M. RIAT

GRUNDLAGEN DER MUSIK

VERSION 1.3 PDF
M. Riat: riat@pobox.com
BORRIANA, SOMMER 2002

INHALTSVERZEICHNIS

ANMERKUNG DES VERFASSERS

Mein Vater war Musiker und meine ganze Kindheit war von klassischer Musik durchzogen. Das erklärt vermutlich mein lebhaftes Interesse für alles, was mit dieser Kunst zusammenhängt. Als anfangs der Achtzigerjahre ein Fachmann mein Klavier stimmen kam, stellte ich diesem ein paar Fragen über seine Kunst, und der Mann war so freundlich, mir ein paar der akustischen Eigenheiten des Instruments vorzuführen, die ich noch nicht kannte. Unter anderem erwähnte er die Obertöne und die Schwebungen, die ich in den darauffolgenden Tagen nach einiger Anstrengung hören konnte.

Voller Wissensdrang begab ich mich in meine Stammbuchhandlung, in der Absicht, ein Buch über alle diese interessanten Phänomene zu erwerben. Ich fand aber keine Einführung in dieses Thema, welche nicht entweder trivial oder aber so komplex waren, dass sie den Spezialisten vorbehalten waren. Eines Tages fand ich in der Zentralbibliothek von Barcelona ein paar Werke, die meine Ansprüche befriedigten. Aber es handelte sich ausschliesslich um vergriffene Werke; und keines derselben war in katalanischer Sprache abgefasst.

Damals begann ich mit dem Gedanken zu spielen, selber eines zu schreiben.

Die von nicht spezialisierten Autoren verfassten populärwissenschaftlichen Werke sind oft besser an die Bedürfnisse des Laien angepasst, da es einem Spezialisten oft schwerfällt, sich einem Unkundigen gegenüber verständlich auszudrücken.

Ich begann verschiedene Werke über das Thema zu lesen, machte mir Notizen und ordnete diese mittels Karteikarten, schön von Hand, da ich damals noch keinen Computer besass. Und eines Tages begann ich, die ersten Textfragmente mit einer romantischen Schreibmaschine niederzuschreiben, da die hohen Preise mich immer noch von der Anschaffung eines Computers abhielten. Schliesslich begann ich, meine Fragmente zu ordnen, noch hängige Themen hinzuzufügen, überflüssigen Text auszumerzen und schliesslich die Seiten zu nummerieren. Die schematischen Zeichnungen verschob ich auf später und fertigte vorläufig erst mal ganz einfache Skizzen an.

Ich plante folgendes: ich würde einen Verleger suchen und andererseits die Auflage durch Einschieben von Inseraten von Firmen, die mit dem Thema in Einklang standen, mitfinanzieren. Dabei dachte ich etwa an Musikalienhändler, Klavierhäuser oder Schallplattengeschäfte.

Einstweilen übergab ich mehreren Verlegern je eine Photokopie meines unkorrigierten Manuskripts und versuchte gleichzeitig, Kunden zu finden, die in meinem Buch inserieren würden. Dieses System hätte es mir erlaubt, das Buch zu einem erschwinglichen Preis anzubieten, denn kleine Auflagen kommen immer teurer zu stehen als grosse und ich sah ein, dass dieses Buch nicht in grossen Mengen verkauft werden würde.

Aber ich fand nicht genug Inserenten und keiner der Verleger, an die ich mich gewandt hatte, war bereit, sich am Projekt zu beteiligen. Und ich erinnerte mich, wie bei meinem ersten Buch "Tècniques gràfiques"[1] aller Ärger angefangen hatte, als ich das Manuskript der Druckerei zum Satz abgeliefert hatte. So legte ich meine Arbeit zu den Akten, wie ich vermutete, für immer.

Aber im Jahr 1999, nach der Anschaffung eines Programms *Microsoft Word,* das es erlaubte, die graphischen Darstellungen in den Text einzubetten, beschloss ich, die ganze Arbeit jener Epoche auf eine Computerdatei zu übertragen. So könnte ich das Buch an die interessierten Leute verteilen, indem ich ihnen eine Diskette zusandte oder indem ich ihnen die Datei ganz einfach per E-Mail zukommen liesse. Danach kann jeder das Buch in einem Drucker ausdrucken, oder es am Bildschirm lesen.

Die vorliegende Version ist eine PDF-Version, so dass die Dateien nicht mehr an das *Windows*-System gebunden sind. Die Daten dürfen unter den folgenden Bedingungen gebraucht werden:

BEDINGUNGEN

Der vorliegende Text darf frei vertrieben werden, sofern die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

Die Originaldateien dürfen nicht abgeändert werden.

Die Daten dürfen nicht im Zusammenhang mit einem kommerziellen Produkt vertrieben werden, auch nicht auszugsweise.

Der Text und das Bildmaterial dürfen ausschliesslich für nicht lukrative Zwecke, wie etwa für den Unterricht verwendet werden.

[1] Graphische Techniken.

Wird der Text oder das Bildmaterial ganz oder teilweise für kulturelle, didaktische oder andere Zwecke verwendet, so ist die Herkunft zu erwähnen und auf die vorliegenden Bedingungen hinzuweisen.

Obwohl ich ein leidenschaftlicher Verfechter des qualitativ einwandfreien typographischen Satzes bin und ich immer stärker an das geschriebene Wort gebunden sein werde als an die elektronischen Medien, habe ich beschlossen, diese kleine Monographie unter dieser Form zu vertreiben, da uns die modernen Techniken Möglichkeiten zum Vertrieb und zur Variierung in die Hand geben, die die Mittel des gedruckten Textes zweifelsohne weit übertreffen. Im gleichen Sinne, wie die alten Amanuenser der Geburt der Druckerei mit beweglichen Typen mit Misstrauen begegneten, beobachtet heute mancher Verteidiger der klassischen Typographie die Entwicklung der letzten 20 oder 30 Jahre argwöhnisch. Aber ich glaube, auch im Umgang mit den neuen Techniken wird sich eine gewisse Ästhetik und eine Tradition einspielen, die zur Erschaffung von qualitativ hochstehenden Werken führen wird.

Und die Geburt einer neuen Technik bedeutet nicht unbedingt eine Überbietung des herkömmlichen Verfahrens, aber in diesem Fall ist uns eine Freiheit beschieden, die uns über die Grenzen der traditionellen Prozedur helfen. Die Typographie hat in keinem Moment die wertvolle und noble Arbeit der alten Kopisten entwürdigt, die manchmal ein ganzes Leben dem Bedecken der Pergamentseiten eines einzigen Buches mit ihrer minuziösen Kaligraphie widmeten.

Ich habe das Programm *Word* von *Microsoft* vor allem wegen seiner grossen Verbreitung ausgewählt, die eine zukünftige Kompatibilität gewährleistet. Ich habe den Text so gestaltet, dass er mit einem Ink-Jet- oder Laser-Drucker auf Papier des Formats DIN A4 abgedruckt werden kann. Die vorliegende PDF-Version ist nun nicht mehr an *Windows* gebunden.

Obwohl es sich um einen herkömmlichen Text handelt, habe ich versucht, diesen ein Wenig im Sinne eines Hypertextes anzulegen, und zwar im folgenden Sinn: Die einzelnen Kapitel stellen zuerst die verständlichsten Konzepte dar, die dann allmählich vertieft werden. Die Lektüre der darauffolgenden Kapitel kann auch dann weitergeführt werden, wenn man den vorangehenden Stoff nicht gänzlich verstanden hat.

Dieser Text ist nicht bestrebt, einen Akustik- oder Musikkurs darzustellen. Mein Ziel bestand lediglich darin, einen Versuch zu verfassen, der den Leser in die verschiedenen Themen, um die sich dieses Buch dreht, einführt.

Ich bitte alle Leser, mir ihre Kommentare, Vorschläge und Korrekturen zukommen zu lassen, am besten per E-Mail. Die Mitarbeiter werden in der nächsten Ausgabe am Schluss des Buches erwähnt.

VORWORT

Von allen Künsten gilt die Musik als die abstrakteste, die am wenigsten greifbare. Seit der Erfindung des Buchdruckes im XV Jh., hat sich die westliche Kultur allmählich immer stärker einer auf dem Gesichtssinn begründeten Denkweise zugewandt, unter allmählicher Ausschaltung der anderen Sinnesorgane. Um etwa wissenschaftliche Zusammenhänge klar darzustellen oder um ein Computerprogramm zu entwickeln, erstellen wir eine graphische Darstellung, im Bewusstsein, dass ein Bild tausend Wörtern gleichkommt.

Wir haben uns derart an diese Vorzugsstellung des Sehorgans gewöhnt, dass wir mitunter leicht der Versuchung verfallen, unsere anderen Sinnesorgane als Wahrnehmungsquellen zweiter Ordnung einzustufen. Das Beispiel der Blinden zeigt uns, wie vor allem die Leistungsfähigkeit des Gehörs und des Tastsinnes stark verbesserungsfähig sind, wenn man sie nur einem systematischen und sorgfältigen Training unterwirft. Dieses Buch ist nicht ein Musikbuch im herkömmlichen Sinne, da es sich im Wesentlichen darauf beschränkt, die physikalischen, mathematischen, anatomischen, physiologischen, psychologischen und technischen Grundlagen der Musik zu erläutern, ohne von der Musik selber zu sprechen, jener Kunst, die auf den hier besprochenen Prinzipien beruht. Aber es handelt sich auch nicht um ein wissenschaftliches, nur Fachleuten zugängliches Buch, ganz im Gegenteil: es ist ein populärwissenschaftliches Werk und richtet sich an alle Leute mit einer mittleren Bildung, die sich die Kenntnis einiger grundsätzlichen Begriffe im Bereich der musikalischen Akustik aneignen wollen, ohne sich übermässig anzustrengen.

Die ausserordentliche Zunahme des menschlichen Wissens in den letzten zweihundert Jahren erforderte täglich eine zunehmende Spezialisierung aller Wissenschafter. Die ausserordentlich entwickelten Wissenschaften wie etwa die Physik oder die Mathematik können heutzutage nicht mehr von einer einzelnen Person beherrscht werden, so dass es nach einem allgemeinen Studium des entsprechenden Fachs unmöglich ist, sich gleichzeitig in allen Sektoren einer bestimmten Wissenschaft weiterzubilden. Die grossen Universalgenies, wie zum Beispiel Leonardo da Vinci, die fast die gesamte Wissenschaft ihrer Epoche beherrschten, können heute nicht mehr existieren, hat doch der menschliche Geist auch seine Grenzen. Das XIX Jh. brachte die letzten Universalgenies hervor, wie etwa Helmholtz. Will heutzutage eine gebildete Person über eine grosse Anzahl Themen informiert sein, bleibt ihm nichts anderes übrig, als nach populärwissenschaftlichen Werken oder nach Enzyklopädien zu greifen; möchte er ausschliesslich streng wissenschaftliche Werke lesen, würde er nicht lange genug leben, um einen allgemeinen Überblick über die Welt, in der er lebt, zu gewinnen.

Für jeden gebildeten Menschen wird es stets besonders interessant sein, über ein minimales Kenntnis der greifbaren Strukturen, die uns umgeben, zu verfügen, wie etwa die akustischen Erscheinungen, unter vielen anderen Themen. Wer hat sich nicht ab und zu die Frage gestellt, wie es möglich sei, dass man inmitten von lautem Geschwätz dem Gespräch einer ganz bestimmten Person folgen kann? Wie ist es möglich, dass eine einzelne Schallplattenrille die gesamte Information enthält, die dem Schall verschiedener gleichzeitig erklingenden Musikinstrumenten entspricht? Oder auch: wie kommt es, dass man das Klopfen an die eigene Türe vom Klopfen an des Nachbarn Türe unterscheiden kann? Der aufmerksame Leser dieser Schrift wird unter vielen anderen Erklärungen auch Antworten zu diesen Fragen finden.

Gewisse gleiche Konzepte werden in verschiedenen Publikationen oft verschieden benannt und gewisse Begriffe werden auf verschiedene Konzepte angewandt. Die hier verwandte Terminologie ist so nützlich, wie jede andere, wenn sie nur streng eingehalten wird. Ich denke hiermit etwa an die Definitionen der Begriffe "Partialtöne", "Obertöne", "harmonische Töne" und so weiter, die von einem Autor zum anderen abweichen.

In Anbetracht der Tatsache, dass dieses Buch unter anderem auch an Personen gerichtet ist, die mit mathematischen Formeln nicht vertraut sind, wurde dieser Text so strukturiert, dass der Leser die einzelnen Formeln alle übergehen kann, wie wenn es sich um Randbemerkungen handelte, ohne dadurch das Verständnis des qualitativen Inhaltes opfern zu müssen. Die wenigen Kapitel, die dazu eine Ausnahme bilden, da sie sich gerade mit dem quantitativen Aspekt des Stoffes befassen, wurden gegen Ende des Buches eingebaut. So sind zum Beispiel die Integrale im Kapitel 'DER SATZ VON FOURIER' nicht wesentlich für das Verständnis dieses Satzes, sondern vielmehr eine Demonstration der Rechnungen, die es erlauben, diesen Satz auf gewisse periodische mathematische Funktionen anzuwenden. Die Zahlentafeln weisen 5 oder 6 Dezimalstellen auf, viele mehr, als nötig wären, um die Tatsachen zu erläutern. Diese geradezu unvernünftige Präzision ist denjenigen Lesern gewidmet, die einzelne Rechnungen nachvollziehen wollen oder prüfen wollen, ob sie den dargestellten Stoff richtig verstanden haben. Aus demselben Grund wurde darauf verzichtet, die letzte Ziffer zu runden. Nach dieser Regel würde zum Beispiel der Wert 1,712829 als 1,71282 belassen, anstatt ihn auf 1,71283 zu runden, was der gegebenen Zahl genauer entspräche. Durch die bemerkenswerte Bindung, die zwischen der Musik und der Mathematik stets bestanden hat, wird das 'DIE MUSIKALISCHEN TONLEITERN' genannte Kapitel, das den arithmetischen Zusammenhang zwischen den in der westlichen Musik gebrauchten Musiknoten erläutert, genügend gerechtfertigt. Viele der grossen Komponisten zeigten ein reges Interesse an der Mathematik und umgekehrt.

Heute gilt Sauveur als der eigentliche Begründer der Akustik als selbständige Wissenschaft. Es ist beeindruckend, dass diese Würde gerade einem Menschen zukommt, der mit einem mit dem Thema verbundenen körperlichen Mangel behaftet war: Sauveur war nämlich bis ins Alter von 6 Jahren taubstumm, was ihn offenbar dazu herausforderte, einen grossen Teil seiner intellektuellen Fähigkeiten dem eingehenden Studium der mit seinem Gebrechen zusammenhängenden physikalischen Fragen zu widmen. Bis zur Erscheinung des Buches "Die Lehre von den Tonempfindungen" von Helmholtz bildeten Sauveurs Schriften die solideste Basis der musikalischen Akustik. Andererseits bildet das Buch von Helmholtz die Grundlage der modernen Akustik, selbst wenn ein paar Dinge abgeändert wurden.

Der HISTORISCHE ÜBERBLICK soll uns einen Überblick über die Geschichte der musikalischen Akustik verleihen.

Die BIBLIOGRAPHIE beschränkt sich im Wesentlichen auf historisch relevante Bücher und erwähnt die heutzutage in Buchhandlungen erhältlichen Bücher im Allgemeinen nicht.

In den biographischen Angaben sollen die erwähnten Personen kurz kommentiert werden. Es wurden vor allem Personen ausgewählt, die nicht jedem wohlbekannt sind; in diesem Sinne fanden wir es unnötig, hier so berühmte Leute wie J.S. Bach oder Newton anzuführen.

Schliesslich kann das ALPHABETISCHE VERZEICHNIS, das sowohl als Personen-, wie als Sachregister funktioniert, manchem die Lektüre erleichtern, da dieses auf die Seiten verweist, auf denen die verschiedenen Personen oder Begriffe erwähnt, definiert oder erklärt werden.

EINFÜHRUNG

Ein MUSIKALISCHER TON ist durch seine Frequenz (Anzahl Schwingungen pro Sekunde) festgelegt. Er unterscheidet sich also von anderen Lauten durch seine Periodizität. Eine Musik-Note ist ein Name, der einem bestimmten Ton erteilt wird. Die Note kann einen Eigennamen haben (wie etwa Do, Re, Mi, oder C, D, E) oder durch ein abstraktes Symbol der internationalen musikalischen Notation vertreten sein.

Wie wir etwas weiter unten sehen werden, ist die Nomenklatur der Musiknoten nicht international. Wir werden hier aus praktischen und aus historischen Gründen die in den lateinischen Ländern übliche Notation gebrauchen, die ohne weiteres in die Deutsche Nomenklatur umbenannt werden kann. Schliesslich gilt Italienisch als die internationale Sprache der Musik. Diese Bennenung der Noten wird mitunter als Solmisation bezeichnet und geht auf Guido d'Arezzo zurück.

Dieses System wurde nicht von einem Tag auf den anderen erfunden. Bis ungefähr zum Jahr 1000 wurden die liturgischen Gesänge in Form sogenannter Neumen niedergeschrieben, die vor allem aus mnemotechnischen Angaben über die Tonhöhenveränderungen bestanden, ohne jegliche rhythmischen Angaben, also ohne über die Dauer jedes einzelnen Tones zu informieren.

