$. Die Posaune ist 278 cm lang, die hier ermittelte Länge beträgt 290 cm. Wir deuten das Ergebnis so, dass der Saitenlänge aus dem Monochord-Experiment annähernd die Länge der Posaune entspricht, genau genommen aber eine um 12 cm längere Größe. Die Länge der musikalisch relevanten Luftsäule ist ein bisschen größer als die Länge der Posaune. - Dies ist, anschaulich, ein vernünftiges Ergebnis, denn im Gegensatz zur Saite, die an den beiden Enden relativ exakt begrenzt ist, geht die Luftsäule im Innern des Instruments kontinuierlich in die Außenluft über. Es ist also nicht zu erwarten, dass die schwingende Luftsäule genau mit dem Trichter des Instruments endigt.

Bezeichnen wir mit „Länge“ die Länge der musikalisch relevanten Luftsäule, so gilt wie bei der Saite die wichtige Beziehung:

$$\text{Länge}_1 : \text{Länge}_2 = \text{Frequenz}_2 : \text{Frequenz}_1$$

Bei der Posaune sind die Längenänderungen am einfachsten. Andere Blechblasinstrumente haben Klappen oder Ventile, mit denen sie die effektive Länge des Instruments entsprechend einem Halbton, einem Ganzton oder einer kleinen Terz verändern können. Ein Quartventil vergrößert die effektive Länge auf $4/3$ der ursprünglichen.

An Orgeln oder bei Panflöten (siehe ganz unten) können Längenmessungen mit sehr guten Ergebnissen durchgeführt werden. Hier stimmt die musikalisch relevante Länge oft bis auf wenige Millimeter mit der tatsächlichen Länge des Rohres überein.



Bei Luftinstrumenten mit Löchern ist die musikalisch relevante Luftsäule *ungefähr* so groß wie der Abstand vom Mundstück bis zum ersten geöffneten Loch, sofern keine „Gabelgriffe“ vorkommen, die die Überlegungen verkomplizieren. Abbildung 7.4 zeigt das Ergebnis von Messungen, die an unterschiedlich großen Löchern von Arthur H. Benade durchgeführt worden sind (aus: Spektrum der Wissenschaften: Die Physik der Musikinstrumente, S. 25). Je größer das Loch, um so genauer stimmen Lochabstand und musikalisch relevante Länge miteinander überein.

Abb. 7.5 Effektive Rohrlängen abhängig von der Größe des Loches

vom Mundstück bis zum ersten geöffneten Loch, sofern keine „Gabelgriffe“ vorkommen, die die Überlegungen verkomplizieren. Abbildung 7.4 zeigt das Ergebnis von Messungen, die an unter-

schiedlich großen Löchern von Arthur H. Benade durchgeführt worden sind (aus: Spektrum der Wissenschaften: Die Physik der Musikinstrumente, S. 25). Je größer das Loch, um so genauer stimmen Lochabstand und musikalisch relevante Länge miteinander überein.

7.3. Im Innern der „Black Box“ Luftsäule

Im vorliegenden Abschnitt beantworten wir zwei Fragen aus dem Innern der Black Box Luftsäule:

- wie wird die Schwingung der Luftsäule erregt,
- wie funktioniert die Schwingung der Luftsäule „im Innern der Black Box“ physikalisch?

Für die **Schwingungserregung** ist das **Mundstück** zuständig. Es erzeugt, oft in Verbindung mit den Lippen, eine Schwingung, die mit dem Schnarren der menschlichen Stimmbänder vergleichbar ist: diese Schwingung soll die Luftsäule zu Eigenschwingungen anregen, braucht selbst aber nicht schön zu sein. Im Gegenteil, je schnarrender der „Ton“ des Mundstücks ist, umso mehr Obertöne hat er und umso mehr hat er der Luftsäule anzubieten. Mundstücke produzieren ihre Schwingungen wie kleine Energieschalter, die schnelle periodische Luftstöße oder Luftwirbel von sich geben. Es gibt vier Grundtypen solcher „Schalter“:



Abb. 7.6 Griechische Aulos = Doppeloboe.
Der Spieler trägt eine Lippenbinde

Theorie dynamischer Systeme. Ein interessantes Modell hat „Physical Modeling“ entwickelt (Abbildung 10.13). Es bestehen Wechselwirkungen zwischen den Blasvorgängen im vorderen Mundbereich und dem Mund-Rachenraum (also dem Stimmapparat) bis hinunter in Lunge und Zwerchfell einerseits und der schwingenden Luftsäule im Instrument andererseits. Erwähnenswert sind einige Beobachtungen aus der musikalischen Praxis, die direkte Rückschlüsse auf akustische Vorgänge zu ziehen erlauben:

- einfaches Rohrblatt (Prototyp Klarinette, Saxophon): ein bewegliches Blatt bewegt sich über einer festen Unterlage hin und her, die Luftstöße erfolgen wie bei einer Rechteckschwingung „auf-zu-auf-zu“ usw.;
- doppeltes Rohrblatt (Prototyp Oboe, Schalmei, Dudelsack); zwei bewegliche Blätter klappen in schneller Abfolge auf und zu und hacken dadurch einen Luftstrom ab;
- menschliche Lippen (Prototyp Trompete usw., Alphorn): die Lippen werden durch ein stabiles Kesselmundstück wie Stimmbänder gespannt, der hindurchtretende Luftstrom wird zerhackt und verwirbelt;
- Luftstrom über Schneide (Prototyp Flöten und Pfeifen aller Art): ein Luftstrom wird durch eine Schneide in zwei Hälften gespalten, die periodische Wirbel hervorrufen. Bei Blockflöten und Pfeifen wird der Luftstrom durch einen Spalt des Mundstücks sauber geführt, bei Quer- oder Panflöte müssen die Lippen der SpielerIn die Führung übernehmen.

Die physikalischen Vorgänge bei den verschiedenen Arten von Mundstücken sind recht kompliziert und nicht mit so einfachen Dingen wie Zupfen, Schlagen und Streichen von Saiten zu vergleichen. Die genaue Beschreibung der Vorgänge, wie periodische Energiestöße durch Mundstücke ausgelöst werden, gehört ins Reich der Chaostheorie und der

Der Dudelsack „spielt“ auf Pfeifen, die wie eine Oboe aufgebaut sind. Die Doppelrohrblätter befinden sich in einem Druckbehälter. DudelsackspielerInnen üben auf „Hornpipes“, die eine einfache Druckkammer aus Holz mit Mundöffnung besitzen. Mit dem Mund wird der zur Erregung des Doppelrohrblatts notwendige Luftdruck in der Kammer aufrecht erhalten. Das Besondere ist, dass das

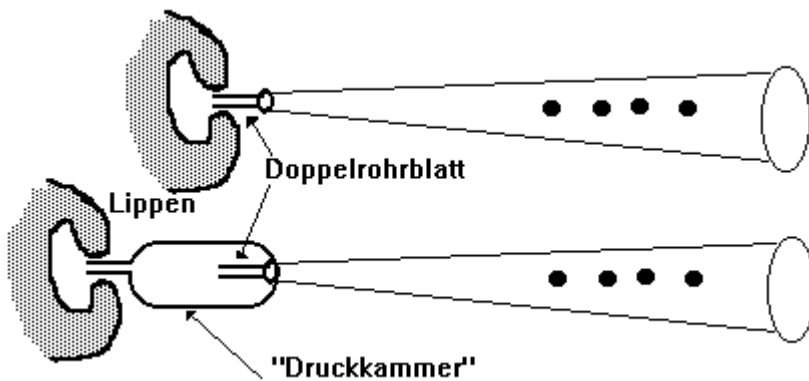


Abb. 7.6 Doppelrohrblatt: zwischen den Lippen oder in der „Druckkammer“

Doppelrohrblatt-Mundstück *nicht* mit den Lippen rückt wird und der Mundvorderraum *nicht* die „Druckkammer“ bildet. Das heißt: Lippen und Lippendruck sind nicht zwingend notwendig für die Erzeugung von Doppelrohrblatt-Schwingungen.

Die Rohrblätter der Mundstücke schwingen, was man mit den Fingern leicht überprüfen kann. Kontaktmikrofone nehmen an den Mundstücken von Rohrblattinstrumenten Schwingungen auf und ab. Berührt man aber das Kesselmundstück eines Blechblasinstruments, so spürt man nichts, und auch ein Kontaktmikrofon bleibt stumm. Es schwingen nur die Lippen im Innern des Kessels, während der massive Metallkessel die stabile Halterung für diese Lippenbewegungen darstellt. - Dem Musikerjargon ist das Mundstück wichtiger als das Instrument, denn ein Alphorn (aus Holz mit Kesselmundstück) zählt zu den Blechblasinstrumenten.

Besonders bekannt geworden ist in den letzten Jahren das australische **Didgeridoo** (Didjeridu), bei dem es kein besonderes Mundstück gibt. Die Lippen schwingen am einen Ende eines vollkommen zylindrischen Rohrs und erregen dasselbe zu einer Oberschwingung. Das Didgeridoo zeigt, dass bei den „Lippen“-Luftinstrumenten gar kein Mundstück nötig ist, um das Rohr in sonore Schwingung zu versetzen. Allerdings ist das bei den Blechbläsern so beliebte „Überblasen“ (siehe unten) beim Didgeridoo nur sehr schwer möglich.

Mundstücke erzeugen periodische Energiestöße und regen dadurch Luftsäulen zu Schwingungen an. Bisweilen genügt sogar ein einziger Energiestoß, um eine Luftsäule zu musikalisch verwertbaren Schwingungen anzuregen. Beispielsweise lässt sich die „Eigenschwingung“ einer Weinflasche bereits dadurch feststellen, dass man mit der flachen Hand einmal auf die Flaschenöffnung schlägt: man hört einen klaren, kurzen Ton. (Bläst man über den Flaschenhalsrand, so erzeugt man periodische Luftwirbel wie bei Querflöte oder Qeña.)



Abb. 7.8 Ein Posaunenmundstück und das mundstückfreie Ende eines Didgeridoos

Mundstücke sind austauschbar. So können Rohrblattmundstücke zur Erregung der Luft in Blechblasinstrumenten herangezogen werden und umgekehrt. Ein Saxophon- oder Posaunenmundstück kann auch die Luft in dem Hohlraum zwischen beiden Handflächen in musikalisch interessante Schwingung versetzen. Das Öffnen und Schließen der Handflächen erzeugt dann Wah-wah-Effekte. Es kann auch mit bloßen Lippen ohne Kesselmundstück auf Blechblasinstrumenten gespielt werden.

Die zweite eingangs gestellte Frage betraf den physikalischen Mechanismus, nach dem die Schwingungserzeugung durch die Luftsäule abläuft. Es gibt hierfür zwei einander ergänzende Erklärungen:

Die *erste Erklärung* verläuft genauso wie bei den Saiten, es ist die Erklärung durch „**stehende Wellen**“. Abbildung 5.7 zeigte, wie sich eine Störung durch die Saite hindurch fortpflanzt, am Ende reflektiert wird und dann zu stehenden Wellen mit Knoten und Bäuchen führt. Die Störung der Saite verläuft quer zur Ausbreitungsrichtung derselben, daher spricht man auch von „**Querwellen**“. Bei der Luft breitet sich eine „**Störung**“ des Luftdrucks oder der Luftdichte kugelförmig im Raum aus - ist die Luft in ein Rohr eingesperrt, so breitet sich die Störung wie bei der Saite in nur einer Richtung aus. Am Ende des Rohres ändern sich schlagartig die Druckverhältnisse (sowohl dann, wenn das Rohr offen, als auch dann, wenn das Rohr zu ist). Diese Änderung gibt Anlass dazu, dass ein Teil der Störung reflektiert, der andere Teil nach außen abgestrahlt wird. Der reflektierte Teil bildet mit den neu vom Mundstück nachgeschickten Störungen dann wie bei der Saite eine stehende Welle. In einem offenen Rohr haben stehende Wellen den Typ der Abbildung 7.9a, in einem geschlossenen Rohr den von Abbildung 7.9b. „**Knoten**“ sind hier Stellen, an denen die Luftmoleküle keine Bewegungs-Schallenergie haben d.h. die Bewegung der Ausgangswelle und der reflektierten sich gegenseitig aufheben, „**Bäuche**“ sind Stellen, wo maximale Bewegungsenergie vorliegt.

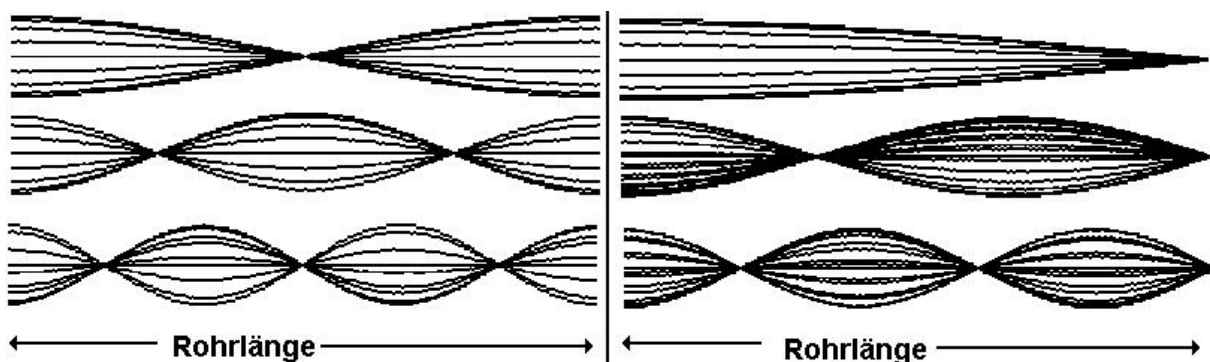


Abb. 7.9 Stehende Wellen (a) im offenen Rohr, (b) im geschlossenen (gedeckten) Rohr

In beiden Fällen ist die Wellenlänge λ einer stehenden Welle (der doppelte Abstand zwischen zwei Knotenpunkten) ein ganzzahliges Vielfache der halben oder Viertel Rohrlänge L . Wie bei der schwingenden Saite kann diese Beobachtung auch umgekehrt werden: ein Rohr kann nur in eine der hier abgebildeten Zustände gebracht werden, es erzeugt also eine Schwingung mit der zu diesen Zuständen und damit zu diesen Wellenlängen gehörenden Frequenz.

<i>offenes Rohr</i> Gesamtlänge L	<i>mögliche</i> Wellenlänge λ	<i>geschlossenes Rohr</i> Gesamtlänge L	<i>mögliche</i> Wellenlänge λ
$L = \lambda/2$	$\lambda = 2 L$	$L = \lambda/4$	$\lambda = 4L$
$L = \lambda$	$\lambda = 2/2 L$	$L = 3 \lambda/4$	$\lambda = 4/3 L$
$L = 3\lambda/2$	$\lambda = 2/3 L$	$L = 5\lambda/4$	$\lambda = 4/5 L$
$L = 4\lambda/2 = 2 \lambda$	$\lambda = 2/4 L$	$L = 7\lambda/4$	$\lambda = 4/7 L$

Der tiefst mögliche Ton, der „Grundton“ des Rohres (Instrument) liegt im Falle eines offenen Rohrs bei einer Wellenlänge, die der doppelten Rohrlänge entspricht, im Falle eines geschlossenen Rohrs bei der 4-fachen Rohrlänge. „Gedackte“ Pfeifen (= geschlossene Orgelpfeifen) sind daher nur halb so lange wie „offene“ Pfeifen. Wir berechnen die Standardlängen von Pfeifen und Instrumenten nach der Gleichung für die Schallgeschwindigkeit $c = \lambda f$. Es ist $\lambda = c/f$ und somit $2L = c/f$ oder $L = c/2f$ für offene und $4L = c/f$ oder $L = c/4f$ für geschlossene Rohre.

Tonhöhe (Frequenz)	Instrument	musikalisch relevante Rohrlänge
CC (32 Hz)	Orgelpfeife offen	5,3 m
CCC (16 Hz)	Orgelpfeife geschlossen	5,3 m
F (44 Hz)	Alphorn	3,86 m
B (58 Hz)	Posaune (offen)	2,93 m
b (116Hz)	Klarinette (geschlossen)	0,73 m
a' (440 Hz)	Stimpfpfeife (geschlossen)	0,19 m

Eine *zweite Erklärung* beschreibt die harmonische Art, in der Luftsäulen schwingen, durch „**Resonanzeffekte**“. Danach hat ein Hohlraum, insbesondere der Raum innerhalb des Rohres, bestimmte Resonanzfrequenzen, die sich empirisch feststellen lassen:

Experiment 7.3

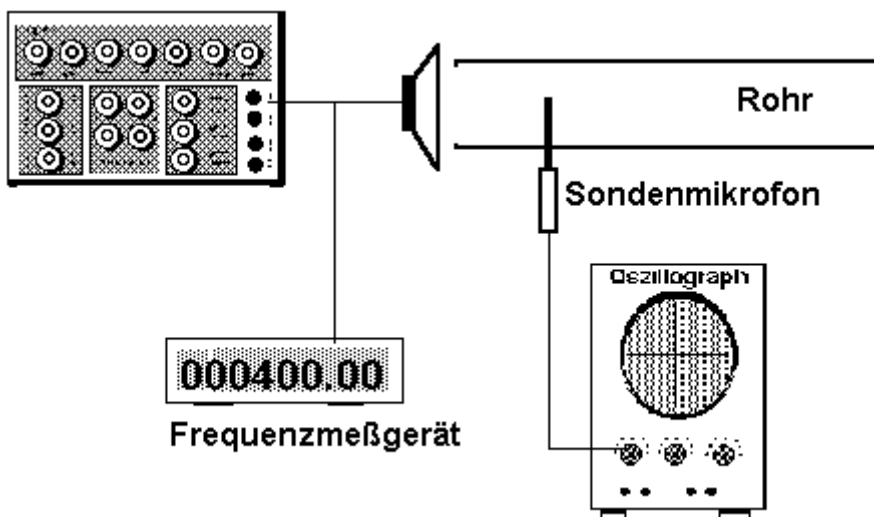


Abb. 7.10 Resonanzexperiment am Rohr

Wir senden über einen kleinen Lautsprecher (z.B. die Muschel eines Kopfhörers) in ein Rohr eine beliebige Schwingung. Die Frequenz f dieser Schwingung ist veränderbar. Im Rohr ist ein Loch für ein Sondenmikrofon. Wir kontrollieren über ein Oszilloskop die Schwingung im Rohr und messen über ein Frequenzmessgerät die jeweilige Frequenz.

Beobachtungsergebnis:

- Bei Vielfachen der halben Frequenz der die Luft im Rohr anregenden Schwingung beobachten wir sehr starke Schwingungen derselben Frequenz der Luft im Rohr. Dies sind die Resonanzfrequenzen des Rohrs.

- Die Resonanzfrequenzen sind dieselben Frequenzen, die sich auch durch die Erklärung mittels stehender Wellen ergeben. Für den Zusammenhang von Rohrlänge und Resonanzfrequenz gilt also beim offenen Rohr $f_{\text{Resonanz}} = c/2L (= c/\lambda)$.
- Die Schwingungsform im Rohr ist überwiegend sinusförmig, unabhängig davon, welche Form die anregende Schwingung gehabt hat. Die Resonanz spricht offensichtlich auf Obertöne der anregenden Schwingung an.

Schlussbemerkung:

Die beiden Erklärungen des Schwingungsmechanismus einer Luftsäule - durch stehende Wellen und Resonanz - sind im Grunde zwei Arten, dasselbe Phänomen zu beschreiben und zu benennen. Die „stehenden Wellen“ erklären, warum es Resonanzen gibt, und das Resonanzverhalten ist eine makroskopisch-ganzheitliche Folge der stehenden Wellen.

7.4. Funktion des Instrumentenkorpus und spieltechnische Eigenlichkeiten von Luftinstrumenten

Wie schon angedeutet, hat der Instrumentenkorpus der Luftinstrumente eine andere Funktion als der der Saiteninstrumente. Während der Korpus dort nicht nur der „Halterung“ der Saiten, sondern auch der Abstrahlung der Schwingung diene, hat hier der Korpus wenig mit der Abstrahlung zu tun. Im Gegenteil: ein „guter“ Korpus hält die Luftsäule fest zusammen, schwingt also selbst nicht und strahlt daher auch nicht ab. Die Abstrahlung erfolgt bei den Luftinstrumenten vielmehr durch einen ziemlich diffusen (und chaotischen) Austausch zwischen Luft im Innern des Instruments und Außenluft. Dieser Austausch findet am „Schalltrichter“, der primären Öffnung des Rohrs, an den Schalllöchern (falls vorhanden) und am Mundstück (falls möglich) statt. Dass die Abstrahlung „diffus“ ist, weiß man aus der musikalischen Praxis, die sich oft schwer akustisch exakt erklären lässt:

Ein Trompetendämpfer „verstopft“ die vollständige Abstrahlung und ändert dadurch die Klangfarbe (den Obertongehalt). Er ändert aber kaum die Tonhöhe, d.h. die musikalisch relevante Rohrlänge. Ein vergleichbarer, nicht einmal zu krasser Vorgang ist das „Stopfen“ des Waldhorns, bei dem die SpielerIn die Hand in den Schalltrichter einführt: hier ändert sich auch die Tonhöhe (was bei Naturhörnern zu Mozarts Zeiten der Zweck des Stopfens war).

Klarinette und Saxophon haben dasselbe Mundstück, die Rohre sind aber unterschiedlich geformt (Klarinette zylindrisch, Saxophon parabolisch). In der Klarinette entstehen stehende Wellen wie am geschlossenen Rohr, beim Saxophon wie im offenen Rohr: eine Klarinette, die gleich lang ist wie ein Saxophon klingt eine Oktav tiefer. Wie strahlen beide Instrumente ab, wenn beim einen ein Geschwindigkeitsknoten, beim andern ein Geschwindigkeitsbauch am Schalltrichter ist? Und warum ist das so?

Die **Abstrahlung** erfolgt bei Trompete und Posaune für Frequenzen bis ca. 500 Hz in alle Richtungen (= 360°), während sie bei höheren Frequenzen gebündelt nur noch einen engen Winkelbereich erreicht. Dies zeigt, dass die Hauptabstrahlung nicht durch das Blech, sondern den Schalltrichter erfolgt. Bis 500 Hz gehen die Schallwellen „um die Ecke“, weil sie länger als 68 cm und somit größer als das Instrument sind.

Die Luftsäule kann theoretisch *alle* stehenden Wellen ausbilden, die im Rohr Platz haben. Bei der Saite ergaben alle stehenden Wellen zusammen die Grundschiwingung, die ja aus Obertönen zusammengesetzt ist. Wie aber durch den Trick des flageoletts (siehe Abschnitt 6.1) eine Saite sprung-

artig in eine einzelne Oberschwingung springen konnte, so kann auch ein Rohr durch Öffnen eines Loches an geeigneter Stelle sprunghaft „überblasen“ werden. Die Tatsache, dass aber auch *ohne* Öffnung geeigneter Löcher allein durch eine Änderung des Anblasedrucks oder der Lippenstellungen ein „Überblasen“ möglich ist und die dabei entstehende Schwingung auch nicht - wie beim flageolet - sinusförmig, sondern sehr obertonreich ist, gehört wieder zu den vielen „chaotisch-diffusen“ Fähigkeiten der Luftinstrumente. Erklärbar ist das Überblasen ohne Zuhilfenahme eines Loches nur durch die Tatsache, dass es zwischen der Schwingung des Mundstücks und des Rohres eine intensive Wechselwirkung gibt. Dies geht so weit, dass einige Akustiker bei den Luftinstrumenten nicht das im vorliegenden Skriptum entwickelte Modell



vertreten, sondern das Mundstück als Schwingungserzeuger betrachten, der das Rohr in Resonanzschwingungen versetzt. Die vom Mundstück erzeugte Frequenz muss dann auf die Resonanzfrequenzen des Rohrs „sorgfältig abgestimmt“ werden (Walther Krüger im „neuen“ MGG aus dem Jahr 1996, Band 5, Spalte 215).

Wie dem auch sei, alle Luftinstrumente können nicht nur ihren Grundton, sondern auch durch Überblasen weitere Obertöne, genannt „**Naturtöne**“ erzeugen. Oft, wie bei der Posaune oder der Bachtrompete, liegt der Grundton so tief, dass er musikalisch gar nicht genutzt und spieltechnisch kaum erzeugt werden kann. Die meisten Luftinstrumente funktionieren wie offene Rohre und erzeugen daher Naturtöne der Wellenlängen $L/2$, L , $3L/2$, $4L/2$, $5L/2$, usw. Die Wellenlänge des Grundtons ist daher die halbe musikalisch relevante Länge des Instruments. Lediglich die Klarinette (und analog gebaute Instrumente) funktionieren wie ein geschlossenes Rohr und erzeugen Naturtöne der Wellenlängen $L/4$, $3L/4$, $5L/4$, $7L/4$ usw. Die Wellenlänge des Grundtons ist ein Viertel der musikalisch relevanten Länge des Instruments und es kann nur in die ungeradzahlig Obertöne überblasen werden. Ein Beispiel:

- Eine B-Posaune mit Grundton BB (58 Hz) ist 2,93 m lang und kann die Naturtöne BB-B-f-b-d'-f'-as'-b'-c'-d' usw. hervorbringen.
- Eine B-Klarinette mit Grundton b ist nicht halb, sondern nur ein Viertel so lange wie die Posaune, also 73 cm. Sie erzeugt die Naturtöne b-f''-d³-as³ usw.

Ohne Klappen oder Ventile kann ein Luftinstrument nur Naturtöne spielen. Betrachtet man die Teiltonreihe (Abbildung 6.3) und geht davon aus, dass ein solches „Naturinstrument“ die untersten 12 Naturtöne hervorbringt, so wird deutlich, warum (Natur-)Trompeten- oder Fanfaren-Musik nach Dreiklangsbrechung und Quartsprüngen klingt. Wollte kurz vor der Erfindung der Klappen/Ventile für die Blech-Luftinstrumente ein Komponist dennoch ganze diatonisch oder chromatische Melodien auf Trompeten spielen lassen, so musste er

- den Grundton der Trompete so tief wie möglich legen,
- die Mensur des Instruments und das Mundstück so eng machen, dass möglichst hohe Naturtöne hervorgebracht werden können, und
- von den Trompetern noch eine gewisse Fähigkeit im Tricksen verlangen,
- sofern er nicht ein kleines Hilfsloch ins Blech bohren wollte.

Betrachten wir einige Fragmente aus einer prototypische Naturtrompetenstimme:



Abb. 7.11 Fragmente aus der Trompetenstimme des 2. Brandenburgischen Konzerts von J. S. Bach

Diese Passage soll auf einer Bachtrompete gespielt werden, denn sie ist auch von Bach komponiert. Die Trompete ist in F gestimmt und kann - theoretisch - folgende Naturtöne erzeugen:



Bachs Blue Notes!



Abb. 7.12 Welche Töne der Trompete im 2. Brandenburgischen Konzert von Bach sind Blue Notes? In welcher Richtung muss ein Trompeter modulieren, damit das Konzert nicht nach Jazz klingt?

Kapitel 8: Tonsysteme



Abb. 8.1 Ein anonymer Araber aus dem 14. Jahrhundert versucht die Musikpraxis in das Bild eines Theorie-Baumes zu fassen!

Tonsysteme beziehen sich auf Struktureigenschaften der in der Musikpraxis vorkommenden Tonhöhen. Eine Musikkultur, in der Tonhöhen keine Rolle spielen, „hat“ kein Tonsystem. Die Frage, ob in einer Musikkultur Tonhöhen eine Rolle spielen, ist nicht immer entscheidbar. Beim Gamelan scheint es nach heutiger Erkenntnis kein Tonsystem zu geben: die von Dorf zu Dorf wechselnden Stimmungen der Instrumente müssen nicht als Tonhöhen-Ordnungen, sondern können auch als ein Lokalkolorit betrachtet werden.

Der Begriff Tonsystem hat etwas Normierendes. Er setzt voraus, dass es in einer Musikkultur für die Tonhöhenordnung des musikalischen Materials Regeln gibt. Solche Regeln können *bewusst* und explizit formuliert oder *unbewusst* gehandhabt werden. Bewusst gehandhabte Tonsysteme können begründet oder unbegründet tradiert werden. Im Falle einer Begründung kann diese aus mathematisch-physikalischer Sicht richtig oder falsch sein, was aber die Wirksamkeit eines Tonsystems kaum tangiert. Auch unbewusst gehandhabte Tonsysteme können aus der Sicht Außenstehender begründbar sein.

Die Formulierung von Regeln für Tonsysteme sind oft Ausdruck des Versuchs von Theoretikern oder Philosophen, eine Musikpraxis zu verstehen - oder gar zu bewerten. In der arabischen Musik gibt es spätestens seit Ende des 10. Jahrhunderts n. Chr. Versuche, die Musikpraxis, die zahlreiche Zwischentöne und Schleifer kennt, mittels der griechischen Musiktheorie (der pythagoreischen Tradition) zu erklären. Und Paul Hindemith hat noch 1934 eine „natürliche Herleitung“ korrekter Musik entworfen („Unterweisung im Tonsatz“).

8.1. Abendländische Tonsysteme: aus der Obertonreihe abgeleitet

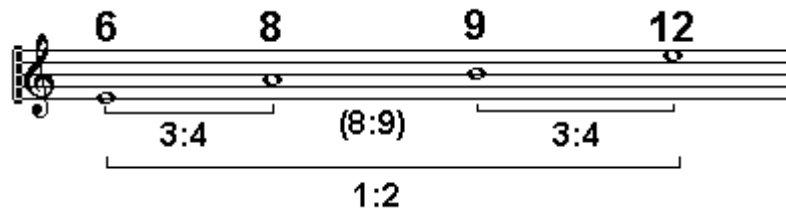
Die Obertonreihe hat zwei Aspekte:

- Sie ist nach ganzen Zahlen (Verhältnissen) strukturiert, die sich an Musikinstrumenten zeigen lassen („Teiltöne“, Abschnitt 6.1).
- Sie ist notwendig mit jedem natürlichem Ton verbunden, kommt bei Instrumenten in vielfältiger Weise vor und bedingt die klangliche Vielfalt der tönenden Musik („Obertöne“, Abschnitt 6.2).

Beide Eigenschaften können jede für sich oder beide zusammen einer Tonsystem-Konstruktion dienen. Die zweite Eigenschaft wurde erst im 19. Jahrhundert von Fourier entdeckt. Wenn also Pythagoras oder Boethius (ca. 480 - 524 n. Chr.) Tonsysteme aus der Obertonreihe ableiten, so, weil sie ein Tonsystem aus einfachen Zahlenverhältnissen, und nicht, weil sie ein System gemäß der Obertonnatur des Tons haben wollen.

Fall 1: Pythagoras (582 - ca. 496 v. Chr.)

Pythagoras akzeptiert nur Oktav, Quint und Quart (also die untersten 3 Obertöne) als Konsonanz. Alle anderen in der Musikpraxis seiner Zeit vorkommenden Töne sind als „bewegliche“ zwar möglich, aber eben nicht „harmonisch“ (= durch ein Zahlenverhältnis fixiert). Die bei Pythagoras vorkommenden Töne wurden nach der Zahlenformel 6-8-9-12, aus der sich alle vorkommenden Proportionen ergeben, geordnet:



Heute wird mit dem Namen „Pythagoras“ ein Tonsystem verbunden, das alle jeweils benötigten Töne aus einer Abfolge reiner Quinten 2:3 ableitet und bei Überschreitung des Oktavraums Oktavtranspositionen vornimmt:

Pentatonik: **F-C-G-D-A**

Diatonik: **F-C-G-D-A-E-H**

Chromatik: **Ges-Des-As-Es-B-F-C-G-D-A-E-H(-Fis)**

Bei Verwendung des reinen Quintenaufbaus treten folgende Probleme auf:

Alle großen Terzen und damit alle Dreiklänge sind nicht „rein“ im Sinne der Obertöne 4:5:6. Beweis am Beispiel F-A: Von F nach A kommt Pythagoras über 4 Quinten auf- und 2 Oktaven abwärts. Rechnerisch $(2:3) \cdot (2:3) \cdot (2:3) \cdot (2:3) / (2^2) = 64:81$. Dies ist die pythagoreische große Terz. Man sieht hier, dass $4:5 = 64:80$ nicht gleich $64:81$ ist. Die „Differenz“ ist das Intervall von $80:81$, das „**syntonische Komma**“.

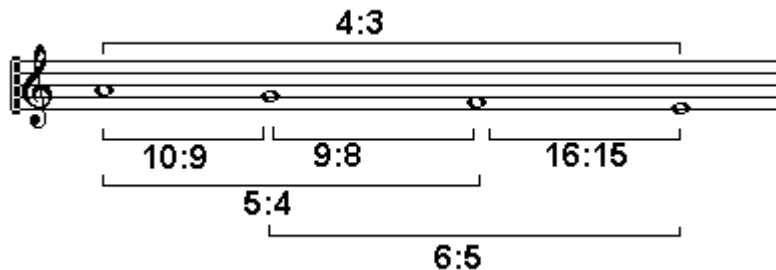
Der **pythagoreische Quintenzirkel** schließt sich nicht, d.h. Fis ist nicht gleich Ges. Beweis: Von Ges nach Fis sind es 12 reine Quinten, also ein Frequenzverhältnis von $(2:3)^{12}$. Man ist dabei aber 7 Oktaven zu hoch gelandet, sodass diese Zahl durch $(1:2)^7$ dividiert werden muss, was auf ein Intervall von $2^{19}:3^{12}$ führt. Es ergibt sich $531441:524288 = \text{ca. } 74:73$ (etwa ein Achtel Ton). Dies ist das „**pythagoreische Komma**“.

Ein Vorteil des reinen Quintensystems ist, dass man beliebig im Quintenzirkel modulieren kann und, solange man nur nicht enharmonisch verwechselt (zum Beispiel Dis = Es, Fis = Ges), zwar nie reine Dreiklänge, aber stets reine Quinten und Quintschritte erhält.

Diese Überlegungen sind aber ganz und gar unpythagoreisch. Zwar kannte Pythagoras nur die Quint/Quart/Oktave als harmonische Intervalle, er kannte aber auch die „**beweglichen Töne**“ dazwischen mit ihren musiktherapeutischen und spirituellen Wirkungen. Er wäre nie auf die Idee gekommen, diese Zwischentöne in einem „System“ zu fixieren, wie es Ptolemäus wollte. - Die pythagoreische Lehre wirkte im arabischen Kulturraum und von dort nach Indien und wurde von Boethius (ca. 480 - 524 n. Chr.) im heutigen Mitteleuropa tradiert.

Fall 2: Ptolemäus (ca. 2. Jahrhundert n. Chr.)

Ptolemäus geht einen Schritt in der Obertonreihe bis zum 6. Oberton weiter und anerkennt die große Terz 4:5 als harmonisches Intervall. Insgesamt schreibt er folgende Töne auf:



Ptolemäus fixiert auch die „beweglichen Töne“ und nennt drei „Tongeschlechter“:

enharmonisch:	$(5:4) * (36:35) * (28:27)$	= 4:3
chromatisch:	$(32:27) * (243:224) * (28:27)$	= 4:3
diatonisch:	$(9:8) * (8:7) * (28:27)$	= 4:3

Beim enharmonischen Geschlecht wird das Halbtonintervall zwischen großer Terz (4:5) und Quart durch zwei ungleich große Viertelöne (36:35 und 28:27) aufgefüllt. Wenn 16:15 der „reine“ Halbton ist, dann wäre 32:31 oder 31:30 ein „reiner“ Viertelton, 36:35 ist somit noch kleiner!

Fall 3: Die „reine Stimmung“



Es ist ganz logisch, dass im Zuge einer Verbreitung der „Kadenzharmonik“ ein System bis heute Begeisterung auslöst, in dem doch wenigstens die drei Grunddreiklänge Subdominante-Tonika-Dominante, z.B. C-E-G, G-H-D und F-A-C, rein im Sinne der Proportionen 4:5:6 (also der 4. bis 6. Obertöne) sind. Durch F-A-C-E-G-H-D sind die 7 Töne der diatonischen Skala C-D-E-F-G-A-H-C bereits determiniert. Es kommen die beiden Ganztöne 8:9 und 9:10 und der Halbton 15:16 vor. Die folgende Zahlenreihe erlaubt es, alle Proportionen „hintereinander“ zu schreiben - eine Schreibweise, die bereits Boethius anwandte:

$$C / D / E / F / G / A / H / C = 24 : 27 : 30 : 32 : 36 : 40 : 45 : 48$$

Probleme hat dies zunächst recht schön erscheinende Tonsystem mit den Parallelen: die Quinten D-A, E-G und A-E sind unrein, und somit auch die Molldreiklänge D-F-A und E-G-C und A-C-E. Nimmt man beispielsweise die Quint D-A, so beträgt ihr Frequenzverhältnis nach obiger Reihe $27:40 = 54:80$, während die reine Quint $54:81 = 2:3$ betragen müsste. Als „Differenz“ taucht hier das schon von Pythagoras her bekannte **syntonische Komma** 80:81 auf.

8.2. Temperierte Tonsysteme

Fall 1: Die „Mitteltönigkeit“

Problem 1: Tonartenwechsel und Modulationen. Wenn MusikerInnen in tonaler Musik über Zwischendominanten durch die Tonarten wandern, so versuchen sie, sofern sie die Tonhöhen frei wählen können, immer wieder, reine Dreiklänge hervorzubringen. Ein größerer Modulationszyklus, der von H-Dur ausgehend sich über E, A usw. bis gegen As, Des und Ges bewegt, wird sich dabei immer mehr von der Ausgangstonlage entfernen. Das ursprüngliche H ist nicht mehr das H des G-Dur-Dreiklangs, und das letzte Ges schon gar nicht mehr die Dominante Fis dieses H's. Ein ViolinspielerIn oder eine SängerIn, die derart in einem Solo musizieren, haben rein gespielt und landen doch nicht mehr in der Tonlage des Orchesters bzw. Klaviers, das sie begleitet. Bereits die in Jazzstandards gebräuchliche Rückkehr aus einer Quintschrittsequenz durch einen Verminderten, etwa

„Autumn Leaves“: A - D - G - C - Verm - H - E (- A...)

oder durch funktional analoge Umdeutung der Durterz in die Septim (3 in Es-Dur zu 7 in A-Dur), etwa

„How High The Moon“: G - C - F - B - Es - A - D (- G...)

bewirkt bei reinem Spiel eine Anhebung der Tonlage.

Problem 2: Reibungen zwischen pythagoreischer und reiner Terz. Die Terz 5:4 der reinen Stimmung unterscheidet sich von der pythagoreischen Terz 81:64 um das syntonische Komma 81:80. In der musikalischen Praxis heißt das, dass beim Modulieren von C in die Parallelen As oder E *nicht* die Terz unter oder über dem Grundton C herauskommt.

Bei der „Mitteltönigkeit“ wird das syntonische Komma „irgendwie“ in mehrere Teile geteilt und so auf die Intervalle der chromatischen Skala verteilt, dass die beiden genannten Probleme etwas verringert sind. Ein Beispiel ist die Lösung, die schon 1523 (bei Pietro Aaron) nachweisbar ist, von den reinen Quinten „ein Viertel syntonisches Komma“ abzuziehen, sodass sich nach Aneinanderreihung von 4 solchen mitteltönig bereinigten Quinten genau eine reine Terz ergibt:

C	G	D	A	E
1	$(3:2)*K$	$(9:8)*K^2$	$(27:16)*K^3$	$(81:64)*K^4 = 5:4$

Die Größe des abzuziehenden Intervalls K konnte nur nach Gehör gehandhabt werden (wir wissen heute, dass es sich als 4. Wurzel aus 81:80 errechnet), sicher war nur, dass $K*K*K*K = K^4 = 81:80$ ist.

Das dieser Art Mitteltönigkeit zugrunde liegende Paradigma ist neu. Gegenüber der reinen, philosophisch begründeten Zahlenlehre wird in der Musikpraxis ein pragmatischer Fehler gemacht, der die Probleme, die sich aus der Zahlenlehre zwingend ergeben, beschönigt. Dieser Paradigmenwechsel war durch eine Musikpraxis notwendig geworden, die sich nicht - mehr? - an der Zahlenlehre orientierte. Am gravierendsten waren die „Komma-Probleme“ bei den Dauerklängen der Orgel. Wie in Abschnitt 3.3 erörtert bilden sich zwischen Intervalltönen, die nicht nach der Obertonreihe gestimmt sind, hörbare Schwebungen. Zum Beispiel: Wird die Terz c-e rein gespielt, so ist der 5. Oberton e“ des g identisch mit dem 4. Oberton e“ des e. Ist die Terz pythagoreisch, so liegen die beiden e“s dicht beieinander und schweben...

Fall 2: Das 12-temperierte Tonsystem

Grundidee der 12-Temperierung ist es, das Intervall 2:1 der Oktav in 12 genau gleich große Intervalle zu teilen, um nachträglich aus diesen Bausteinen alle Intervalle der chromatisch-diatonischen Musik zusammensetzen. Das Frequenzverhältnis I des gesuchten Intervalls muss 12 Mal in die Oktave passen, was bedeutet:

$$I * I * I * \dots * I = I^{12} = 2:1 = 2$$

Dies ist eine implizite Definition von I . I ist durch diese Definitionsgleichung eindeutig bestimmt und heißt „**12. Wurzel aus 2**“, wofür es verschiedene Schreibweisen gibt:

$$2^{1/12} = 2^{\uparrow(1/12)} = 2^{(1/12)} = \text{EXP}((1/12)*\text{LN}(2)) = \sqrt[12]{2}$$

Je nach Rechner ist eine dieser Schreibweisen zu verwenden, in jedem Falle wird der Rechner für I den Zahlenwert **1,0594630944542587** ausgeben. Das sind ca. 5,95%.

Ein 12-temperiertes Intervall, das aus N solchen „Halbtönschritten“ besteht, hat die Verhältniszahl I^N oder $\text{EXP}((N/12)*\text{LN}(2))$. Zum Beispiel: $N=7$ entsprechen der Quint und ergeben $\text{EXP}(7/12)*\text{LN}(2) = 1,4983070767484605$. Dies Intervall ist also etwas kleiner als die reine Quint $3:2 = 1,50$.

Die 12-temperierten Intervalle weichen von den reinen *mehr oder weniger* ab. Die „Differenz“ zwischen den reinen und 12-temperierten Intervallen zeigt die Tabelle:

Nr.	reiner Wert	temp. Wert	„Differenz“
2	(9:8) 1,125	1,122462	0,2261058%
3	(6:5) 1,2	1,1892071	0,90756984%
4	(5:4) 1,25	1,2599211	0,78743426%
7	(3:2) 1,5	1,4983070	0,11298907%
10	(9:5) 1,8	1,7817974	1,0215843%
11	(16:15) 1,875	1,8877486	0,67533492%

Die „Differenzen“ erscheinen relativ unbedeutend, zumal der JND (der gerade noch hörbare Tonhöhenunterschied bei Sinustönen vgl. Abschnitt 3.4) zwischen 3 % bei 100 Hz und 0,5 % bei 2000 Hz liegt. Bei gleichzeitig erklingen Tönen jedoch ergeben sich Schwebungen.

Das 12-temperierte Tonsystem hat sich bekanntlich in Mitteleuropa in der Zeit zwischen Bach und Beethoven durchgesetzt. Nachdem es theoretisch formuliert war, ergaben sich in der Klavierstimmpraxis immer noch erhebliche Probleme. Johann Sebastian Bach soll nach Gehör gestimmt haben, „und war so geübt in dieser Arbeit, dass sie ihm nie mehr als eine Viertelstunde kostete. Dann waren aber auch, wenn er phantasierte, alle 24 Tonarten sein, er machte mit ihnen, was er wollte“ (J. N. Forkel, Bach-Biografie 1802). Mozarts Klavier war noch nicht vollständig temperiert, sodass f-Moll und e-moll unterschiedlich große Intervalle verwendeten. Die Temperierung ist immer als ein Kompromiss betrachtet worden. Alle Argumentationen für reine Tonsysteme, die die philosophische oder ästhetische Bedeutung ganzer Zahlen beschworen, halfen nichts gegen die Pragmatiker des temperierten Systems.

Während die Zwölftonmusik nach Meinung ihres Erfinders Arnold Schönberg die musikalische Konsequenz aus der Temperierung gezogen hat, haben in den letzten Jahren Tonstudios den Klangfarbenunterschied zwischen einem temperierten und reinen Intervall oder Dreiklang entdeckt. Es gibt heute Computerprogramme, die, bevor ein am Keyboard angeschlagener Akkord gespielt wird, seine Intervallstruktur analysieren, die Tonerzeuger so rein wie möglich stimmen und dann erst den Akkord senden.

1500 Jahre vor der abendländischen Diskussion um die Temperierung hatten chinesische Gelehrte und Fürsten sich des Problems angenommen und es erstaunlich gut gelöst. Ching Fang gibt 45 v. Chr. an, man solle die reine Quint 51 Mal aneinanderreihen, um eine temperierte Septime (einen temperierten Ganzton abwärts) zu erhalten. In der Tat ist der entsprechende Wert mit 999,7 statt 1000 Cent besser als alles, was zur Zeit Beethovens Klavierstimmer sich erträumten. Prinz Chu Tsai Yü gibt 1595 eine Liste von Saitenlängenverhältnissen an, die temperierte Intervalle repräsentieren:

$$1\ 000\ 000\ 000 : 943\ 374\ 312 : 890\ 898\ 718 : 840\ 896\ 415 : \dots$$

was auf ein Intervall von 1,0590 hinausläuft, das der 12. Wurzel aus 2 mit 1,0595 sehr nahe kommt. Der Prinz soll mit diesen Millionenbeträgen den Wert 750:749 aus dem Jahre 289 n. Chr. verbessert haben, der als „zwölfter Teil des pythagoreischen Kommas“ ein Intervall darstellte, um das man die reine Quint (von 702 Cent) vermindern muss, um eine temperierte Quint (von 700 Cent) zu bekommen.

Fall 3: Microtuning

Die universelle Berechnungsformel für ein N-temperiertes System lautet

$$I = \text{EXP}((1/N) * \text{LN}(2)) = 2^{(1/N)}$$

und kann nun auf alle nur denkbaren Teilungen der Oktav angewandt werden. Ein Beispiel ist „Cent“:

N = 1200, d.h. Teilung der Oktav in 1200, des Halbtons in 100 temperierte Kleinstintervalle. Cent ist die Maßeinheit der musikethnologischen Forschung.

<i>Intervallbezeichnung</i>	<i>Intervallgröße</i>	<i>Intervall in Cent</i>
große Terz, rein	5:4	386 Cent
große Terz, temperiert	$2^{4/12}$	400 Cent
große Terz, pythagoreisch	81:64	408 Cent
syntonisches Komma	81:80	22 Cent

Ein weiteres Beispiel wäre das bereits besprochene „Pitch-Bend“ mit N=384 (Experiment 3.4). Aus Gründen der Digitallogik teilt das „Microtuning“ des Synthesizers DX 7 von Yamaha die Oktave in 1024 Teile (entsprechend 10 Bit). Dafür kann bei den Yamaha-Instrumenten jede Keyboardtaste absolut frei eingestellt werden, was bei Tonsystemen *ohne* reine Oktaven dann die einzige Rettung ist (siehe unten „Bremens Gamelan“). Cent-Mikrotuning innerhalb einer reinen Oktav bieten heute alle Modell der „Soundcanvas“-Serie von Roland und fast alle Synthesizer von Korg an. Tonsysteme-Bastler sind also gut bedient.

Fall 4: Stockhausens „Studien“

Karlheinz Stockhausen hat in seiner elektronischen „Studie II“ ein temperiertes Tonsystem verwendet, das nicht von der Oktave 1:2, sondern vom Intervall 1:5 (also 2 Oktaven plus Terz) ausgeht. Dies Intervall wurde in 25 temperierte Intervalle unterteilt, sodass die Frequenzverhältnisse statt „12. Wurzel aus 2“ nun „25. Wurzel aus 25“ heißen. Die in diesem Tonsystem konstruierten Sinuston-Akkorde nannte Stockhausen „Tongemische“. Die Tabelle zeigt, dass dies abwegige Tonsystem „recht nahe“ bei der 12-Temperierung der Oktav liegt:

**Tonhöhenmaterial der Studie II: fett.
12-Temperatur: dünn.**

0	100	100	500	423.78524
1	106.64949	105.94631	533.24747	448.98482
2	113.74115	112.2462	568.70573	475.68285
3	121.30436	118.92071	606.52179	503.96842
4	129.37048	125.99211	646.85242	533.92594
5	137.97297	133.48399	689.86483	565.68542
6	147.14747	141.42136	735.73735	599.32283
7	156.93203	149.83071	784.66017	634.96042
8	167.36722	158.74011	836.8361	672.71713
9	178.49629	168.17928	892.48147	712.71897
10	190.36539	178.17974	951.82697	755.09945
11	203.02373	188.77486	1015.1186	800
12	216.52378	200	1082.6189	847.57048
13	230.92152	211.89262	1154.6076	897.96964
14	246.27663	224.49241	1231.3832	951.36569
15	262.65278	237.84142	1313.2639	1007.9368
16	280.11786	251.98421	1400.5893	1067.8719
17	298.74428	266.96797	1493.7214	1131.3708
18	318.60927	282.84271	1593.0463	1198.6457
19	339.79517	299.66142	1698.9759	1269.9208
20	362.38983	317.48021	1811.9492	1345.4343
21	386.48692	336.35857	1932.4346	1425.4379
22	412.18635	356.35949	2060.9317	1510.1989
23	439.59466	377.54973	2197.9733	1600
24	468.82548	400	2344.1274	1695.141

8.3. Außereuropäische Tonsysteme

Fall 1: Indonesische Gamelan-Musik

Die indonesische Gamelan-Musik kennt keine Theoriebücher aber Instrumente, die aus Bronze sind. Daher besteht über den Tonhöhenvorrat dieser Musik kein Zweifel. Indessen scheint jedes Dorf einen eignen Tonhöhenvorrat zu besitzen. Man ist heute der Meinung, dass es kein generelles Tonsystem in Java oder Bali gibt und dass die vorkommenden Tonhöhen nicht zufällige Abweichungen von einem zwar angestrebten, aber nicht erreichten Ideal sind. Vielmehr ergibt jede Stimmung einen eigentümlichen Klangcharakter, der „für sich steht“.

Im Überseemuseum Bremen stehen zwei Gamelan-Orchester. Beide wurden von der Werkstatt des Königshofes Mangkunagaran von Surakarta (Java) gekauft. Das 1979 gekaufte ist ein fünftöniges **Slendro**, das 1993 gekaufte ein siebentöniges **Pelog**. Das Slendro ist als Auswahl des Pelog gestimmt, d.h. Pelog erweitert die Töne des Slendro um zwei (und zwar die Nummern 4 und 7). Im Rahmen eines Kompositionsauftrags aus Anlass des 100-jährigen Jubiläums des Überseemuseums habe ich alle Instrumente vermessen, die kompletten Sounds „spielfertig“ ins Internet gestellt (www.uni-oldenburg.de/musik/gamelan) und drei live zu spielende Synthesizern danach gestimmt. Die Messergebnisse lauteten:

<i>Gong Nr.</i>	<i>Frequenz (Hz)</i>	<i>Intervall (Cent)</i>	<i>Abweichung (Cent)</i>
1 tief	271	0	Cis- 39
2 tief	316	266	Dis + 27
3 tief	365	251	Fis - 24
5 tief	411	205	Gis - 8
6 tief	465	214	Ais - 4
1 mittel	544	270	Cis - 34
2 mittel	638	280	Dis + 46
3 mittel	737	289	Fis - 7
5 mittel	839	224	Gis + 17
1 hoch	1113	490	Cis + 7
2 hoch	1323	299	Dis + 106
5 hoch	1733	466	A - 28

Ersichtlich sind die Oktaven nicht rein (1:2) und sind die Intervalle innerhalb einer Oktave auch nicht in allen Tonlagen gleich. Eine echte Herausforderung!

Fall 2: Indische Ragas

Die indische Musik hat ein sehr ausgearbeitetes und theoretisch gut dokumentiertes Tonhöhen-system. Ein Musikstück der klassischen indischen Musik ist eine geregelte Improvisation über einen Rag, der eine ganz bestimmte Abfolge von Tonhöhen darstellt. Die Ragas haben Namen, Bedeutungen und Stimmungsgehalte. Der Tonhöhenvorrat von in der Regel 7 Tönen pro Oktav speist sich aus Mini-Intervallen, die man schon in der altindischen Musik „shruti“ nannte. Die Oktav habe 22 shruti, die Quint 13 und die Quart 9 („Natyasastra“, 1. Jh. n.Chr.). Die Tonhöhenstufen haben die Namen sa-ri-ga-ma-pa-dha-ni. Es gibt Tabellen, Handbücher (Joep Bor's „The Raga Guide“, Rotterdam 1999 mit 4 CD, die auch typische Improvisationen zeigen) und seit 1997 in Oldenburg eine Datenbank für Ragas.

Indische Theoretiker (z.B. Ramamatya 1550 im Buch „Svaramelakalanidhi“) lehnen sich weitgehend an Pythagoras gemäß folgender Tabelle an:

<i>Nr.</i>	<i>Name</i>	<i>Berechnung</i>	<i>Verhältnis</i>	<i>Cent</i>	<i>Cent-Differenz</i>
0	C	-	1:1	0	0
1	Des	5 Qui abw.	256:243	90	90
2	D	2 Qui aufw.	9:8	204	114
3	Es	3 Qui abw.	32:27	294	90
4	E	4 Qui aufw.	81:64	408	114
5	F	1 Qui abw.	4:3	498	90
6	Fis	- temperiert -	-	(600)	
7	G	1 Qui auf	3:2	702	204
8	As	4 Qui ab	128:81	792	90
9	A	3 Qui aufw.	27:16	906	114
10	B	2 Qui abw.	16:9	996	90
11	H	5 Qui aufw.	243:128	1110	114
12	C	-	2:1	1200	90

Einer der bekannteste Rags heißt „**Bhairav**“ und wird im „Raga Guide“ mit C-Des-E-F-G-As-H-C angegeben. Diese Skala, die in der arabischen Musik als „Higaz“ und in den jüdischen „shteygers“ als „freygish“ („jüdisch-phrygisch“) vorkommt, ist charakterisiert durch den Halbton über dem Grundton mit nachfolgender übermäßigen Sekunde. (Man kann auch von harmonisch-g-Moll mit Grundton C statt G sprechen). Im „Neuen Handbuch Musikwissenschaft“ (Laaber 1984), Band 8, schreibt Heinz Zimmermann zu dieser Intervallfolge:

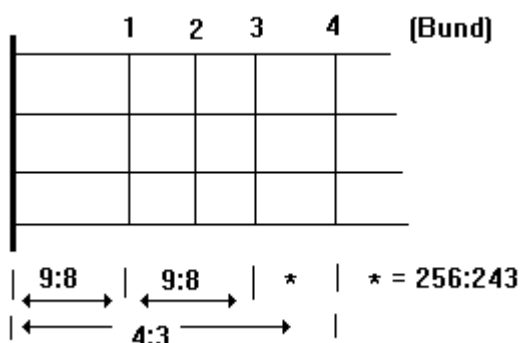
sa ri ga ma pa dha ni sa (Tonname)

90 294 114 204 90 204 204 (Intervall in Cent)

Diese Angaben sind ganz eindeutig „pythagoreisch!“

Fall 3: Tonsysteme der arabisch-persisch-türkischen Musik

Auch im arabischen Kulturraum gibt es eine hoch artifizielle Musikpraxis, an der sich Theoretiker seit Jahrtausenden die Zähne ausbeißen. Die arabische Musik ist strikt monodisch - einstimmig - und kennt daher das abendländische Problem der „reinen Dreiklänge“ nicht. Dafür aber ist die Melodik ausgesprochen raffiniert. Die Frage, die sich alle Theoretiker stellten, ist, nach welchen Regeln die Musiker singen und spielen, und, wie brauchbare Musikinstrumente gebaut und gestimmt sein müs-



sen. Die ältesten theoretischen Abhandlungen arabischer Tonsysteme besprechen daher auch meist die Stimmung der Lauten „Du“ (zum Beispiel „Risala fi l-musiqi“, ca. 900 n. Chr. siehe Abbildung!).

Neben den hier am Beispiel der Du-Bünde dargestellten einfachen Verhältnissen, gibt es in der arabisch-persisch-türkischen Musik bekanntlich „**Vierteltöne**“ – was in vieler Beziehung eine nicht-korrekte Ausdrucksweise ist. *Erstens* zeigen die

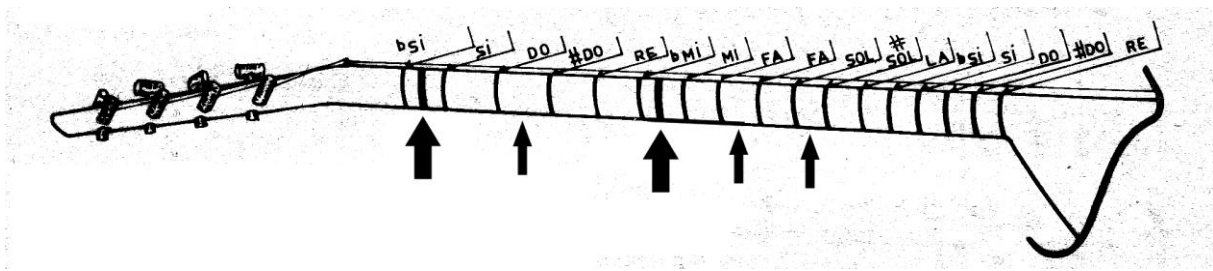
Berechnungen zur arabischen Ud (um 906 n.Chr.)