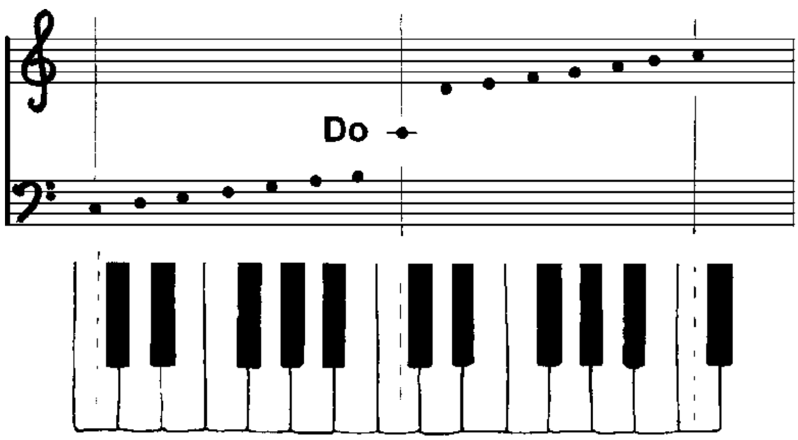
Offenbar führte der Mönch Hucbald im IX Jh. die erste horizontale Linie ein, die sich später zu unserem Notensystem aus fünf Linien entwickeln würde. Hucbald wird ferner die Vervollständigung einer alphabetischen Notation zugeschrieben, bei welcher er eine siebte Note mit dem griechischen Buchstaben Gamma bezeichnete. Daher stammt offenbar der italienische Name *gamma* für die Tonleiter, oder auch für eine einzelne Oktave aus derselben. Auf französisch haben wir auch das Wort *gamme*.

Einem anderen Mönch, Guido d'Arezzo, wird die Einführung des Notensystems auf vier Linien zugeschrieben. Von ihm stammt auch die heutzutage in den lateinischen Ländern gebräuchliche Nomenklatur der Noten, die von einer Hymne an Sankt Johannes den Täufer abgeleitet wurden:

UT *queant laxis*
RE*sonare fibris*
MI*ra gestorum*
FA*muli tuorum*
SOL*ve polluti*
LA*bii reatum*
Sancte I*ohannes*

Mit der Ausnahme Frankreichs ersetzten alle Länder später das Ut durch das Do. Auch scheint sich der Name Si erst ab dem XVI Jh. durchgesetzt zu haben. Erst im XVI Jh. wurden sich die Musiker über das heutige Fünfliniensystem einig und Frescobaldi benutzte offenbar noch ein System mit acht Linien.

Das Fünfliniensystem wird stets von einem sogenannten Schlüssel eingeleitet, von dem wir die Stellung der Note Do (oder C) ableiten können. Hier seien nur die beiden wichtigsten Schlüssel angegeben,



Klaviatur

nämlich der Sol-Schlüssel (G-Schlüssel), 𝄞, und der Fa-Schlüssel (F-Schlüssel), 𝄢. In Klavierpartituren, die üblicherweise aus zwei Liniensystemen bestehen, einem für jede Hand, entspricht der Sol-Schlüssel meist der rechten, der Fa-Schlüssel meist der linken Hand, so dass die Note Do zwischen die beiden Liniensysteme auf eine gemeinsame Hilfslinie zu liegen kommt.

Um die Figur nicht zu überlasten wurden nur die den weissen Tasten entsprechenden Noten aufgezeichnet. Zwischen den Tasten Do und Re befindet sich eine schwarze Taste, die zugleich das um einen Halbton erhöhte Do, das Do #, und das um einen Halbton erniedrigte Re, Re ♭ darstellt. In der musikalischen Notation wird das entsprechende Zeichen, die Diesis, #, respektive das Vertiefungszeichen, ♭, der Note vorangestellt[2]. Dasselbe geschieht mit dem Re #, das zugleich Mi ♭ ist, usw. Ein weiteres Zeichen, das Auflösungszeichen (♮), hebt die Änderung der Note wieder auf. Nun müssen wir uns fragen: Was hat es denn für einen Sinn, zwei gleiche Noten mit zwei verschiedenen Namen zu benennen? Ganz einfach: die beiden Noten sind gar nicht gleich, obwohl sie auf einer Klaviertastatur durch die gleiche Taste vertreten werden. Wie ist das zu verstehen?

Die gleichmässig temperierte Tonleiter (besser: gleichmässig temperierte Stimmung), die heute fast ausschliesslich zum Stimmen der Tasteninstrumente angewandt wird ist eine verhältnismässig neue Errungenschaft und Johann Sebastian Bach schuf eine der brillantesten praktischen Anwendungen dieses Systems mit seinem fundamentalen Werk "Das Wohltemperierte Klavier", das aus zwei Sätzen von je 24 Präludien und Fugen in allen verschiedenen Dur- und Molltonarten aufgebaut ist.

Was die Tonleitern von Pythagoras und Zarlino anbelangt, um nur die beiden wichtigsten zu nennen, so war es unmöglich ein Tasteninstrument so zu stimmen, dass darauf Musik in allen verschiedenen Tonarten befriedigend wiedergegeben werden konnte. Schon bald einmal wurden angenäherte Stimmsysteme, sogenannte Temperaturen, entwickelt, die es erlaubten, das Do # mit dem Re ♭, auf eine gleiche Taste zu vereinen, usw. Solche Systeme ermöglichten die befriedigende musikalische Wiedergabe in den vier oder fünf üblichsten Tonarten. Die Einführung der gleichmässig temperierten (oder gleichstufig temperierten) Stimmung, die schon früher vorgeschlagen worden war, verdanken wir hauptsächlich J.S. Bach und Werckmeister.

Die mathematische Konstruktion der gleichmässig temperierten Tonleiter wird folgendermassen vorgenommen:

Man geht von einer beliebigen Note der Tonleiter aus, beispielsweise vom La (A), das auf die gewünschte Höhe gestimmt wird, beispielsweise 440 Schwingungen pro Sekunde (440 Hz), in unserer Nomenklatur La (3) benannt. Um die Schwingungszahl jeder einzelnen der darauffolgenden Noten zu bestimmen, wird nacheinander die Schwingungszahl jeder Note mit der Konstanten k multipliziert, wobei k die zwölfte Wurzel aus 2 (1,05946...) darstellt, also jene Zahl, die zwölf mal mit sich selber multipliziert die Zahl 2 ergibt. Man sagt, 2 sei die zwölfte Potenz von k. So finden wir nach 12

[2] Da ich die entsprechenden Symbole nicht in den mit Windows mitgelieferten Schriften gefunden habe, habe ich ein paar der Symbole des Schriftsatzes Bach von Dr. Yo Tomita in die Word-Datei aufgenommen, mit freundlicher Bewilligung des Autors.

Schritten einen Ton, der genau der doppelten Schwingungszahl des Ausgangstons entspricht. Diese Note heisst Oktave des Ausgangstons und erhält bis auf einen Index oder ein graphisches Kennzeichen denselben Namen, wie die Ausgangsnote. In unserem Beispiel finden wir das La mit 880 Schwingungen pro Sekunde, das La (4).

Offensichtlich erhält man auf analoge Weise eine um einen Halbton niedrigere Note, indem man die Ausgangsnote durch die Konstante k dividiert. Ausgehend vom La (3) mit 440 Schwingungen pro Sekunde finden wir durch Anwendung dieses Verfahrens die folgenden Noten in der Oktave zwischen Do (3) und Do (4):

Note	Frequenz
Si # / Do	261,62
Do # / Re ♭	277,18
Re	293,66
Re # / Mi ♭	311,12
Mi / Fa ♭	329,62
Fa / Mi #	349,22
Fa # / Sol ♭	369,99
Sol	391,99
Sol # / La ♭	415,30
La	440
La # / Si ♭	466,16
Si / Do ♭	493,88
Si # / Do	523,25

Alle Noten ausserhalb dieser Grundoktave bilden Oktaven zu einer der Noten der Tafel; ihre Frequenzen sind also stets das Produkt oder der Quotient der Frequenz einer Note dieser Grundoktave mit 2, 4, 8, usw. Dies ist die mathematische Konstruktion der gleichmässig temperierten Tonleiter. Wie wir allerdings später sehen werden, ist dies nicht das System, das beim Stimmen eines Klaviers angewandt wird, da sich die Fehler zu stark anhäufen würden.

Wie schon gesagt, ist die Nomenklatur der Noten in den verschiedenen Ländern nicht einheitlich. Die folgende Tafel fasst die Nomenklatur in den verschiedenen Sprachen[3] kurz zusammen:

	Italienisch	Französisch	Deutsch	Englisch
Do	Do	Ut	C	C
Re	Re	Ré	D	D
Mi	Mi	Mi	E	E
Fa	Fa	Fa	F	F
Fa ♯	Fa diesis	Fa dièse	Fis	F ♯
Sol ♭	Sol bimolle	Sol bémol	Ges	G ♭
Sol	Sol	Sol	G	G
La	La	La	A	A
Si ♭	Si bimolle	Si bémol	B	B ♭
Si	Si	Si	H	B

Auch die Hinweise auf die Oktave, welcher eine bestimmte Note angehört, sind nicht einheitlich festgelegt. Hier werden wir folgende Abmachung treffen: Das zentral gelegene Do auf der Klaviertastatur mit der Frequenz 261,625 Hz (Schwingungen pro Sekunde) werden wir als Do (3) bezeichnen. Diesen Index werden wir auf alle Noten zwischen Do (3) und Si (3) anwenden. Tieferen Oktaven entsprechen tiefere Indizes und umgekehrt. Auf diese Weise entfaltet sich die Tastatur des Klaviers über alle in der Musik üblichen Frequenzen, die etwa von 20 bis zu 4000 Schwingungen pro Sekunde reichen.

[3] Die in Deutschland und den angelsächsischen Ländern üblichen Notationen haben ihren Ursprung bereits im IX Jh. Das Si und das Si ♭ wurden anfänglich beide mit dem Buchstaben 'b' bezeichnet, wobei für das Si ein 'b' mit rechteckigem Profil verwandt wurde, während das Si ♭ durch ein rundes 'b' dargestellt wurde. Das rechteckige 'b', welches das Si vertrat wurde später in Deutschland mit einem 'h' verwechselt. Eine andere Variante der rechteckigen Version des Buchstabens 'b' führte zum Auflösungszeichen ♮ und eine weitere zum Kreuz ♯.

Note	Frequenz	Note	Frequenz
		Do (3)	261,625
		Do #	277,182
		Re	293,664
		Re #	311,126
		Mi	329,627
		Fa	349,228
		Fa #	369,994
		Sol	391,995
		Sol #	415,304
La (-1)	27,500	LA (3)	440,000
La #	29,135	La #	466,163
Si	30,867	Si	493,883
Do (0)	32,703	Do (4)	523,251
Do #	34,647	Do #	554,365
Re	36,708	Re	587,329
Re #	38,890	Re #	622,253
Mi	41,203	Mi	659,255
Fa	43,653	Fa	698,456
Fa #	46,249	Fa #	739,988
Sol	48,999	Sol	783,990
Sol #	51,913	Sol #	830,609
La (0)	55,000	La (4)	880,000
La #	58,270	La #	932,327
Si	61,735	Si	987,766
Do (1)	65,406	Do (5)	1046,50
Do #	69,295	Do #	1108,73
Re	73,416	Re	1174,65
Re #	77,781	Re #	1244,50
Mi	82,406	Mi	1318,51
Fa	87,307	Fa	1396,91
Fa #	92,498	Fa #	1479,97
Sol	97,998	Sol	1567,98
Sol #	103,826	Sol #	1661,21
La (1)	110,000	La (5)	1760,00
La #	116,540	La #	1864,65
Si	123,470	Si	1975,53
Do (2)	130,812	Do (6)	2093,00
Do #	138,591	Do #	2217,46
Re	146,832	Re	2349,31
Re #	155,563	Re #	2489,01
Mi	164,813	Mi	2637,02
Fa	174,614	Fa	2793,82
Fa #	184,997	Fa #	2959,95
Sol	195,997	Sol	3135,96
Sol #	207,652	Sol #	3322,43
La (2)	220,000	La (6)	3520,00
La #	233,081	La #	3729,31
Si	246,941	Si	3951,06
		Do (7)	4186,00

Schliesslich sei erwähnt, dass in der internationalen musikalischen Notation die Darstellung jeder Note ihre Dauer im Verhältnis zu derjenigen der anderen angibt, je nachdem, ob sie als GANZE NOTE (𝅝), HALBNOTE (𝅗𝅥), VIERTELNOTE (♩), ACHTELNOTE (♪), SECHZEHNTELNOTE (𝅘𝅥𝅯), usw. auftritt. Die Unterbrechungen zwischen den Noten werden mit den sogenannten Pausenzeichen angezeigt. Der ganzen Note entspricht hier das Zeichen 𝄻, den Noten zwischen der Halbnote und der Sechzehntelnote entsprechen nacheinander die Zeichen 𝄼, 𝄽, 𝄾 und 𝄿. Die Lautstärke wird meist mit den Symbolen "pppp" bis "ffff" angegeben.

Dieses Systems, das wir nur kurz skizziert haben, weist vor allem zwei Beschränkungen auf: Gewisse Intervalle, wie etwa Vierteltöne oder Sechsteltöne können nicht dargestellt werden und das System erlaubt es nicht, Hinweise auf die Klangfarbe der dargestellten Töne zu machen. Die Klangfarbe ist diejenige Eigenschaft eines Tons, die es uns erlaubt, ihn von einem Ton derselben Höhe, die von einem anderen Instrument erzeugt wurde, zu unterscheiden. Ein von einer Violine erzeugtes La unterscheidet sich also von dem auf einer Flöte erzeugten La durch die Klangfarbe. Später werden wir sehen, dass sich auch die verschiedenen durch die menschliche Stimme erzeugten Vokale grundsätzlich in ihrer Klangfarbe unterscheiden. Gewisse romantische und post-romantische Komponisten versuchten die Beschränktheit der musikalischen Notation durch oft suggestive und poetische Interpretationshinweise zu ergänzen. Ein schönes Beispiel dazu finden wir in der sechsten Klaviersonate, op. 62, die Scriabin um 1911 erschuf. Da heisst es unter anderem: *"mystérieux, concentré", "étrange, ailé", "avec une chaleur contenue", "souffle mystérieux", "onde caressante", "concentré", "le rêve prend forme", "l'épouvante surgit", ...*

Ein Vorgang, der sich nach einem bestimmten Zeitabschnitt T stets identisch wiederholt, heisst PERIODISCH. Die PERIODE T ist die Zeit, die zwischen zwei gleichen Zuständen im Ablauf des Vorganges verstreicht. Beispiele periodischer Vorgänge sind die aufeinanderfolgenden Mondphasen, die Bewegung des Pendels einer Uhr, der Gang eines Benzinmotors (falls dieser mit gleichbleibender Geschwindigkeit läuft) oder die Rotation eines Mühlrades.

Im Gebiet des hörbaren Klangs entsprechen die MUSIKALISCHEN TÖNE grundsätzlich periodischen Schwingungen (auch Vibrationen), während die nicht periodischen Schwingungen den sogenannten GERÄUSCHEN oder dem LÄRM entsprechen. Wie wir später sehen werden, existiert keine strenge Trennung zwischen den musikalischen Tönen und den Geräuschen.

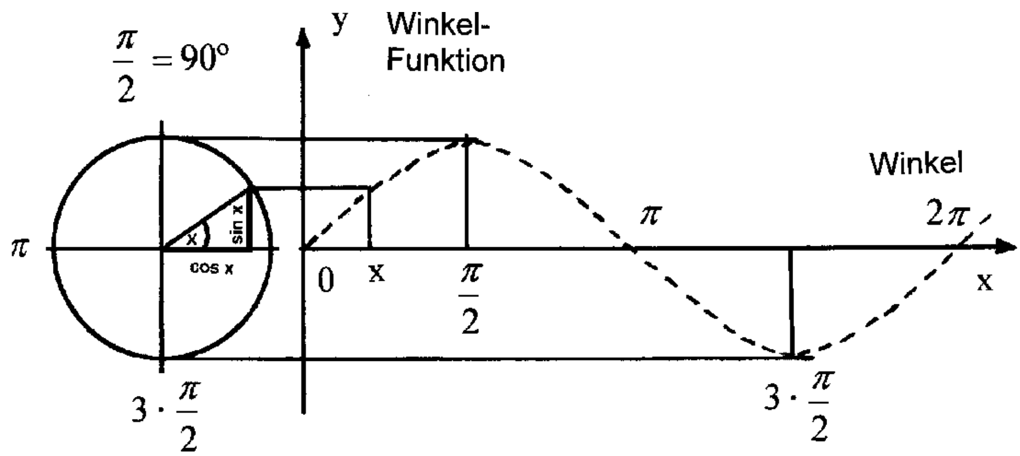
Offensichtlich hat ein Vorgang mit der Periode T auch die Perioden 2T, 3T, 4T, ... Unter allen möglichen Perioden hat stets die kleinste den Vorrang.

Die Frequenz f eines periodischen Vorganges ist der Reziprokwert (auch: Kehrwert) der Periode, also $\frac{1}{T}$. Die im Zusammenhang mit Frequenzen wichtigste Einheit ist $\frac{1}{\text{Sekunde}} = 1\,\text{Hz}$ (von Heinrich Hertz). Dreht sich beispielsweise der Rotor eines Motors 5 Mal in der Sekunde, ha dieser Vorgang eine Periode von 0,2 Sekunden und eine Frequenz von $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}2\,\text{Sekunden}} = 5\,\text{Hz}$. Bewegt sich ein Massenpunkt[4] auf einer Strecke periodisch um einen Gleichgewichtspunkt hin und her, nennt man das eine SCHWINGUNG. Den Abstand des Massenpunktes vom Gleichgewichtspunkt zu einem bestimmten Zeitpunkt oder PHASE des schwingenden Massenpunktes nennt man ELONGATION. Die grösstmögliche Elongation wird als AMPLITUDE bezeichnet. Manchmal wird der Abstand zwischen den extremen Positionen des Massenpunktes als DOPPELTE AMPLITUDE bezeichnet.