Halbton sind, ein konkretes Musikstück verwendete jedoch niemals Skalen mit mehr als 7 Tonstufen pro Oktave. *Zweitens* kommen in solch einer siebenstufigen Skala nie Intervallfolgen vor, die kleiner als ein Halbton sind. Die Mini-Intervalle treten stets nur als Trübungen anderer größerer Intervalle auf. Das faktisch einzige Intervall, das anders als im 12-temperierten System ist, ist ein „Dreiviertelton“, d.h. ein um einen „Viertelton“ erhöhter Halbton. *Drittens* suggeriert die Bezeichnung „Viertel“, dass hier ein (temperierter) Halbton nochmals (temperiert) „halbiert“ wäre. Dies ist aber in der Praxis nicht der Fall, auch wenn moderne Instrumente in Anlehnung an die mitteleuropäische Gitarre mit ihren temperierten Bündeln, ebenfalls temperierte Bündel aufweisen.

Bünde universell einsetzbarer Instrumente zwar viele Intervalle, die kleiner als ein temperierter

Ein Instrument zeigt also in Form der Bündel einen Tonvorrat, aus dem die Skala eines konkreten Musikstücks 7 Tonstufen auswählt und alle anderen unberücksichtigt lässt. Wir untersuchen eine **moderne Saz**, wie sie heute von Deutschtürken verwendet wird (Abbildung 5.12!). Man sieht, dass es neben einer mitteleuropäischen 12-Temperierung der Bündel an einigen Stellen nochmals eine – nach Augenmaß: temperierte – Unterteilung gibt. In der „Bağlama-Büyük Metod“ von Güray Taptık Yayınları sind auf der A-Seite nur das Intervall zwischen B und H (also 1. und 2. 12-temperierter Bund) und Es und E (also 6. und 7. 12-temperierter Bund) unterteilt, bei meiner Bağlama (= „Saz“), die Abbildung 5.12 zu sehen ist, gibt es noch zwei weitere Unterteilungen, sodass insgesamt neben

den 12-temperierten noch weitere 5 Bünde eingezogen sind, zusammen also 17 (Bild aus der erwähnten Bağlama-Schule:



Dicke Pfeile sind die gebräuchlichsten Unterteilungen, die dünnen Pfeile kommen ganz selten zum Zuge (eher bei der Verwendung anderer Tonarten). Eine Messung der Bundabstände ergibt:

Bund	Tonname	Bundabstand	Intervall	in Cent
0	a (la)	0		
1	b	4,7	1,057	96,1
2	\flat	2,5	1,031	53,4
3	h (si)	2,4	1,031	52,9
4	c (do)	3,9	1,053	89,5
5	\sharp	2,7	1,038	64,8
6	cis	1,8	1,026	44,6
7	d (re)	3,7	1,057	95,4
8	es	3,5	1,057	95,4
9	\flat	1,7	1,028	48,3
10	e (mi)	1,9	1,033	55,6
11	f (fa)	2,8	1,051	85,4
12	\sharp	2,1	1,039	66,9
13	fis	1,4	1,027	46,1
14	g (sol)	2,8	1,057	96,0
15	gis	2,5	1,054	90,5
16	\sharp	1,8	1,040	68,2
17	a (la)	1,4	1,032	55,0
halbe L		43,6		1204,0

Die Saiten der hier vermessenen Saz waren 87 cm lang, der Oktav-Bund lag bei 43,6 cm. Die Bundabstände sahen sehr gleichmäßig „logarithmisch“ aus, eine Messung ergab jedoch, dass fast alle nicht unterteilten Halbtontschritte zu klein waren (95 Cent statt 100 Cent), zugleich aber die unterteilten Halbtontschritte zu groß waren (2 mal 53 = 106 Cent, 65 + 44 = 109 Cent usw.). Es ist zu vermuten, dass die Bünde „nach Gehör“ angelegt worden sind. Sie sind sogar (wie bei einer Sitar) beweglich, da sie aus eng geknüpftem Saitenmaterial bestehen.

Die bei Deutsch-Türken beliebteste *musikalische Skala* ist eine, bei der der 2. Bund statt des 1. oder 3. Bundes verwendet wird, d.h. das Intervall zwischen a und c wird durch das \flat „gleichmäßig“ unterteilt. Eine andere Schreibweise für das nur um einen Viertel Ton erniedrigte h ist \flat .

In der bereits anlässlich des indischen Rags „Bhairav“ erwähnten arabischen Skala „**Hiğaz**“ (von a aus als a – b – h – c – usw. notiert) wird das übermäßige Intervall b – h dadurch „abgemildert“, dass statt b nur ein \flat gewählt wird, dadurch wird aus der Intervallfolge $1/2 - 3/2 - 1/2 -$ usw. die Intervallfolge $3/4 - 5/4 - 1/2 -$ usw. (nach Frederic Lagrange „Al-Tarab“, Heidelberg 2000, S. 146).

Es gibt mehrere Theorien arabischer Musikwissenschaftler darüber, wie die Zwischentöne der arabischen Musik „herzuleiten“ seien. Einige interpretieren alle Zwischentöne als Folge eines auf 21 Quintschritte erweiterten pythagoreischen Quintenzirkels (Supi Ezgi: „Nazari ve Ameli Türk Musikisi“, Istanbul 1953). Andere gehen von echten Vierteltönen aus, die auf der Unesco-Bärenreiter-LP-Serie von Alain Danielou mit 25:24 angegeben werden.

8.4. Kosmische Tonsysteme

Fall 1: Johannes Keplers Harmonia Mundi

Johannes Kepler (1571-1630) geht erstmals in der Astronomie bei den Berechnungen kosmischer Tonsysteme vom heliozentrischen Weltbild (Kopernikus 1473-1543) aus und wendet die von ihm selbst entwickelten Planeten-Bewegungsgesetze an, die noch heute Gültigkeit haben. Zugleich jedoch dient ihm all diese „Aufklärung“ dem Zweck, die „göttliche Ordnung“ in der *musica mundana*, *musica humana* und *musica instrumentalis* (der Sphärenmusik, der menschlichen Lebensharmonie und der Instrumental- und Vokalmusik) zu begründen. Kepler geht alle nur denkbaren mathematischen Beziehungen zwischen Planetendaten (wie Umlaufzeit, Bahngeschwindigkeit, Sonnenentfernung, Winkelgeschwindigkeit) durch und verwirft jene, die sich als nicht „ordentlich“ im Sinne seiner Harmonie-Vorstellung erweisen. „Göttliche Ordnung“ findet er letztendlich in den Verhältnissen zwischen den Winkelgeschwindigkeiten der Planeten im sonnenfernsten und sonnennächsten Punkt ihrer elliptischen Umlaufbahn, in Aphel und Perihel. Hier die Messergebnisse, die eine Leistung jahrelanger Präzisionsarbeit darstellen:

Planet	Aphel	Aph:Perih	Perihel
Saturn	1'48"	4:5	2'15"
Jupiter	4'30"	5:6	5'30"
Mars	26'14"	2:3	38'1"
Erde	57'3"	15:16	61'12"
Venus	94'50"	24:25	97'37"
Merkur	164'0"	5:12	384'0"

Wir rechnen die hier angegebenen Proportionen ausgehend vom „Kammerton“ Erde(Aphel) = 440 Hz in Frequenzen um:

Hz: 440 472 555 555 586 632 678 731 740 752 809 872

Erde/A Erde/P Saturn/P Jupiter/A Mars/P Merkur/A Jupiter/A Venus/A Merkur/P Venus/P Mars/A Saturn/A

440	469	550	587	660	733	792
	16:15	5:4	4:3	3:2	5:3	9:5

Die nächstliegenden reinen Intervalle

Das entstehende Tonsystem ist im Sinne der abendländischen Musik indessen vollkommen unbrauchbar. Das Ergebnis zeigt, dass man sich entweder von der Vorstellung lösen muss, „Sphärenmusik“ sei etwas harmonikal Einfaches, oder dazu übergehen muss, Sphärenmusik lediglich symbolisch zu nehmen, wie es die Pythagoreer nach heutigem Verständnis auch getan haben.

Fall 2: Hans Coustos „Planetentöne“

Keplers Größen sind weder anschaulich, noch direkt erlebbar. Die periodischen Bewegungen der Erde um die Sonne (Periode 1 Jahr), des Mondes um die Erde (Periode 1 Monat) oder der Erde um die eigene Achse (Periode 1 Tag) sind jedoch für alle Lebewesen gut erlebte Biorhythmen. In erweitertem Sinne können auch die Umlaufzeiten der Planeten um die Sonne Perioden von biorhythmischer Bedeutung sein. Der Nachteil der genannten Perioden ist, dass sie zwischen 86 400 sec (= 1 Tag) und 7 839 694 000 sec (= Umlaufzeit des Pluto um die Sonne) liegen, also so groß sind, dass sie Welten von den Perioden akustischer Schwingungen getrennt sind. Um eine Verbindung dieser Welten herzustellen, hat Hans Cousto 1979 das „Kosmische Gesetz der Oktav“ formuliert, das besagt: „Periodizitäten, die sich durch Oktavierung auseinander ergeben, sind wirkungsverwandt“. Die Wirkung der Mond-Periode ist verwandt der Wirkung eines Tons mit der Frequenz 210,42 Hz, weil dieser Ton die Periode der 29. Oktave der Mondperiode von 2508 268 sec hat. Die folgende Liste zeigt die Perioden der Planeten um die Sonne und die Frequenzen von oktavierverwandten Tönen:

Gestirn	Periode in sec	Oktavierung	Frequenz in Hz
Merkur	7600521	30	141,27
Venus	19414149	32	221,23
Erde	30900691	32	136,10
Mars	59355107	33	144,72
Jupiter	374335600	36	183,58
Saturn	929595740	37	147,85
Uranus	2651264400	39	207,36
Neptun	5200212100	40	211,44
Pluto	7839694100	40	140,25

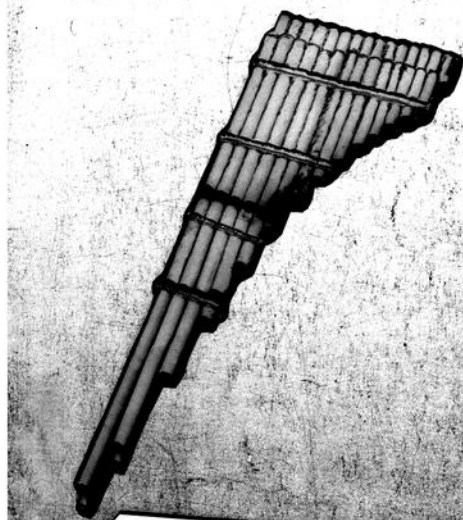
Zum Beispiel Merkur: 30 Oktavierungen bedeuten eine Multiplikation mit 2^{30} (=1073741824). Die Merkur-Periode beträgt 7600521 sec, die Merkurfrequenz f_m folglich $1/\text{Merkurperiode} = 0,0000001315699$ Hz. Der Merkurton hat dann die Frequenz $(f_m) * 2^{30} = 141,72$ Hz.

Die „Planetentöne“ sind seit Joachim Ernst Berendts „Nada Brahma“ und seinen Monochord-Meditations-CD's zum Kernbestand der Eso-Szene geworden: nach ihnen werden Gongs, Klangschalen, Baby-Beruhigungs-CD's, Mind-Mashines und ... das MIDI-Planetarium (siehe Kapitel 11.4) „gestimmt“. Die einfachste Download-Möglichkeit der Planetentöne ist www.uni-oldenburg.de/musik/planet/cousto.html, die aber aus geschäftlichen Gründen von der „Cousto-Firma“ Planetware gar nicht gerne gesehen wird.

Das Gesetz der Oktav von Hans Cousto greift ein Modell auf, das Kepler erwähnt und aufgrund der allzu „ungöttlichen“ Ergebnisse verworfen hat. Oktaviert man etwas weniger oft als in der Tabelle angegeben, so erhält man musikalisch brauchbare Rhythmen, setzt man die Oktavierung fort, so gelangt man in den Frequenzbereichs der Spektralfarben – ein weites Feld esoterischer Spekulation!

Panflöten

APRENDA A TOCAR
ZAMPOÑA



COMPLETO
 METODO PARA
 APRENDER A TOCAR

NOTA	Longitud aprox.	Diámetro aprox.
RE 3	28,5 cm.	1,55 cm.
MI	25,5 cm.	1,5 cm.
FA#	22,5 cm.	1,45 cm.
SOL	21,5 cm.	1,45 cm.
LA	19 cm.	1,4 cm.
SI	17 cm.	1,35 cm.
DO 4	16 cm.	1,3 cm.
RE	14 cm.	1,25 cm.
MI	13 cm.	1,2 cm.
FA#	11 cm.	1,15 cm.
SOL	10,5 cm.	1,1 cm.
LA	9,5 cm.	1,05 cm.
SI	8,5 cm.	1 cm.

Diese lateinamerikanische Panflötenschule gibt prototypische Längen an: Überprüfe dies und ordne die „Notas“ den Pfeifen der abgebildeten Flöte zu!

Kapitel 9: Zwei- und dreidimensionale Schwingungserzeuger

Instrumente mit zwei- und dreidimensionalen Schwingungserzeugern sind laut. Sie haben die Fähigkeit, ihre Schwingungsenergie ohne Umschweife optimal an die Luft zu übertragen. Sie sind ihr eigener Lautsprecher. Und sie sind sehr robust und einfach gebaut. Wie schon erwähnt, kann aber nicht erwartet werden, dass ein mehrdimensionaler Schwingungserzeuger „harmonisch“ schwingt. Musikalisch heißt dies, dass die mehrdimensionalen Schwingungserzeuger „von sich aus“ kaum einen Tonhöhenindruck hervorrufen. Und, wenn entsprechende Instrumente dies doch tun, dann liegt dies oft nicht am Schwingungserzeuger, sondern an Resonanzeigenschaften des Instrumentenkörpers.

9.1. Eine Membran als Schwingungserzeuger

Eine *Membran* ist das zweidimensionale Gegenstück zur Saite. Sie ist ein zweidimensionaler elastischer Körper. Es gibt drei Möglichkeiten, ein Fell, eine Plastikhaut oder dergleichen als elastische Membran aufzuspannen:

- auf einem offenen Rahmen,
- auf einem durch eine andere Membran abgeschlossenen Rahmen,
- auf einem (fast) geschlossenen Hohlkörper.



Im 1. Fall strahlt die Membran unmittelbar an die Luft ab (Beispiel: Bass Drum). Im 2. Fall schwingen die beiden Membranen als ein über die Innenluft gekoppeltes System und strahlen beide ab (Beispiel Tom-Tom). Im 3. Fall wird die Schwingung der Membran durch die Resonanz des Hohlraumes beeinflusst, strahlt aber im wesentlichen alleine an die Luft ab (Beispiel Kesselpauke). Die kleine Luftöffnung ist zum Druckausgleich notwendig.

Abb. 9.1 Aufspannungen einer Membran

Experiment 9.1a

Wir nehmen Klänge verschiedener Membran-Instrumente auf und sehen uns den Verlauf der an die Luft abgestrahlten Schwingung am Computerbildschirm an. Bei Bass Drum, Tom-Tom und tendenziell Bongos sieht man recht einfache Schwingungsbilder. Die hier verwendete **Bass Drum** mit einem harten Anschlag zeigt in den ersten 6 ms Geräuschanteile, sodann ca. 8 Schwingungsperioden mit schnell abnehmender Amplitude innerhalb 1/10 Sekunde. Eine kleine Quasiperiode (vgl. Abbildung 3.6) ist noch an den „wandernden“ kleinen Einbuchtungen zu erkennen. Dass der Bass Drum trotz dieser Periodizität selten eine Tonhöhe zugeordnet wird, liegt daran, dass bei diesen tiefen Frequenzen die wenigen Schwingungen nicht ausreichen, um vom menschlichen Gehirn als Periode erkannt zu werden. (Ein Glück für die gesamte Rockmusikszene!). Ein ähnliches Schwingungsbild zeigen Bongos, die wegen höherer Grundfrequenz in 100 ms mehr Perioden unterbringen.

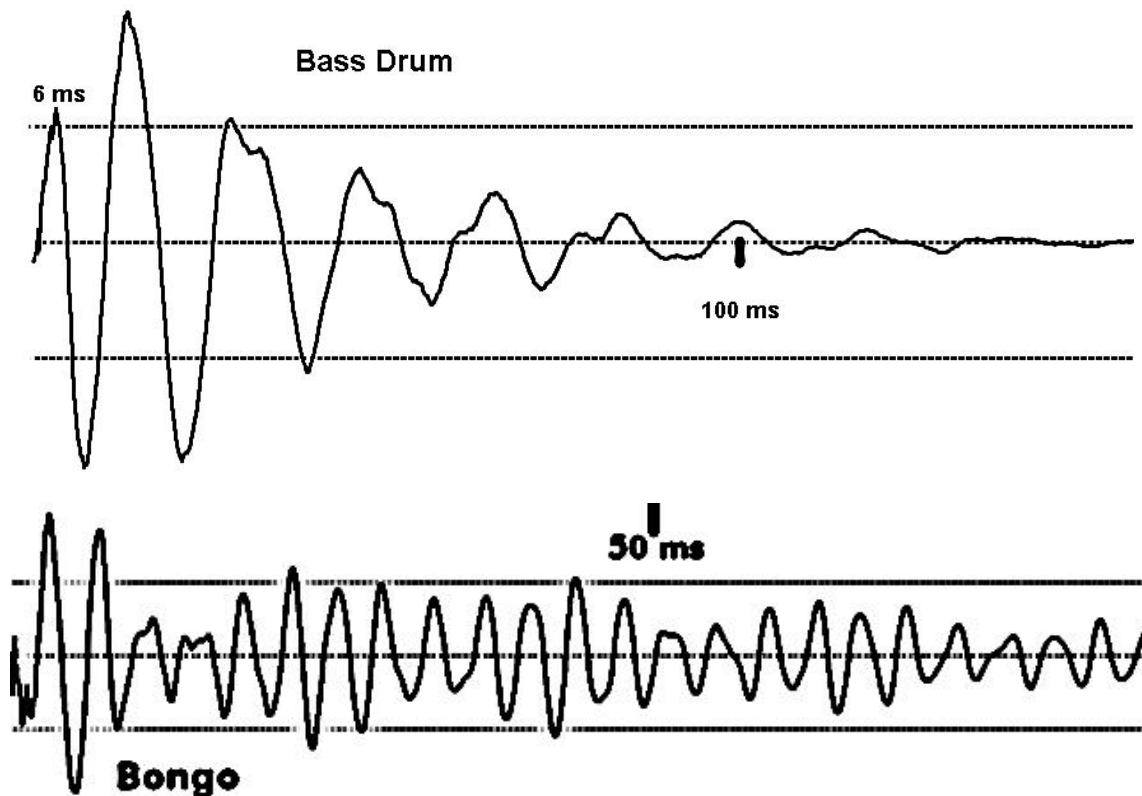


Abb. 9.2 Schwingungsbilder von Bass Drum und Bongo

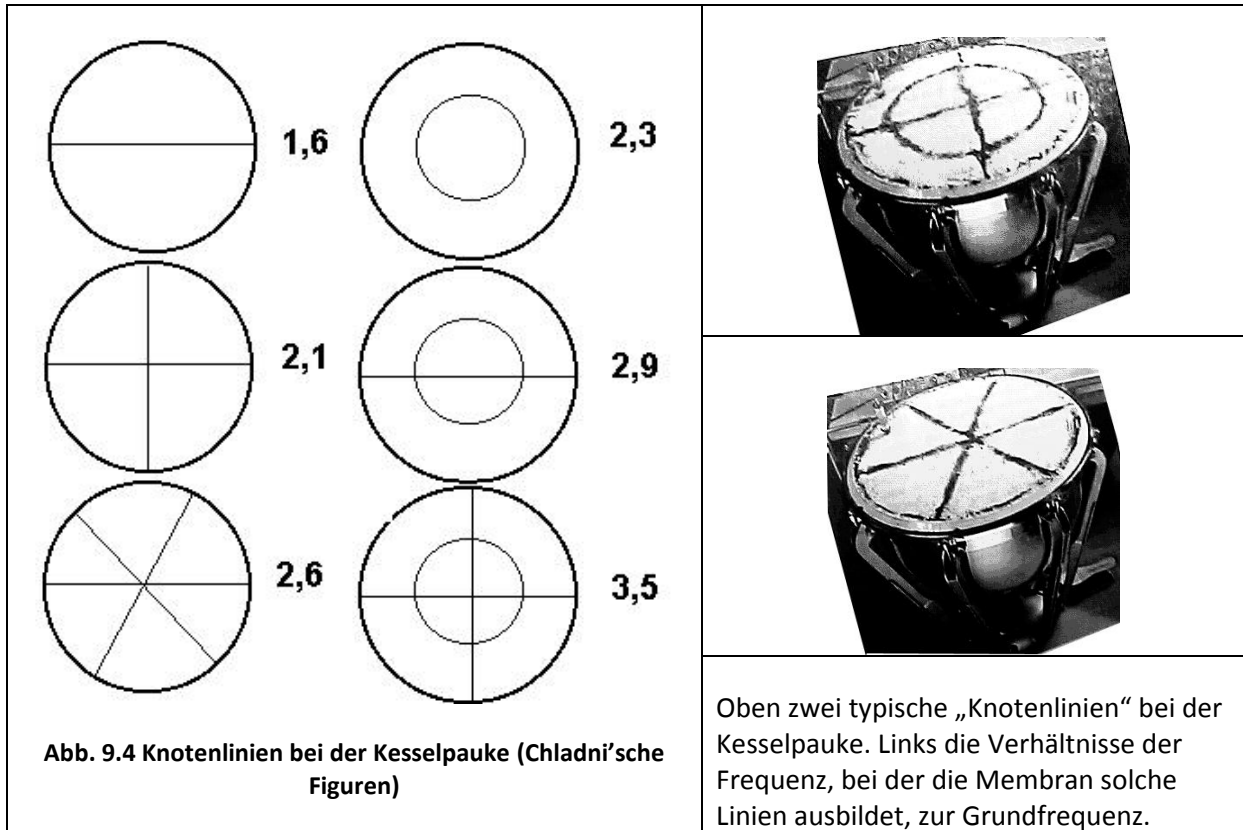
Bei der **Kesselpauke**, Typ 3 von Abbildung 9.1, ist mit etwas komplizierteren Umständen zu rechnen. Hier regt die Membran die Luft im Hohlraum des Kessels zu Eigenschwingungen an, die dann wieder auf die Membran zurückwirken. In einem Experiment, das analog zu Experiment 7.3 aufgebaut ist, können wir die Schwingungsknoten und -bäuche einer Membran einzeln sichtbar machen. Dabei gehen wir wie in Kapitel 5 und 7 davon aus, dass die Gesamtschwingung der Membran sich aus den einzelnen Resonanzschwingungen zusammensetzt.

Experiment 9.1b

Die Membran einer Pauke wird durch einen Sinuston über Lautsprecher erregt. Auf der Membran ist gleichmäßig Weizenkleie (oder geriebene Kreide) verteilt. Wir verändern die Frequenz der die Membran anregenden Sinusschwingung.

Beobachtung: Bei bestimmten Frequenzen stellen sich zweidimensionale Schwingungsmuster (**Chladni'sche Figuren**) ein. Diese Frequenzen sind allerdings nicht immer ganzzahlige Vielfache einer „Grundfrequenz“, d.h. der tiefsten beobachteten Resonanzfrequenz (bei der sich kein Knoten bildet, d.h. in der Membranmitte ein Bauch ist). Die Knotenlinien liegen *nicht* „harmonisch“.

Der relativ gute Tonhöhen-Eindruck der Pauke rührt von einer Wechselwirkung der Fellspannung und damit der für die Knotenlinien zuständigen Grundfrequenz und dem Hohlraum innerhalb des Kessels her. Das Kesselvolumen hat Einfluss darauf, in welcher Stärke die einzelnen „Obertöne“ (die zu den Knotenlinien gehören) vertreten sind.



Dünne Metall- oder Plastikplatten (**Becken**, dünne Gongs) rechnen mit zu den zweidimensionalen Schwingungserzeugern, obwohl sie nicht alle Kriterien von „elastisch“ erfüllen.

Experiment 9.1c

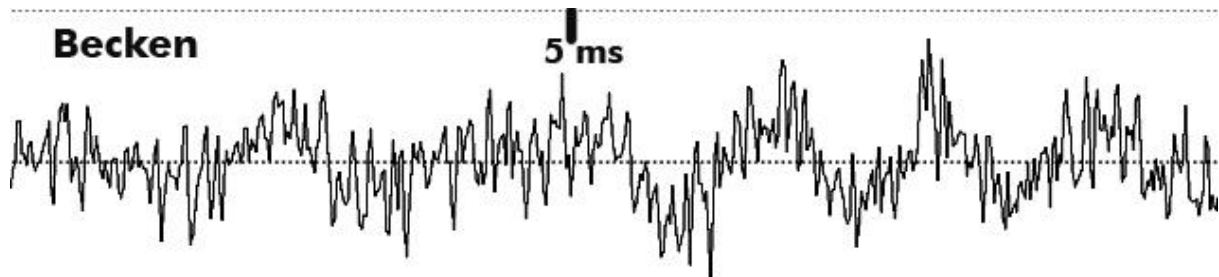
Wir wiederholen das Experiment 9.1b an einem Becken und messen neben der vom Becken abgestrahlten Luftschwingung nun über ein Kontaktmikrofon auch die Schwingung am Beckenrand. Das Experiment lässt sich auch an Gongs durchführen.

Ergebnis:

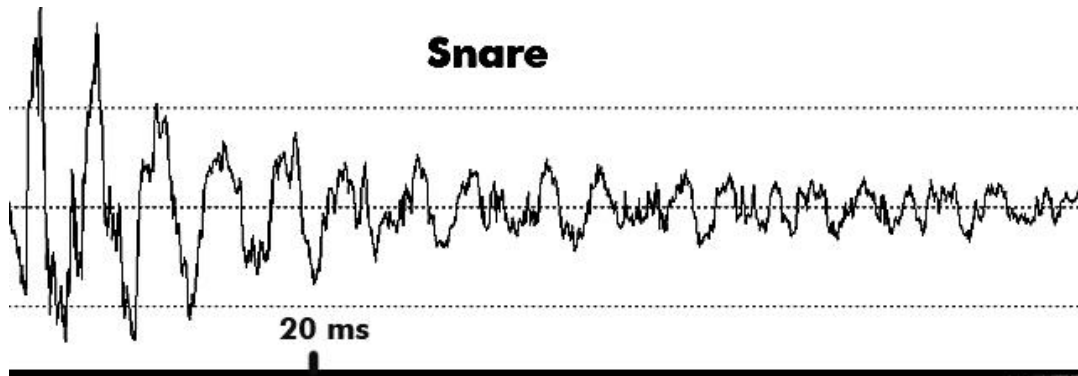
- Bei gewissen Anregungsfrequenzen gerät das Becken in Resonanzschwingung.
- Die Resonanzschwingungen werden am Rand des Beckens als Sinusschwingungen registriert.
- Die Resonanzfrequenzen (und damit die Frequenzen der „nicht-ganzzahligen Overtöne“) zeigt folgende Tabelle:

Resonanzstellen	klein	sehr groß	sehr groß	groß	mittel
Frequenz in Hz	131	366	478	598	768
ganzzahliges Vielfache	2 * 65,5	6 * 61	8 * 59,8	10 * 59,8	13 * 59,1
nicht-ganzzahliges Vielfache	2,2 * 59	6,2 * 59	8,1 * 59	10,1 * 59	13,02 * 59

Das ausklingende Becken zeigt eine Schwingung von 59 Hz. Die hier vorliegenden Resonanzstellen sind „nicht-ganzzahlige Vielfache“ dieser Frequenz, allerdings liegen die Werte stets in der Nähe von ganzen Zahlen, sodass ein „fast harmonisches Spektrum“ vorliegt. Dies kann man auch am Schwingungsbild erkennen:



Mit einiger Phantasie kann man sich das Schwingungsbild einer Snare, bei der das eine Fell mit Metallspiralen versehen ist, bereits ohne Zuhilfenahme eines Computers vorstellen: „geräuschhafte gekräuselte Bongo-Schwingung“.



Und dass eine „Open Hihat“ fast farbig rauscht, aber dennoch eine schwebungsartige Amplitudenmodulation aufweist, bemerkt man hörend eventuell aber erst, nachdem man das Schwingungsbild studiert hat:

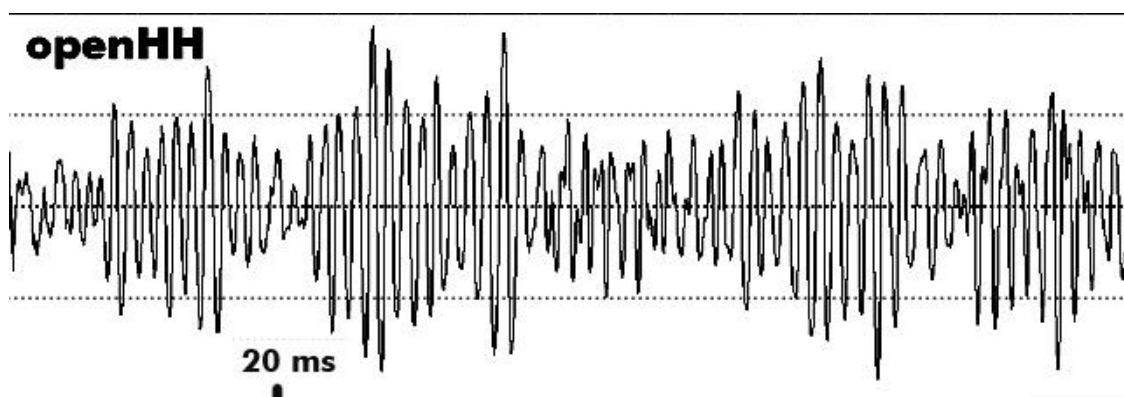


Abb. 9.5 Schwingungsbilder diverser zweidimensionaler Schwingungserzeuger

Ein dritter Typ eines zweidimensionalen Schwingungserzeugers (neben Membranen und dünnen Platten) sind schwingende Metall- oder Bambuszungen: Mundharmonika, Maultrommel, Akkordeon, Harmonium und **Mbira/Sanza**. Von letzteren gibt es im Überseemuseum Bremen viele nie gespielte Exemplare, die schon fast 100 Jahre alt sind. Bei einem „Klangarchivierungs-Projekt“ wurde ein Instrument aus Kamerun „vermessen“:

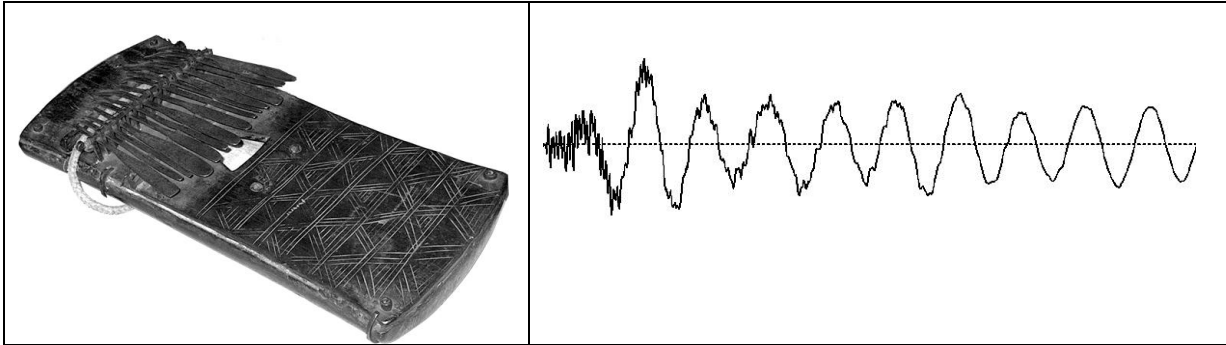


Abb. 9.6 Mbira (Kamerun 1914) : geräuschhafter Einschwingvorgang, sinusförmiges Ausklingen

9.2. Dreidimensionale Schwingungserzeuger (Festkörperinstrumente)

Dass die Schwingungsverhältnisse bei dreidimensionalen Schwingungserzeugern einfacher sind als bei zweidimensionalen, wird niemand erwarten. Glücklicherweise werden sie aber auch nicht wesentlich komplizierter. Das Schwingungsverhalten - so schwer es sich bei Xylophonplatten, chinesischen Glocken, Klangschalen oder Holz-Claves erklären lässt - zeigt alle Mischformen der uns inzwischen bekannten Schwingungen:

- harmonische Bestandteile, oft erst im Ausschwingvorgang,
- quasiperiodische Schwingungen resultierend aus nicht-ganzzahligen Obertönen,
- alle Arten von Rauschen und chaotischen Schwingungen.

Bei **Triangeln** und ähnlich klar klingenden Festkörperinstrumenten ohne definierte Tonhöhe tritt noch ein weiterer Schwingungstyp hinzu, der sich im Spektrum als „Seitenbänder“ äußert. Die Spektrallinien liegen hier teilweise „harmonisch“ an Stellen, die ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind, sind aber begleitet von dicht dabei liegenden, zusätzlichen Spektrallinien (den „Seitenbändern“). Weitere Einzelheiten zu Spektren mit Seitenbändern werden in Abschnitt 10.2 unter dem Stichwort „FM-Synthese“ erörtert. Mit der „Fast Fourier Transformation“, die in „Cubase“ eingebaut ist, wurde folgendes Spektrum einer Zimbel aufgenommen.

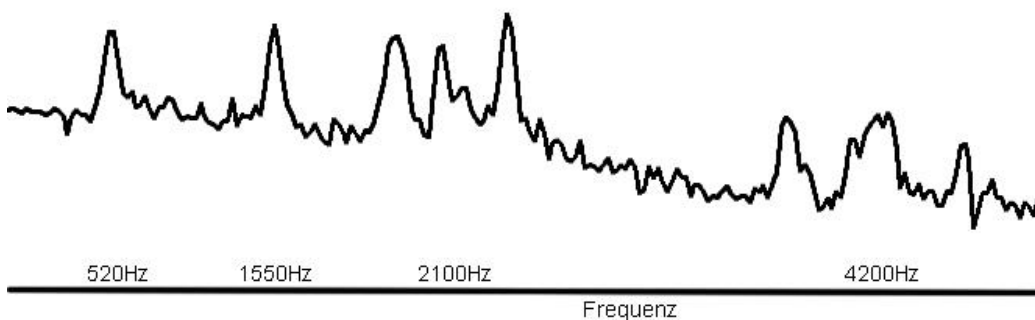


Abb. 9.7
Spektrum
einer Zim-
bel

Um die Frequenz 2100 und 4200 Hz herum sind Seitenbänder zu sehen, die sich nicht als „harmonische Obertöne“ des Grundtons (520 Hz) deuten lassen. (Das Bild zeigt, dass Spektrallinien in der Realität eine Utopie darstellen: hier sind es kleine Berge!)

Experiment 9.2

Wir sampeln Klänge von verschiedenen Glocken, Gongs, Vibraphonplatten etc. Das Schwingungsbild ist meist komplex. Die Fourieranalyse ergibt bisweilen eine „Grundfrequenz“ und Spektrallinien. Fast immer ändert sich das Spektrum beim Ausklingen. Und oft lässt sich die Schwingung als Überlagerung geräuschhafter und periodischer Vorgänge interpretieren. Im folgenden einige Beispiele.

Die Schwingungsform von **Gongs** ist sehr variabel: Sie ändert sich mit dem Material des Schwingungserregers (Schlegel) und mit der Lautstärke. Die Fourieranalyse eines „Feng-Lui“-Gongs (Johannes Oehlmann) zeigt den musikalisch bekannten Sachverhalt, dass sich (1) die Klangfarbe mit der Lautstärke extrem ändert (nach der Regel: je lauter umso mehr Oberfrequenzen sind aktiv) und (2) der Gong im Ausklingen immer „harmonischer“ und „tiefer“ wird (die hohen nicht-harmonischen Obertonbestandteile klingen schneller ab als die tiefen). In einem 3D-Bild sieht das so aus:

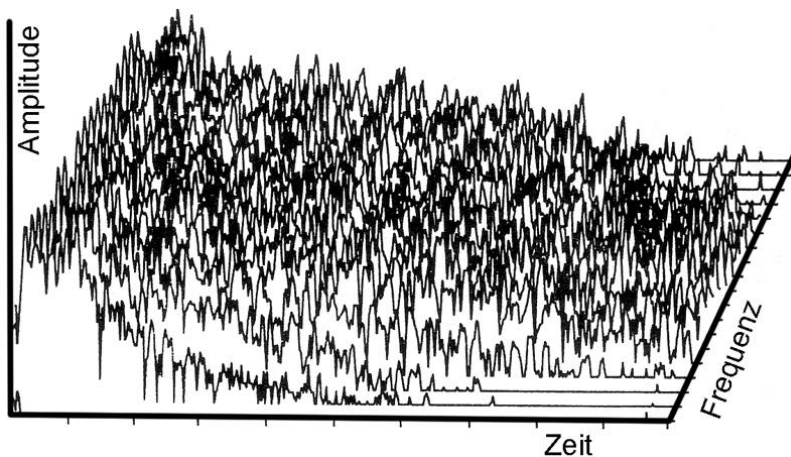


Abb. 9.8 Feng-Lui-Gong-Spektrum im 3D-Bild (nach Johannes Oehlmann)

Derartige Bilder beeindrucken stets außerordentlich. Johannes Oehlmann spricht von einem „Wasserfall“, womit nicht nur das Bild, sondern auch der Klang beschrieben werden soll.

Dass es sehr viele Instrumente mit mehrdimensionalen Schwingungserzeugern gibt, die keine Tonhöhenwirkung hervorrufen und daher kein periodisches Spektrum haben, äußert sich in den meisten Fällen in einem Schwingungsbild, das für „Rauschen“ typisch ist (Abbildung 3.8 Tambourin).

Dreidimensionale Schwingungserzeuger haben Knotenflächen (entsprechend den Knotenlinien zweidimensionaler Schwingungserzeuger). Die „Knotenlinien“ von **Glocken** können in holografischen Laser-Fotografien deutlich gemacht werden. Dabei wird die Oberfläche dreidimensional „gescannt“. Abbildung 9.9 zeigt als Beispiel chinesische Zhong-Glocken (aus dem 5. Jahrhundert v. Chr.), mit denen der Grundton der Regierungsführung festgelegt wurde. Die Schwingungen zeigen Ähnlichkeiten mit der in Abbildung 5.10 dargestellten Schwingung von Decke und Boden der Geige. Beide Bilder stellen die Grundschwingung unterschiedlich geformter Glocken dar.

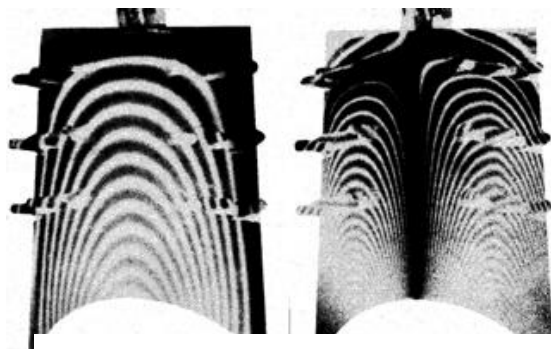


Abb. 9.9 Knotenflächen bei Glocken

Die wichtigsten dreidimensionalen Schwingungserzeuger mit relativ klaren Tonhöhen sind die **Xylophone** (aus Holz oder Metall). In der Regel sind die Xylophonklänge sehr kurz und besitzen einen geräuschhaften Einschwingvorgang, dem sich eine fast sinusförmige Schwingung anschließt. Von großer Bedeutung ist hier (wie auch beim Gong) die Art und Weise, wie die Schwingung erregt wird: an welcher Stelle des Festkörpers und mit welchem Mechanismus (weicher/harter Schläger usw.). Im Rahmen eines Projekts zur „Vermessung“ und klanglichen Archivierung der nie gespielten und oft über 100 Jahre alten Xylophone des Bremer Überseemuseums sind auch die Schwingungserregungsarten „archiviert“ worden:

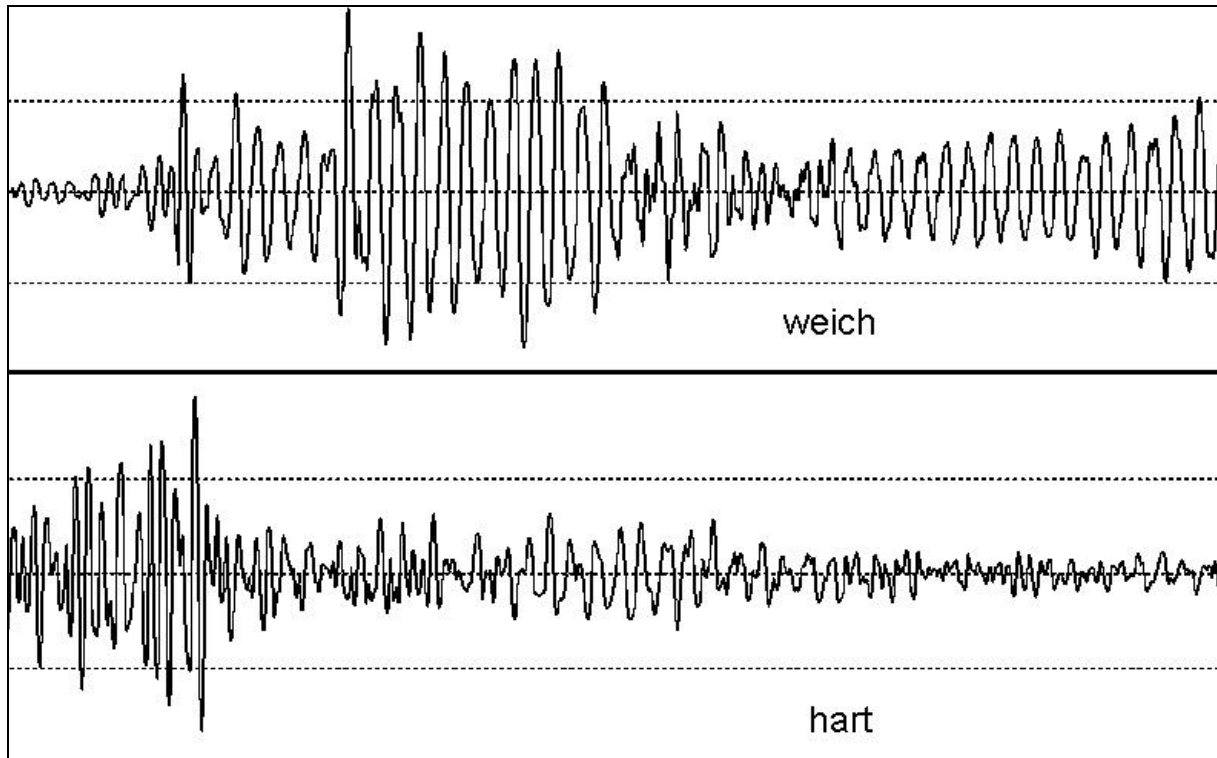


Abb. 9.10 Xylophon aus Kamerun (1914) weich und hart angeschlagen

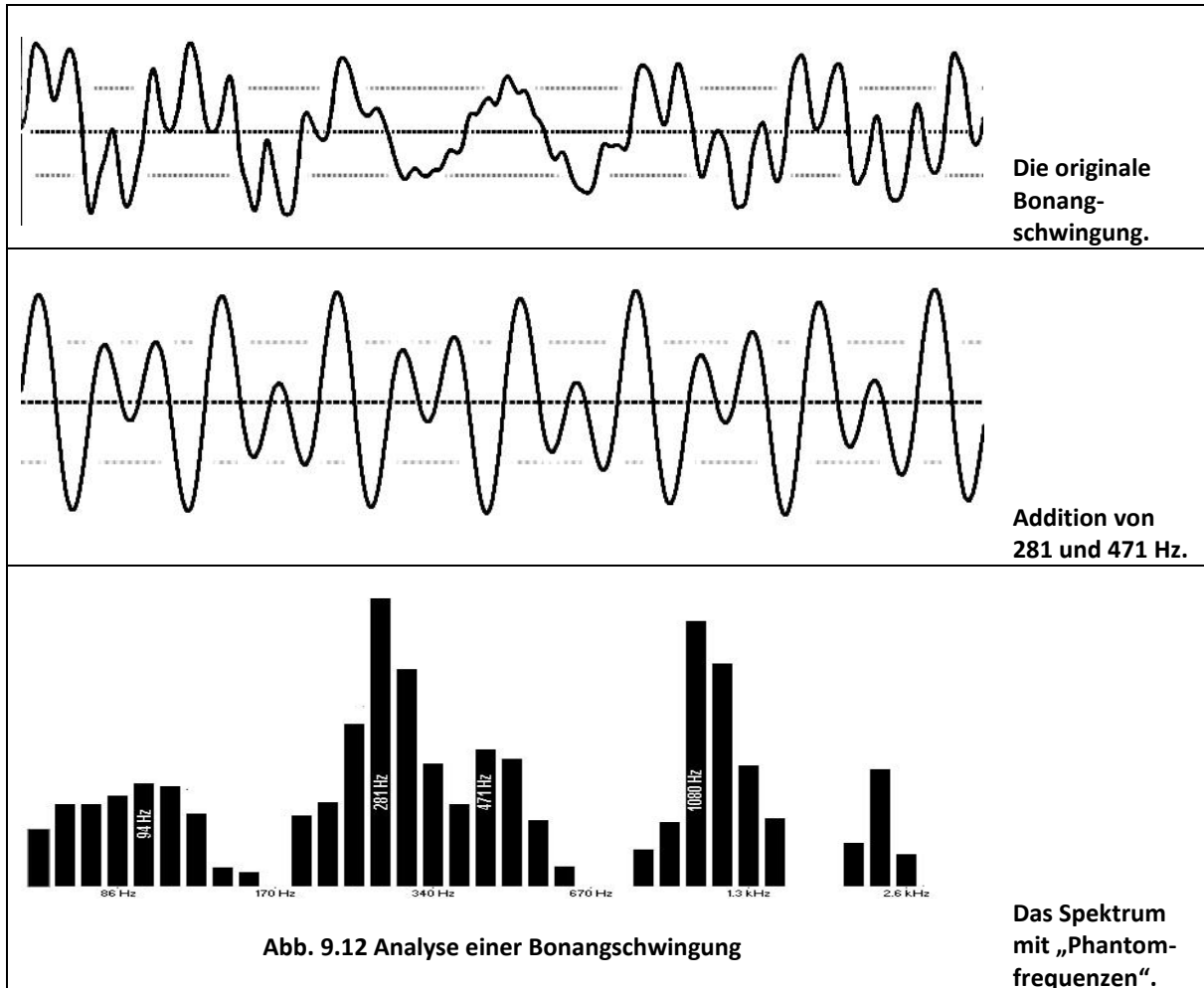
Beim weichem Anschlag „kommt“ der Klang erst langsam und ist weniger geräuschhaft.

Das Instrumentarium des **Gamelan** besteht aus Xylophonen (Metall und Holz), aus großen Gongs mit unbestimmter Tonhöhe und aus Serien von kleineren Gongs („Bonang“) mit gut erkennbaren Tonhöhen. Der tiefste Gong der Bonang (Abbildung 9.11) hat die Tonhöhe cis' mit 281 Hz. Im Spektrum



Abb.9.11 Bonang: ein Satz gestimmter Gongs

gibt es einen ersten unharmonischen Oberton bei 471 Hz. Im Schwingungsbild sieht man die typische quasiperiodische Schwingung, eine „wandernde“, sehr starke Ausbuchtung. Die grobe Spektralanalyse weist bei ca. 100 Hz Amplituden auf. Dies Phänomen ist so zu erklären, dass sich der Analyse-Algorithmus bei den beiden Frequenzen 281 und 471 Hz „denkt“, dass diese der 3. und 5. Oberton von 95 Hz sein müssten gemäß der Formel $3 \times 95 = 285 \text{ Hz}$ und $5 \times 95 = 475 \text{ Hz}$.



Dreidimensionale schwingende Flüssigkeiten (Kymatik)

Mit technischer Raffinesse ist es Hans Jenny gelungen, ins „Innere“ schwingender dreidimensionaler elastischer Körper (viskoser Flüssigkeiten) zu blicken. Dazu wurde ein entsprechender Stoff (Wasser, Öl, Paraffin usw.) in einen auf einer Glasplatte liegenden Rahmen gefüllt, die Platte von unten mit einem Tongenerator erregt, die Flüssigkeit mit einem Stroboskop beleuchtet und eine Fotografie der schwingenden Flüssigkeit erstellt. Die Frequenz des Stroboskops war ein ganzzahliges Vielfache der anregenden Frequenz des Tongenerators. Im Stroboskoplicht sieht man dann stets dieselbe Phase der sehr schnellen Dichteschwankungen im Innern und an der Oberfläche der Flüssigkeit. Hans Jenny stellte bei seinen Fotografien symmetrische und „harmonikale“ Verteilungen der Flüssigkeitsdichte fest. Diese Beobachtung stand in gewissem Gegensatz zu den eher chaotischen Hologrammen an Glocken und dicken Platten und entsprach den Chladni'schen Figuren an Membranen. Es wurde auch festgestellt, dass es bei kontinuierlicher Änderung der Anregungsamplitude sprunghafte Änderungen des „harmonikalen“ Schwingungsmusters gibt, die an das Überblasen von Luftinstrumenten erinnern.

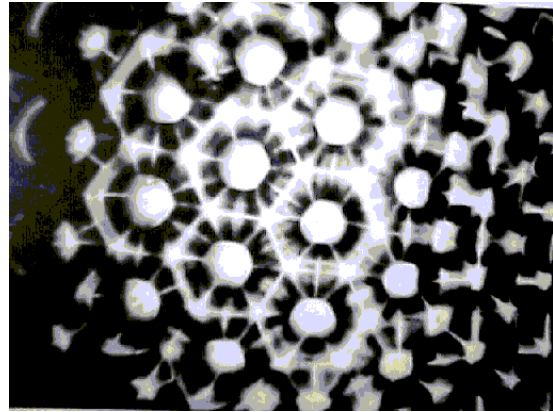


Abb. 9.13 Links: Steeldrums mit Ausbuchtungen, die an Chladni'sche Figuren erinnern. Rechts eine Fotografie von Hans Jenny („Kymatik“)

9.3. Die menschliche Stimme als Schwingungserzeuger

Die Vokale der menschlichen Stimme werden, wie in Abschnitt 6.4 erörtert, durch ein „Filtersystem“ hervorgebracht, bei dem die Stimmbänder Schwingungserzeuger und der Mund-Rachenraum ein Formantfilter ist. Bei den stimmlosen Konsonanten sind die Stimmbänder inaktiv. Der jeweilige Laut wird durch Operationen der Zunge, der Lippen und durch Windgeräusche hervorgebracht. Hier eine **Systematik der Sprachlaute**:

Signale mit harmonischen Spektrum	m, l, n, ng	sinustonähnlich, kaum Obertöne	stimmhafte Konsonanten
	u, o, a, ö, ä, e, i	obertonreiche Klänge, Formanten	Vokale
Signale mit Geräuschkpektren	s, sch, j, ch, w	obertonartige Geräusch-Maxima	stimmhafte Zischlaute
	s, sch, (a)ch, (i)ch, f	obertonfreies Geräuschspektrum	stimmlose Zischlaute
Kurzgeräusche, Impulse	b, d, g	harmonische Impulse	stimmhafte Plosivlaute
	p, t, k	geräuschhafte Impulse	stimmlose Plosivlaute

Kriterium für die erste Gruppe ist, dass man auf alle diese Laute Melodien singen (d.h. *Tonhöhen* produzieren) kann. Kriterium der 2. Gruppe ist, dass man die Laute *beliebig lange* aushalten, aber keine Melodien singen kann. Die letzte Gruppe besteht aus Lauten, die definitionsgemäß sehr kurz sind und auch bei bestem Willen nicht zeitlich ausgedehnt werden können. Bei den stimmhaften Plosivlauten schwingt der Mund-Rachenraum als Formantfilter mit und man kann sogar (wie bei einer Maultrommel) vokalähnliche Laute hervorbringen. Der Mechanismus, der für das Rauschen zuständig ist, ist ein durch einen Lippen- und/oder Zungenspalt dringender Luftstrom.

In der *Sprachanalyse* besonders beliebt ist die Darstellung der Spektren als „Spektrogramm“ (siehe Abbildung 6.10). Reine Geräusche haben dort eine gleichmäßig verteilte Schwärzung zur Folge, während es bei formant- oder obertonartigen Geräuschen Streifen größerer und geringerer Schwärzung gibt. Bei „u“ und „a“ sieht man solche Streifen, deren Wellung besagt, dass der Sprecher die Tonhöhe verändert hat. Am Schwingungsbild (oben) erkennt man, dass die Konsonanten gegenüber den Vokalen sehr kurz sind.

Die Schwingungsbilder eines stimmlosen und stimmhaften „s“ unterscheiden sich qualitativ. Das Spektrogramm der Konsonanten „s“, „t“ und „f“ ist fast gleichmäßig geschwärzt, „sch“ hat einen Formanten bei 2-3000 Hz.

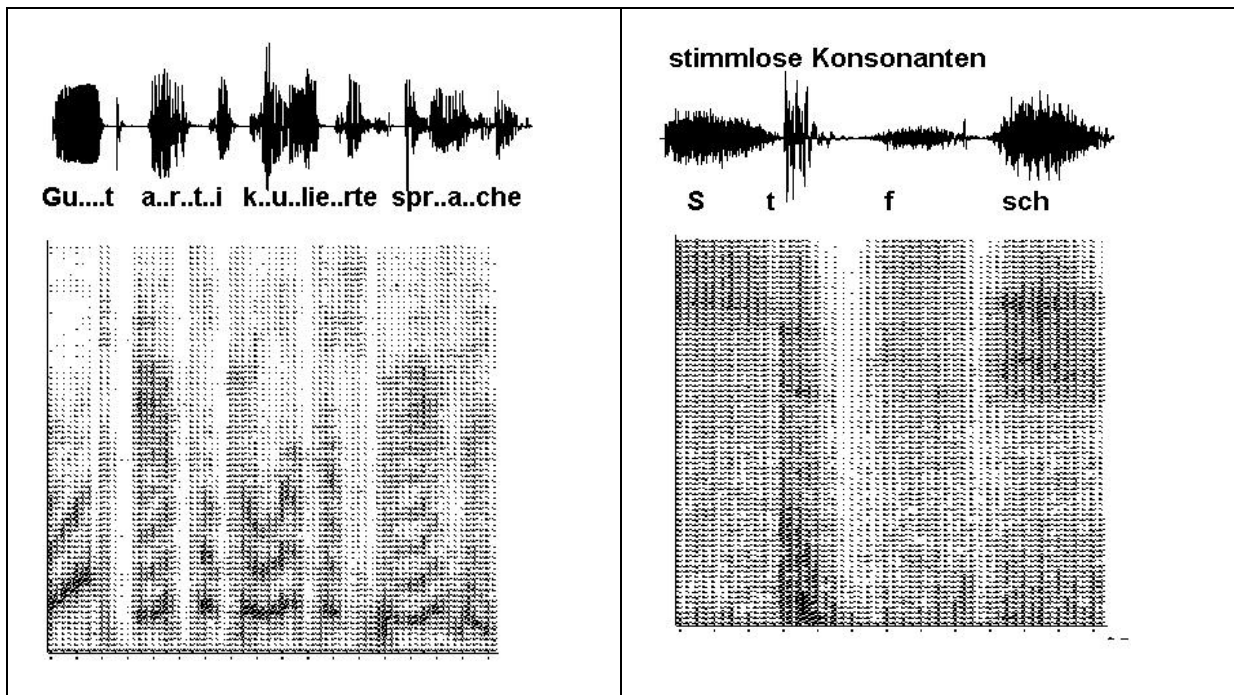


Abb. 9.13 Sprachlaute – Hüllkurve und Spektrogramm

Für die Sprachanalyse und –synthese werden (möglicherweise pro Sprecher) die typischen Spektrogramme gespeichert. Das Ergebnis der Analyse wird als Untersuchungsraaster verwendet, wenn später Sprache erkannt, und als Generator verwendet, wenn Sprache synthetisch produziert werden soll.

„Wir bitten um Ihr Verständnis!“

DB BAHN

vor ICE hat

sieben

und

zwanzig

Minuten Verspätung. Wir bitten...

Abfahrt Departure **DB**

	Ziel	Dauer	Hinweis
Bremer-Steig-Str.	BREMEN-VERDERBACH	5 min	
Bremer-Lagefeld	KARLSRUHE	7 min	
	VERDER	5 min	
Neuhöfen	OLDENBURG	2 min	
Rehde	DELZEN	6 min	
	OSNABRÜCK	9 min	

Die Deutsche Bahn setzt auf ihren Bahnhöfen keine synthetisch generierte Sprache, sondern kleine oder größere Samples von Audiodateien ein.