Unter allen möglichen Schwingungen, die äusserst komplexe Gestalten annehmen können, nennt man die einfachste und zugleich wichtigste die HARMONISCHE SCHWINGUNG oder SINUSSCHWINGUNG. Es handelt sich dabei um die Vertikalprojektion eines Kreispunktes bei einer gleichmässigen Rotation auf eine zur Kreisebene senkrechte (auch: normale) Ebene. Oder etwas bildlicher ausgedrückt: wenn wir ein senkrechtes Rad, das sich regelmässig dreht von oben beleuchten, beschreibt der Schatten eines seitwärts auf dem Reifen angebrachten Punktes auf dem Boden eine harmonische Schwingung. Auch ein Gewicht, das an einer Spiralfeder aufgehängt wird beschreibt eine Sinusschwingung, wenn wir mal von dem Energieverlust[5] durch Reibung absehen. Graphisch kann jede Schwingung in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt werden, in dem die Abszissenachse (waagerechte oder x-Achse) der Zeit, die Ordinatenachse (senkrechte oder y-Achse) der Elongation entspricht. Die Elongation in jedem Moment wird als Funktion der Zeit aufgefasst. Die in der Figur wiedergegebene graphische Darstellung einer Si-

[4] Der Massenpunkt ist ein mathematisches Modell zur Erklärung physikalischer Vorgänge.
[5] Die Energie geht in Wirklichkeit nicht verloren; sie wird nur in andere Energieformen umgewandelt, vor allem in Wärmeenergie.

nusschwingung ist mit der Darstellung der Winkelfunktion Sinus (Symbol: sin) identisch.



Die Sinuskurve

In der Figur kann man ein rechtwinkliges Dreieck erkennen, dessen senkrechte Kathete dem sin des Winkels x, und dessen waagrechte Kathete dem Kosinus (Symbol: cos) entspricht. Die Hypotenuse entspricht dem Kreisradius.

Die meistgebräuchlichen Winkelmasse sind der GRAD und der RADIANT (Symbol: rad). Der Kreis wird in 360° (360 Grad) unterteilt[6]; ein rechter Winkel entspricht also 90°.

Beim System der Radianten wird der Winkel als Quotient zwischen dem entsprechenden Kreisbogen und dem Radius gemessen. Daher wird dieses Mass mitunter auch BOGENMASS genannt. Bei diesem System entspricht der Kreis einem Winkel von $2 \cdot \pi \cdot$rad (π ist der Quotient zwischen den Umfang und dem Durchmesser jedes beliebigen Kreises, eine transzendente Zahl mit dem angenäherten Wert von 3,141592653589...).

$360^o = 2 \cdot \pi \cdot \text{rad}$

Also hat 1 rad den angenäherten Wert von 57,295°.

Bei der Darstellung musikalischer Klänge wird üblicherweise ein Koordinatensystem eingesetzt, bei dem der Abszissenachse die Zeit t entspricht, die bei der Sinusschwingung proportional zum überstrichenen Winkel x ist, der in diesem Zusammenhang PHASENWINKEL genannt wird. Die Ordinatenachse, y, entspricht der Elongation zu jedem Zeitpunkt t. Man bezeichnet diese graphische Darstellung des Schalls als PHONOGRAPHISCHE KURVE. Bezeichnen wir den in einer Sekunde überstrichenen Winkel mit ω[7], ergibt sich

[6] Das System, bei dem der Kreis in 400° (sogenannte Neugrade) unterteilt wird, scheint sich in der Praxis nicht durchzusetzen.
[7] Omega.

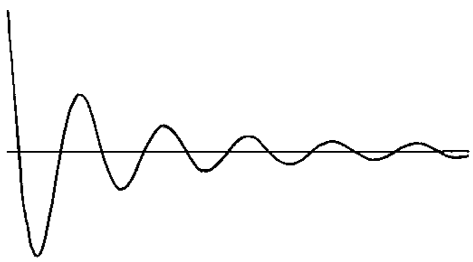
$x = \omega \cdot t$

Der Radius des Einheitskreises beträgt 1 und entspricht der grösstmöglichen Elongation, also der Amplitude der einheitlichen Sinuskurve. Wenn wir den Radius unseres Kreises auf den Wert A bringen, wird sich jeder Kurvenpunkt im gleichen Verhältnis wie der Radius verändern, und wir finden für die Elongation in einem beliebigen Zeitpunkt t, also für den Ordinatenwert, der dem Punkt t der Abszissenachse entspricht, den Ausdruck:

$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$

In dieser Formel stellt A zugleich den Radius des Kreises und die Amplitude (grösste Elongation) der Schwingung gleichzeitig dar.

Die Amplitude der Schwingung eines Objekts, wie etwa einer Stimmgabel, nimmt allmählich ab, da ein Teil der Energie durch die Reibung der Materialien in Wärme verwandelt wird. Die Frequenz der Schwingung verändert sich jedoch nicht, da die Frequenz eine Charakteristik des schwingenden Objekts ist und in diesem Zusammenhange als EIGENFREQUENZ bezeichnet wird. Diese allmähliche Abnahme der Amplitude, die wir täglich immer wieder beobachten können, zum Beispiel bei einem Klavierton, der allmählich abnimmt oder bei der Schwingung eines Pendels, wird als PFUNG bezeichnet. Die Dämpfung kann durch Energiezufuhr kompensiert werden. Man spricht dann von einer UNTERHALTENEN SCHWINGUNG. Die Wirkung derselben ist optimal, wenn sie im Rhythmus, der der Eigenfrequenz



Dämpfung einer Schwingung

unseres schwingenden Körpers entspricht, zugeführt wird. Aber auch eine leicht von der Eigenfrequenz abweichende Frequenz vermag die Schwingungen zu unterhalten, da die beiden Objekte, das schwingende und dasjenige, das ihm Energie zuführt, ein gekoppeltes System bilden, bei dem allerdings Energie verloren geht.

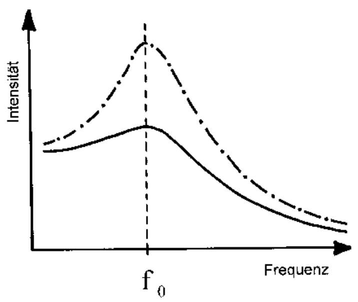
Die Figur *'Wirksamkeit der Energiezufuhr'* stellt graphisch den Wirkungsgrad der Energiezufuhr mit der Frequenz f auf ein Objekt mit der Eigenfrequenz f_0 dar, wobei das Resultat vom Ausmass der Dämpfung abhängt. Hier wurde eine Kurve für eine mittlere und eine andere für eine kleine Dämpfung gezeichnet.

Die Erscheinung der Eigenschwingung tritt etwa dann auf, wenn wir ein in einem Loch festgefahrenes Auto zu befreien versuchen. Haben wir nicht genug Kraft, um es auf Anhieb hinauszufahren, bringen wir es in eine schwingende Bewegung, bis die Amplitude der Schwingung gross genug ist, um es aus dem Loch zu stossen.

Wird die Energie mit der Eigenfrequenz des schwingenden Objekts zugeführt, spricht man von RESONANZ. Resonanz kann extrem gefährlich werden, wenn sie bei gewissen Maschinen oder in der Architektur auftritt. Die Literatur weist uns auf Fälle hin, bei denen eine Brücke unter einer Gruppe Soldaten, die im Gleichschritt über sie hinwegmarschierten, einstürzte, obwohl sie für ein Mehrfaches des Gewichts vorgesehen war, da sie die Füsse in der Eigenfrequenz der Brücke absetzten.

Später werden wir auch sehen, dass es schwingende Körper mit mehreren Eigenfrequenzen gibt.

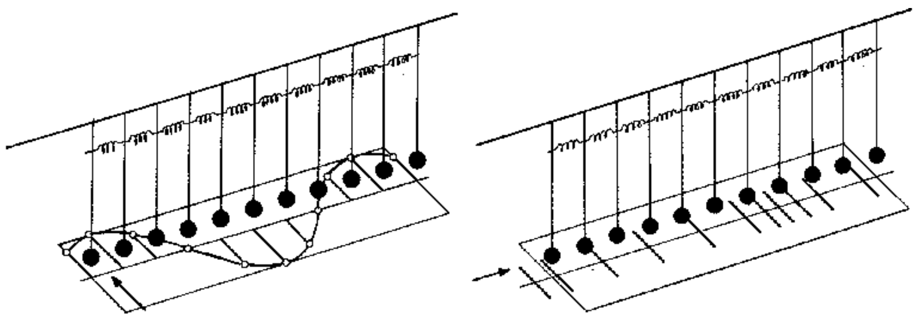
In jenen speziellen Fällen, bei denen die für den Unterhalt nötige Energiezufuhr durch die Schwingung selber kontrolliert wird, spricht man von RÜCKKOPPLUNG. Ein besonders wichtiges Beispiel von Rückkopplung, das mit unserem Thema zusammenhängt, bildet die von einem Bogen gestrichenen Violinsaite. Um diese Art Bewegung besser zu verstehen wollen wir ein Modell gebrauchen: man stelle sich ein Förderband vor, so wie es bei der Kasse des Supermarkts zur Anwendung kommt. Auf dieses Band legen wir ein Objekt, zum Beispiel ein Paket, das über eine Spiralfeder mit einen starren Haken verbunden ist. Wird das Fliessband in Bewegung gebracht, bewegt sich das Paket mit ihm fort, wobei die Feder mehr und mehr gespannt wird, bis die Kraft gross genug ist, um das Paket ruckartig in Richtung des Hakens zurückzureissen. Fast augenblicklich haftet das Paket wieder fest auf dem Band und bewegt sich mit ihm fort. Die Haftreibung ist wesentlich grösser als die Gleitreibung. Der Vorgang wiederholt sich periodisch.



Wirkung der zugeführten Energie

Stellen wir den Abstand unseres Objekts vom Haken als Funktion der Zeit dar, erhalten wir eine Folge von Dreiecken. Im Falle der Violine entspricht die Saite unserem Paket und der Bogen entspricht dem Fliessband. Und die Kurven der von Streichinstrumenten hervorgebrachten Töne weisen eine ähnliche Zackenstruktur auf, wie die graphische Darstellung unseres Modells. Später wird diese Art Kurve noch ausführlicher besprochen werden.

Wird eine schwingende Bewegung im Raum von einem Partikel zur anderen fortbewegt, spricht man von einer WELLE. Betrachten wir in der Fortbewegungsrichtung einer Welle zwei bestimmte schwingende Partikeln, so stimmen deren Phasen nur dann überein,



Querwellen und Längswellen.

wenn ihr Abstand dem von der Welle in der Periode T zurückgelegten Weg (oder einem ganzzahligen Mehrfachen desselben) gleichkommt.

Die beiden wichtigsten Arten mechanischer Wellen sind die QUERWELLEN und die LÄNGSWELLEN. Um beide Sorten darzustellen, verwenden wir ein einfaches Modell. Stellen wir uns zunächst eine Achse vor, auf der in gleichen Abständen eine Serie Pendel, bestehend aus einem steifen, vertikalen Stiel und einer Stahlkugel, so angebracht sind, dass sie sich nur quer zur Achse bewegen können. Die Stiele der Pendel sind untereinander in einer gewissen Höhe durch Spiralfedern oder Gummibändern verbunden (gekoppelt). Geben wir einem der Pendel einen seitlichen Anstoss, können wir das Entstehen einer Querwelle beobachten, die durch eine Folge von seitlichen Schwingungen charakterisiert ist. Lasset uns nun unser Modell in der Weise verändern, dass sich die Pendelstiele nur in der Ebene bewegen können, die sie mit der Achse gemeinsam haben. Geben wir nun einem der Pendel einen Impuls in Richtung der Achse, entsteht eine durch veränderliche Dichten in der Bewegungsrichtung charakterisierte Längswelle.

Sowohl Längs- wie auch Querwellen können sich in festen Medien fortpflanzen. Gase hingegen übermitteln hauptsächlich Längswellen. Mechanische Wellen können sich in eindimensionalen Medien fortpflanzen, wie etwa eine Welle, die sich auf einer Saite bewegt. Die durch einen fallenden Stein auf einer ruhigen Wasseroberfläche erzeugte Welle pflanzt sich in der grundsächlich zweidimensionalen Umgebung der Wasseroberfläche fort. Die akustischen Wellen aber pflegen sich frei im dreidimensionalen Raum fortzubewegen. Die WELLENLÄNGE ist der kleinste Abstand zwischen zwei Partikeln, die sich in derselben Schwingungsphase befinden.

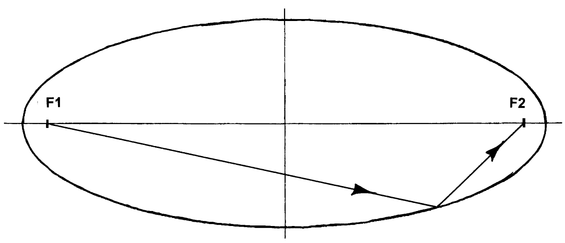
Die AUSBREITUNGSGESCHWINDIGKEIT v einer Welle ist die Geschwindigkeit, mit der sich eine beliebige Phase fortbewegt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird als Produkt der Frequenz f und der Wellenlänge L berechnet:

$$v = f \cdot L = \frac{L}{T}$$

Wellen, die durch Sinus-Schwingungen (harmonische Schwingungen) erzeugt werden, nennt man SINUS-WELLEN.

Wirft man einen Stein auf eine ruhige Wasseroberfläche, wird die vom Stein erzeugte Auf- und Abwärtsbewegung auf alle Partikeln der Umgebung übertragen und es bildet sich eine KREISWELLE. Wie schon Huygens beobachtete, ist die Kreisform das Resultat sämtlicher durch jeden einzelnen Punkt der Wasseroberfläche erzeugten Wellen. Streuen wir kleine Korkkügelchen auf die Wasseroberfläche, sehen wir leicht ein, dass die Bewegung vom Zentrum nach aussen nur scheinbar ist, schwingen doch die einzelnen Partikel ausschliesslich in senkrechter Richtung.

So wie sich die Wasserwellen auf der Seeoberfläche kreisförmig ausbreiten, haben die akustischen und die elektromagnetischen (Licht, Rundfunk,...) Wellen im Raum die Tendenz, sich kugelförmig auszubreiten, werden sie nicht künstlich gerichtet. Die Kugel bildet die dreidimensionale Analogie zum (zweidimensionalen) Kreis. Gerichtet können die Wellen etwa mit einer Art Trichter werden, der eine gewisse Analogie zu dem im Bereiche der Optik gebräuchlichen Parabolspiegel aufweist.



Spiegelungen im Innern einer Ellipse

Betrachtet man ausschliesslich den Teil einer Welle, der sich auf einer bestimmten Geraden befindet, spricht man von einem STRAHL.

Alle Arten von Wellen, seien es Längs- oder Querwellen, mechanische oder elektromagnetische Wellen, weisen gewisse gemeinsame Eigenschaften auf, von denen die wichtigsten REFLEXION (Spiegelung), REFRAKTION (Brechung) und DIFFRAKTION (Beugung) heissen.

Ändert ein Strahl an der Grenze zwischen zwei Substanzen (zum Beispiel Luft und Wasser) ihre Ausbreitungsrichtung, ohne von einem Stoff in den anderen zu dringen, spricht man von REFLEXION. In allen Fällen gilt das physikalische Gesetz: Der Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallswinkel[8].

Es muss zwischen ZWEI KATEGORIEN VON REFLEXION unterschieden werden: Die erste Kategorie entspricht demjenigen Fall unseres Pendel-Modells, bei dem sich hinter der letzten Kugel eine starre Wand befindet, während bei der zweiten Kategorie die letzte Kugel auf keinen Widerstand stösst. Die beiden Fälle unterscheiden sich durch eine Phasendifferenz.

Dringt der auftreffende Strahl durch die Substanzgrenze, meist unter einem Richtungswechsel, spricht man von REFRAKTION. Das von Snellius[9] entdeckte Brechungs-Gesetz ist das folgende: der Sinus des Einfallswinkels verhält sich zum Sinus des Refraktionswinkels wie die entsprechenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Welle in den beiden Substanzen.

Meist finden beide Erscheinungen gleichzeitig statt: ein Teil des Strahls wird reflektiert, während ein anderer Teil gebrochen (refraktiert) wird.

Die Ebene, die den eintreffenden Strahl und den reflektierten Strahl enthält steht im Auftreffpunkt senkrecht zur Substanzgrenze und enthält ebenfalls den refraktierten Strahl.

DIFFRAKTION findet statt, wenn eine Welle neben einem Hindernis vorbei oder zwischen zwei Hindernissen hindurch muss. Wir können uns ein anschauliches Bild von der Diffraktion machen, wenn wir eine Wasserwelle beobachten, die gegen eine Mauer prallt, die nur durch eine kleine Spalte unterbrochen ist: auf der anderen Seite des Spaltes entsteht eine Fächerförmige Wellenstruktur.

In einer homogenen Umgebung pflegen sich die Wellen als konzentrische KUGELWELLEN fortzupflanzen. Daher kommt es, dass sich die Intensität eines Geräusches oder von Licht zum Quadrat des Abstandes von der Quelle umgekehrt proportional verhält, da die Oberfläche einer Kugel proportional zum Quadrat ihres Radius zunimmt.