Kapitel 10: Elektronische Musikinstrumente

In diesem Kapitel verzichte ich auf die explizite Nennung von „Experimenten“. Alle hier erwähnten Instrumente und Klangerzeugungsverfahren werden im Kurs anhand von Ton- oder Videobeispielen demonstriert, sofern sie nicht live vor- oder durchgeführt werden.

Die elektrische/elektronische Übertragung, Speicherung, Verstärkung und Bearbeitung akustischer Information beruht auf der Tatsache, dass es möglich ist, mechanische Schwingungen „isomorph“ (= strukturgleich) in elektrische umzuwandeln und umgekehrt. Es gibt eine Reihe „unechter“ elektronischer Instrumente, bei denen eine mechanische Schwingung erzeugt wird, diese Schwingung aber erst aufgrund elektronischer Bearbeitung musikalisch brauchbar wird. Ein bereits besprochenes Beispiel ist die E-Gitarre und der E-Bass (Abbildung 3.1). Weitere Beispiele sind der 1930 erfundene **Neo-Bechstein-Flügel**, bei dem die Saiten wie beim mechanischen Hammerklavier erregt werden, die Saitenschwingung aber wie bei der E-Gitarre weiter verarbeitet wird. Bei der **Wurlitzerorgel** und beim heutigen Cembalett sind es akustisch kaum hörbare Metallzungen, deren Schwingung elektronisch bearbeitet werden.

10.1. Vorformen des Synthesizers

Es gab in der vordigitalen Zeit verschiedene Möglichkeiten, elektronische Schwingungen zu erzeugen:

- durch (elektrische) Kippschwingungen an Glühlampen,
- durch magnetisches „Abtasten“ rotierender Metallscheiben,
- durch elektrische Schwingkreise („in Eigenschwingung versetzte Radios“),
- durch Schwebungen zwischen hochfrequenten Schwingkreisen.

Teilungsfrequenzen			harmonische Obertöne:
1	1680 Hz	= 20 x 84 Hz	20 (=1680 Hz)
2	840 Hz	= 10 x 84 Hz	10 (= 840 Hz)
3	560 Hz	= 6,7 x 84 Hz	6 (= 504 Hz)
4	420 Hz	= 5 x 84 Hz	5 (=420 Hz)
5	336 Hz	= 4 x 84 Hz	4 (= 336 Hz)
6	280 Hz	= 3,3 x 84 Hz	3 (= 252 Hz)
7	240 Hz	= 2,9 x 84 Hz	
8	usw.		
10	168 Hz	= 2 x 84 Hz	2 (= 168 Hz)
11	usw.		
20	84 Hz	= 1 x 84 Hz	1 (= 84 Hz)

Kippschwingungen wurden 1924 im **Trautonium** verwendet. Die Sägezahnsschwingungen wurden dabei durch Filter verändert und durch „Teilungsschaltungen“ wurden die Frequenzen halbiert. Es entstanden höchst interessante „subharmonische“ Klänge, die nicht-ganzzahligen Obertonspektren glichen (zu hören in Hitchcocks „Die Vögel“, die Oskar Sala 1963 „vertonte“). Die Tabelle zeigt, was passiert, wenn man einen 20. Teilungston als Grundton interpretiert: die Teilungstöne 1 bis 19 erscheinen dann als teilweise sehr harmonische „Obertöne“! 1995 hat Jörg Spix an der Universität Oldenburg die Klangerzeugung des Trautoniums stilgetreu digital simuliert

und das Ende der 80er Jahre wiederentdeckte aber unbezahlbare Instrument in greifbare Nähe von MusikinteressentInnen gerückt.

Bei der **Hammondorgel** (erstmalig 1934/35 gebaut) wird die elektrische Schwingung dadurch erzeugt, dass sich eine rotierende Scheibe mit eingebuchtetem Rand an einem Tonkopf vorbei bewegt und dadurch eine Wechselfspannung in der Spule des Elektromagneten erzeugt. Die Umdrehung des Rades wird von der Frequenz der Wechselfspannung des Stromnetzes „synchronisiert“, die in den USA

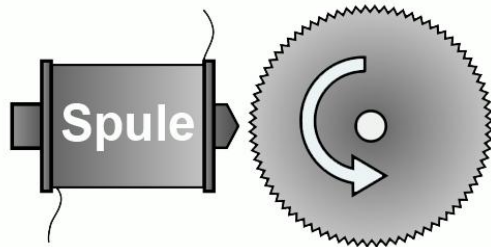


Abb. 10.1 Prinzip der Hammondorgel

60 Hz beträgt. Von einem Ausgangsrad (für den Kamerton 440 Hz) werden durch Übertragungsmechanismen 11 weitere „Frequenzen“ der temperierten Skala erzeugt. Bei einem gezackten Rad (Abbildung 10.1) entsteht eine sinusartige Schwingung, so dass die Hammondorgel sehr „ätherisch“ klingen kann. Eine Weiterentwicklung sind Versuche, das Zahnrad durch ein Rad zu ersetzen, das mit Schwingungsformen wertvoller Musikinstrumente (z.B. Orgeln) versehen ist.

Beim **Melotron** bewegen sich bespielte Tonbandschleifen an Tonköpfen vorbei. Für jede Keyboard-Taste (bzw. Frequenz) wird ein mechanisches Rotationssystem (Scheibe, Tonbandschleife) benötigt, was das gesamte Instrument recht schwer und teuer macht.

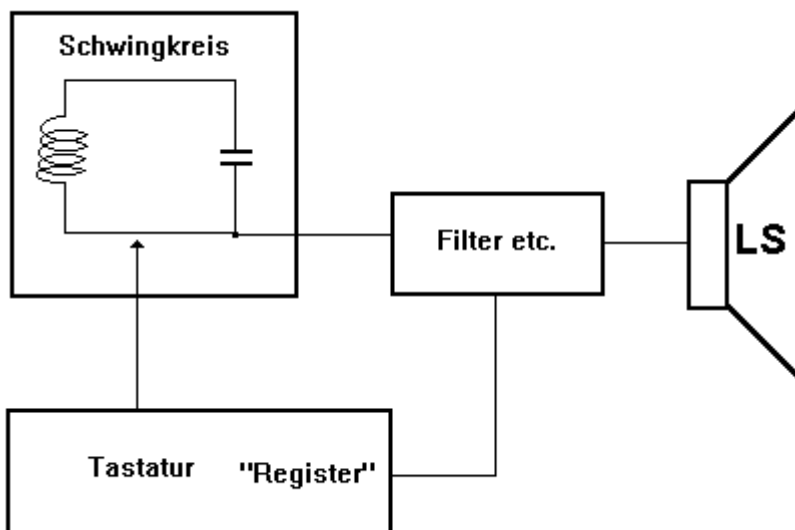


Abb. 10.2 Prinzip des E-Pianos/der E-Orgel

In **E-Pianos** (mit Ausnahme der bereits erwähnten Instrumente mit mechanischer Schwingungserzeugung) und **Elektronenorgeln** wird ein elektrischer Schwingkreis als Schwingungserzeuger verwendet. Ein solcher Schwingkreis erzeugt eine Wechselfspannung, deren Frequenz dadurch verändert werden kann, dass eine der den Schwingkreis bildenden Größen (Kapazität oder Induktion) von einer Tas-

tatur aus verändert wird. Für mehrstimmiges Spiel muss es mehrere Schwingkreise geben, die gleichzeitig mit unterschiedlicher Frequenz schwingen können. Die Schwingungsform kann nachträglich durch elektrische Filter, Modulatoren, Verzerrer und ähnliches gestaltet werden. Solche Instrumente kommen den späteren Synthesizern schon sehr nahe, besitzen aber keine während des Spiels modulierbaren Klänge (Abbildung 10.2).

Noch heute in Gebrauch und neuerdings sogar mit Computer-Anbindung (über MIDI) erhältlich sind Instrumente, deren Tonfrequenz als Schwebung zweier hochfrequenter Schwingungen entsteht: Theremins **Ätherophon** (1921), Magers **Sphärophon** (1921) und die **Ondes Martenot** (1928). Der Mechanismus wurde anlässlich der Schwebungen beschrieben. Das Ondes Martenot wird heute vor allem in Frankreich noch gespielt und gebaut. Im Vorspann von „Raumschiff Enterprise“ ist es jeweils zu hören und Olivier Messiaen hat ihm in der „Turangalila Sinfonie“ die schönste Melodie des Stückes gewidmet. Sowohl Ondes Martenot als auch das beschriebene Trautonium können wie ein Saiteninstrument „kontinuierlich“ gespielt werden. Die für die Tonhöhenunterschiede zuständigen Än-

derungen des Schwingkreises werden dadurch hervorgebracht, dass ein Widerstandsdraht mit dem Finger mehr oder weniger verkürzt wird – die perfekte Nachahmung des Spiels einer Geige. Kein Wunder, dass sich der Bratschist Paul Hindemith (in der Abbildung 10.3 zusammen mit Oskar Sala) für dies Instrument begeistern konnte.

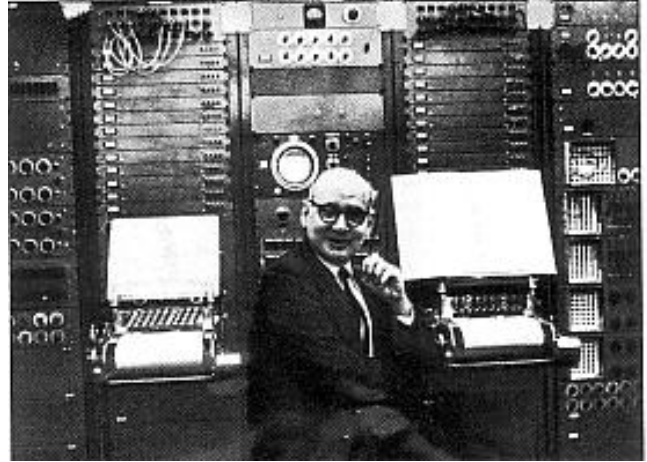


Abb. 10.3 Trautoniumkonzert im Berliner Funkhaus. **Abb. 10.4** Milton Babbitt vor dem RCA-„Synthesizer“

Die erste Phase elektronischer Musikinstrumente wird abgeschlossen durch „Synthesizer“, die noch ohne Spannungssteuerung arbeiten und im wesentlichen tonnenschwere Elektronenorgeln darstellen, die aber von Lochkarten als den Vorläufern von Computern gesteuert werden. Prototyp war der **RCA-Synthesizer** 1956. Durch die „automatische Steuerung“ konnten komplexere Kompositionen realisiert werden, so dass sich auch Avantgarde-Musiker für die Anlage am Columbia-Princeton Electronic Music Center interessierten. (Abbildung 10.4: Rechts und links die Schreibmaschinen zum Stanzen der Lochstreifen).

10.2. Analoge Synthesizer

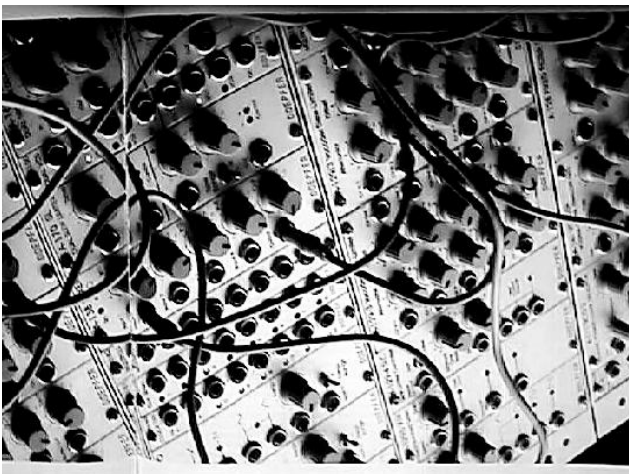
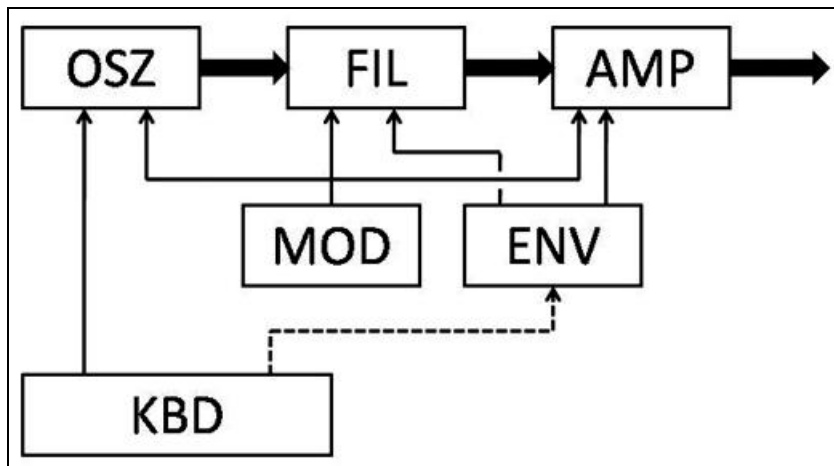


Abb. 10.4 Moderner Nachbau eines modularen Analogsynthesizers (Doepfer)

Synthesizer unterscheiden sich von den früheren elektronischen („elektrischen“) Musikinstrumenten dadurch, dass der Klang während des Spiels verändert („moduliert“) und die Klangfarbe nicht nur durch „Presets“ abgerufen, sondern auch durch Aktivitäten von MusikerInnen „komponiert“ werden kann. Geburtsstunde des Synthesizers ist das Prinzip der „**Spannungssteuerung**“: alle Module (= Bauteile) eines Synthesizers können durch elektrische Spannungen gesteuert werden und erzeugen selbst elektrische Spannungen. Das bis heute gültige Grundschaltbild eines Synthesizers zeigt Abbildung 10.5:



OSZ = Oszillator
 FIL = Filter
 AMP = Verstärker
 MOD = Modulator
 ENV = Hüllkurvengenerator
 KBD = Keyboard

dicke Pfeile = Audiosignale
 normale Pfeile = Steuer-
 spannungen
 gestrichelter Pfeil = Trigge-
 rimpuls

Abb. 10.5. Funktionsschema eines Analogsynthesizers

Die Bauteile

OSZ = Oszillator(en) als Schwingungserzeuger. Sie stellen meist einfache, obertoneiche „Grundschwingungen“ her (Rechteck, Sägezahn, Dreieck, Puls). Der Ausgang ist ein Audiosignal (Spannungsschwankungen im Millivoltbereich).

FIL = Filter unterschiedlichster Art. Sie lassen von der eingehenden Schwingung nur einen Teil der Obertöne durch. Es gibt drei wesentliche Filtertypen: Hochpass, Tiefpass und Bandpass, die je nach Bezeichnung nur hohe, tiefe oder Obertöne eines Frequenzbandes durchlassen.

AMP = Endverstärker, der die Amplitude des aus dem Filter austretenden Audiosignals steuert.

MOD = Modulator ist ein Oszillator, der mit niedrigen Frequenzen im Bereich zwischen 0,5 und 10 Hz schwingt. (Dies sind keine Tonfrequenzen, sondern Frequenzen, die als Tremolo, Vibrato etc. gehört werden können.) Ein von Hand betriebener Modulator ist das Pitchbend-Rad.

ENV = Der Hüllkurvengenerator ist dazu da, den zeitlichen Lautstärkenablauf zu steuern. Da dieses Bauteil in Verbindung mit der Spannungssteuerung das wichtigste innovative Bauteil eines Analogsynthesizers ist, wird es später ausführlich besprochen (Abbildung 10.9).



KBD = Keyboard/Tastatur. Diese Tastatur erzeugt bei Niederdrücken einer Taste eine Steuerspannung, die am OSZ eine Frequenz einstellt.

Die MS-Serie von Korg mit 4 Instrumenten (Synthi, Vocoder, Modulbank, Analog-**Sequencer**) hat das Fach Musik an der Universität Oldenburg im Jahr 1978 angeschafft.

Abb. 10.6 die Module des Analogsynthesizers Korg MS 10 (1978)

periert-chromatische Skala möglich ist. Wird durch ein Zusatzpotentiometer diese Steuerspannung verändert, so kann die Skala gespreizt oder gestaucht werden ... und zwar vollkommen frei und kontinuierlich!

MOD→OSZ Die Frequenz des Oszillators wird „moduliert“. Erzeugt MOD eine Sinusschwingung von 5 Hz, so hört man ein ebenmäßiges Vibrato („Frequenzmodulation“).

MOD→FIL Die „Cut-Off-Frequenz“ des Filters und damit die Klangfarbe des Synthi-Klangs wird moduliert. Dieser Effekt ist ein genuiner Synthi-Effekt, da akustische Musikinstrumente kaum ein „Klangfarbenvibrato“ erzeugen können.

MOD→AMP Die Amplitude wird moduliert, so dass ein Tremolo entsteht (siehe Schwebung!).

ENV→AMP Der Hüllkurvengenerator erzeugt eine elektrische Steuerspannung von der Form einer „Hüllkurve“ (siehe später).

Die vom ENV erzeugte Steuerspannung öffnet und schließt den AMP gemäß der Hüllkurvenform. Der Hüllkurvengenerator sendet, wenn keine Taste gedrückt ist, keine Spannung, der AMP ist dann zu, man hört nichts von der Schwingung des OSZ. Erst wenn eine Taste gedrückt wird, sendet der Hüllkurvengenerator elektrische Steuerspannungen gemäß der Form der Hüllkurve an den AMP mit der Folge, dass dieser sich öffnet und die Schwingung von OSZ und FIL durchlässt.

ENV→FIL Die Hüllkurve kann nicht nur auf den AMP, sondern auch die Cut-Off-Frequenz des Filters einwirken. Dann wird die Klangfarbe „entlang der Hüllkurve“ moduliert. Dies ist **der** genuine Synthi-Effekt, der seit den 60er Jahren kontinuierlich die Elektronikszene – von „Switched On Bach“ über Jean Michel Jarres „Oxygen“ bis zu irgendeiner Live-Rave-Party heute – fasziniert hat. Denn in dieser Flexibilität kann nur ein Analogsynthi solch einen Sound herstellen, kein akustisches Instrument ist in der Lage, derart flexible Klangformung zu betreiben. (Am nächsten kommt dem Analogsynthi eines der ältesten Instrumente der Menschheit, das Didgeridoo der australischen Aborigines!!)

Wie schon erwähnt gibt es neben den Audiosignalen (hochfrequente Spannungen im Millivoltbereich) und den Steuerspannungen (niederfrequente oder einmalige Spannungen von +/- 5 Volt) noch sog. Triggerspannungen oder Triggerimpulse, die den ENV „starten“ (gestrichelter Pfeil in Abbildung 10.5). Einen solchen Triggerimpuls sendet das Keyboard, sobald eine Taste gedrückt wird.

Klangformung am Analogsynthi oder der analoge „Kult-Sound“

An einem Beispiel wird das Entstehen eines Analogsynthi-typischen Klangs erläutert. (1) Bevor eine Keyboardtaste gedrückt wird steht der AMP auf 0, weil er vom ENV keine Steuerspannung erhält, weil dieser vom KBD noch keinen Trigger empfangen hat. Der OSZ schwingt seit Einschalten des Geräts in Ruhelage vor sich hin... ungehört. (2) Sobald eine Taste gedrückt wird, sendet KBD eine Steuerspannung an OSZ, die dort die der Taste entsprechende Frequenz einstellt. Zugleich sendet sie einen Trigger an ENV, so dass dieser anfängt, seine Hüllkurven-Steuerspannung zu senden. (3) Im weiteren Verlauf, solange die Taste des KBD nieder gedrückt ist, öffnet sich AMP gemäß der Hüllkurve von ENV, man hört die von FIL verarbeitete Schwingung des OSZ als Ton. Zugleich jedoch verändert die Hüllkurven-Steuerspannung von ENV auch die Cut-Off-Frequenz des FIL. Dadurch ändert sich die Klangfarbe. (4) Wird die Taste des KBD losgelassen, so lässt die Hüllkurven-Steuerspannung je nach Einstellung der sog. Release-Zeit langsam nach, der AMP schließt sich (der Ton verklingt) und die Cut-Off-Frequenz des FIL wird wieder „zurück gestellt“.

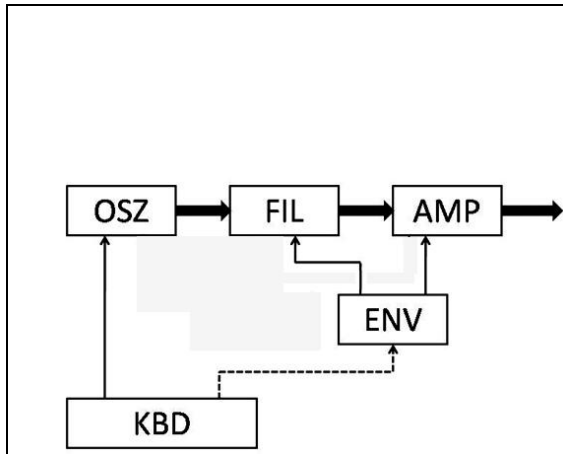


Abb. 10.8 Schema des Synthesizers

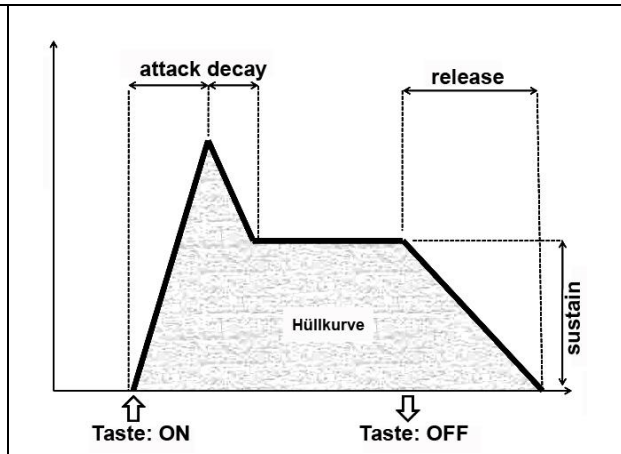


Abb. 10.9 Die Hüllkurvenparameter

Um den musikalischen Effekt dieses im Prinzip einfachen, musikhistorisch jedoch revolutionären Vorganges nachvollziehen zu können, hier eine genauere Erklärung der Parameter einer klassischen Hüllkurve (die heute jeder Computer in seiner Soundcard fest eingepreist hat): Die Hüllkurve steht auf Null, wenn kein Trigger eintrifft. Trifft ein Trigger ein (Pfeil 1), so startet die Hüllkurve mit dem Einschwingvorgang („attack“), dem ein Abfallen („decay“) auf den Dauerzustand mit einem bestimmten Level („sustain“) folgt. Trifft der Trigger „Taste wird losgelassen“ ein (Pfeil 2), dann beginnt die Ausschwingphase („release“) der Hüllkurve. – Die Hüllkurve spiegelt also die Grunderscheinungsformen eines Instrumentalklanges wider.

Was hört man? Beim Drücken der Taste öffnet sich während der attack-Zeit der Filter von tief nach hoch, bei entsprechender Einstellung entlang den Formantbereichen von U→O→A, es entsteht ein „Wah“ und die Klangfarbe geht dann, je nach sustain-Stellung auf eine Vokalfarbe zwischen A und O zurück. Beim Loslassen der Taste klingt der Sound nach, von O→U (oder noch „tiefer“). Jean Michel Jarre lässt grüßen! Mit diesem Vorgang und ein bisschen Humor hat er Millionen gemacht.

Weiterentwicklungen



Abb. 10.10 Einer der ersten mehrstimmigen Analogsynthesizer

Mehrstimmigkeit. Synthesizer, die nach dem Schema von Abbildung 10.5 arbeiten, sind einstimmig. Seit 1978 gibt es mehrstimmige Instrumente, die mehrere einstimmige Synthesizer integrieren, deren Verstärker je nach Anzahl gedrückter Tasten zugleich aktiviert sind. Ein kleiner Rechner muss dafür sorgen, dass neu gedrückte Tasten gegebenenfalls früher geöffnete Verstärker stummschalten. Abbildung 10.10 zeigt den 8-stimmigen Synthesizer aus dem *Oldenburger TechnoMuseum* (siehe Kapitel 11.5) mit dem Namen „Mono/Poly“ von Korg. 1982 kamen dann elegantere Synthesizer auf den Markt, die die internen Komplikationen der analogen Mehrstimmigkeit auf kleinen Platinen verstecken.

Speicherung der Einstellungen. Seit 1982 kann die Gesamtheit aller Einstellungen des Modulsystems digital gespeichert und auf Knopfdruck wieder abgerufen werden. Damit ist es möglich, verschiedene Klangfarben schnell zu reproduzieren. Der „Programm“-Speicherinhalt kann auch extern gespeichert werden. Bei den ersten Geräte geschah

dies dadurch, dass die einschlägigen PCM-Signale (vergleiche Kapitel 4.4) analog-akustisch auf eine Musikkassette übertragen wurden. Die „Programmspeicherung“ setzte voraus, dass die Stellungen sämtlicher Regler eines Modul-Synthesizers in Form von Zahlen vorliegen. Und umgekehrt, dass die Regler durch „Empfang“ von Zahlen „eingestellt“ werden können. Da die Regler spannungsgesteuert waren, war dies nicht schwierig: Zahlen wurden in elektrische Spannungswerte umgesetzt und umgekehrt. Damit war der *erste* Schritt zur Digitalisierung technisch vollzogen. („MIDI“ ist ein 1983 normiertes System solcher Zahlen, die die Einstellungen der Regler und Tasten eines Synthesizers wiedergeben.)

Midifizierte Analogsynthesizer. In den 90er Jahren wurden, nachdem der technische Fortschritt die analogen Synthesizer zunächst vom Markt gefegt hatte, die Analog-Sounds wieder entdeckt. Nun mussten analoge Bauteile so konstruiert werden, dass man sie von Computern aus ansteuern konnte. Dies geschah durch sog. Midifizierung. Computer können MIDI-Daten senden (siehe später) und die analogen Module müssen diese „verstehen“. So muss ein MIDI-Event für die Taste des Tons a' im Oszillator die Frequenz 440 Hz einstellen. Die in München angesiedelte Firma Doepfer hat kontinuierlich analoge Synthesizer-Module gebaut und war daher zuerst auch führend in der Herstellung computer-gesteuerter Analog-Synthesizer. Abbildung 10.11 zeigt ein solches Gerät aus dem *Oldenburger TechnoMuseum*. Die Bauteile OSZ, MOD, FIL, AMP, ENV mit ihren (analogen) Reglern sind gut zu erkennen. Alle diese Regler können nicht nur von Hand, sondern auch vom Computer aus gesteuert werden. Diese Steuerung kann jeder Midi-Sequencer erledigen, es bedarf keines besonderen Programms.



Abb. 10.11 Midifizierter Analogsynthesizer aus der „Analog-Kultzeit“ (1990er Jahre)

10. 3. Digitale Synthesizer

Der nächste Schritt zur Digitalisierung von Synthesizern erfolgt dadurch, dass auch die Schwingungserzeugung und -verarbeitung digitalisiert wird. Der **Oszillator** wird durch einen Mini-Soundsampler ersetzt: die Schwingungsform liegt als Zahlenfolge vor, die von einer „Uhr“ ausgelesen wird. Während ein analoger Oszillator sowohl eine strikte Periodizität einhalten als auch eine konstante Schwingungsform abgeben musste, werden diese beiden Aufgaben nun auf zwei Teile aufgeteilt: die „Uhr“ hat für die konstante Abtastrate („Periodizität“ bzw. Frequenz) zu sorgen, der Speicherinhalt („Zahlenfolge“) stellt die fixe Schwingungsform dar. Es gibt zwei Möglichkeiten, wie das Instrument mit dieser Zahlenfolge umgeht:

- Der „Oszillator“ enthält selbst einen D/A-Wandler und gibt an seinem Ausgang analoge Wechselspannungen ab, die wie im Analogsynthesizer verarbeitet werden (z.B. beim „Juno 106“ des *Oldenburger TechnoMuseums*).
- Der „Oszillator“ gibt seine Zahlenfolge an (digitale) Filter, einen digitalen Verstärker und digitale Effektgeräte ab, an die sich der D/A-Wandler anschließt (z.B. bei der Workstation „Korg M1“ des Instituts für Musik in Oldenburg).