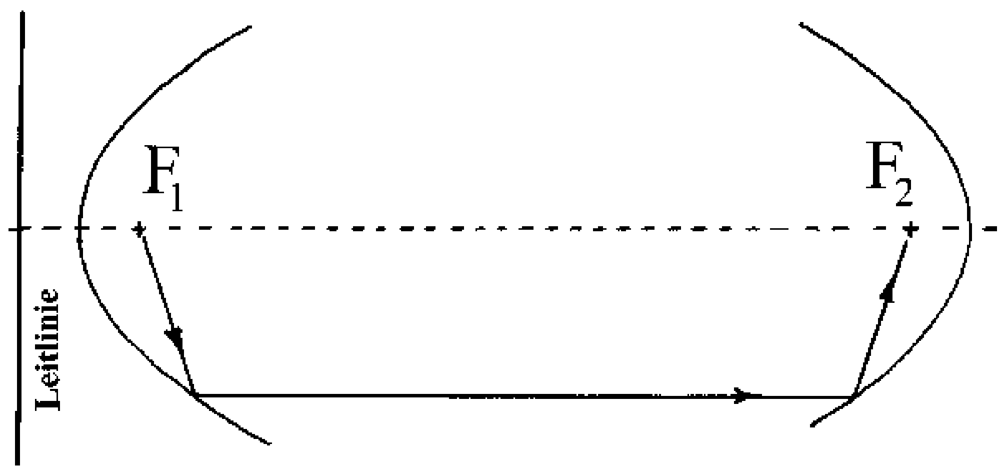
Eine Welle, die von einer grossflächigen Platte abgestrahlt wird mitunter als FLACHE WELLE bezeichnet und kann mit einer Kugelwelle mit sehr grossem Radius verglichen werden. Ein gutes Model

---

[8] Einfalls- und Ausfallswinkel werden zwischen dem Strahl und der Senkrechten zur Substanzgrenze auf dem Auftreffpunkt gemessen.
[9] Auch Willebrord Snel van Royen genannt.

einer flachen Welle ist die im Inneren eines Rohres fortgepflanzte Schallwelle. Eine flache Welle im strengen Sinne weist auf dem gesamten zurückgelegten Weg praktisch keine Energieverluste auf.

Durch die Eigenschaften der Fortpflanzung der Schallwellen ergeben sich viele Analogien zwischen der Akustik und der Optik. So spiegelt sich etwa der im Brennpunkt eines Rotationsparaboloids[10] erzeugte Ton an der Innenfläche des Paraboloids und pflanzt sich in Form von parallelen Strahlen fort, wie eine flache Welle. Genau gleich wie bei der Parabolantenne des Fernsehens. Ein zweites Paraboloid kann symmetrisch zum ersten so aufgestellt werden, dass die Schallwellen in dessen Brennpunkt zusammentreffen, wo sie mit einem Mikrophon abgefangen werden können.



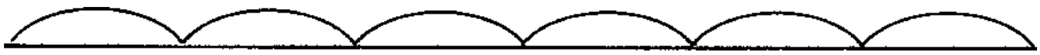
Seit der Renaissance sind verschiedene Kuppeln von Kathedralen bekannt, die es dank ihrem elliptischen Querschnitt erlauben, dass zwei in gegenüberliegenden Brennpunkten stehende Personen sich leise unterhalten können, während die Umstehenden nichts von ihrem Gespräch mitbekommen. Man spricht manchmal von Flüstergewölben.

Diese beiden Beispiele erinnern an entsprechende auf die Reflexion begründete optische Experimente. Auch zu den refraktären Eigenschaften des Lichtes gibt es analoge akustische Erscheinungen. Ein hervorragendes Beispiel hierfür bilden etwa die sogenannten akustischen Linsen. Wird etwa eine Schallquelle neben einen mit dem geeigneten Gas gefüllten Kinderballon aufgestellt, so wird man

[10] Eine Parabel ist die Menge aller Punkte die von einem gegebenen Punkt (dem Brennpunkt) und einer gegebenen Geraden (der Leitlinie) je den gleichen Abstand haben. Jeder Strahl durch den Brennpunkt wird an der Parabel als ein zur Leitlinie normaler (senkrechter) Strahl reflektiert. Wird die Parabel um ihre Achse (die durch den Brennpunkt gehende Normale zur Leitlinie) gedreht, entsteht das Rotationsparaboloid.

diesen Ton in einer dem Ballon gegenüberliegenden Zone mit höchster Intensität vernehmen: hier wirkt der Ballon wie eine Annäherung an eine bikonvexe Linse.

Die Fortpflanzung einer Schallwelle auf einem gefrorenen Teich bildet ein anderes schönes Beispiel: Der Schall ist in einem wesentlich grösseren Abstand hörbar als dies etwa im Sommer auf einer Landstrasse der Fall wäre. Die Erklärung ist einfach: Zuerst werden die Wellen auf der Eisfläche gespiegelt. Diejenigen Strahlen, die bainahe horizontal verlaufen werden in den wärmeren Luftschichten als den unmittelbar an das Eis angrenzenden gebrochen, so dass sie später wieder auf der Eisfläche gespiegelt werden. Auf diese Weise entspricht der Energieverlust der Menge der Strahlen, die sich zwischen zwei Ebenen fortbewegen, also ungefähr demjenigen einer Kreiswelle.



Ein akustischer Effekt, den wir in seiner optischen Analogie dank der grossen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts nicht beobachten können ist der sogenannte NACHHALL oder REVERBERATION. Der Nachhall wird durch die wiederholte Reflexion der Schallwellen an den Wänden eines Raumes erzeugt; seine Dauer hängt von der Absorption der Schallwellen an den Wänden und von der Gestalt des Raumes ab. Die Dauer des Nachhalles, die willkürlich auf die Zeit festgelegt ist, die verstreicht, bis der erzeugte Klang 60 dB[11] an Intensität verloren hat, bildet eine wichtige Charakteristik der Konzertsäle. Wie wir später sehen werden, entspricht die Abnahme des Schalls um 60 dB dem millionstel Teil der Lautstärke.

Je nach Bedarf des Saals (Symphoniekonzert, Theater, eine Rede,...) ist ein längerer oder kürzerer Nachhall erwünscht, der in gewissen Fällen 3 Sekunden überschreiten kann. Für eine Rede wird eine Zeit von 0,3 bis 0,4 s empfohlen, während für die Musik eine Zeit von einer bis zwei Sekunden besser geeignet ist. Aber für Orgelmusik sind längere Zeiten, wie wir sie in verschiedenen Kathedralen vorfinden, bestens geeignet. Diese spezifischen Anforderungen an den Nachhall haben zur Konstruktion von Sälen mit variabler Akustik geführt, bei denen etwa die Umkehrung einiger Deckenplatten zu einer total verschiedenen Nachhallzeit führen.

[11] Dezibel. Diese Einheit wird im Kapitel Graphische Darstellung des Tones und Masseinheiten genauer besprochen.

Die Nachhallzeit hängt im wesentlichen von drei Faktoren ab, nämlich dem Volumen des Saals, der inneren Oberfläche und dem Oberflächenmaterial. Um 1898 fand Sabine eine Formel, mit der sich in den meisten Fällen die Nachhallzeit in Funktion der erwähnten drei Faktoren errechnen lässt:

$$R = 0{,}16 \cdot \frac{V}{S \cdot a}$$

Hier bedeutet V das Volumen in Kubikmetern, S die Oberfläche in Quadratmetern und a den Absorptions-Koeffizienten des Materials, das die Wände bedeckt. Die Formel von Sabine bietet in den meisten Fällen eine gute Annäherung, aber es müssen die Effekte beachtet werden, welche ihre Gültigkeit beschränken. Eine wichtige Tatsache besteht darin, dass die Materialien nicht alle Frequenzen gleich gut absorbieren. Die hohen Frequenzen werden gewöhnlich vor den tiefen verschluckt. Aber es gibt Materialien, für welche diese Eigenschaft stärker ausgeprägt ist, als bei anderen. Die Temperatur und vor allem die Luftfeuchtigkeit verändern den Absorptions-Koeffizienten der Materialien. Ein Faktor, der beachtet werden muss, ist die Lautstärkenkurve, die der Schall durchläuft, bis er erlischt. Je nach der Form dieser Kurve kann eine gleiche Absorptionszeit vollständig verschiedene akustische Effekte bewirken. Und schliesslich muss beachtet werden, dass jede Frequenz einer anderen Lautstärkenkurve entspricht.

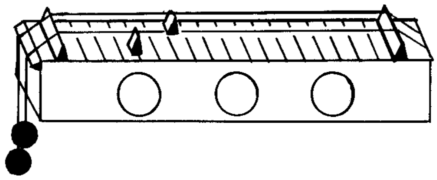
Die Einheit der akustischen Absorption 'sabin', die zu Ehren von Sabine so benannt wurde, wird folgendermassen definiert:

EIN SABIN IST DIE ABSORPTION, DIE EINEM QUADRATMETER VOLLSTÄNDIG ABSORBIERENDEN MATERIALS ENTSPRICHT.

Wenn wir in einem Saal mitten in der Natur ein Fenster öffnen, erreichen wir denselben akustischen Effekt, wie wenn wir das Fenster mit vollständig absorbierendem Material abdecken. Aus diesem Gesichtspunkt können wir die Einheit Sabin auch so definieren: Ein Sabin ist die Absorption, die einem offenen Fenster von einem Quadratmeter Oberfläche entspricht.

DIE SAITE ALS TONERZEUGER

Das MONOCHORD ist das Instrument, das es zum ersten Mal erlaubte, Verbindungen zwischen der Musik und der Mathematik herzustellen, und die Ehre, zum ersten Mal die konsonanten Intervalle vom mathematischen Standpunkt aus erforscht zu haben, wird Pythagoras zugesprochen. Das Monochord, das eines der primitivsten Vorgänger der heutigen Saitenistrumente wie der Violine oder des Klaviers bildete, wurde noch bis ins Mittelalter als Musikinstrument eingesetzt, und in Deutschland wurde eine Variante des Monochords, das sogenannte *Trummscheit* bis ins beginnende XVI Jh. eingesetzt.



Das Monochord

Die Abart de Monochords, die uns hier beschäftigt ist das wissenschaftliche Modell, das auf die Messung der Saitenabschnitte und der Spannkraft ausgerichtet ist. Heutzutage wird es nur noch als didaktisches Gerät eingesetzt. Trotz seines Namens weist es nicht immer ausschliesslich eine Saite auf, da die Gegenwart einer zweiten Saite die Beurteilung der beiden Noten eines Intervalls erleichtert und es sogar erlaubt, die beiden Noten zusammen erklingen zu lassen. Da die Saitenlänge nicht der einzige Parameter ist, der die Tonhöhe bestimmt, erlaubt es das wissenschaftliche Monochord, mit einem Gewichtssatz die Spannung der Saiten zu messen und zu verändern. Ein solches Monochord, manchmal in diesem Zusammenhang auch *Tonmesser* genannt, wird durch die Figur dargestellt.

Zu Pythagoras' Zeiten war der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Tonhöhe noch unbekannt, und die Philosophen jener Zeit stellten sich vor, die Höhe des Tones wachse mit dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit! Das konnte nicht verhindern, dass Pythagoras dank dem Monochord numerische Verhältnisse zwischen den verschiedenen Tönen und Intervallen ermittelte. Die erste Beobachtung zeigte, dass eine Oktave derjenige Ton war, der durch eine Saite halber Länge erzeugt wurde (bei gleichbleibender Spannung der Saite). Die Quinte entstand dadurch, dass man zwei Drittel der Saite schwingen liess. Nach reichlichem Experimentieren mit dem Monochord wurde offensichtlich, dass die konsonanten (wohlklingenden) Intervalle durch die Teilung der Saite, die dem Grundton entsprach, in einfache arithmetische Verhältnisse entstanden. Betrachten wir die Quotienten der Saitenlängen, so finden wir für die wichtigsten Intervalle die folgenden Werte:

Verhältnis	Intervall
2 : 1	Oktave
5 : 3	Grosse Sexte
8 : 5	Kleine Sexte
3 : 2	Quinte
4 : 3	Quarte
5 : 4	Grosse Terz
6 : 5	Kleine Terz

Dank der FORMEL VON BROOK TAYLOR können wir heute mühelos die Frequenz einer idealen Saite berechnen, also einer Saite mit totaler Flexibilität und Homogenität. Die in der Praxis gebräuchlichen Saiten erfüllen diese Bedingungen nur bis zu einem gewissen Grad und ergeben daher auch leicht von den Idealwerten abweichende Resultate. Dies ist die Formel von Taylor, in der L die Gesamtlänge der Saite (in Metern, m), T ihre Spannungskraft (in Newton, N) und C die Masse der Saite pro Längeneinheit (kg/m) bedeutet. Die Einheit der Frequenz, f, ist das Hz (1/s).

$$f = \frac{1}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{T}{C}}$$

Der volkstümliche Brauch, die Kräfte in kg zu messen, widerspricht der Logik, da das kg eine Einheit für die Masse, nicht für das Gewicht darstellt. Das kp ist eine Einheit für die Kraft (also auch für das Gewicht oder die Gewichtskraft), die intuitiv vom kg abgeleitet wurde: 1 kp ist das Gewicht das eine Masse von 1 kg auf die Erdoberfläche ausübt. Dieselbe Masse würde auf der Mondoberfläche nur noch etwa 0'16 kp wiegen. Aber die Masse eines Objektes verädert sich durch eine Reise auf den Mond nicht: ein Hammer mit einer gewissen Masse hat bei gleichbleibender Geschwindigkeit auf dem Mond dieselbe Wirkung wie hier auf der Erde oder an jedem beliebigen anderen Ort, wie zum Beispiel im schwerenlosen Raum. Die Einheit für die Kraft, die wir in unserer Formel antreffen, das Newton (N), entspricht der nötigen Kraft, um eine Masse von 1 kg mit einer Beschleunigung von 1 m/s^2 zu versehen. Das N kann als 1 $m \cdot kg/s^2$ ausgedrückt werden. Ein kp entspricht ungefähr 9,8 N.

BEISPIEL: Berechne die Frequenz einer Klaviersaite aus Stahl mit einer Dichte von 7,85 kg/dm^3, mit einem Durchmesser von 0,9 mm, und einer Distanz zwischen den Stegen von 39 cm, die mit einer Kraft von 60 kp gespannt ist.

$$L = 39\ \mathrm{cm} = 0{,}39\ \mathrm{m}$$

$$T = 60\ \mathrm{kp} = 60 \cdot 9{,}8\ \mathrm{N} = 588\ \mathrm{N} = 588\ \mathrm{m\ kg/s^2}$$

$$C = \frac{(0{,}0009\ \mathrm{m})^2 \cdot \pi \cdot 7{,}85 \cdot 1000\ \mathrm{kg}}{4 \cdot \mathrm{m}^3} = \frac{0{,}00499\ \mathrm{kg}}{\mathrm{m}}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot 0{,}39\ \mathrm{m}} \cdot \sqrt{\frac{588\ \mathrm{m\ kg\ m}}{\mathrm{s}^2 \cdot 0{,}00499\ \mathrm{kg}}}$$

$$= \underline{440{,}09\ Hz} \quad \text{(Note La)}$$

Intervalle, die aus zwei Tönen bestehen, können grundsätzlich auf zwei Arten numerisch dargestellt werden. Durch den Quotient der Frequenzen der beiden Töne (CHARAKTERISTISCHER QUOTIENT eines Intervalls) oder durch Vergleich mit einem festgelegten Mikrointervall. Diese zweite System wird manchmal als LOGARITHMISCHES SYSTEM bezeichnet, da zur Berechnung der Anzahl Mikrointervalle, die in einem bestimmten Intervall vorkommen, Logarithmen gebraucht werden.

Es sei hier in Erinnerung gerufen, dass die Verkettung (Zusammenfügung) von Intervallen nicht mit der Addition der charakteristischen Quotienten, sondern mit deren Multiplikation einhergeht. Entsprechend erhalten wir die Hälfte eines gegebenen Intervalls nicht durch Halbierung des Quotienten; wir müssen vielmehr die Quadratwurzel aus ihm ziehen, da die Quadratwurzel diejenige Zahl ist, die wieder den ursprünglichen Quotienten herstellen wird, wenn wir sie mit sich selber multiplizieren.

Arbeiten wir jedoch mit einem logarithmischen System, ergibt sich für die Verkettung von zwei Intervallen die Summe ihrer logarithmischen Charakteristika. Ebenso entspricht der Halbierung eines Intervalls die Halbierung der (logarithmischen) Charakteristik.

BEISPIEL: a) Welches Intervall entspricht der Verkettung einer Quinte mit der Charakteristik 3/2 und einer kleinen Sexte mit der Charakteristik 8/5?

b) Welches Intervall entspricht der Teilung einer Oktave in 3 gleiche Teile?

a) $3/2 \cdot 8/5 = 24/10 = 12/5$; da $12/5 = 2 \cdot 6/5$ handelt es sich bei unserem Intervall um die um eine Oktave erweiterte kleine Terz (oder: die Verkettung einer kleinen Terz und einer Oktave).

b) $\sqrt[3]{2} = 1{,}25992...$;[12] da die dritte Wurzel die vierte Potenz der zwölften Wurzel ist, die ihrerseits dem temperierten Halbton entspricht, handelt es sich bei unserem Intervall um die temperierte grosse Terz. Wir stellen ebenfalls fest, dass die grosse Terz 5/4 nur wenig von diesem Wert abweicht. Aber es ist Vorsicht geboten: Um diesen Unterschied zu berechnen, dürfen wir die charakteristischen Quotienten nicht etwa subtrahieren; wir müssen sie vielmehr dividieren.

$\sqrt[3]{2} = 1{,}25992...$
$5/4 = 1{,}25$

Quotient = 1,00793...

Wie wir sogleich sehen werden, wird in den logarithmischen Systemen (welche die zu untersuchenden Intervalle mit einem fest vorgeschriebenen Vergleichsintervall vergleichen) die Multiplikation der charakteristischen Quotienten zur Addition und die Division zur Subtraktion der entsprechenden Anzahl Mikrointervalle.

Zuerst seien dem Leser die für das Verständnis der Systeme *"Savart"* und *"Cent"* notwendigen Eigenschaften des mathematischen Konzeptes des Logarithmus in Erinnerung gerufen.

Eine Potenz der Form $\mathbf{b}^{\mathbf{e}}$ ist das Produkt aus e gleichen Faktoren b. Der gemeinsame Faktor b heisst in diesem Zusammenhange die BASIS, die Anzahl Faktoren e der EXPONENT der Potenz. So ist etwa die Potenz 3^7 das Produkt $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3$; in diesem Beispiel ist 3 die Basis, 7 der Exponent der Potenz, die den Wert 2187 hat. Zwei Po-

[12] Die dritte Wurzel aus 2 ist diejenige Zahl, die hoch drei (dreimal mit sich selber multipliziert) 2 ergibt.

tenzen derselben Basis werden miteinander multipliziert, indem man ihre Exponenten addiert. Der Begriff Potenz kann für reelle Exponenten verallgemeinert werden. In diesem Fall ist die Definition des Exponenten als Anzahl Faktoren nicht mehr einleuchtend, aber die Rechenregeln bleiben erhalten.

Betrachten wir alle Potenzen einer konstanten Basis, werden ihre Exponenten als LOGARITHMEN der Potenzwerte bezeichnet. In Logarithmenschreibweise wird die Gleichung $p = b^r$ folgendermassen ausgedrückt:

$$r = {}^{b}\log p$$

Man sagt, r sei der Logarithmus von p zur Base b. Die Basis eines solchen Logarithmensystems kann jeder von 1 verschiedene positive reelle Wert sein, aber für technische Zwecke ist die meistgebrauchte Basis die 10. Die Logarithmen zur Basis 10 werden auch als Zehnerlogarithmen, dezimale oder dekadische Logarithmen bezeichnet und mit dem Symbol lg gekennzeichnet. So ist etwa der Zehnerlogarithmus von 100 gleich 2, da $10^2 = 10 \cdot 10 = 100$. Die Logarithmen sind meist irrationale Zahlen.

Der Logarithmus eines Produkts ist immer die Summe der Logarithmen der einzelnen Faktoren:

$$\log (a \cdot b) = \log a + \log b$$

Der französische Arzt und Physiker Félix Savart scheint zum erstenmal in der Geschichte ein System eingeführt zu haben, mit dem beliebige Intervalle mit einem konstanten Mikrointervall verglichen werden können, das ihm zu Ehre noch heute als *Savart* bezeichnet wird. Definiert ist das *Savart* als die tausendste Wurzel aus 10 (ca. 1,0023052). Um die Anzahl der in einem gegebenen Intervall I enthaltenen *Savarts* zu berechnen, geht man wie folgt vor:

$$\left(\sqrt[1000]{10}\right)^x = \mathrm{I} \qquad / \log$$

$$x \cdot \log \sqrt[1000]{10} = \mathrm{I}$$

$$x \cdot \frac{1}{1000} \cdot \log 10 = \log \mathrm{I}$$

$$x = 1000 \cdot \frac{\log \mathrm{I}}{\log 10}$$

$$\text{Anzahl Savarts} = 1000 \cdot \frac{\log I}{\log 10}$$

Diese Herleitung ist von der Basis des Logarithmensystems unabhängig; trotzdem sei in Erinnerung gerufen, dass die Zehnerlogarithmen am häufigsten angewandt werden und wir uns künftig auf diese beziehen werden, wenn keine andere Basis angegeben wird.

Bei Anwendung von Zehnerlogarithmen reduziert sich unsere Formel auf:

$$x = 1000 \cdot \lg I$$

da ja lg 10 = 1.

<u>BEISPIEL:</u> Wie vielen *Savarts* entspricht die grosse Terz 5/4 und die grosse temperierte Terz? Berechne die Differenz in *Savarts*.

Terz 5/4: $x1 = 1000 \cdot \log (5/4) = 96{,}9100...$
$x2 = 1000 \cdot \log (1{,}2599...) = 100{,}34...$
Differenz = 3,4333...

Im System von Savart wird die Oktave in 301,029... Mikrointervalle unterteilt.

Ab sofort werden wir ein anderes System anwenden, das wir dem Mathematiker und Übersetzer ins Englische des berühmten Buches von Helmholtz, "Die Lehre von den Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik", Alexander John Ellis verdanken, der die Oktave in 1200 *Cents* unterteilte. Ein *Cent* entspricht also genau dem Hundertstel eines temperierten Tons. Der charakteristische Quotient eines *Cents* entspricht der tausendzweihundertsten Wurzel aus 2. In Analogie zum *Savart* finden wir die folgende Formel zur Berechnung der Anzahl in einem gegebenen Intervall I enthaltenen *Cents*:

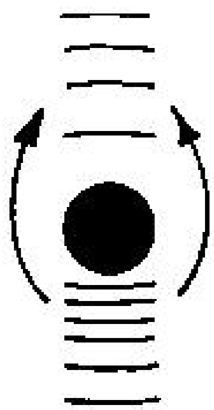
$$x = 1200 \cdot \frac{\log I}{\log 2}$$

Bei der Anwendung von Logarithmen zur Basis 2 würde die Formel vereinfacht. Aber dieses Logarithmensystem ist nicht üblich.

<u>BEISPIEL:</u> Wie viel *Cents* entspricht die natürliche Quinte? Und die temperierte?

Natürliche Quinte 3/2: x_1 = 1200 · (log (3/2) / log 2) = 701,955...
Temperierte Quinte 1,49830...: x_2 = 1200 · (log 1,4983 /log 2) = 700

Wir haben die von einer Saite produzierten Töne erwähnt, ohne näher auf deren physikalische Erzeugung einzugehen. Um die vibratorischen Erscheinungen einer gespannten Saite besser zu verstehen, können wir ein Gummiband zwischen zwei festen Punkten aufspannen, es in der Mitte packen, nach der Seite hin ziehen und schnellen lassen. Wir bemerken sofort, dass alle Punkte des Gummibandes, mit Ausnahme der Befestigungspunkte, eine Schwingung gleicher Frequenz beschreiben, und wenn unser Modell gut gelungen ist, schwingen alle Punkte in der gleichen Ebene. Bei dieser Art von Querschwingungen finden wir in der Mitte die grösste Amplitude, die gegen die Fixpunkte hin allmählich bis auf 0 abnimmt, so dass das vibrierende Gummiband unseres Modells den Aspekt eines Spindels annimmt. Dies ist der einfachste Schwingungsmodus der Saite.



Schwingende Saite und Luftbewegung

Führen wir künstlich einen neuen Fixpunkt ein, indem wir die Saite genau in der Mitte zwischen den beiden Befestigungspunkten festhalten, so formen sich beim Zupfen plötzlich zwei Spindel und der von der Saite angegebene Ton hat die doppelte Frequenz, die der Oktave des Grundtones entspricht. Analog können wir die Saite auch in 3, 4 oder mehr gleichlange Abschnitte teilen. Die Fixpunkte werden in diesem Zusammenhange als KNOTEN, die Punkte grösster Amplitude als BÄUCHE bezeichnet.

Sei f die Grundfrequenz der Saite und n die Anzahl Abschnitte derselben. Bei n=1 haben wir die Grundschwingung der Saite.

Die Anzahl Knoten (die Befestigungspunkte mitgezählt) ergibt sich als n+1. Die Frequenz des erzeugten Tones ist n · f.

Wollen wir ohne Einführung künstlicher Fixpunkte eine Saite so erregen, dass sie 2 Bäuche erzeugt (n=2) so müssen wir sie am vierten Teil Ihrer Gesamtlänge anzupfen. Wir hören einer Ton der doppelten Frequenz der Grundfrequenz.

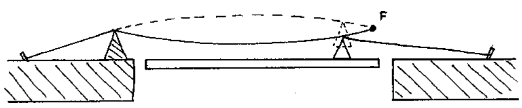
Eine einzelne Saite kann also Töne mit den Frequenzen f, $2 \cdot f$, $3 \cdot f$, ... erzeugen. Normalerweise hören wir alle diese Frequenzen aufs Mal, mit verschiedenen Intensitäten, so dass wir einen ZUSAMMENGESETZTEN TON hören. Der Grundton bestimmt die Periode und daher die Grund-Frequenz dieser Überlagerung von Schwingungen. Das ungeübte Gehör erkennt meist nur die Grundfrequenz eines solchen zusammengesetzten Tones. Wir nennen hier die verschiedenen Komponenten eines zusammengesetzten Tons PARTIALTÖNE. Sind die Frequenzen der Partialtöne ganzzahlige Vielfache des Grundtones (wie es bei schwingenden Saiten immer der Fall ist) spricht man von HARMONISCHEN PARTIALTÖNEN. Der ERSTE PARTIALTON ist der GRUNDTON. Die anderen Partialtöne werden auch OBERTÖNE benannt. Ein REINER TON enthält ausschliesslich den Grundton und entspricht einer einzigen Sinusschwingung. Jeder einzelne Partialton ist für sich genommen ein reiner Ton.

Es sei hier in Erinnerung gerufen, dass die Definition der Begriffe Partialton, Oberton, harmonischer Partialton, usw. leider keiner Norm unterstellt sind, und daher von einem Autor zum anderen abweichen können.

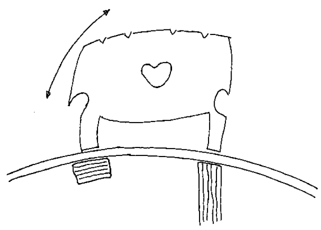
Wie gehen die von einer Saite erzeugten Vibrationen (Schwingungen) auf die Luft über? Diese Frage ist nicht ganz so trivial, wie es zuerst scheint. Stellen wir uns einen Querschnitt durch eine schwingende Saite vor, so sehen wir eine Kreisscheibe, die harmonisch im umgebenden Luftraum hin- und herschwingt. Nehmen wir an, unsere Scheibe befindet sich in einer der extremen Positionen. Die Luft ist auf der gegenüber der Gleichgewichtsposition liegenden Zone komprimiert worden und man könnte meinen, diese Kompression sollte sich in Form einer Welle konzentrisch fortbewegen. Hier tritt aber eine andere Erscheinung auf: Die komprimierte Luft fliesst in die Zone mit Unterdruck auf der anderen Seite der Saite ab und die Überlagerung dieses Effekts mit der entstehenden Welle hat eine äusserst schwache Welle zur Folge. Wie ist dann der brillante Klang eines Klaviers oder einer Violine zu erklären? Die Saite bringt den Steg (oder beide Stege) des Instruments zum Schwingen,[13] der die Schwingungen dem RESONANZBODEN (auch Klangboden genannt) mitteilt, also demjenigen Teil des Instruments, der seine Schwingungen schliesslich an die umgebende Luft abgibt. Dank der grossen Ausdehnung des Resonanzbodens können hier die abgestrahlten Wellen nicht mehr durch die Kompensierung des Luftdruckes abgeschwächt werden, wie dies bei einer Saite alleine der Fall war.

[13] Also ist der Steg nicht ganz so unbeweglich, wie es scheinen möchte.

Es ist wichtig, dass der Resonanzboden innerhalb des Tonumfangs des entsprechenden Instruments keine allzu ausgeprägte Eigenfrequenz aufweist, da sonst einzelne Noten vor anderen übervorteilt würden. Die Schwingungen des Resonanzbodens sind also nicht frei, wie im Fall einer Resonanz im strengeren Sinne, sondern erzwungen. Ein guter Resonanzboden soll einen grossen Anteil der eintreffenden Schwingungen zu Schallwellen umwandeln.



Der virtuelle Fixpunkt



Steg einer Geige

Bei der Übertragung der Schwingungen der Saite auf den Resonanzboden gingen wir davon aus, dass der Steg parallel zu den seitlichen Schwingungen der Saite mitschwingt. Das bedeutet, dass der Kontaktpunkt des Steges und der Saite strenggenommen keinen Fixpunkt F darstellt; vielmehr befindet sich der Punkt F in virtueller Form in der Verlängerung der Saite, leicht hinter dem Steg. Die Figur stellt diese Tatsache im Falle der Übertragung der Schwingungen einer Violinsaite auf den Resonanzboden über den Steg graphisch dar.

Aber der Steg hat auch die Tendenz, in Richtung der Saite zu schwingen, wie wir es anhand eines Modells sofort ersehen können: Wir binden dazu ein Gummiseil zwischen zwei feste Punkt, etwa an zwei Haken an gegenüberliegenden Wänden. Dann stellen wir einen Steg in der Nähe einer der beiden Wände auf, der sich wie ein Scharnier bewegen kann und das Seil berührt. Bewegen wir nun die Mitte des Seils hinauf und hinunter, beobachten wir, dass das Scharnier mit der doppelten Frequenz waagrecht hin- und herschwingt.

Diese Erscheinung steuert auch dazu bei, bei Streichinstrumenten, wie etwa bei der Violine, die Oktave zu verstärken.

Stellen wir uns etwa ein Instrument vor, bei dem die Saiten senkrecht auf dem Resonanzboden stünden: bei diesem Instrument wären die vom Resonanzboden abgestrahlten Töne genau eine Oktave höher, als die von der Saite erzeugten.

Wir sehen also, dass die Stege der Saiteninstrumente nie ganz starr sind, da gerade ihre Fähigkeit zu vibrieren erlaubt, die Schwingungen der Saite dem Resonanzboden zuzuführen, der sie schliesslich als Schallwellen abstrahlt.

Im modernen Klavier werden die 13 tiefsten Töne durch je eine Saite erzeugt. Die nächsten 16 Töne werden durch je zwei auf die gleiche Frequenz gestimmten Saiten (Saitenchöre) erzeugt. Die restlichen Töne entsprechen Dreiergruppen von Saiten. Dieses Schema kann von einem Klavier zum anderen leicht variieren.

Die Stimmung auf den gleichen Ton wird durch die Tatsache, dass die beiden Saiten zusammen mit dem Steg ein gekoppeltes System bilden erleichtert. Stimmen wir also die beiden Saiten einer gleichen Note mit einer extrem kleinen Differenz (die einen gewissen Maximalwert nicht überschreiten darf), werden die beiden Saiten bei gleichzeitigem Anschlagen einen Ton der selben Frequenz erzeugen. Es ist wie wenn sich die beiden Saiten einigen würden.

Bis hierher haben wir ausschliesslich die Querschwingungen Transversalschwingungen) der Saite betrachtet. Aber die Saiten schwingen noch auf zwei andere Arten, die man bei der Besprechung der Klangfarbe eines Instruments nicht ganz vernachlässigen darf: die torsionalen Schwingungen oder DREHSCHWINGUNGEN und die Längsschwingungen oder Longitudinalschwingungen. Wir können von den beiden Schwingungsarten je ein Gedankenmodell entwickeln: Um die Drehschwingungen zu veranschaulichen, stellen wir uns ein an zwei senkrecht übereinanderliegenden Punkten aufgespanntes Gummiband vor, an dem in regelmässigen Abständen Querstäbe angebracht sind. Versetzen wir einen der Stäbe in rotierende Bewegung, so erhalten wir bald einmal das Bild einer Drehschwingung des ganzen Gummibandes. Zur Illustration der Längsschwingungen ist eine senkrecht aufgehängte Spiralfeder nützlich: Verpassen wir dieser an einem Punkt einen senkrechten Stoss, so können wir beobachten, wie eine Welle die ganze Feder durchläuft.

Die Frequenz der Quer-, Dreh- und Längsschwingungen sind im Allgemeinen voneinander verschieden.

Zuhause habe ich ein rohrförmiges Treppengeländer, das sich sehr gut zur Erzeugung von Quer- und Längswellen eignet. Schlage ich mit der Faust auf das Geländer, ertönt ein Do. Streiche ich jedoch mit der feuchten Hand in Längsrichtung darüber, wird ein Fa $\sharp$ hörbar. Die Frequenz der Längsschwingung hängt nicht von der Spannung der Saite oder der Röhre ab, wohl aber vom verwandten Material. Dies erklärt, warum Leute mit entsprechend geübtem Gehör hören können, ob die Mi-Saite einer Geige aus Draht oder aus Darm besteht.

Die Art der Anregung entscheidet grundsätzlich über die verschiedenen gleichzeitig stattfindenden Schwingungsarten und über die Intensitäten der verschiedenen im produzierten Ton enthaltenen Partialtöne. Grundsätzlich muss zwischen den von Streichinstrumenten (Violine, usw.), Zupfinstrumenten (Cembalo, Gitarre) und Schlaginstrumenten (Klavier[14]) erzeugten Tönen unterschieden werden.

Die Instrumente der ersten Gruppe weisen die grösste Auswahl an Schwingungsarten auf und bieten dem Künstler die grösste Freiheit zur Entfaltung seiner Interpretation. Beim Streichen mit dem Bogen wird die Saite zu Quer- aber auch zu Drehschwingungen angeregt. Der Berührungsort des Bogens begünstigt die Bildung der einen oder der anderen Partialtöne. In gewissen Violinpartituren können wir Hinweise wie *"sul ponticello"* oder *"sulla tastiera"* finden. Der erste Ausdruck erfordert, dass der Bogen möglichst nahe am Steg angelegt werden soll. Diese Stellung begünstigt hohe Partialtöne und das Resultat ist ein sehr schriller Ton. Wird jedoch der Bogen *"sulla tastiera"* angelegt, also auf dem Griffbrett, dem Holz, auf dem die Finger der linken Hand die Saiten niederdrücken, um deren wirksame Länge einzuschränken und damit die Tonhöhe zu bestimmen, in diesem Fall wird ein sehr sanfter Ton mit nur wenigen höheren Partialtönen erzeugt.

Bei den Zupf- und Schlaginstrumenten erfolgt die Anregung der Saite in einem kurzen Augenblick, dann wird die Saite sich selbst überlassen. Die Intensität wird daher im ersten Moment maximal sein, dann allmählich abfallen, und die Schwingungsweise wird sich nicht mehr durch den anregenden Hammer beeinflussen lassen. Sowohl bei der durch den Hammer angeschlagenen wie bei der gezupften Saite wird das Spektrum der Partialtöne vor allem durch den Anregungspunkt bestimmt, sowie auch durch die Form und das Material des anregenden Gegenstandes.

Wir haben am Anfang erwähnt, dass der zweite Partialton durch Anregung im vierten Teil der Saite gefördert wird, da dadurch hier ein Bauch diese Partialtons entsteht. Wird die Saite jedoch genau in der Mitte erregt, so erhalten wir einen Ton der keine geraden Partialtöne enthält, da alle Frequenzen, die ein gerades Vielfaches des Grundtones sind im Zentrum der Saite einen Knoten aufweisen, der durch die Erregung in diesem Punkt zerstört wurde.