Es wurden im Laufe der 80er Jahre unzählige mehr oder minder erfolgreiche Methoden entwickelt, wie die Zahlenfolgen in den „Oszillator“ hineinkommen: von Hand geschrieben oder gezeichnet, aus akustischen Instrumentalklängen abgeleitet, mittels Algorithmen errechnet usw. Im Extremfall enthielt der „Oszillator“ komplette Instrumentensamples, sodass der Synthesizer faktisch ein mit Filtern und Modulationswerkzeugen versehener Soundsampler (wie in Kapitel 4.5 beschrieben) war. Seit 1997 sind Mischformen derartiger Sampler mit „reinen“ Synthesizern marktbestimmend. Jede GM-Soundcard eines Computers enthält heute faktisch eine solche, mehr oder minder fest eingebaute Struktur.

FM-Synthese als rein-digitale Klangerzeugung

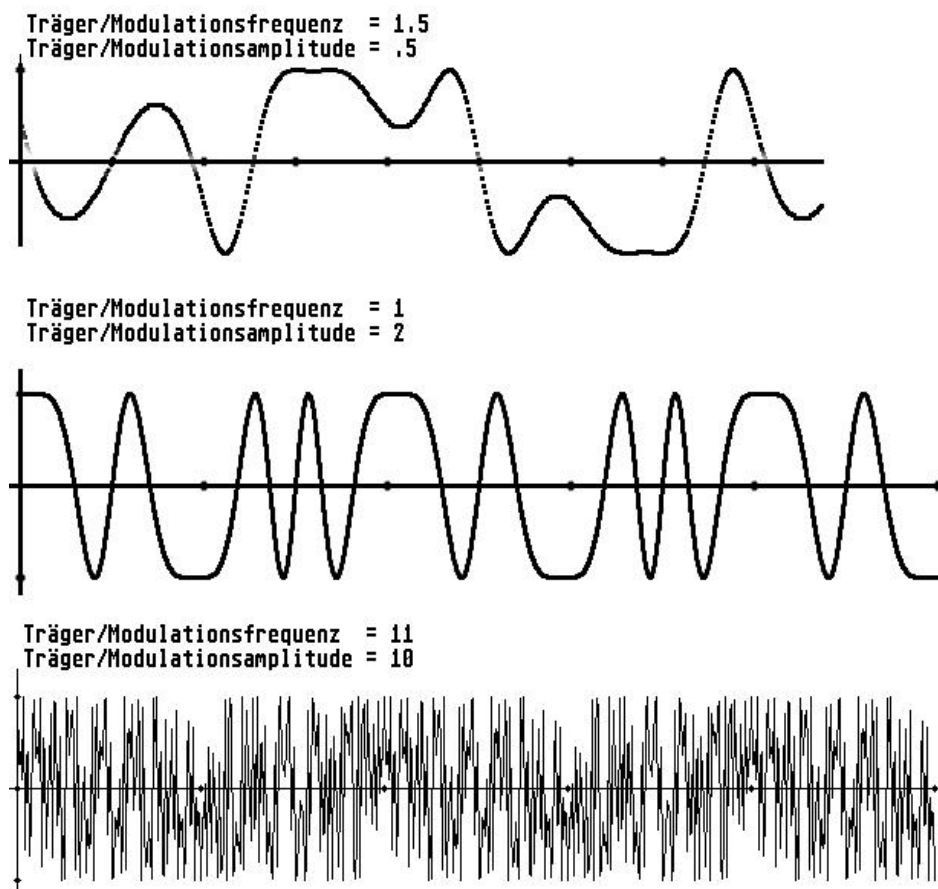


Abb. 10.12 Die FM-Synthese

nur Sinus-Oszillatoren und gar keine Filter. Die Oszillatoren können sich gegenseitig frequenzmodulieren: die Schwingung eines als „Modulator“ bezeichneten Oszillators verändert die Frequenz eines anderen mit „Träger“ bezeichneten Oszillators (**FM-Synthese**). Ist die Modulatorfrequenz sehr klein, zum Beispiel 5 Hz, so erzeugt der Träger ein Vibrato. Ist die Modulatorfrequenz aber hoch, zum Beispiel 1000 Hz, so erzeugt der Träger eine kompliziert aus Seitenbändern aufgebaute Schwingung, die eine äußerst eigentümliche Form und damit Klangfarbe hat. Abbildung 10.12 zeigt einige Beispiele. Derartige Schwingungskurven gab es noch nie – weder bei akustischen noch analog-elektronischen Instrumenten! Das Ohr bekam etwas ganz Neues zu hören und reagierte mit bekannten Assoziationen an Glockenklänge, Rauschen, „harte“ Analogklänge usw.

Eine musikalisch befriedigende FM-Synthese war technisch nur möglich mit digitalen und miteinander koordinierten Oszillatoren. Theoretisch können sich über Steuerspannungen auch die Oszillatoren analoger Synthesizer frequenzmodulieren, das Ergebnis ist jedoch ein chaotisches Knurren, da

Ein gravierendes Problem rein-digitaler Synthesizer ist die Tatsache, dass die digitale Simulation analoger Filter musikalisch nicht überzeugend ist. Deshalb klingen digitale Filter anders - und nach Meinung vieler MusikerInnen „schlechter“ - als analoge. Die eleganteste und radikalste Lösung des „Filter-Problems“ hat die Firma Yamaha 1983 mit dem viele Jahre hindurch weltweit meistverkauften Synthesizer „DX 7“ auf den Markt gebracht. In diesem Synthesizer gibt es

die analogen Oszillatoren nie wirklich synchron arbeiten. Das Aufeinander-Einwirken der Oszillatoren bei der FM-Synthese ist ein rein mathematischer Vorgang, weshalb das Schaltschema eines Klages auch „Algorithmus“ genannt wird. Die FM-Synthese wird daher auch (logisch nicht korrekt) „**digitale Klagesynthese**“ bezeichnet.

Zusammenfassung der FM-Innovationen:

- Einfachste Module führen zu komplexen Klängen (es genügen 2 Sinusoszillatoren ohne Filter).
- Es entstehen Schwingungsformen, die kein anderes Instrument erzeugen kann.
- Es ist möglich, Klänge zu erzeugen, die an Glocken, Gongs etc. erinnern oder geräuschhafte Einschwingvorgänge simulieren (Hammerklavier, Funk-Gitarre usw.).
- Die Klagerzeugung ist für viele Musiker/innen nicht mehr durchschaubar. Es entsteht das trial-and-error-Prinzip beim Sound-Design.

Ein einfacher und preiswerter FM-Sound-Chip ist Bestandteil jeder Soundcard und wird für all jene Klänge eingesetzt, die nach „typisch Computer“ klingen sollen (vor allem bei Computerspielen).

Physical Modeling

Zwischen dem Funktionsschema OSZ→FIL→AMP eines Analog-Synthesizers (Abbildung 10.5) und der Funktionsweise der menschlichen Stimme (Vokallaute) besteht große Übereinstimmung

Stimmbänder → Mund-Rachenraum → Lunge/Zwerchfell – Abstrahlung

Auf ähnliche bzw. erheblich verfeinerte Weise werden beim Physical Modeling Funktionsschemata für andere akustische Instrumente entwickelt. Ein physikalischer Modellierer muss daher zunächst ein Modell der Klangerzeugung eines akustischen Instruments entwickeln, das möglichst alle Feinheit von Klangfarbe, Artikulation und Klangcharakter beinhaltet, um sodann dies Modell in ein Computer-Design zu überführen. 1994 ist am Beispiel der Klarinette, deren Klangerzeugung bis dahin wissenschaftlich recht umstritten war (vgl. Kapitel 7), ein Modell entwickelt worden, das zu erstaunlich guten Klagesimulationen geführt hat (Abbildung 10.13). Als Grundmoduln wird Mundstück, Rohr und Schalltrichter gewählt. Das Mundstück wird als nichtlinearer Oszillator betrachtet, der seine Schwingung ans Rohr abgibt, zugleich aber von rücklaufenden Schwingungen aus dem Rohr beeinflusst wird. Die stehende Welle im Rohr wird durch eine hinlaufende und eine rücklaufende Welle dargestellt. Letztere enthält überwiegend tiefe Frequenzen der Originalschwingung und ist invertiert. Nach Außen dringt ein mit Hochpass leicht gefiltertes Audiosignal.

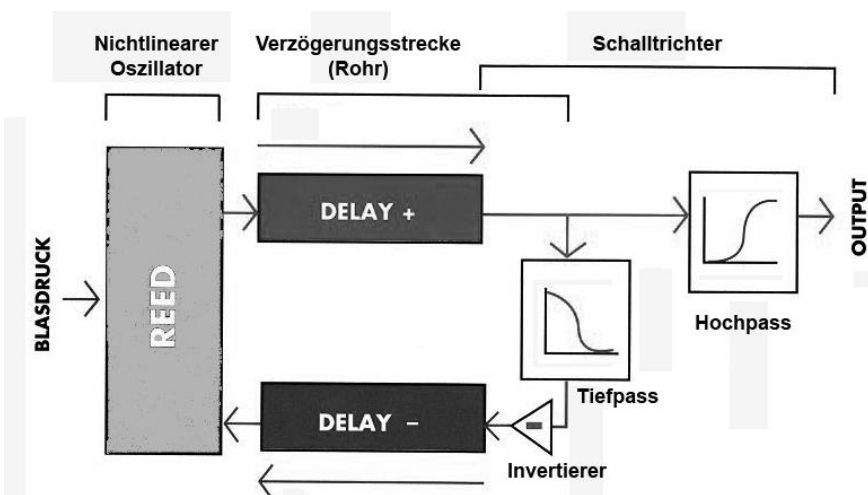


Abb. 10.13 Modell der Klarinette

Alle hier vorkommenden Parameter („Blasdruck“ = Amplitude des nichtlinearen Oszillators, Intensität und Klangfarbe der rücklaufenden Welle, Verzögerung im Rohr hin und zurück, Hochpassfilter

etc.) können beliebig variiert werden. Bei gewissen Einstellungen erhält man einen Klarinettenklang, bei anderen jedoch kann man vollkommen neue Klänge erzeugen.

Granularsynthese und Resynthese

Das Physical Modeling setzt große Rechnerleistungen voraus, um flexibel „spielbar“ zu sein. Eine andere zunächst spielerisch anmutende Art, den Computer neue Klänge aus alten herstellen zu lassen, hat sich aus einer „Miniaturisierung“ des Sampling ergeben. Wählt man aus einem Originalklang, der als Audiodatei (beispielsweise als wav-Datei) vorliegt, kleine Teile („grains“) aus, klebt diese Teile neu zusammen, so erhält man – traditionell gesprochen – eine Collage. Granularsynthese ist eine solche, auf die Spitze getriebene Collage. Die herausgegriffenen Teile sind sehr klein und die Collage ist dadurch enorm fein gestrickt. Sind die Teile unter 5 ms, so wird die Collage als neue Klangfarbe wahrgenommen.

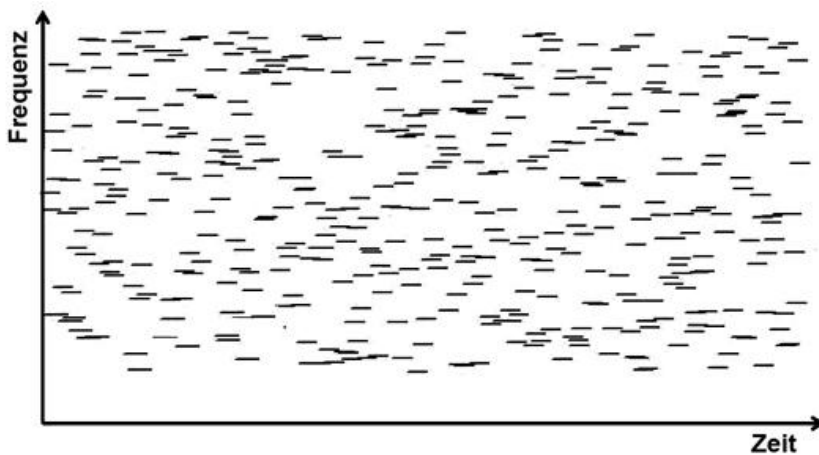


Abb. 10.14 Klangwolke einer Granularsynthese

Die Art der Collage ist vielfältig, sie kann auch mehrdimensional angelegt sein. Curtis Road spricht von „Wolken“. Die Klangergebnisse sind kaum vorhersehbar und bieten damit Klangexperimentatoren einen großen Handlungsspielraum.

Resynthese: Die Klangerzeugung am Analog-Synthesizer wird „Subtraktive Fouriersynthese“ genannt, weil hier einer ober-

tonreichen Oszillatorschwingung durch die Filter Obertöne weggenommen werden. Das Gegenstück ist die „Additive Fouriersynthese“, bei der Obertöne systematisch zusammengesetzt werden. Dies Verfahren ist musikalisch dann einigermaßen befriedigend, wenn man wirklich sehr viele (mindestens 32) Obertöne „addieren“ und die Art der Addition moduliert werden kann. Das Letztere bedeutet, dass es möglich sein muss, im Verlauf eines Klanges – wie dies bei akustischen Instrumenten der Fall ist – die Amplituden der einzelnen Oberschwingungen zu verändern.

Die Resynthese ist das diesbezüglich eleganteste Verfahren, da es sowohl zur Generierung elektronischer Klänge als auch zur „Verbesserung“ vorgegebener Klänge eingesetzt werden kann. Wie der Name sagt wird in einem ersten Schritt ein beliebiger digital gespeicherter Instrumentalklang in sehr kleinen Zeiteinheiten (siehe oben „grains“) nach Fourier analysiert. Was nicht „obertonrein“ ist, bleibt unberücksichtigt. Im 2. Schritt kann die Amplitude jeder einzelnen Oberschwingung verändert werden – und das in kleinsten Zeitfenstern. Im 3. Schritt werden die modifizierten Fenster wieder zusammengesetzt. Evident kann man mit diesem Verfahren eine Stimme (mit wenig Tiefen) oder eine Geige (mit wenig „Stradivari-Formanten“) aufmöbeln. Man kann aber auch synthetische Klänge mit vagen Erinnerungen an den Originalklang erzeugen.

Zusammenfassung: Wann ist ein Synthesizer digital?

- Schwache Form: analoge Bauteile werden durch digitale ersetzt. Im Falle der Oszillatoren sind hier mehr Flexibilität und Kontrollierbarkeit die Folge, im Falle der Filter ein Qualitätsverlust.
- Mittelstarke Form der Digitalisierung: die digital simulierte ehemals analogen Bauteile sind von Computern aus steuerbar („Midifizierung“) und die Klangparameter können wie Computerdaten behandelt werden.
- Starke Form der Digitalisierung: die Klangerzeugung ist nicht-analog, nicht-simuliert sondern vollkommen eigenständig und nur auf digitalem Weg (Stichwort „algorithmisches Sound-Design“) möglich. FM-Synthese und Physical Modeling waren hierfür zwei herausragende Beispiele.

Doch wie's da drin aussieht...

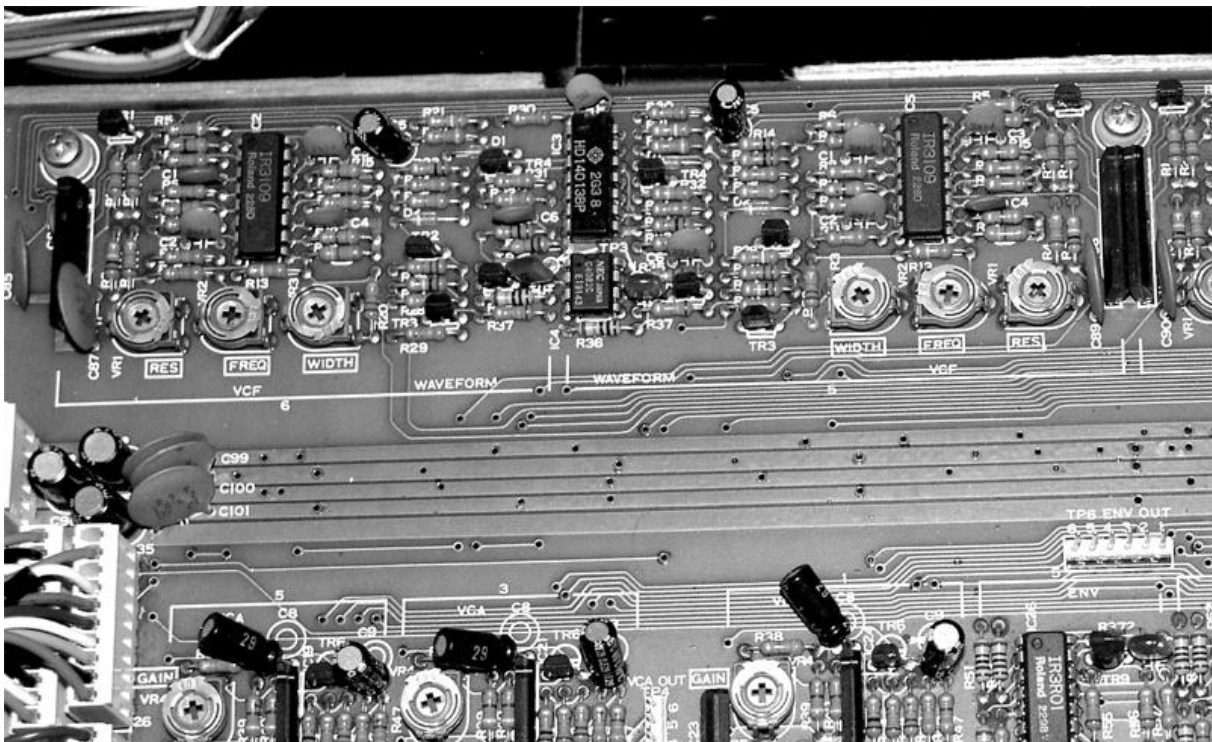


Abb. 10.14 Wie viele Stimmen hat dieser „Juno 60“ von Roland? Und aus welcher Operette ist das Zitat der Überschrift und wie geht der Satz weiter – und: stimmt er?

Kapitel 11: Der Computer als Musikinstrument

11.1. MIDI und die Synthesizer-Computerverbindung

Vorbemerkung

Die bislang besprochene Digitalisierung von elektronischen Musikinstrumenten spielt sich auf der datenintensiven Ebene des Soundsampling bzw. der digitalen Darstellung analoger akustischer Schwingungen ab (Kapitel 4). Viele Mega-Byte an Zahlen müssen verwaltet und hin- und hergeschoben werden, damit solcherlei Sounds entstehen. Dabei ist das Niederdrücken und Loslassen einer Keyboardtaste eigentlich ein sehr einfacher Vorgang, den die traditionelle Klavier-Notenschrift mit ca. 4 Angaben (Tonhöhe, -dauer, -stärke und Agogik) bewältigt hat. Physikalisch genauer lässt sich der Vorgang mit folgenden vier Zahlen ausdrücken:

- Zeitpunkt des Drückens einer Taste,
- „Nummer“ der gedrückten Taste („Tonhöhe“),
- Schnelligkeit, mit der die Taste sich aufgrund der spezifischen Art des Drückens nach unten bewegt („Lautstärke“),
- Zeitdauer zwischen Drücken und Loslassen der Taste („Dauer“).

Wenn ein in CD-Qualität über 10 sec klingender Klavierton ein paar Millionen Daten benötigt, benötigt die Beschreibung der Aktion, die diesen Ton auf einem bestimmten Instrument erzeugt, nur 4 Daten. Der einzige Nachteil dieser erheblich vereinfachten Aktions-Datendarstellung ist der, dass der Ton je nach verwendetem Klavier unterschiedlich klingt. Dieser Nachteil lässt sich auch als Vorteil beschreiben: die **Aktions-Datendarstellung** ist von einem Instrument auf ein anderes übertragbar, lässt der Instrumentierung Spielräume offen. Und genau in diesem Punkt trifft sie auf den Kern der elektronischen Musik(instrumente): die aktive musikalische Gestaltung des Klanges durch die MusikerInnen.

MIDI („musical instrument digital interface“) ist eine derartige Aktions-Datendarstellung der Musik digitalisierter elektronischer Musikinstrumente. Sie wurde 1983 von einigen marktbeherrschenden Firmen ausgehandelt. MIDI war nicht nur informationstheoretisch eine gute Idee, weil komplizierte musikalische Vorgänge einfach und flexibel zugleich beschrieben und übertragen werden konnten. Sie war auch die in der Geschichte der elektronischen Musik menschenfreundlichste Aktion der internationalen Industriekonzerne, die in diesem einen Punkt anerkannt haben, dass MusikerInnen in der Praxis elektronische Instrumente unterschiedlicher Hersteller miteinander verbinden möchten und Konkurrenz und Wettbewerb selten „beim Verbraucher ankommen“. Die Normierung durch MIDI hat es erstmals möglich gemacht, dass ein Synthesizer der Firma A einen Soundmodul der Firma B oder einen Soundsampler der Firma C ansteuert.

„MIDI was established as a hardware and software specification which would make it possible to exchange information between different musical instruments or other devices such as sequencers, computers, lightening controllers, mixers etc. This ability to transmit and receive data was originally conceived for live performances, although subsequent developments have had enormous impact in recording studios, audio and video production, and composition environments“ (Vorwort der MIDI-Specification Version 4.1.1 vom Februar 1990.)

Die musikalische Informationsübertragung durch MIDI

MIDI überträgt, wie gesagt, nicht elektronische Klänge, sondern Informationen über Aktionen an elektronischen digitalen Instrumenten. Es gibt daher zwei Typen von MIDI-Informationen:

- Daten für Aktionen, die bei *allen* Synthesizern (bzw. elektronischen Instrumenten) in gleicher Weise anfallen, und
- Daten für Parameter, die aufgrund des speziellen Baus eines Instruments nur bei diesem speziellen Instrument anfallen („**systemexclusive Daten**“).

Zum letztgenannten Datentyp gehören alle Angaben über die spezifischen Klänge, die Filtereinstellungen, die Wellen- und Hüllkurvenformen usw. Solch ein Klang wird in jedem Synthesizer als „Programm“ und unter einer „program change“ genannten Nummer abgespeichert. Man kann ihn am Instrument durch Tastendruck und Nummernwahl abrufen. Bei *allen* Synthesizern regelt nun MIDI, wie solche „program change“-Nummern abgerufen werden können, unabhängig davon, welcher konkrete („exclusive“) Klang auf diesem Speicherplatz sitzt. Der auf Nr. 3 gespeicherte Klang des Synthesizers A kann durch Betätigen der „program change“-Taste Nr. 3 von Synthesizer B abgerufen werden. Dasselbe gilt für alle anderen gemeinsamen Aktionen: Drücken und Loslassen von Keyboardtasten, Drehen am Pitchbend-Rad usw.

Da die meisten Synthesizer und Soundmodule mehrere Klänge gleichzeitig zur Verfügung stellen, können die Daten für „Taste drücken“, „program change auslösen“, „Pitchbend-Rad drehen“ usw. über 16 unterschiedliche MIDI-Kanäle gesendet und empfangen werden. Das Kanal-Prinzip funktioniert genauso wie beim Rundfunk: über eine einzige Leitung können gleichzeitig mehrere Sender senden und Empfänger empfangen. Hat ein „multitimbraler“ Synthesizer die Möglichkeit acht Sounds gleichzeitig abzuspielen und hat er auf „program change“ Nr. 2 Bass, auf Nr. 3 Saxophon und auf Nr. 10 Drumset gespeichert, so ist möglich, dass drei KeyboarderInnen gleichzeitig diesen Synthesizer „spielen“:

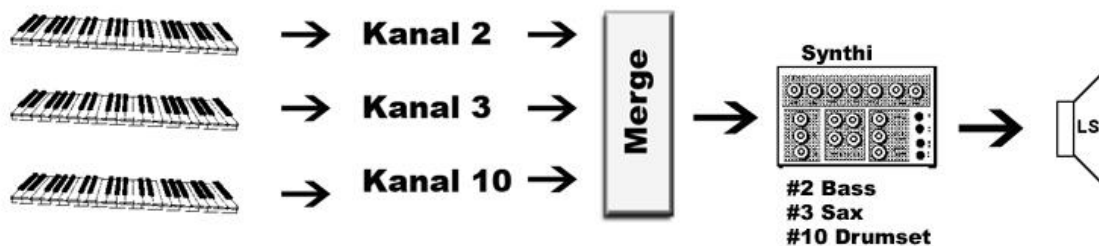


Abb. 11.1 Klassische MIDI-Konstellation

Bei der „klassischen“ MIDI-Konstellation spielen mehrere KeyboarderInnen auf einem einzigen „multitimbralen“ Synthesizer (oder Soundmodul) gleichzeitig. „Merge“ mixt die MIDI-Daten der drei Keyboards so, dass keine Verwechslungen vorkommen.

Über ein **MIDI-Interface** können die zunächst nur elektronischen Musikinstrumenten „verständlichen“ MIDI-Daten an das Input-Output-System von Computern angepasst werden. Einige Soundcards enthalten eine MIDI-Schnittstelle, was sich daran äußert, dass sich an dieser Karte zwei charakteristische 5-poligen MIDI-Buchsen befinden. Weitere Möglichkeiten, ein MIDI-System (Synthesizer, Soundmodul, Effektgerät) mit einem Computer zu verbinden, sind MIDI-Keyboards, MIDI-Controller, MIDI-Mischpulte, mit MIDI versehene Audio-Interfaces usw. Alle diese Geräte haben einen MIDI-Ein- und Ausgang und sind (über i-Link/fire wire, USB 2 oder SCSI) mit einem Computer verbunden.

Speicherung und Verarbeitung von MIDI-Daten

Unter einem „**Midifile**“ versteht man die Gesamtmenge von MIDI-Daten, die – in der korrekten Zeitabfolge – von einem midifizierten Instrument beim Spielen eines Musikstücks gesendet und im Computer gespeichert worden sind. Ein Midifile ist ein in die digitale Computersprache übersetztes Notenblatt. Daher kann ein Notationsprogramm (Finale, Score Perfect, Forte usw.) Midifiles „lesen“ und in sichtbare Noten umsetzen. Wenn ein Computer ein Notenblatt eines solchen Notationsprogrammes abspielt, so setzt er intern die Notation in ein Midifile um, das dann die Soundcard wiedergibt.

Hier eine Gegenüberstellung der Syntax von MIDI und der abendländischen Notenschrift:

MIDI überträgt	Äquivalent
die Kanalnummer (channel #)	die Stimme einer Partitur
die Tastennummer („Note ON“-Nr.)	die Tonstufe
die Tastengeschwindigkeit („velocity“)	die Dynamik(zeichen): fff , mf , p usw.
die Stellung des Pitchbend-Rades („bend“)	Zusatzzeichen zur Angabe von glissando u.a.
die Nummer eines Programms auf einem der Kanäle („program change“)	das Instrument, das eine bestimmte Stimme der Partitur spielen soll
den Zeitpunkt, an dem eine Taste gedrückt wird, gemessen seit Start der MIDI-Aufnahme	Position der Noten (im Taktgefüge)
die Zeitspanne zwischen „Note ON“ und „Note OFF“	Tondauer
viele andere Synthespezifische Daten	Artikulations- u.ä. Zeichen

Jedes MIDI-Ereignis hat eine „Hausnummer“, eine Zahl, die es kennzeichnet, und einen Wert, der zwischen 0 und 127 liegt. Ein MIDI-Recordingprogramm eines Computers muss diese Zahlen einfach nur zusammen mit einer Zeitangabe abspeichern. Beim Abspielen werden dann die Zahlen in der richtigen Zeitabfolge ausgelesen, ans MIDI-Instrument gesendet, das darauf hin spielt.

MIDI-Recordingsysteme („Sequencer“) sind Computerprogramme, die die am MIDI-Interface eintreffenden MIDI-Daten *speichern* („aufnehmen“, „record“), am Bildschirm in musikalisch verständlicher Form (Partitur, Notenschrift, Grafik, Symbolsystem) oder explizit als Zahlenfolgen (bei „Cubase“ im List-Editor) *darstellen* und auf Wunsch so wieder an das Interface *senden* („abspielen“, „play“), wie sie eingetroffen sind. Die MIDI-Daten können auch am Bildschirm manipuliert („editiert“) werden. Zudem können neue MIDI-Daten erzeugt werden. All dies geschieht in einer benutzerfreundlichen, fast-intuitiven Weise am Bildschirm, wo man vom MIDI-Datengerangel im Hintergrund nicht viel merkt. „Cubase“ hat eine partiturähnliche Bildschirmgestaltung eingeführt, die sich in den 90er Jahren in allen größeren Programmen durchgesetzt hatte. Jeder „Stimme“ (die meist auf einem eigenen MIDI-Kanal gesendet wird) entsprechen ein oder mehrere „Balken“ in einer Zeile, die für die in einer „Stimme“ enthaltenen MIDI-Daten steht.