Wir finden ein analoges Resultat, wenn wir auf den Drittel der Saitenlänge schlagen: alle Partialtöne, deren Indices durch 3 teilbar sind, werden getilgt. Dasselbe ist für alle folgenden natürlichen Zahlen der Fall.

Wie wir später im Kapitel über die musikalischen Tonleitern sehen werden, fallen die ersten sechs harmonischen Partialtöne genau mit Tönen von Zarlino zusammen, so dass sie sich auf befriedigende

[14] In diesem Zusammenhang muss das Klavier als Schlaginstrument eingestuft werden.

Weise durch gleichmässig temperierte Töne annähern lassen. Der siebte harmonische Partialton jedoch ist der erste des Spektrums, der durch keine der Töne unserer gleichmässig temperierten Tonleiter angenähert werden kann. Lasset uns die ersten 7 harmonischen Partialtöne der zentralen Note Do (3) eines Klaviers betrachten:

Partialton Nummer	1	2	3	4	5	6	7
Note	Do (3)	Do (4)	Sol (4)	Do (5)	Mi (5)	Sol (5)	La – Si ♭

In diesem Fall kommt der siebte Partialton zwischen La und Si ♭ zu liegen. Um diese Dissonanz aus dem Weg zu räumen, schlug der grosse Physiker Helmholtz vor, den Hammer des Klaviers genau auf den ersten Siebentel der Saite aufprallen zu lassen. Dadurch würden die harmonischen Partialtöne mit den Nummern 7, 14, 21,... aus dem Klavierton ausgeschaltet. Trotzdem hat die Erfahrung—die im Instrumentenbau meist fruchtbarer war, als die exakten Wissenschaften—gezeigt, dass der siebte Partialton die Schönheit des Klavierklanges begünstigt.

Ein anderer Parameter, der entscheidend die Qualität des Klavertons beeinflusst ist die Beschaffenheit des Hammers. Harte und zugespitzte Hämmer fördern die höheren Partialtöne, weiche und runde Hämmer betonen mehr die niedrigen Partialtöne. Für gewisse Zwecke wurden die Hämer eines Klaviers mit Metallspitzen versehen, um einen besonders klirrenden Ton zu erzeugen. Die guten Klavierstimmer verstehen es, die Konsistenz des Filzes, der die Hammerspitze bedeckt, so abzuändern, dass sie die gewünschte Klangfarbe erreichen: man spricht von Intonation, die meist durch Stechen mit geeigneten Nadeln vorgenommen wird.

Wenn wir einen Flügel zur Hand haben, können wir eine ganze Reihe akustischer Experimente durchführen, bei denen die Schwingungen mit einer Serie von gefalzten Papierstreifchen, die über einzelne Saiten gehängt werden, nachgewiesen werden können. Aber Vorsicht: der Stahl, aus dem die Saiten bestehen rostet gerne! Kleine unsichtbare Kratzer auf der Oberfläche der Stahlsaiten neigen dazu, später zum Bruch zu führen!

Wenn wir etwa die Taste Do (3) niederdrücken und gleichzeitig das rechte Pedal (das bewirkt, dass sämtliche Dämpfer von den Saiten abgehoben werden) betätigen, können wir feststellen, dass die Saiten, die den Obertönen (also den vom Grundton verschiedenen Partialtönen) der Note Do (3) entsprechen (nämlich Do (4), Sol (4), Do (5), usw.) durch Resonanz mitschwingen. Aber wir können auch feststellen, dass sogar tiefere Noten wie etwa Do (2) und Fa (1) mitschwingen, unter anderem, weil eine der Eigenresonanz-Frequenzen derselben Do (3) ist, da diese Note je einen Oberton der beiden Noten Do (2) und Fa (1) bildet.

Vielleicht werden wir über die Tatsache staunen, dass die Note Do (1) auch die Saiten der Note Sol (1) zum Mitschwingen anregt, obwohl Do (1) kein Oberton von Sol (1) ist. Aber die beiden Noten haben gemeinsame Partialtöne, etwa die Note Sol (2), unter anderen, welche die Saiten von Sol (1) zur Resonanz bewegt.

Lasset uns ohne Pedal die Taste von Sol (1) vorsichtig runterdrücken, ohne dass der Hammer mit den Saiten in Berührung kommt. Während wir die Taste gedrückt halten, schlagen wir kurz die Note Do (1) an: Es erklingt die Note Sol (2) und erlischt, sobald wir die Taste von Sol (1) loslassen.

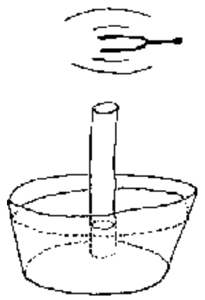
In einem Klavier in optimalem Zustand sollten die Saiten keinerlei Drehschwingungen aufweisen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass beim Einbau einer verdrehten Saite, die Querschwingungen und die Drehschwingungen unangenehme Interferenzerscheinungen hervorrufen können, die sich in einer leicht unbestimmten Tonhöhe äussern, die sich nie mit der nötigen Genauigkeit stimmen lässt.

Wie wir es später im Kapitel über die Klangfarbe sehen werden, spielt die Anwesenheit der harmonischen Partialtöne eine hervorragende Rolle in der Unterscheidung von Tönen gleicher Frequenz, die von verschiedenen Instrumenten erzeugt werden. Leute mit geübtem Gehör können die einzelnen Partialtöne aus einem Ton heraushören. Eine Person mit ungeübtem Gehör, kann folgende Übungen durchführen, um zu lernen, die Obertöne eines Klaviertons zu hören:

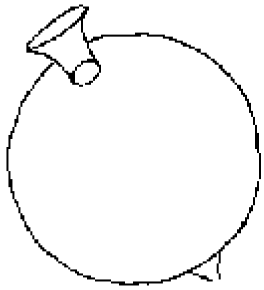
Zuerst schlagen wir die Taste Sol (4) leise an. Anschliessend drücken wir energisch auf die Taste Do (3); nun hören wir Sol (4) als Partialton von Do (3) (Sol (4) ist der dritte Partialton von Do (3)).

- Lasset uns einen Akkord spielen, der die Note Sol (4) nicht enthält, wohl aber lauter Noten, die Sol (4) als Partialtöne enthalten: Do (2), Mi $\flat$ (2), Sol (2), Do (3), Sol (3). (Sol (4) ist der harmonische Partialton Nummer 6 von Do (2), Nummer 5 von Mi $\flat$ (2), Nummer 4 von Sol (2), usw.). Der gemeinsame Partialton Sol (4) tritt deutlich hervor, ist aber einer Art von Schwebungen unterworfen, die im nächsten Kapitel erklärt werden.

Obwohl es immer Leute mit ausserordentlichem Gehör gegeben hat, wie etwa Rameau, von dem gesagt wurde, er sei sogar imstande, die Partialtöne der menschlichen Stimme herauszuhören, gaben sich die Physiker mit dem subjektiven Zeugnis eines menschlichen Organs nicht zufrieden, sondern suchten vielmehr nach einem System, das es erlaubte, die Partialtöne als eine messbare physikalische Tatsache darzustellen, indem sie sie voneinander zu trennen suchten. Dieser Wunsch wurde durch die RESONATOREN VON HELMHOLTZ voll erfüllt. Der Resonanzeffekt, wie im vorangehenden Kapitel beschrieben, beschränkt sich nicht auf feste Körper, wie Federn, Brükken oder Violinsaiten; vielmehr können auch in geeigneten Gefässen untergebrachte Flüssigkeiten und Gase der Resonanz unterworfen sein. Ein einfaches Experiment, das alle durchführen können, soll uns das beweisen:



Resonanz der Luft in einem Rohr



Resonator von Helmholtz

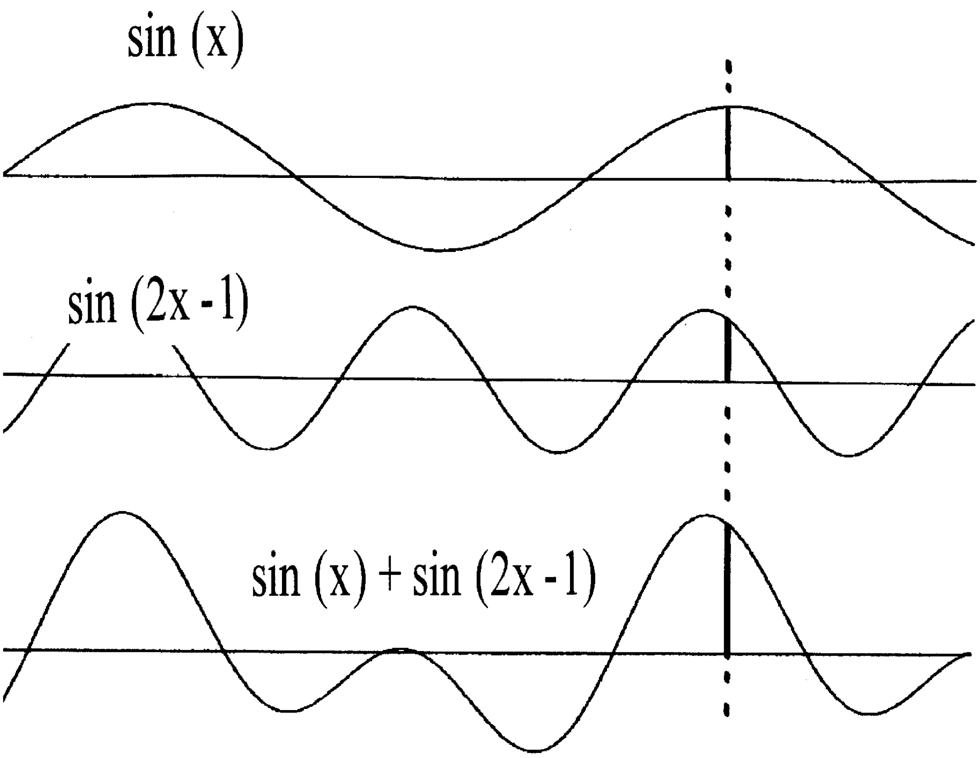
- Ein Stück Rohr aus Kunststoff oder Glas wird senkrecht in ein Becken voll Wasser getaucht, so dass ein zylindrisches Stück hervorschaut. Über die Öffnung des Rohres halten wir eine schwingende Stimmgabel und variieren sodann die Höhe des Rohres, bis wir eine Stellung finden, bei welcher der Ton der Stimmgabel verstärkt wird. Jetzt befindet sich die Luft in der Röhre in Resonanz mit der Frequenz der Stimmgabel.

Die Resonatoren von Helmholz sind kugelförmige Glasgefässe mit zwei gegenüberliegenden Öffnungen: eine, um sie ans Ohr zu halten, die andere, um den zu untersuchenden Schall einzufangen. Ein solcher Resonator verhält sich wie eine Art akustisches Filter, da er nur den Schall einer gewissen Frequenz verstärkt (genauer: den Schall der in einem bestimmten kleinen Intervall liegenden Frequenzen). Um die Komponenten beliebiger Töne zu untersuchen, besass Helmholtz ganze Sätze von Resonatoren, die alle auf bestimmte Frequenzen abgestimmt waren.

Später wurden die Resonatoren von Helmholtz weitgehend durch elektronische Systeme verdrängt, so dass sie heute praktisch nur noch für didaktische Zwecke eingesetzt werden. Aber wir müssen uns bewusst sein, dass sie zu Helmholtz Zeiten ein unersetzliches Hilfsmittel darstellten, das zu einem wichtigen Fortschritt in der akustischen Forschung führte.

TONÜBERLAGERUNG

Die Musik gibt sich nur selten mit einer Folge einzelner Töne zufrieden. In diesem Kapitel wollen wir kurz die physikalischen Erscheinungen besprechen, die mit der Überlagerung von zwei reinen Tönen einhergehen, also Tönen, die keine Obertöne haben und sich durch eine Sinuskurve darstellen lassen. Solche Töne werden durch drei Eigenschaften charakterisiert: Ihre Frequenz (welche die Tonhöhe bestimmt), ihre Amplitude[15] und ihre momentane Phase.



Überlagerung von zwei Kurven

Wie wir es im Kapitel über das menschliche Gehör sehen werden, kann unser Gehör die letzte Grösse nicht unterscheiden; trotzdem

[15] Die Frequenz und die Amplitude bestimmen die Lautstärke: diese ist proportional zum Quadrat der Amplitude und zum Quadrat der Frequenz.

werden wir sehen, dass diese bei der elektrischen oder elektronischen Übermittlung des Schalls eine grundsätzliche Rolle spielt.

Graphisch entspricht der Überlagerung von Sinustönen, wie auch der Überlagerung von zwei oder mehr beliebigen Tönen, die punktweise Summe der Koordinaten der Einzeltöne, wenn diese als Funktionskurven (Elongation als Funktion der Zeit, auch PHONOGRAPHISCHE KURVE genannt) dargestellt werden.

Lasset uns hier unter den unendlich vielen Möglichkeiten ein paar charakteristische Beispiele herauswählen.

- Wenn wir zwei identische Töne auswählen (gleiche Amplitude, Frequenz und Phase) erhalten wir einen Ton mit gleicher Frequenz und Phase, dessen Amplitude der Summe der Amplituden der beiden Töne entspricht, also der doppelten Amplitude des Einzeltons.

$$y = A \cdot \sin x + A \cdot \sin x = 2 \cdot A \cdot \sin x$$

Allgemeiner: Wenn wir zwei Töne addieren, die sich nur in ihrer Amplitude unterscheiden, erhalten wir einen Ton derselben Frequenz und Phase, dessen Amplitude die Summe der Amplituden der beiden Töne ausmacht.

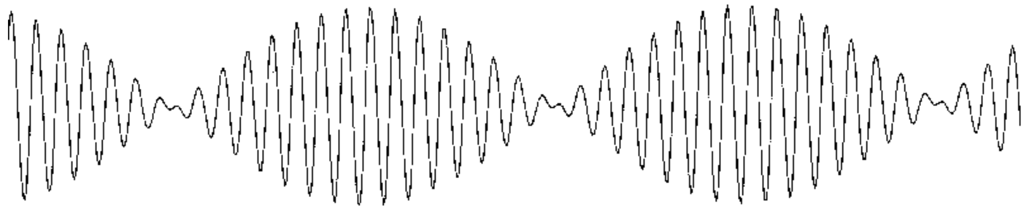
$$y = A \cdot \sin x + B \cdot \sin x = (A + B) \cdot \sin x$$

- Addieren wir zwei Töne, die sich nur in ihrer Phasendifferenz von π (oder 180 °) unterscheiden, ist das Resultat die Absenz von Schall, also absolute Ruhe, da sich die beiden Kurven gegenseitig kompensieren. Wir sehen hier, dass die Überlagerung von Tönen nicht immer eine Zunahme der Lautstärke bewirkt.

- Überlagern wir zwei Töne so, dass die Frequenz des ersten ein natürliches Vielfaches des zweiten ist, erhalten wir einen zusammengesetzten Ton mit einem Oberton.

- Überlagern wir zwei Töne so, dass die beiden Frequenzen einen gemeinsamen Teiler d haben, gehören also die beiden Töne zu den möglichen Obertönen des Tones mit Frequenz d, fasst das Gehör diese Überlagerung wie einen musikalischen Akkord auf, der konsonant oder dissonant sein kann, wie wir später sehen werden.

- Einen besonders interessanten Fall bildet die Überlagerung zweier Töne, die ungefähr die gleiche Amplitude, aber leicht voneinander abweichende Frequenzen haben. Nehmen wir an, die beiden Töne fangen gemeinsam zu klingen an, wird in diesem ersten Zyklus die Summe der Amplituden ungefähr der doppelten Amplitude entsprechen; nach einem weiteren Zyklus werden wir eine Phasendifferenz vorfinden, die der Periodendifferenz der beiden Kurven entspricht; nach ein paar weiteren Zyklen wird die Phasendifferenz ungefähr π entsprechen, so dass sich die beiden Kurven gegenseitig aufheben; dann fängt die Summe wieder zu wachsen an. Dieses Spiel wiederholt sich mit einer gewissen Periodizität, deren Frequenz die Differenz der Frequenzen der beiden überlagerten Töne ist. Diese periodische Schwankungen der Tonintensität werden als SCHWEBUNGEN bezeichnet. Die Frequenz des hörbaren Tones entspricht dem arithmetischen Mittel der beiden überlagerten Töne.



Schwebungen

BEISPIEL: Schlagen wir gleichzeitig zwei Stimmgabeln an, mit den Frequenzen 400 Hz (das internationale A) und 435 Hz, wird der Ton 5 Mal pro Sekunde zu- und abnehmen. Wir haben es mit Schwebungen von 5 Hz zu tun.

Wie wir später sehen werden, sind die Schwebungen beim Stimmen der meisten Musikinstrumente unentbehrlich.

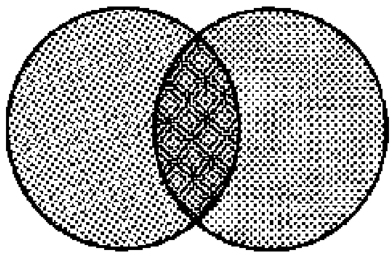
Eine andere Anwendung finden wir in der akustischen Warnung vor Grubengasen, in gewissen Minen. Dieses System beruht auf der gleichzeitigen Betätigung von zwei auf die gleiche Tonhöhe gestimmten Pfeifen, wobei eine mit Aussenluft, die andere mit Grubenluft versorgt wird. Da die Zusammensetzung der Luft die Tonhöhe beeinflusst, verändert sich bei Verunreinigung der Luft die Frequenz der mit Grubenluft gespeisten Pfeife, so dass plötzlich laut vernehmbare Schwebungen auftreten.