Abbildung 11.2 zeigt den vollständigen Hit „Somewhere Over the Rainbow“ von Marusha (1994). Dies „**Technobrett**“ besteht aus 13 Zeilen (Stimmen) und wird insgesamt 27,5 Mal wiederholt, wobei bei jeder Wiederholung einige Zeilen (Stimmen) „stummgeschaltet“ werden. Die Sounds kommen wie bei MIDI üblich von der Soundcard des Computers oder aus einem „multitimbralen“ Soundmodul/Synthesizer. Links stehen neben den Bezeichnungen der Stimmen die Nummern der MIDI-Kanäle. Im unteren Teil des Bildes erkennt man „virtuelle“ Bedienelemente eines Tonbandgerätes: schneller Rück- und Vorlauf, Stop, Start und Record (roter Kreis). Wenn dies Programm bzw. das Technobrett wiederholt abläuft, dann ersetzt es die Keyboarder aus Abbildung 11.1. Jedem der hier

verwendeten 10 MIDI-Kanälen entspricht ein Keyboarder dieser Abbildung. Allerdings ist dies „Technobrett“ nie vom Keyboard aus eingespielt, sondern am Bildschirm millisekundengenau „gezeichnet“ worden!

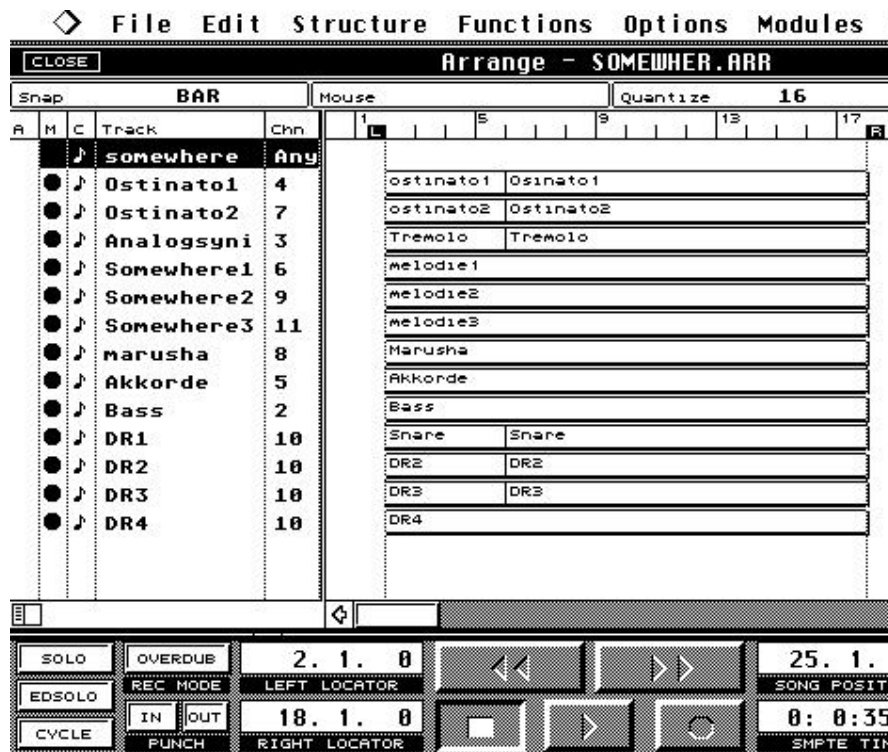


Abb. 11.2 Partitur eines Sequencer-Programmes (Cubase für Atari 1990), als Midifile unter www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download zu haben!

Der Anwendungsbereich hat sich aber von Synthesizern auf viele weitere Gebiete ausgeweitet, die alle von MIDI-Recordingsystemen verwaltet werden können:

- das Tempo von Drumcomputern, Sequencern,
- die Reglerbewegungen eines Mischpultes,
- Microtunings von Synthesizern,
- die komplette Lichtregie von (midifizierten) Lichtanlagen,
- die Koordination mit Tonband oder Videorecordern via Synchronisationsspuren,
- die Programme und Parameter von midifizierten Effektgeräten,
- die analogen Einstellungen midifizierter Analog-Modulsynthesizer,
- gegebenenfalls die Stimmung eines elektronische Instruments usw.

Im Juli 1988 ist „**General MIDI**“ (GM) ausgehandelt worden. Hierunter wird eine ganz bestimmte Konfiguration elektronischer Klangerzeuger verstanden, zum Beispiel das Vorhandensein von 16 MIDI-Kanälen, die Konvention, dass Drum-Sounds auf Kanal 10 gesendet werden, dass die „program change“-Nummern 1-8 für Piano-Sounds zu verwenden sind usw. General MIDI hat zur Folge, dass ein Midifile so normiert werden kann, dass es auf jedem GM-System (vor allem einer handelsüblichen GM-Soundcard) mit annähernd demselben musikalischen Ergebnis abgespielt werden kann. Man kann ein Midifile aber auch „missbrauchen“, indem man die Stimmen vertauscht, die Sounds vermischt usw.

Unter der Bezeichnung „**Workstation**“ befinden sich heute Synthesizer auf dem Markt, die neben einem meist 16-fach multitimbralen Soundmodul mit Effektgeräten und einem Keyboard ein integriertes MIDI-Recordingsystem enthalten. Mit solch einer Workstation kann ohne Hinzuziehung eines Computers ein 16-stimmiges Musikstück komponiert und abgespielt werden.

Die MIDI-Schnittstelle arbeitet mit einer „**Übertragungsrate**“ von 31 250 MIDI-Bytes („Zahlenpaketen“) pro Sekunde. Diese für heutige Computerverhältnisse sehr kleine Rate genügt in der Regel, da für ein musikalisches Ereignis nur 1 oder 2 Bytes übertragen werden müssen. Es gibt einige Aktionen auf Synthesizern, bei denen dennoch viele Daten in kurzer Zeit anfallen. Wenn zum Beispiel ein glissando (= Bewegung des Pitchbend-Rades) gespielt wird, wo ein Halbton in 64 digitale Zwischenschritte unterteilt wird, muss jeder Zwischenschritt einzeln gesendet werden. Kann ein elektronisches Instrument die MIDI-Daten nicht so schnell verarbeiten, wie sie eintreffen, so werden sie in einem Puffer („Buffer“) zwischengespeichert. Bei MusikerInnen gefürchtet ist die Anzeige „Buffer full“, die signalisiert, dass auch dieser Zwischenspeicher voll ist und nun in allernächster Zeit die MIDI-Kommunikation zusammenbricht. Ebenso gefürchtet ist ein nicht seltener Fall, dass ein MIDI-Datenstau zu zeitlichen Ungenauigkeiten der Wiedergabe führt. Programmiertricks (minimal „vorgezogene“ Note-ON-Befehle) helfen meist weiter.



Abb. 11.3 Die Vorläufer von „Cubase“ mit einem Commodore SX 64

besitzen: für ein MIDI-Recordingsystem ist jeder noch so alte Computer gut genug, denn Datenstaus oder Systemzusammenbrüche werden kaum von der Rechengeschwindigkeit sondern eher von den MIDI-Instrumenten verursacht.

„Cubase“ hatte einige Vorläufer für den Commodore 64 (hier im Bild der konzerterprobte SX 64): JMS „Midi Step Composer“, C LAB „Supertrack“ und Steinbergs „Pro-16“, den es (wie im Bild) auch als Hardware-PlugIn mit 32 MIDI-Spuren gab. Es folgten „Cubase 3.1“ für den Atari ST (blaue Diskette, 347 KB) und „Score 1.0“ (graue Diskette) als erstes hybrides Programm für Windows.

Andererseits ist die relativ geringe Übertragungsrate von MIDI ein Trost für alle, die „langsame“ Computer besitzen. Es gibt einige Aktionen auf Synthesizern, bei denen dennoch viele Daten in kurzer Zeit anfallen. Wenn zum Beispiel ein glissando (= Bewegung des Pitchbend-Rades) gespielt wird, wo ein Halbton in 64 digitale Zwischenschritte unterteilt wird, muss jeder Zwischenschritt einzeln gesendet werden. Kann ein elektronisches Instrument die MIDI-Daten nicht so schnell verarbeiten, wie sie eintreffen, so werden sie in einem Puffer („Buffer“) zwischengespeichert. Bei MusikerInnen gefürchtet ist die Anzeige „Buffer full“, die signalisiert, dass auch dieser Zwischenspeicher voll ist und nun in allernächster Zeit die MIDI-Kommunikation zusammenbricht. Ebenso gefürchtet ist ein nicht seltener Fall, dass ein MIDI-Datenstau zu zeitlichen Ungenauigkeiten der Wiedergabe führt. Programmiertricks (minimal „vorgezogene“ Note-ON-Befehle) helfen meist weiter.

Andererseits ist die relativ geringe Übertragungsrate von MIDI ein Trost für alle, die „langsame“ Computer

11.2. Zusammenspiel MIDI- und Audio-Daten

Hybride MIDI-Audiorecordingprogramme

Das Musikmachen mit MIDI-Recordingsystemen (Sequencern) ist seit Zeiten des Commodore 64, für den die ersten Cubase- und Logic-**Sequencer** geschrieben wurden, kein Problem. Midifiles sind extrem klein und waren daher auch die ersten „Klingeltöne“ auf Handys. Ist einmal ein kleiner Soundchip vorhanden (hardware), dann benötigt die Musik nur ein paar wenige Bytes in Gestalt eines Midifiles (software), um zum Leben erweckt zu werden.

Seit 1992/93 sind die MIDI-Recordingsysteme, wie sie in Kapitel 11.1 beschrieben wurden, mit Harddiskrecordingprogrammen, wie sie in Kapitel 4.4 beschrieben worden sind, verknüpft worden. (Steinbergs Cubase Score 1.0 für MS-DOS-kompatiblen Computer ab 386 SX mit 16 MHz Taktrate und 4 MB RAM für Windows 3.1.) Die Programmoberfläche sieht nach wie vor aus wie auf Abbildung 11.2. Nur hinter den „Stimmen“ der „Partitur“ kann sich zweierlei verbergen: entweder ein Midifile oder aber eine Audiodatei (wav- oder au-Datei). Beim Abspielen eines solchen „hybriden“ Pakets von Dateien – bei der Firma Steinberg spricht man auch von „song“ oder gar „project“ – wird der Gesamtklang durch die Mischung der originalen Audiodateien mit den Klängen, die die MIDI-Dateien der Soundcard entlocken, bestimmt.

Das Zusammenspiel von MIDI und Audio ist nicht problemlos und führt heute oft dazu, dass Studio-musiker ganz auf MIDI verzichten und gleich von vornherein nur noch mit Audiodateien arbeiten. Der in Kapitel 4 gerühmte „Music Maker“ von MAGIX ist ein solches reines Audio-Programm, auch wenn sich seine Oberfläche von einem MIDI-**Sequencer** nicht unterscheidet. Damit aber beispielsweise beim „Techno Music Maker“ das Timing wirklich stimmt, müssen genau vorgefertigte Samples an genau fixierten Positionen aneinander gefügt werden: dies ist MIDI-Denken und –Komponieren in Gestalt von Audio (Abbildung 11.4).

Profis jedoch lieben das Ineinander von Audio und MIDI weil man insgesamt das musikalische Ergebnis tiefer gehend gestalten kann:

- (1) die MIDI-Stimmen eines hybriden „songs“ (mit Midifiles und Audiodateien) können auf musikalisch wertvolle Synthesizer oder andere Klangerzeuger geleitet und dabei in Realtime oder live im Konzert extrem manipuliert werden. „Gute“ DJ's beherrschen diese Kunst der Live-Klangformung.
- (2) die MIDI-Daten der MIDI-Stimmen können innerhalb des Computers gespeicherte Samples „triggern“ oder aber externe Sounds – zum Beispiel eines Drumcomputers – steuern.
- (3) die MIDI-Daten können parallel zur Audio-Musik noch Raumbewegungen, das Licht, den Ablauf von Videos oder DVD-Playern steuern (synchronisieren).
- (4) die MIDI-Daten können via Notenschrift „komponiert“ und müssen nicht von fehlerhaft spielenden MusikerInnen eingespielt werden, sie können Passagen enthalten, die unspielbar sind.
- (5) die MIDI-Daten können parallel zur Musik externe (qualitativ hochwertige) Effektgeräte steuern.
- (6) mittels MIDI können „virtuelle Synthesizer“ oder „Soundsampler“ gespielt werden (siehe unten).
- (7) MIDI erlaubt auch eine Reihe spezifischer MIDI-Effekte (spezielle MIDI-Echos, -Delays usw.).

Diese Liste der Vorteile von MIDI zeigt, dass MIDI ein brauchbares „Ambiente“ für herkömmliches Harddiskrecording bereit stellt. Auch wenn sich heute Vieles scheinbar von selbst durch „automatisierte PlugIns“ erledigen lässt, so ist nicht zu verkennen, dass die Automatisierung derartiger Teilprogramme intern den Weg über MIDI nimmt und, sobald hochwertige Klangerzeuger verwendet werden sollen, extern via MIDI kommuniziert werden muss..

Der Wehrmutstropfen des Zusammenspiels von MIDI und Audio ist die sehr schwierige zeitliche Syn-

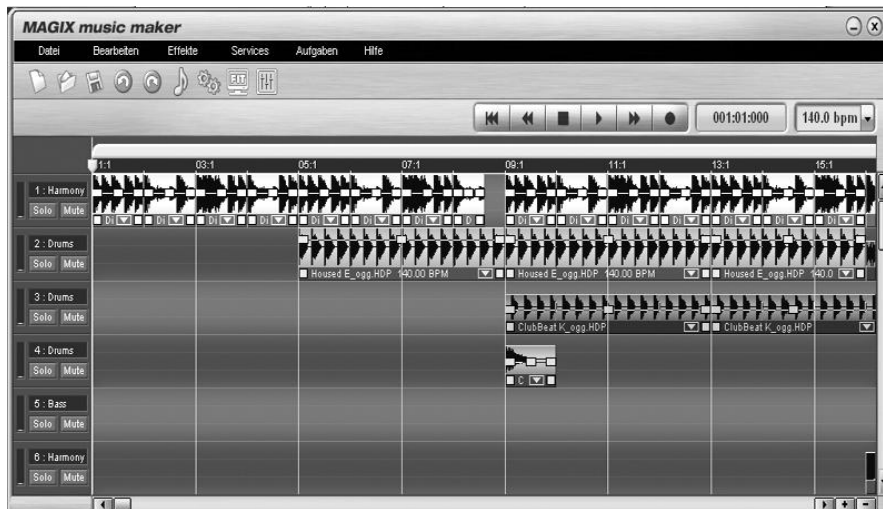


Abb. 11.4 Die Oberfläche des Audiorecordingprogramms „Music Maker“

chronisation der beiden Welten. MIDI läuft nach einer „Uhr“ des Programms ab, die meist in MM-Werten (Schläge pro Minute) eingestellt werden kann. Das Abspieltempo von Midifiles liegt nicht fest und ist von der Einstellung des „Metronoms“ abhängig. Bei Audiodaten ist das Tempo durch die Audioaufnahme genau festgelegt. Da eine Beschleunigung oder Verlangsamung

von Audiodateien Qualitätsverluste und eine Klangfarbenänderung bewirkt, muss grundsätzlich das flexible MIDI-Tempo dem starren Audio-Tempo angepasst werden. Es gibt hierbei vier Möglichkeiten:

- (1) Es wird eine MIDI-Stimme als Zeitgeber vor Beginn der Audioaufnahmen festgelegt. Es kann auch ein Metronom-Click genügen. Die Audio-Dateien sind also von vornherein synchron zu MIDI.
- (2) Wird mit einem im Tempo sehr konstanten Fremd-Material gearbeitet – Stichwort: Sampling! –, so kann man vom Computer das Metrum dieses Materials bestimmen lassen und den MIDI-Metronom entsprechend einstellen. Dies gelingt allerdings selten befriedigend.
- (3) Ersatzweise zu (2) kann das Fremdmaterial in kürzere Stücke aufgeteilt werden, deren Beginn jeweils an einer im MIDI-Tempo markanten Stelle liegt. Beispiel hierfür wäre der bereits zitierte „Techno Music-Maker“, bei dem die Samples (Audiodateien) meist genau einen Takt lang sind und sich die Musik aus lauter Eintakt-Phrasen zusammensetzt (vgl. Abbildung 11.2 mit 11.4!).
- (4) Man kann von Hand das Tempo der MIDI-Stimmen an den Audioablauf anpassen. Dabei wird die Audiospur abgespielt und das MIDI-Tempo nach Gehör „nachgeregelt“ und die Temposchwankungen (ebenfalls als MIDI-Datei) aufgezeichnet.

VST-Geräte und Plugins

Es ist ein nur von der Rechenfähigkeit des Computers abhängiger Schritt, wenn die MIDI-Daten eines Sequencers nicht nur einfache GM-Sounds der Soundcard „abspielen“ oder ihre MIDI-Daten nach außen an angeschlossene Geräte schicken, sondern auch Software-Klangerzeuger „abspielen“. Ein Software-Klangerzeuger ist mit Bezug auf den Sequencer ein „Plugin“: das Programm läuft nicht allein, sondern nur in Verbindung mit dem Sequencer, auf den es genau abgestimmt sein muss. Die heute systemübergreifende Normierung dieses Zusammenspiels nennt man VST (virtual studio technology). „Audio Unit“ für Macintosh und „DirectX“ von Windows leisten teilweise dasselbe wie VST.

Die wichtigsten und gängigsten VST-Plugins, die von MIDI angesteuert werden, sind:

- (1) „*Virtuelle Synthesizer*“. Ein solcher Synthesizer ist ein Programm mit den aus Abbildung 10.5 bekannten Modulen. Alle diese Module können „von Hand“ (mit der Maus) oder aber über spezifische MIDI-Controller-Daten gesteuert werden. Viele virtuelle Synthesizer laufen sowohl als Plugin in einem Sequencer – wobei dann die MIDI-Stimmen den Synthesizer „spielen“ – und auch als „Stand-alone“-Software. Im letztgenannten Fall werden sie von einem externen Keyboard ge-

spielt, das über die MIDI-Schnittstelle an den Computer angeschlossen ist. Viele virtuelle Synthesizer können auch GM-Midifiles direkt – ohne Sequencer – abspielen. Ein von einem ehemaligen Oldenburger Musikstudenten programmierter virtueller Synthesizer befindet sich auf <http://home.arcor.de/mfiedler/software.html>. Ein virtueller Synthesizer ist in der Regel einstimmig. Wer mehrere Stimmen haben will, lädt sich mehrere PlugIns auf einmal. Die Klangerzeugung eines virtuellen Synthesizers übernimmt letztendlich der D/A-Wandler der Soundcard.

- (2) „*Virtuelle Soundsampler*“. Es handelt sich hier um einen kompletten Soundsampler wie in Kapitel 4.4 beschrieben auf Software-Basis. Neben dem Abspielprogramm dem eigentlichen PlugIn) müssen auch die abzuspielenden Samples alle im Speicher des Computers vorliegen. Das Programm holt diese gemäß den MIDI-Befehlen des Sequencers dann aus dem Speicher und spielt sie ab. Beispiel: Auf dem Uni-Server Oldenburg befinden sich alle Klänge der Gamelaninstrumente des Bremer Übersee-Museums sowie einiger Xylophone. Mit diesen Klängen haben Musikstudenten schon mittels des PlugIn „Halion“ von „Cubase“ technoide Kompositionen erstellt.
- (3) „*Virtuelle Drumsets*“. Hier handelt es sich im Prinzip um einen stark vereinfachten Soundsampler. Drumsounds liegen im Computerspeicher vor und werden MIDI-genau abgespielt.

Eine Reihe weiterer PlugIns verarbeiten die Audio-Dateien des Sequencers. Hierzu zählen alle nur denkbaren Effektgeräte, Raumsimulatoren, Equalizer, Compressoren, Gruncher, Ringmodulatoren, Verzerrer usw. Solche PlugIns verändern die Audiodateien nach den ihnen eigenen Algorithmen.

Will man aus einem Midifile eine wav-Datei herstellen, ohne den Sound analog ausgeben und dann wieder aufnehmen zu müssen, so kann man ebenfalls PlugIns verwenden, die entweder die GM-Sounds der Computer-Soundcard oder aber einen Set eigener Sounds verwenden. Ein passabler Set von GM-Sounds (also 128 normierten „Instrumentalklängen“) hat einen qualitätsabhängigen Speicherbedarf von zwischen 1 und 5 MB. Das ist nicht viel, wenn man bedenkt, dass es für MIDI-Sequencer auch Sets von „wertvollen“ Klavierklängen gibt, die eine ganze DVD füllen.

11.3. Effektgeräte - elektronische Musik in Raum und Zeit

„Effektgeräte“ werden im Studio eingesetzt, um der Musik jenes Flair aufzuprägen, das in natürlichen Aufführungssituationen (Kirche, Konzerthalle, Jazzkeller, Weltraum, Badezimmer, Gebirgsschluchten usw.) herrscht. Auch Positionen oder Bewegungen der Musik im Raum sowie das nicht hundertprozentig exakte Spiel eines Sinfonieorchesters gehören hierher. Im Laufe der Zeit hat sich das „Effektwesen“ technisch und ästhetisch verselbständigt, sodass mittlerweile neben den „natürlichen“ Effekten auch zahllose „künstliche“ Effekte zur Verfügung stehen. Hierzu zählen nicht nur ästhetisch zulässige „Fehler“ elektronischer Übertragungsanlagen früherer Musikepochen (Verzerren bei Gitarren, Phasing bei Verstärkern, Boosten bei Bassboxen usw.), sondern auch Eigenkreationen von der Mickeymaus („pitch transpose“) zum Stereo-Delay, Ping-Pong oder Double-Phasing.

Akustisch am interessantesten sind die *natürlichen* Effekte, weil sie eine praktische Anwendung akustischer Untersuchungsergebnisse zur Schallausbreitung in Räumen darstellen. Im folgenden werden einige Beispiele aufgezählt und dabei das weite Gebiet der „Raumakustik“ und „Schallbewegung“ exemplarisch gestreift.

Analoge und digitale „Delays“

Kernbestand aller Effektgeräte sind „**Delays**“. Darunter versteht man Vorrichtungen, die ein eintreffendes Signal zeitlich verzögert abgeben. Delaygeräte speichern das eintreffende Signal digital oder analog und lesen es nach der Delay-Zeit wieder aus dem Speicher aus. An einem Dreikopf-Tonbandgerät ist ein Delay einfach herzustellen (Abbildung 4.3 und Demonstration).

Von derartigen Audio-Delays sind (digitale) **MIDI-Delays** zu unterscheiden, bei denen nicht die Audio-Daten selbst, sondern nur die MIDI-Daten elektronischer, midifizierter Instrumente verzögert werden. Der Vorteil des reinen MIDI-Delays liegt darin, dass es technisch extrem einfach ist und dass das verzögerte Signal auch einen anderen Sound, eine andere Tonhöhe oder Lautstärke, ja ein vollkommen anderes MIDI-Ereignis darstellen kann. Der Nachteil ist der, dass ausschließlich die Produkte von MIDI-Instrumenten verarbeitet werden können, also weder Gesang oder akustische Instrumente noch zusammengesetzte Musikaufnahmen. (Demonstration: MIDI-Delay in „Cubase“.)

Im folgenden werden gängige Effekte besprochen, die alle mehr oder weniger Delays benutzen. Dabei besprechen wir ausschließlich Audio-Effekte und keine reinen MIDI-Effekte. Wenn ein solcher Audio-Effekt „midifiziert“ ist, dann heißt das, dass seine Parameter (wie Verzögerungszeit, Frequenzabhängigkeit, Diffusität, Rückkopplungsgrad usw.) über MIDI gesteuert werden können. Der Effekt selbst arbeitet aber ausschließlich mit Audio- und nicht mit MIDI-Daten.

Anwendung: Effektgeräte

Echo. Ein Schall wird an einem Gegenstand reflektiert. Die HörerIn hört den „direkten“ Schall und nach einiger Zeit den reflektierten Schall. Dieser hat dieselbe Frequenz wie der direkte Schall, ist wegen Absorption bei der Reflexion schwächer und kann auch seine Klangfarbe verändert haben, weil die Reflexion häufig frequenzabhängig ist. - Dieser Effekt ist simulierbar. Die Zeitverzögerung zwischen direktem und reflektiertem Schall enthält eine Information über „Größe“ des Echoraums, die Schwächung und Klangveränderung über das Material des reflektierenden Gegenstandes (Wald, Fels, Wand etc.). Mehrfachreflexion und Mehrfach-Echos kommen vor, wenn es mehrere reflektierende Gegenstände (Felswände eines Gebirgstales) gibt. - Eine künstliche Weiterentwicklung sind stereophone Echos sowie Echos bei denen sich auf „unnatürliche“ Weise die Tonhöhe verändert.

Hall. In hallenden Räumen treffen auf die HörerIn neben dem direkten Schall zahlreiche reflektierte Schalle ein, deren Gesamt mehr oder weniger „diffus“ erscheint. Hallgeräte verwenden Rückkopplungs-Algorithmen in Verbindung mit Delays, mit denen der direkte Schall mehrfach und möglichst „diffus“ (= unregelmäßig) wiederholt und dabei systematisch bezüglich Lautstärke, Klangfarbe und Diffusität verändert wird. - An heutigen digitalen Hallgeräten kann meist eine Pre-Delay-Zeit (d.h. die Verzögerung bis zum ersten Echo) eingestellt werden, ferner eine Delay-Zeit und eine Rückkopplungsintensität, die die Dichte und Dauer des Halls bestimmen. Ferner können Filter die rückgekoppelten Signale verändern und

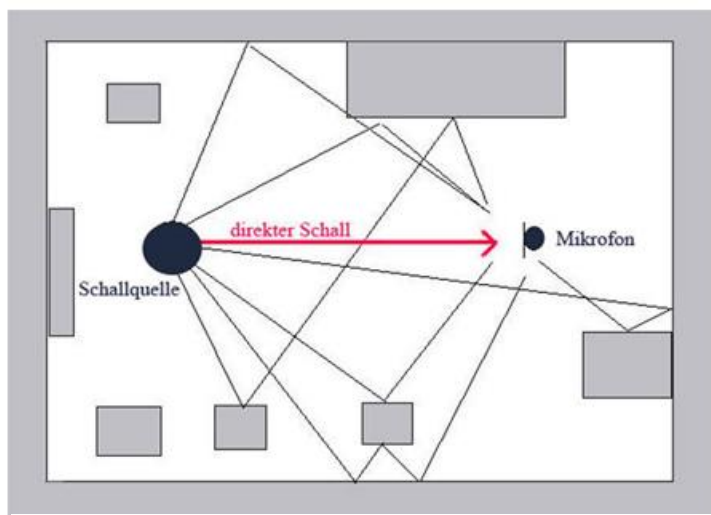


Abb. 11.5 Faktoren, die den Hall bedingen

damit „Materialeigenschaften“ von Räumen simulieren.

Chorus, Flanging und Phasing. Der Chorus-Effekt simuliert ein größeres Instrumental- oder Vokalensemble, dessen SpielerInnen ihre im Idealfall identischen Töne mit unterschiedlicher Phasenlage aussenden. Es kommt zu Überlagerungen, die musikalisch von Bedeutung sein können. Der Gesamtklang wird „reicher“ - kurz: ein Chor klingt qualitativ anders als eine entsprechend laute Einzelstimme. Im Prinzip wird bei allen genannten Effekten dem Ausgangssignal ein phasenverschobenes

Signal hinzugefügt. - An heutigen digitalen Hallgeräten kann meist eine Pre-Delay-Zeit (d.h. die Verzögerung bis zum ersten Echo) eingestellt werden, ferner eine Delay-Zeit und eine Rückkopplungsintensität, die die Dichte und Dauer des Halls bestimmen. Ferner können Filter die rückgekoppelten Signale verändern und

Exemplar desselben Signals überlagert. Es wird eine „mikroskopische“ Delay-Zeit in der Größenordnung von Bruchteilen der Periode verwendet. Dabei können recht viele Überlagerungsalgorithmen zum Tragen kommen: durch Rückkopplung entstehen mehrere Phasenüberlagerungen, die Phasenüberlagerung wird künstlich moduliert, die überlagerten Signale werden gefiltert (d.h. in der Klangfarbe verändert) usw.

Panorama. Wenn dasselbe Signal über zwei Stereokanäle unterschiedlich laut wiedergegeben wird, spricht man von Panorama. Bei Änderungen des Panoramas erinnert der Effekt daran, dass das Signal von einem Ohr zum andern wandert. Das Signal erscheint aber nicht außerhalb des Kopfes „durch den Raum“ zu wandern wie beim echten Stereo-Effekt. Panorama-Einstellungen dienen bei multitimbralen Soundmoduln der größeren Transparenz des Gesamtklanges. (Siehe Experiment unten zum Richtungshören!)

Stereophone Bewegung. Bewegt sich eine Schallquelle horizontal um die HörerIn herum, so verändern sich dabei sowohl wegen der Schattenwirkung des Schädels die auf die beiden Ohren eintreffenden Schallintensitäten des Signals, als auch wegen der unterschiedlichen Entfernung der Ohren zur Schallquelle die Phasenlage bzw. Delay-Zeit (vgl. Abbildung 11.6). Wenn beispielsweise ein Schall von halblinks vorne kommt, so unterscheidet sich die Entfernung des linken Ohrs von der Schallquelle von der des rechten Ohres um wenige Zentimeter. Bei Wellenlängen im Zentimeter-Bereich entspricht das relevanten Zeit- oder Phasenunterschieden.

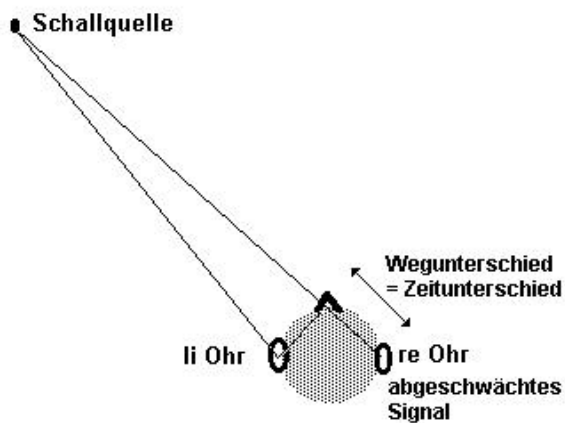


Abb. 11.6 Richtungshören

Beim **Richtungshören** (Abbildung 11.6) werden die Intensitäts- und Phasen- bzw. Zeitunterschiede der vom linken und rechten Innenohr ausgehenden Nervenimpulse miteinander verglichen. Dies geschieht in der „Hörbahn“ zwischen Innenohr und Hörzentrum des Gehirns dort, wo die ersten Querverbindungen zwischen linkem und rechtem Hörnerv stattfinden. Aus den kleinsten noch wahrnehmbaren Richtungsunterschieden kann die kleinste gerade noch auswertbare Zeitdifferenz errechnet werden, die bei 1/10 Millisekunden liegt. Dass für die Richtungswahrnehmung Intensitäts- und Zeitunterschiede gleichermaßen wichtig

sind, wissen MusikerInnen aus der Praxis, weil der Panorama- oder stereophone Delay-Effekt alleine nicht genügt, um einen Richtungseindruck hervorzurufen.

Richtungshören muss gelernt werden. Im Alltag treten Intensitäts- und Zeitunterschiede stets gemäß Abbildung 11.6 gekoppelt auf. In einem bösartigen Experiment kann man das lebenslang Gelernte „auseinanderdividieren“. Man dreht den Panoramaregler eines Stereoverstärkers zunächst nach links, sodass der Schall im Kopf nach links zu wandern scheint (obgleich manche Menschen auch nur hören, dass der Schall links lauter ist). Sodann verändert man mit einem Delay solange die Phase, bis das Signal wieder in der Mitte ist. - Dies Experiment (der sog. **Trading-Effekt**) bestätigt, dass Intensitäts- und Zeitunterschiede zum Richtungshören beitragen.

Noch raffinierter ist der binaurale Schwebungseffekt (vgl. Kapitel 3.3), bei dem die Signale, die auf das linke und rechte Ohr treffen, um wenige Hz gegeneinander verschoben sind. Man kann den Frequenzunterschied nicht als Tonhöhenunterschied zweier unterschiedlicher Signale hören. Die Schwebung bewirkt eine scheinbare Veränderung der Phase der beiden Signale, sodass man einen

sehr langsamen Phasing-Effekt wahrnimmt: das Signal scheint im Kopf zu rotieren, die Rotationsgeschwindigkeit ist die Schwebungsfrequenz (= Differenz der beiden Signalfrequenzen).

Relativ ungeklärt ist noch, wie der Mensch „vorn-hinten“ unterscheidet bzw. ob überhaupt und wie „oben-unten“ funktioniert. In einem schalltoten Raum ohne jegliche Reflexion haben Musikstudent/innen vorn und hinten häufiger verwechselt als in einem normalen Raum mit Hall. Das spricht für den Einfluss der Raumakustik auf die Orientierung im Raum.

11.4. Das Heimstudio als Musikinstrument

Ein einigermaßen vollständiges Heimstudio besteht aus Mikrofonen, einem Harddiskrecordingsystem, möglichst einem Sequencer, der auch mit MIDI arbeiten kann, und somit einem Computer, diversen Keyboards und anderen elektronischen Instrumenten, (elektronischen) Drums und gegebenenfalls ein paar Effektgeräten. Für Liveauftritte und Konzerte kann dies Setting eventuell abgespeckt werden: ohne große Ansprüche ans „Musizieren“ und eine Interaktion Mensch-Maschine auf der Bühne genügt ein Laptop mit einem soliden Paket an Software. Für etwas größere Ansprüche ans „Musizieren“ gibt es „Heimstudios“ für spezifische Anwendungen in kompakter, robuster und anwendungsfreundlicher Form. Das wichtigste Einsatzgebiet sind experimentierfreudige DJ's, die elektronische Musik machen und dabei mit dem Publikum interagieren wollen. Für diesen Bedarf hat Roland 1996 die erste **Groove-Box** „MC-303“ entwickelt, der 1997 von der Bastler-Firma „Quasimidi“ mit der „Rave-O-Lution 309“ eine „analogere“ und daher flexiblere Box folgte.

Die Quasimidi-Box ist ein Hardware-Sequencer mit 5 fest eingebauten Soundmodulen, die wie Analogsynthesizer (live) bedient werden können: für eine Bass Drum, eine Snare, eine HiHat, ein Percussions-Set und einen Bass. Mit selbst gebauten Patterns lassen sich alle 5 Sounds einzelnen, aber doch stets im selben „Groove“ ansprechen und individuell klanglich (live) verändern. Die Bass-Stimme ist ein vollständiger Bass-Analogsynthesizer mit dem kompletten Analog-Regelwerk. Da alle Handgriffe des Spielenden in „MIDI“ übersetzt werden, können auch weitere elektronische Instrumente über den MIDI-Ausgang angeschlossen werden. Für externe Sequencerprogramme, Drum-

computer oder andere Groove-Boxes gibt das Gerät auch Synchronisationssimpulse zur Temposteuerung aus.



Abb. 11.8 Die erste Groove-Box „Rave-O-Lution“ (1997)

Solch eine Groove-Box verzichtet einerseits auf Melodien und Harmonien, ist also ein genuines Techno-

Instrument. Es setzt aber andererseits ganz auf Klang und Rhythmus, die beiden Archetypen von Musik überhaupt (wie Musikanthropologen sagen). Im Live-Einsatz werden die verschiedenen musikalischen Patterns über 12 blaue Tasten abgerufen, die zugleich als Leuchtschrift den Rhythmus angeben. Das Tempo kann mittels eines „Tab's“ per Hand eingeklopft und so an andere Musiker angepasst werden. Die Filter können nicht nur die Synthisounds der Bass-Sektion, sondern auch von außen eingeführte Audio-Signale bearbeiten.

Auf „MC-303“ und der „Rave-O-Lution“ bauten in den letzten 10 Jahren alle Japaner mit „MPC's“ (music production centre) auf. Die heutigen Groove-Boxes haben die Analog-Architektur zugunsten von Hardware-Samplern zurück gedrängt, wodurch die Sounds bombastischer, die Bedienung aber weniger live-tauglich wurde. Die Firma Quasimidi gibt es nicht mehr. In zahlreichen Projekten an der Uni Oldenburg und in Dutzenden von Konzerten hat sich die einfache musikalische Architektur nach dem Schema „4 einzelne Percussionsklänge und 1 Analog-Bass“ als erstaunlich tragfähig erwiesen.

11.5. Oldenburger Projekte elektronischer Livemusik

Das abschließende Kapitel schreibe ich noch expliziter „in eigener Sache“ als die anderen. Ich möchte einige Projekte beschreiben, die ich in den Jahren 1984 bis 2008 durchgeführt habe und die sich alle auf die Interaktion Mensch-Computer in Live-Situation, auf die Frage, ob und wie man mit Computern improvisieren kann, und ob Computer nicht auch musikalisch kreativ sein können, beziehen. Es handelt sich um sog. „künstlerisch-wissenschaftliche Vorhaben“, die einerseits einen Forschungsaspekt beinhalten, andererseits aber künstlerische Produktionen im aktuellen Musikleben darstellen. Alle Projekte habe ich ausführlich dokumentiert und analysiert. Über die jeweils genannten Internetseiten lässt sich das jeweilige wissenschaftliche Umfeld erschließen.

Brain and Body

Ziel des Projekts

Zentrales Thema des Projekts war die Beziehung von Mensch zu Maschine. Zwischen einem Musiker (Brain), der den Computer und die angeschlossenen elektronischen Klangerzeuger bedient, und dem Musiker (Body), der singt, tanzt und Geige spielt, sollte sowohl durch Hören und Sehen (also konventionell) als auch auf elektronischem Wege eine Interaktion stattfinden. dies erforderte Improvisatorisches Herangehen. Daher sollte auch gezeigt werden, dass und wie auf Computern improvisiert werden kann.

Technik des Projekts

Zentrale Steuerstelle war ein Computer (zuerst Commodore SX64, dann Atari ST zuletzt eine „Groove



Box“) und ein „MIDI Performance System“ der Firma Zyclus aus London. Der Computer konnte fertige „Technobretter“ und eigens komponierte algorithmische Kompositionen (bzw. „tools“) erzeugen. Als Klangerzeuger dienten Synthesizer, Soundmoduln und Sampler. Die Interaktion zwischen dem Musiker „Body“ und dem „Brain“ geschah (1) über midifizierte Stepplatten, auf denen „Body“ tanzte. An der Platte befanden sich Kontaktmikrofone, deren Klicks MIDI-Daten in Abhängigkeit von der Amplitude des Klicks über einen „Pad to MIDI-Converter“, wie sie elektronische Drums verwenden, auslösten. Diese MIDI-Daten konnten Klänge abrufen, Patterns triggern oder Melodien durchsteppen. Eine weitere Interaktionsmöglichkeit bestand (2) darin, dass das, was „Body“ ins Mikrofon sang oder spielte, gesampelt und unmittelbar in die laufende Musik integriert wurde. Im Laufe der 90er Jahre wurde eine von der Oldenburger Haustechnik konstruierte midifizierte Lichtanlage implementiert. Sowohl Farben als auch Stroboskopblitze konnten in eigenen Rhythmen oder synchron zur Musik gesteuert werden.

Evaluation des Projekts

Das Projekt wurde von Festivals, von der Klubszene, von Tagungen, Kunstausstellungen und Hochschulen zu Konzerten eingeladen und spielte 31 Mal. 1987-1995 hat sich das musikalische Programm aufgrund von Publikumsresonanz inhaltlich von eher spielerisch-abstrakten Vorführungen hin zur Thematik „Männerphantasien“ gewandelt. Beim Revival auf der Bielefelder „diagonale“ 2006 fand eine extreme Reduktion der technisch-musikalischen Mittel statt, indem auf jede technische Interaktion zwischen „Brain“ und „Body“ verzichtet wurde. Das reduzierte Konzept läuft nun unter der Devise „Violin Concerto 21“ (Violinkonzert des 21. Jahrhunderts: ein Jazzgeiger improvisiert und wird von einem DJ live begleitet).

Das Plakat zum Programm „Männerphantasien“ wurde häufig abgerissen und beschmiert. Der „Body“ Peter Bayreuther trat im brasilianischen Tanga-Slip auf.

Weitere Info mit Beispielen unter
www.uni-oldenburg.de/musikfor/brainandbody.

Das Oldenburger TechnoMuseum

Ziel des Projekts



10 Analoge Synthesizer aus dem Bestand der Universität Oldenburg spielen als „Orchester“ so zusammen, dass eine auch rhythmisch gut koordinierte Musik entsteht. Die „Kultinstrumente“ sollten alle gemeinsam „grooven“, die einzelnen Spieler ohne umfangreiche Schulung in der Lage sein, klanggestaltend mit zu wirken. (Hervorgegangen ist das Projekt aus Ferienblockseminaren zur elektronischen Musik, bei denen gemeinsames Musizieren motivierend wirken sollte.)

Technik des Projekts

Die technisch zentrale Vorrichtung des „Groovenden Synthesizer-Orchesters“ ist ein 16-stimmiges Gerät der Firma Doepfer, das MIDI-Daten in Spannungssteuerungen so verwandelt, dass analoge Synthesizer diese auf eine musikalisch sinnvolle Weise „verstehen“. Ein zentraler Computer oder eine Groove-Box erzeugen für jedes angeschlossene Instrument ein eigenes Rhythmuspattern. Dies Pattern gelangt in Gestalt eines zeitlichen Trigger-Musters an die diversen Analoogsynthesizer. Die Spieler dieser Synthesizer haben die Aufgabe, auf der Basis dieses Triggers mittels „Musizieren mit den Reglern“ Klänge zu erzeugen und zu modulieren.

Bild oben: EMS Synthi A (ein Analoogsynthi mit absolut „oofener“ Modul-Architektur). Bild unten: Kreative Arbeit am Korg MS 10 (siehe auch Abbildungen 10.6 und 10.7).

Evaluation des Projekts

Das als hochschuldidaktische Maßnahme 1997/98 entwickelte Projekt hatte bereits bei seiner ersten (5-stündigen) öffentlichen Aufführung 1998 einen solchen (Tanz-)Erfolg, dass es über 6 Jahre durch mit unterschiedlichen Besetzungen immer wieder durchgeführt wurde. Die einzelnen Spieler/innen haben für das Ensemble „Improvisationskonzepte“ entworfen, d.h. einerseits die

Rhythmuspartitur des steuernden Computers andererseits gewisse Rahmenvorgaben für die Aktionen der einzelnen Spieler/innen. Das „TechnoMuseum“ ist wohl das erste und weltweit einzige „improvisierende AnaloSynthesizer-Orchester“, das zudem einen angesagten Techno-Groove zu erzeugen imstande ist. Bei den „Rave-Parties“ des Techno-Museums wurden midifizierte Stroboskope eingesetzt, die den Vorführungen ein besonderes Flair verliehen. Das TechnoMuseum gastierte auch als Dauerinstallation eine Woche lang im Keller der Musikhochschule Köln und ermutigte Hauptschulklassen zu Besuchen in der Universität.



Information über alle verwendeten Instrumente und Geräte, Klang- und Videoproben unter www.uni-oldenburg.de/musik-for/techno

MIDI-Planetarium

Ziel des Projekts

Ein Computerprogramm produziert MIDI-Daten nach einem Algorithmus, in den als Anfangswerte die Positionen der Gestirne entlang der Ekliptik („Horoskop-Bild“) eingehen. Das Projekt soll ein gna- denlos objektiver Beitrag zur Diskussion um „Horoskopvertonungen“ sein. Der Produktions- Algorithmus verwendet das „Gesetz der Oktav“ von Hans Cousto (Kapitel 9.5). Kompositionstech- nisch gesehen ist das MIDI-Planetarium „Computermusik“, die live ausgeführt und improvisatorisch bedient wird.

Technik des Projekts



Das Programm MIDI-Planetarium erzeugt für jedes Gestirn eine charakteristische Abfolge von Obertönen des jeweiligen Cousto-Gestirn-Grundtons sowie einen eigenen Rhythmus. Der Computer, auf dem dies Programm läuft, produziert auf diese Weise eine sehr große und dichte Menge undurchschaubar komplexer aber dennoch intern strukturierter MIDI-Daten. Bei der Studio- oder Liveauf- führung wählt der Musiker/Komponist aus diesem Datenstrom so aus, dass ein musikalisch sinnvoller Ablauf entsteht. Der Datenstrom fällt in jedem Konzert anders aus, da die Ausgangswerte für das Programm dem Stand der Gestirne zum Zeitpunkt des Konzerts entnommen werden.

Das Programm existiert in einer elaborierten Ver- sion für 2 Atari ST-Computer und in einer „Volksversion“ als PlugIn des Horoskopprogramms „Jupiter 55“ für Windows 95. Die musikalische Qualität einer Vorführung hängt stark von den verwendeten Klangerzeugern ab, die das Programm anspricht.

Evaluation des Projekts

Seit 1991 ist das MIDI-Planetarium bundesweit 26 Mal in Planetarien, bei Konzerten, in Kirchen und auf Festivals solistisch und in Verbindung mit einem Obertonsänger „konzertant“ erklingen. (Bild: Reinhard Schimmelpfeng mit mir zusammen vor dem „Knochen“ des Planetariums Osnabrück.) Es diente als Playback für Kompositionen (z.B. für die Einweihung des Hörsaalgebäudes der Uni Oldenburg), als Generator von „Ambiente“ (Freies Musikzentrum München) und Unter-Wasser-Musik (Bad Sulza). Im Studio wurden 75 Auftragskompositionen erstellt, 56 davon im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojekts. Das Programm findet sowohl in der Esoterik- als auch Avantgardeszene Beachtung, weil es sowohl in die Kategorie „kosmische Musik“ als auch „neue Computerkomposition“ eingeordnet werden kann.

Information auch zu den Ergebnissen des Forschungsprojekts unter
www.uni-oldenburg.de/musik-for/midiplan.

Fractal Music*Ziel des Projekts*

Algorithmische Computerkompositionen auf der Basis fraktaler Geometrie sollen zeigen, dass und wie mit Algorithmen „organisch“ oder „natürlich“ wirkende musikalische Abläufe produziert werden können. In einem konkreten Gemeinschaftsprojekt sollten 8 Atari-Computer, deren jeder ein eigenes „fraktales Programm“ abspielt, über MIDI zentral synchronisiert werden. Das Endergebnis soll eine öffentlich vorführbare Gruppenimprovisation sein.

Technik des Projekts

Es werden 9 Atari-Computer aus dem „Traditionsbestand“ des Faches Musik an der Uni Oldenburg im Raum verteilt und jeweils mit einem Soundmodul und Lautsprecher versehen. Die 8 „Spieler“ (Mensch, Atari, Soundmodul und Lautsprecher) produzieren ihren jeweils eigenen Algorithmus, erhalten aber Hinblick auf ein gemeinsames Timing von einem Zentral-Atari (wie im TechnoMuseum) einen rhythmischen Trigger. Die „Komposition“ eines derartigen Gruppenimprovisationskonzept besteht somit aus 8 individuellen algorithmischen Programmen (mit gewissen Interaktionsmöglichkeiten) und einer „Rhythmuspartitur“ für den Zentral-Atari.

Evaluation des Projekts

Das Projekt „Fractal Music“ war als Lehrveranstaltung angelegt, die mit einem öffentlichen Konzert abgeschlossen wurde. Es war eine Weiterentwicklung des TechnoMuseums in Richtung „algorithmisches Komponieren“. Das Projekt fand 2003, d.h. zu einer Zeit statt, als Atari-Computer längst zum alten Eisen zu gehören schienen und Musikprogrammierung als eine Angelegenheit von hoher Kennerchaft galt. Das Projekt zeigte, dass die MIDI-Eigenschaften des Atari professionellen Ansprüchen genügen und Basic-Musikprogrammierung am Atari „normalen“ Musikstudent/innen zugänglich ist und zu hörbaren Ergebnissen führt.

Dokumentation mit allen verwendeten Programmen (open source) und Tonbeispiel unter
www.uni-oldenburg.de/musik-for/fractamusic.

Anhang

Lehr- und Nachschlagewerke

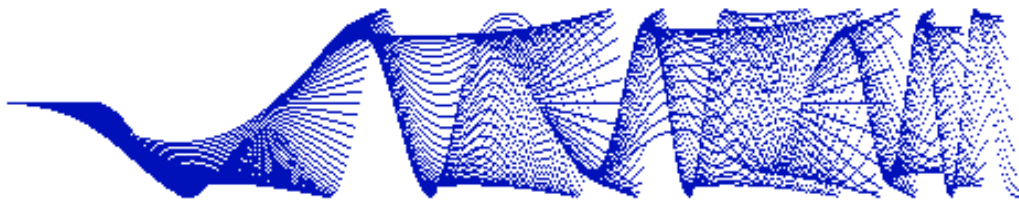
- Curt Sachs:** Reallexikon der Musikinstrumente. Olms/Hildesheim 1964.
- Wolf D. Keidel** (Hg.): Physiologie des Gehörs. Akustische Informationsverarbeitung. Thieme/Stuttgart 1975.
- Heinrich Husmann:** Einführung in die Musikwissenschaft. Heinrichshofen/Wilhelmshaven 1975.
- Michael M. Rieländer:** Reallexikon der Akustik. Bochinsky/Frankfurt/M. 1982.
- Eberhard Zwicker:** Psychoakustik. Springer/Berlin u.a. 1982. (Mit LP.)
- Craig Anderson:** The Digital Delay Handbook. Amsco/New York 1985.
- [Spektrum der Wissenschaften:]** Die Physik der Musikinstrumente mit einem Vorwort von **Klaus Winkler**. Verlag Spektrum der Wissenschaften/Heidelberg 1988.
- John R. Pierce:** Klang. Musik mit den Ohren der Physik. Verlag Spektrum der Wissenschaften/Heidelberg 1989.
- Hans Cousto:** Klänge Bilder Welten. Simon und Leutner/Berlin 1989.
- Thomas D. Rossing:** The Science of Sound. Addison-Wesley/Reading Mas. 1990.
- Wolfgang Martin Stroh:** MIDI-Experimente und Algorithmisches Komponieren. Band 1. musiklabor/Berlin 1989. Band 2. musiklabor/Berlin 1990.
- Jürgen Hellbrück:** Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie. Hogrefe/Göttingen u.a. 1993.
- Wolfgang Martin Stroh:** Tonsysteme und Stimmungen hören. Microtuning auf Midi-Instrumenten. Ein Handbuch. musiklabor/Berlin 1994.
- Wolfgang Martin Stroh:** Handbuch New Age Musik. Bosse/Regensburg 1994.
- Charles Taylor:** Der Ton macht die Musik. Vieweg/Braunschweig 1994.
- „Musik in Geschichte und Gegenwart“ (MGG):** Artikel über einzelne Instrumente und Gattungen. Neue Ausgabe ab 1994 hg. von Ludwig Finscher. 5 Bände des Sachteils bis Anfang 1997 (Buchstabe „M“). Bärenreiter-Metzler/Kassel-Stuttgart. Alte Ausgabe vollständig.
- Scott Jarol:** Abenteuer in Visual Basic Multimedia. tewi-Verlag/München 1995.
- Robert F. Schmidt** (Hg.): Neuro- und Sinnesphysiologie. Springer/Berlin u.a. 1995.
- David Miles Huber:** Hard Disk Recording for Musicians. Amsco/New York 1995.
- Anthony Baines:** Lexikon der Musikinstrumente. Metzler-Bärenreiter/Stuttgart 1996.
- Peter Forrest:** The A-Z of Analogue Synthesizers. 2 Teile. Short Run Press/London 1994. In Deutschland: MMM-Verlag 1997.
- Georg Eska:** Schall & Klang. Wie und was wir hören. Birkhäuser/Basel etc. 1997.
- Bernd Enders:** Lexikon der Musik-Elektronik. Atalntis-Schott/Mainz³1997.
- Donald E. Hall:** Musikalische Akustik. Schott/Mainz 1997.
- André Ruschkowski:** Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen. Reclam/Lepizig 2000.
- Juan G. Roederer:** Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer/New York³2000.
- Perry Cook:** Music, Cognition, and Computerized Sounds. MIT Press/London 1999.
- Manfred Spitzer:** Musik im Kopf. Schattauer/Stuttgart 2002.
- Peter Gorges/Alex Merk:** Keyboards. MIDI. Homerecording. GC Carstensen/München 2003.
- Elena Ungeheuer** (Hg.): Elektroakustische Musik. Laaber/Laaber 2002.
- Kay Kaufman Shelemay:** Soundscape. Exploring Music in a Changing World. Norton/N.Y. 2006.

Frequenztabelle der 12-temperierten Skala

Taste	Hz	Name	Taste	Hz	Name	Taste	Hz	Name
			<i>c</i> (kleine Oktav)			<i>c</i> ⁴		
0	8,1757	C-2	48	130,8128	C2	96	2093,0045	C6
1	8,6619	C#-2	49	138,5913	C#	97	2217,4610	C#
2	9,1770	D-2	50	146,8324	D	98	2349,3181	D
3	9,7227	D#-2	51	155,5635	D#	99	2489,0159	D#
4	10,3009	E-2	52	164,8138	E	100	2637,0205	E
5	10,9134	F-2	53	174,6141	F	101	2793,8259	F
6	11,5623	F#-2	54	184,9972	F#	102	2959,9554	F#
7	12,2499	G-2	55	195,9977	G	103	3135,9635	G
8	12,9783	G#-2	56	207,6523	G#	104	3322,4376	G#
9	13,7500	A-2	57	220,0000	A	105	3520,0000	A
10	14,5676	Bb-2	58	233,0819	Bb	106	3729,3101	Bb
11	15,4339	H-2	59	246,9417	H	107	3951,0664	H
<i>C</i> ₂ (Subkontra-Oktav)			<i>c'</i> (eingestr. Oktav)			<i>c</i> ⁵		
12	16,3516	C-1	60	261,6256	C3	108	4186,0090	C7
13	17,3239	C#	61	277,1826	C#	109	4434,9221	C#
14	18,3540	D	62	293,6648	D	110	4698,6363	D
15	19,4454	D#	63	311,1270	D#	111	4978,0317	D#
16	20,6017	E	64	329,6276	E	112	5274,0409	E
17	21,8268	F	65	349,2282	F	113	5587,6517	F
18	23,1247	F#	66	369,9944	F#	114	5919,9108	F#
19	24,4997	G	67	391,9954	G	115	6271,9270	G
20	25,9565	G#	68	415,3047	G#	116	6644,8752	G#
21	27,5000	A	69	440,0000	A	117	7040,0000	A
22	29,1352	Bb	70	466,1638	Bb	118	7458,6202	Bb
23	30,8677	H	71	493,8833	H	119	7902,1328	H
<i>C</i> ₁ (Kontra-Oktav)			<i>c''</i> (zweigestr. Oktav)			<i>c</i> ⁶		
24	32,7032	C0	72	523,2511	C4	120	8372,0181	C8
25	34,6478	C#	73	554,3653	C#	121	8869,8442	C#
26	36,7081	D	74	587,3295	D	122	9397,2726	D
27	38,8909	D#	75	622,2540	D#	123	9956,0635	D#
28	41,2034	E	76	659,2551	E	124	10548,0818	E
29	43,6535	F	77	698,4565	F	125	11175,3034	F
30	46,2493	F#	78	739,9888	F#	126	11839,8215	F#
31	48,9994	G	79	783,9909	G	127	12543,8540	G
32	51,9131	G#	80	830,6094	G#			
33	55,0000	A	81	880,0000	A			
34	58,2705	Bb	82	932,3275	Bb			
35	61,7354	H	83	987,7666	H			
<i>C</i> (gr. Oktav)			<i>c</i> ³ (dreigestr. Oktav)					
36	65,4064	C1	84	1046,5023	C5			
37	69,2957	C#	85	1108,7305	C#			
38	73,4162	D	86	1174,6591	D			
39	77,7817	D#	87	1244,5079	D#			
40	82,4069	E	88	1318,5102	E			
41	87,3071	F	89	1396,9129	F			
42	92,4986	F#	90	1479,9777	F#			
43	97,9989	G	91	1567,9817	G			
44	103,8262	G#	92	1661,2188	G#			
45	110,0000	A	93	1760,0000	A			
46	116,5409	Bb	94	1864,6550	Bb			
47	123,4708	H	95	1975,5332	H			

1. Spalte (Nr.):
Numerierung der realen
oder virtuellen
Keyboardtasten (MIDI).
2. Spalte (Hz):
Frequenz der 12-
Temperierung bei
Kammerton 440 Hz.
3. Spalte (Name):
internationale
Bezeichnung bei
Synthesizern und MIDI
(z.B. das D# unter C3
wird mit D#3 bezeichnet).

Das Signet



Das Signet des „iii-twickenstudios oldenburg“ ist ein optisches Experiment zur Gestaltwahrnehmung. Es setzt sich aus 40 digital aufgezeichneten Schwingungen vom Typ der FM-Synthese zusammen. Die Schwingungen unterscheiden sich minimal durch das Amplitudenverhältnis von Träger und Modulator. Die „Querstreifen“ oder Nadeln setzen sich aus Bildpunkten der 40 überlagerten Schwingungsdarstellungen aufgrund der geringen Samplingrate zusammen. Der Eindruck eines sich windenden Bandes ist ebenfalls ein gestaltpsychologischer Effekt, der durch die verwendete Bildschirmauflösung eines Atari ST hervorgerufen ist.