Wächst die Differenz zwischen den beiden Tönen, wächst auch die Frequenz der Schwebungen. Von etwa 30 oder 40 Hz an, beginnt das Gehör einen neuen Ton mit eben dieser Frequenz zu vernehmen, einen Differenzton. Spielen wir etwa gleichzeitig einen Ton von 440 Hz und einen von 550 Hz (die grosse Terz des ersten) auf einer Violine, können Leute mit geübtem Gehör einen Ton von 110 Hz vernehmen.

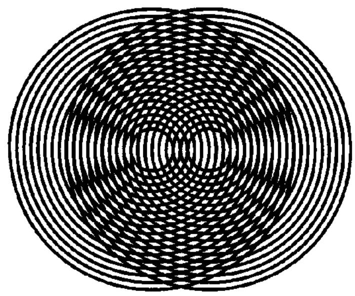
Die Differenztöne stellen die wichtigste Erscheinung im Bereich der sogenannten Kombinationstöne dar, die nicht immer reellen Tönen entsprechen, sondern vielfach subjektive Erscheinungen unseres Gehörs sind. Schon Tartini entdeckte die Differenztöne um 1754, so dass manchmal auch von Tartini-Tönen gesprochen wird.

Im Jahre 1856 entdeckte Helmholtz eine andere Art von Kombinationstönen, die SUMMENTÖNE, die wesentlich schwieriger zu vernehmen sind.

So wie die Schwingungen, überlagern sich auch die Wellen. Diese Fälle sind vom mathematischen Standpunkt her wesentlich komplizierter, da hier nicht eine einzelne Partikel schwingt, sondern eine Unendlichkeit. Trotzdem werden wir anschliessend ein paar Spezialfälle besprechen. Es sei vorangestellt, dass sich unter normalen Bedingungen zwei akustische Wellen, die einander kreuzen, nicht gegenseitig beeinflussen, obwohl sie sich im gleichen Medium fortpflanzen.



Interferenz zweier Raster



Interferenz von Kreisen

Das Resultat der Überlagerung von zwei oder mehreren Wellen heisst INTERFERENZ. Die Wellen können eindimensional sein, wie etwa bei akustischen Wellen, die sich in einem Rohr fortbewegen; oder zweidimensional, wie die Wellen auf der Wasseroberfläche; oder schliesslich dreidimensional, wie die meisten akustischen Wellen.

In jedem Fall kann jeder einzelne Punkt als Überlagerungsort von zwei oder mehr Schwingungen angesehen werden. Um eine Idee der Erscheinungen zu geben, die im Zusammenhang mit der Überlagerung zweidimensionaler Wellen auftreten können, stellen die beiden Abbildungen Überlagerungen von zwei regelmässigen Strukturen dar: im ersten Fall wurden zwei Raster aus konzentrischen Kreisen dargestellt, und das Resultat gleicht der Struktur, die entsteht, wenn wir zwei Steine gleichzeitig in einen See werfen, mit einem kleinen Abstand zwischen ihnen. Die zweite Abbildung zeigt den typischen Moiréeffekt, den wir von den graphischen Künsten her kennen, und der unter anderem entstehen kann, wenn mit einem Autotypieraster ein bereits gerastertes Bild reproduziert wird[16].

Die beiden Abbildungen zeigen natürlich nicht die Vorgänge, die bei der Überlagerung von zwei bidimensionalen Wellen wirklich stattfinden, sie gibt uns nur eine statische Idee davon. Mit etwas Einbildungskraft können wir uns die dreidimensionalen Analogien dieser Abbildungen vorstellen, die den meisten akustischen Fällen entsprechen.

Die Überlagerung von Wellen gleicher Frequenz erzeugt die sogenannten STEHENDEN (auch stationären) WELLEN. Stehende Wellen können durch Überlagerung von ein-, zwei- oder dreidimensionalen Wellen entstehen.

Als erstes Beispiel sei die Überlagerung von zwei eindimensionalen Wellen in der sogenannten KUNDTSCHEN RÖHRE[17] erwähnt. Diese in ihrem Aufbau mit einer Fahrradpumpe vergleichbare Röhre besteht aus einem Glasrohr mit einem festverschlossenen Boden und einem beweglichen Ende in Form eines Kolbens auf der anderen Seite. Vibriert dieser so (in Pfeilrichtung), dass die Periode der Schwingung mit der Zeitspanne zusammenfällt, die eine Schallwelle braucht, um die Strecke vom Kolben zum Boden zurückzulegen, sich daran zu spiegeln und in die Ausgangsstellung zurückzukehren, befindet sich die Luft in der Röhre in Resonanz mit der Frequenz des Kolbens. Diese Situation kann durch Anpassung der Schwing-Frequenz des Kolbens oder durch Veränderung der wirksamen Rohrlänge (zwischen Kolben und Boden) erreicht werden. Verdoppeln wir die Frequenz des Kolbens, stossen wir wieder auf Resonanz. In diesem Fall stösst jede vom Kolben erzeugte Welle mit der am Rohrboden zurückgeworfenen vorangehenden Welle zusammen (beide haben dieselbe Frequenz) und das Resultat ist eine stehende Welle, die sich durch die Anwesenheit von Zonen fast absoluter Ruhe (die in Analogie an die schwingende Saite als KNOTEN bezeichnet werden) und Zonen maximaler Bewegung (BÄUCHEN) auszeichnet.

Im einfachsten Fall finden wir zwei Knoten vor, einen beim Boden und einen beim Kolben. Schwingt unser Kolben mit doppelter Frequenz verglichen mit der Ausgangslage, finden wir 3 Knoten; wird die Frequenz der Ausgangslage mit einer beliebigen natürlichen Zahl n multipliziert, werden n+1 Knoten erzeugt.

Der aufmerksame Leser wird einen Widerspruch in der Tatsache finden, dass gerade der Kolben, der seine Schwingungen der Luft im

---

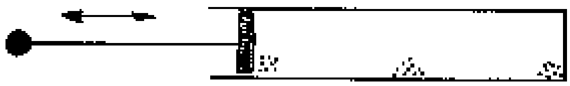
[16] Leider sehen wir uns auch hier nicht ganz frei von diesem Effekt, da die gleichmässigen Strukturen, aus denen diese Bilder bestehen die Tendenz haben, mit den Rastern des informatischen Systems zu interferieren.

[17] Nach ihrem Erfinder, August Kundt (1839-94), benannt.

Inneren des Rohres überträgt, einen Knoten darstellt, da er schliesslich nicht gleichzeitig ruhig sein und Schwingungen übertragen kann. Dieses Paradoxon kann analog erklärt werden, wie im Falle des schwingenden Steges, der zugleich als Knoten und als Überträger von Schwingungen wirkt: in jenem Fall sahen wir, dass der Fixpunkt virtuell war und etwas hinter dem Steg lag. Auch hier ist der Fixpunkt virtuell und liegt etwas jenseits des Kolbens.

Ein Vorteil der Kundtschen Röhre liegt in der Möglichkeit, die Lage der Knoten experimentell darzustellen. Zu diesem Zweck wird eine kleine Menge feiner, leichter Staub (Mehl oder Korkmehl zum Beispiel) ins Innere des Rohres gegeben. Sobald sich die Luft im Rohr in Resonanz befindet, häuft sich der Staub, im Bestreben, die bewegten Zonen zu meiden, in den von Knoten eingenommenen Zonen, und wir können eine der Abbildung entsprechende Figur beobachten.

Die Kundtsche Röhre bietet auch heute noch im elementaren Physikunterricht ausgezeichnete Dienste.



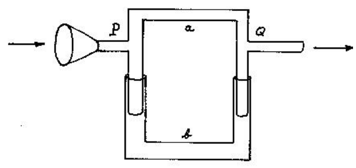
Kundtsche Röhre

Stimulieren wir zwei Punkte auf der Oberfläche eines Sees mit derselben Frequenz, können wir eine bidimensionale stehende Welle beobachten. Strahlen zwei Lautsprecher in zwei Punkten des Raums einen reinen Ton derselben Frequenz aus, formt sich eine dreidimensionale Analogie zu den beiden vorangehenden Beispielen. Wenn wir mit dem Ohr verschiedene Zonen des Raums ablauschen merken wir bald, dass in einzelnen Zonen der Schall verstärkt, in anderen, abgeschwächt wird. Auch der Ton einer Stimmgabel (ohne Verstärkung durch einen Resonanzboden) ist in einzelnen Punkten hörbarer als in anderen. Werden zwei Wellen gleicher Frequenz überlagert, entspricht jedem Punkt im Raum eine konstante Phasendifferenz, und das ist die Grundlage der stehenden Welle.

Da im allgemeinen Fall zwei überlagerte Wellen weder die Frequenz noch die Amplitude gemeinsam haben (und daher erst recht nicht die Phase), müssen die Schwebungseffekte, die Differenztöne usw. in jedem Punkt individuell betrachtet werden.

Das INTERFERENZROHR von Quincke, (auch Umwegrohr genannt) besteht aus einer Verzweigung eines akustischen Rohres in zwei Rohre a und b in einem Punkt P, gefolgt vom Zusammenschluss der beiden Röhren in einem Punkt Q. Die Länge des Abschnittes b kann dank der in der Abbildung schematisierten Anordnung leicht verändert werden.

Diese Anordnung erlaubt es, zwei Töne zu überlagern, die sich nur in ihrer Phase unterscheiden. Der Ausgangston wird in einem Endpunkt des (symmetrischen) Apparates erzeugt, so dass sich die Schallwellen im Punkt P trennen und sich in Q wieder vereinigen. Da das Teilstück a kürzer als b ist, treffen die durch b geleiteten Schwingungen etwas später in Q ein, so dass ein Phasenunterschied entsteht. Wird die Frequenz des Tons so gewählt, dass der Phasenunterschied genau der halben Wellenlänge entspricht, ist das Ergebnis der Überlagerung... die Stille. In diesem Sinn kann das Interferenzrohr von Quincke als ein Antagonist zum Resonator von Helmholtz betrachtet werden, der einen bestimmten Ton verstärkt und alle anderen abschwächt, während im Interferenzrohr das Gegenteil stattfindet.



Tub de Quincke

Auch das folgende, auf Savart zurückführende Experiment dient der Beobachtung der Überlagerung zweier Töne, die sich ausschliesslich in ihrer Phase unterscheiden: Savart erzeugte einen Ton vor einer Wand, so dass sich in den einzelnen Punkten des Raums die von der Schallquelle abgestrahlten und die an der Wand zurückgeworfenen Wellen[18] überlagern. Es ist hier leicht, Bäuche und Knoten zu finden.

[18] In Form eines Echos; üblicherweise wird nur von Echo gesprochen, wenn die Phasendifferenz direkt hörbar ist.

GRAPHISCHE DARSTELLUNG DES TONS UND MASSEINHEITEN

In der Einführung wurde der Begriff der phonographischen Kurve als die Funktionskurve definiert, welche die Elongation als Funktion der Zeit darstellt. Im einfachsten der Fälle ist die phonographische Kurve eine Sinuskurve oder die Überlagerung verschiedener Sinuskurven.

Aber im allgemeinen kann die Kurve recht unregelmässig gestaltet sein. Es sei daran erinnert, dass die Kurve die relative Lage eines schwingenden Objekts in Funktion der Zeit darstellt. Wie wir es im Fall der schwingenden Saite gesehen haben, ist das menschliche Gehör imstande die verschiedenen Partialtöne, aus denen ein musikalischer Ton (also eine periodische Schwingung) zusammengesetzt ist, einzeln herauszuhören. Die Partialtöne können auch mit einem Resonator oder mit einem elektronischen Messgerät ermittelt werden. Wir haben also hier drei verschiedene Systeme, um die Partialtöne eines zusammengesetzten Tones zu bestimmen. Die Figur "Vier periodische Kurven" stellt folgendes dar:

a) Einen Sinuston mit der Formel:

$$y = \sin(x)$$

b) Den gleichen Ton mit einem harmonischen Oberton, dessen Amplitude drei mal kleiner als die des Grundtons ist:

$$y = \sin(x) + \frac{\sin(2 \cdot x)}{3}$$

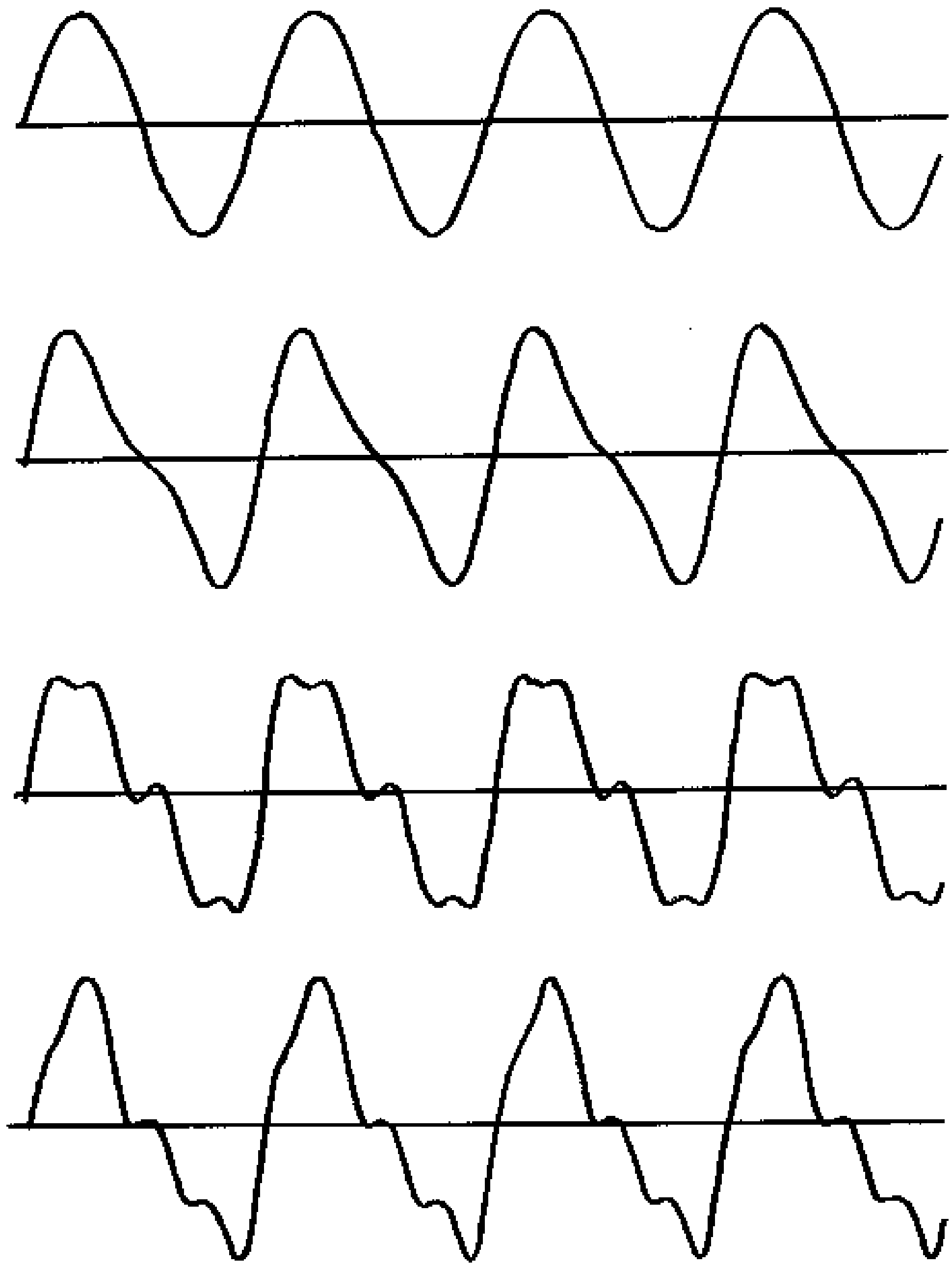
c) Den selben Ton wie in b) mit einem zusätzlichen vierten Partialton, dessen Amplitude fünf mal kleiner als diejenige des Grundtones ist:

$$y = \sin(x) + \frac{\sin(2 \cdot x)}{3} + \frac{\sin(4 \cdot x)}{5}$$

d) Gleich wie in c), aber mit Phasenverschiebung:

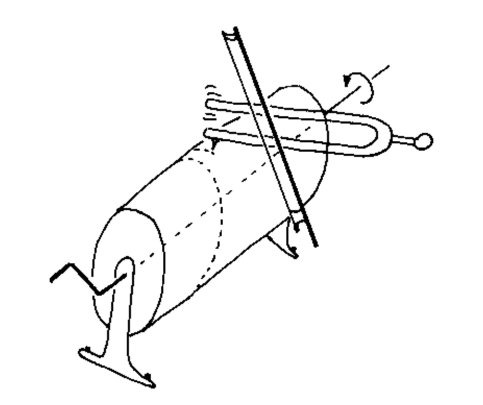
$$y = \sin(x) + \frac{\sin(2 \cdot (x - 0.2))}{3} + \frac{\sin(4 \cdot (x + 0.3))}{5}$$

Seltsamerweise sind die Töne a) und b), die sich optisch nur wenig voneinander unterscheiden mit dem Gehör gut unterscheidbar; die Töne c) und d) hingegen, die sich optisch leicht auseinanderhalten lassen, können mit dem Gehör nicht unterschieden werden. Diese Tatsache wird später im Kapitel 'DER SATZ VON FOURIER' erklärt.

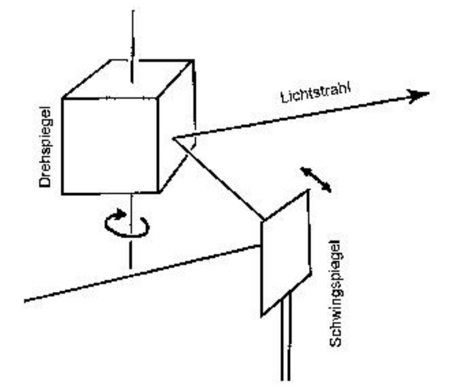


4 periodische Kurven

Die Töne, die wir täglich hören sind im Allgemeinen nicht musikalisch (nicht periodisch) und werden daher als "GERÄUSCHE" oder auch als "Lärm" bezeichnet. Geräusche sind nicht periodisch und stellen im strengeren Sinne des Wortes keine Töne dar, obwohl uns das eine oder andere Geräusch an eine gewisse Tonhöhe erinnert, wenn einer der Partialtöne die anderen an Lautstärke übertrifft. Wenn wir ein kurzes Fragment aus einem Geräusch betrachten, können wir es dem musikalischen Ton zuordnen, der bei der periodischen Wiederholung des Fragments entstünde.


Anordnung von Young

Freilich wird die Aufteilung eines Tones in Partialtöne bei der Verkürzung des betrachteten Abschnitts allmählich ungenauer, da es unmöglich ist, eine Periodizität aufgrund eines zu kurzen Kurvenstückes abzuleiten. Besonders tiefe periodische Töne (die entsprechend lange Perioden aufweisen) können anhand eines kurzen Kurvenstücks nicht erkannt werden. Wird andererseits das Kurvenstück verlängert, um genaue Messungen der auftretenden Periodizitäten vornehmen zu können, werden kurze musikalische Töne nicht mehr als solche erkannt. Entsprechende Probleme treten bei der Wahl der Bandbreiten auf. Wir beobachten also hier eine gewisse Unbestimmtheit, die formal mit der Unschärferelation von Heisenberg verglichen werden kann.



Die schwingenden Spiegel

Eines der ersten Systeme der Geschichte, das erlaubte, eine phonographische Kurve aufzuzeichnen stammt von T. Young, der 1807 die annähernd sinusoidalen Schwingungen einer Stimmgabel auf einen mit Russ überdeckten Zylinder aufzeichnete. Beim Experiment von Young schrieb eine an einem Arm einer schwingenden Stimmgabel befestigte Nadel die Schwingungen in die Russschicht, während die Schwingungen durch eine Art Geigenbogen unterhalten wurden.

Obwohl heutzutage ausschliesslich der elektronische Oszillograph eingesetzt wird, funktionierten die ersten Oszillographen aufgrund eines Drehspiegels, der einen an einem schwingenden Spiegel reflektierten Lichtstrahl auf einen Bildschirm projizierten. Diese Anordnung erlaubt es, die phonographische Kurve einer beliebigen periodischen Schwingung darzustellen. An Stelle eines einzelnen Spiegels werden meist mehrere symmetrisch zur Drehachse angeordnete Spiegel $m_1, \ldots m_n$ eingesetzt, wie in der Figur dargestellt.

Der Schwingspiegel muss so angeordnet werden, dass er den Schwingungen folgt, die graphisch dargestellt werden soll. So kann er etwa auf der Spitze einer Stimmgabel befestigt werden, wenn wir eine Analogie des Youngschen Experimentes nachvollziehen wollen. Die Kombination mit einer Membrane, die im Einklang mit den Schallwellen schwingt ermöglicht die Darstellung beliebiger periodischer Klänge. Die Achse[19] des schwingenden Spiegels muss zur Achse des Drehspiegels senkrecht stehen; auf diese Weise wird der vom schwingenden Spiegel reflektierte Strahl hinauf und hinunter schwingen, immer in Richtung zur Drehspiegelachse. Jede Facette des Rotationsapparates projiziert den Strahl von links nach rechts (oder umgekehrt) auf den Bildschirm. Bei der Ablösung der Facette springt der Strahl in die Ursprungsstellung an den linken (oder rechten) Rand des Bildschirms zurück. Passen wir die Drehgeschwindigkeit der Periodizität des Schalls an, erhalten wir eine scheinbar stillstehende Projektion[20], die sogar photographisch festgehalten werden kann.

Ab 1864 untersuchte Koenig den Schall mittels einer Kombination des Drehspiegeloszillographen mit einer Gasflamme, die im Rhythmus des Schalls ihre Gestalt verändert. Dies war dank der anschliessend beschriebenen manometrischen Kapsel möglich.

Die manometrische Flamme

Eine Seite der Kapsel ist mit einer flexiblen Membrane bespannt, die mit den Schallwellen mitschwingen kann. Die gegenüberliegende Seite ist steif und weist je eine Öffnung auf, durch die ein kontinuierlicher Strom von Leuchtgas in die Kapsel (respektive aus der Kapsel) dringt. Das ausströmende Gas wird angezündet. So bewirken kleinste Druckänderungen, wie sie der auf die Membrane wir-

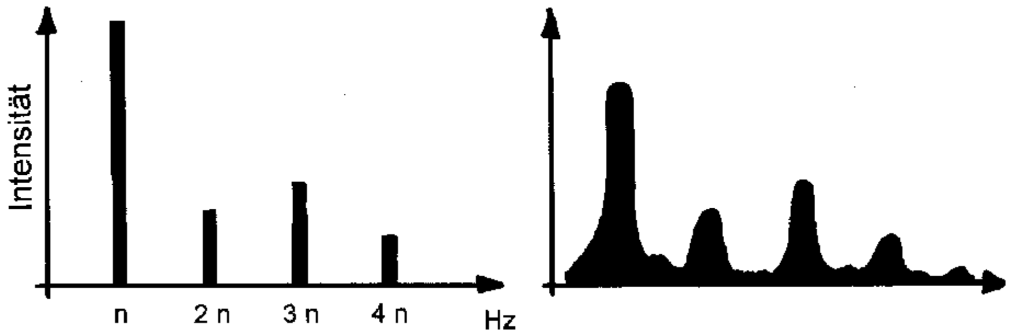
---

[19] Die Achse des Schwingspiegels ist meist eine imaginäre, zur Drehspiegelachse senkrecht stehende Achse.

[20] Ab 20 oder 30 Umdrehungen pro Sekunde täuscht uns unser Sehorgan einen Eindruck von Stetigkeit vor; dieser Effekt ist eine der Grundlagen der Kinematographie.

kende Schall hervorruft, Variationen in der Form und Grösse der Flamme. Die Figur *"Die manometrische Flamme"* zeigt schematisch drei der möglichen Figuren[21], die mit dem Drehspiegel erhalten werden können. Die erste entspricht dem gesungenen Vokal *u*. Die zweite und die dritte entsprechen dem Vokal *i*, der im zweiten Fall auf einem höheren Ton gesungen wurde.

Unter den Erfindungen, die der Darstellung der phonographischen Kurve dienen, muss der vom Typographen Scott erschaffene *Phonautographe* aus dem Jahr 1857 erwähnt werden. Der *Phonautographe* arbeitet ähnlich, wie der Phonograph von Edison, erlaubt aber die Wiedergabe des Schalls nicht. Die Aufzeichnung erfolgt wie beim Apparat von Young auf einen mit Russ überdeckten Zylinder. Der *Phonautographe* von Scott sei hier wegen seiner grossen Ähnlichkeit mit dem im Kapitel 'DIE REPRODUKTION DES SCHALLS' besprochenen Phonographen nicht näher beschrieben.



Partialtonspektrum eines periodischen und eines annähernd periodischen Tons

Ein idealer musikalischer Ton (im Sinne der Definition, nicht der Ästhetik, also ein perfekt periodischer Ton) kann als Partialtonspektrum dargestellt werden, wie in der Figur gezeigt. Das Partialtonspektrum informiert uns über die Amplitude der einzelnen Partialtöne, die für die Charakteristik der Klangfarbe der Musikinstrumente mit unterhaltenem Ton eine überragende Bedeutung haben.

Bei einem annähernd periodischen Ton, also einem Ton mit nicht perfekt harmonischen Partialtönen, oder auch einem ganz aperiodischen Ton, geht das Partialtonspektrum in eine stetige Kurve über, die etwa wie der rechte Teil der Figur aussehen kann. Im Falle von aperiodischen Klängen vermittelt uns das Partialtonspektrum nur eine Beschreibung eines bestimmten Augenblicks des Verlaufes des Schalls. Hier hängt das Ergebnis stark von der Länge des betrachteten Intervalls ab.

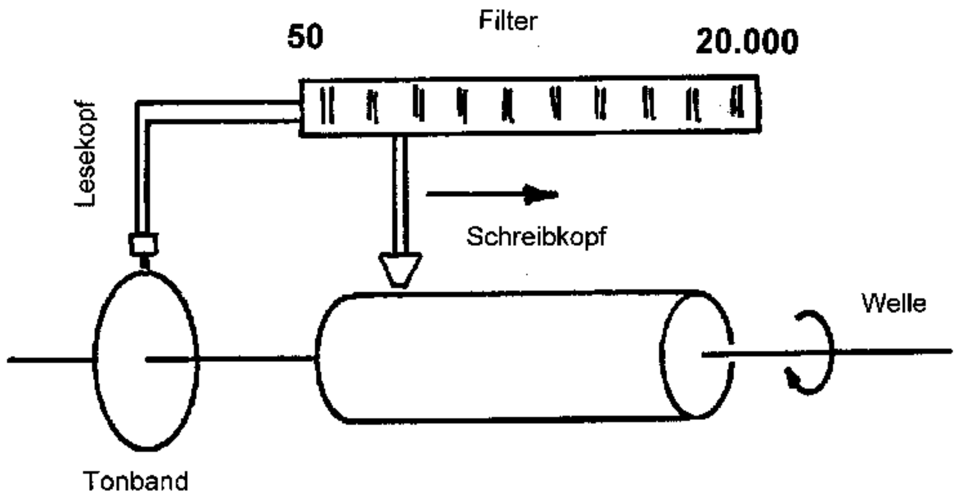
Könnten wir in drei Dimensionen zeichnen, könnte der Schall wie eine Art Skulptur dargestellt werden, indem man ein Koordinatensy-

[21] Die drei Figuren wurden durch Nachzeichnen einer der Abbildungen des Buches von R. Koenig *Quelques expériences d'acoustique* (Paris, 1882) erhalten.

stem festlegte, in dem die Zeit, die Frequenzen und die Amplituden den drei Koordinatenachsen entsprächen. Um diese Daten graphisch darzustellen, müssen wir uns mit einer Projektion dieses Schallraumes auf die Ebene unseres Zeichenblattes begnügen, das heisst in der Praxis, wir müssen eine perspektivische Abbildung herstellen.

Wenn wir uns eine Beige von chronologisch geordneten Diagrammen vorstellen, die in regelmässigen Zeitabständen auf transparentes Material einer gewissen Dicke angefertigt wurden, können wir uns so ein perspektivisches Diagramm —das an eine phantastische Landschaft erinnern könnte— besser vorstellen.

Um den Schall graphisch darzustellen, entwickelten die Bell Laboratorien den SONOGRAPHEN, der sogenannte SONOGRAMME erzeugt. Im sonographischen System wird die Amplitude der verschiedenen Partialtöne durch Grautöne wiedergegeben. Ein helles Grau bedeutet eine kleine Amplitude, ein dunkles, eine grosse. Eine weisse Fläche bedeutet die totale Abwesenheit des entsprechenden Partialtons.



Funktionsweise des Sonographen

Das Sonogramm wird als ein ideales System zur graphischen Darstellung von Schall betrachtet. Das Funktionsprinzip des Apparates sei hier kurz erläutert:

Eine Schallsequenz wird auf Tonband aufgenommen. Das Band wird auf denselben Zylinder aufgespannt, der auch Träger des Aufzeichnungspapiers ist. Das sonographische Papier ist ein sensibilisiertes Papier, wie etwa Photopapier oder thermographisches Papier. Der Schreibkopf fängt auf der untersten Stufe (auf einer parallelen Linie) mit der Aufzeichnung der Amplituden an, die dem ersten in Betrachtung gezogenen Frequenzbereich entsprechen, z.B. zwischen 50 und 60 Hz. Die Trennung zwischen den verschiedenen Frequenz-bändern wird mit elektronischen Filtern vorgenommen, die eine ähnliche Aufgabe erfüllen, wie die akustischen Resonatoren von Helmholz. Sobald der Zylinder eine Umdrehung verrichtet hat, rutscht der Schreibkopf auf das nächste Niveau auf dem Papier und der elektronische Filter wird automatisch an das nächste Frequenzband angepasst (z.B. 60 bis 75 Hz).

Nach einer Anzahl Umdrehungen erhält man auf dem Papier eine Darstellung, die der senkrechten Projektion unseres dreidimensionalen Modells entspricht, wenn wir die Höhe (Amplitude der einzelnen Frequenzen) durch Grauwerte ersetzen.

Soll der Schall quantitativ erfasst werden, muss zwischen zwei Masssystemen unterschieden werden, nämlich den physikalischen und den psychologischen. Die physikalischen Einheiten sind objektiv und unabhängig vom Gehör; die psychologischen variieren von einer Person zur anderen und können sogar vom momentanen Befinden der Person abhängen.

Da die psychologischen Einheiten von den physikalischen abhängen, soll mit letzteren angefangen werden.

Im internationalen metrischen System (SI), das 1960 anlässlich der elften internationalen Konferenz über Masse und Gewichte eingeführt wurde, können alle Masse der klassischen Physik durch sieben Grundeinheiten ausgedrückt werden: der Meter (m) ist die Einheit des Abstandes, die Massen werden in Kilogramm (kg) ausgedrückt, und die Zeitspannen in Sekunden (s). Die elektrische Stromstärke wird in Ampère (A), die Temperatur in Kelvin (K), die Stoffmenge in Mol und die Lichtintensität in Candela (cd) ausgedrückt[22]. Die anderen Einheiten werden von diesen drei Grundeinheiten abgeleitet. Man spricht manchmal vom MKS-System, um es vom vorher gebräuchlichen CGS-System zu unterscheiden, das den Zentimeter (cm), das Gramm (g) und die Sekunde (s) als Grundeinheiten verwendete. Obwohl die beiden Systeme gleichwertig sind, sollten wir uns heute an die Vereinbarung halten und nur noch das MKS-System anwenden. Da aber in älteren Büchern häufig das CGS-System verwendet wurde, seien die beiden Systeme einander in der Tafel gegenübergestellt.

[22] Wer genaueres darüber wissen will, kann die Webseite des "Bureau International des Poids et Mesures", www.bipm.fr konsultieren, die unter anderem eine Übersichtstafel über die Verknüpfung der einzelnen abgeleiteten Einheiten untereinander bietet.

	MKS	CGS	Technische Einheiten
Länge	m	cm	
Masse	kg	g	
Zeit	s	s	
Geschwindigkeit	m/s	cm/s	
Kraft	$N = \frac{m \cdot kg}{s^2}$	$dyn = \frac{cm \cdot g}{s^2}$	1 kp = 9,81 N
Energie[23] **oder Arbeit**	$J = N \cdot m = \frac{m^2 \cdot kg}{s^2}$	$erg = dyn = 10^7 J$	1 cal = 4,187 J
Leistung	$W = \frac{J}{s} = \frac{m^2 \cdot kg}{s^3}$	erg/s	1 PS = 735,7 W
Druck	$Pa = \frac{N}{m^2}$	$\frac{dyn}{cm^2}$	1 atm = 101325 Pa
Intensität	$\frac{W}{m^2}$	$\frac{erg}{s \cdot m^2}$	

Folgende physikalischen Einheiten sollen anschliessend kurz besprochen werden: Die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, die Kraft, die Energie, die Leistung, der Druck und die Intensität.

Die GESCHWINDIGKEIT ist der Quotient zwischen dem Weg, den ein Objekt (etwa ein Partikel oder eine Welle) zurückgelegt hat und der Zeit, die es dazu braucht. So ist etwa die mittlere Geschwindigkeit eines Autos, das innerhalb einer halben Stunde 40 km zurückgelegt hat $\frac{40\,\text{km}}{\frac{1}{2}\,\text{h}}$ = 80 km/h. Im MKS-System werden die Geschwindigkeiten in m/s gemessen. Das Auto unseres Beispiels fährt also mit 22,22... m/s.

Ändert ein bewegtes Objekt seine Geschwindigkeit, sagt man, es sei einer BESCHLEUNIGUNG ausgesetzt. Bei abnehmender Geschwindigkeit wird mitunter auch von VERZÖGERUNG gesprochen.

Ist die Beschleunigung gleichmässig, entspricht einem bestimmten Zeitintervall ein konstanter Geschwindigkeitsunterschied. In diesem Fall wird die Beschleunigung als Quotient zwischen dem Geschwindigkeitsunterschied (Zunahme oder Abnahme) und dem entsprechenden Zeitintervall berechnet. Im MKS-System wird die Beschleunigung in $\frac{m/s}{s} = \frac{m}{s^2}$ ausgedrückt. Ein frei fallender Körper im

[23] Die physikalische **Arbeit** wird in derselben Einheit ausgedrückt, wie die Energie, nach dem Motto: *Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.*

Vakuum liefert ein schönes Beispiel einer gleichmässigen Beschleunigung, mit einer Beschleunigung von ca. 9,81 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$, dem für die Gravitationskraft auf der Erdoberfläche charakteristischen Wert.

Bewegte Körper haben die Tendenz, die gleiche gerade Richtung und die gleiche Geschwindigkeit beizubehalten, wenn sie frei von äusseren Einflüssen sind.

Die äusseren Einflüsse, die es vermögen, einen Körper von seiner geradlinigen Bahn abzubringen oder seine Geschwindigkeit zu verändern, heissen KRÄFTE. So brauchen wir etwa Kraft, um ein Auto zu bremsen oder zu beschleunigen. Newton fand die folgende Beziehung zwischen der Kraft, der Masse und der Beschleunigung eines Objekts:

KRAFT = MASSE · BESCHLEUNIGUNG

Im MKS-System ist die Einheit der Kraft das NEWTON (N); ein N ist ein $\frac{\mathrm{m} \cdot \mathrm{kg}}{\mathrm{s}^2}$ und entspricht der Kraft, die angewandt werden muss, um eine Masse von einem kg um einen $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ zu beschleunigen.

Wird über eine gewisse Wegstrecke eine konstante Kraft auf einen Körper ausgeübt, wird eine gewisse Menge Energie verbraucht (besser: verwandelt); man sagt, es sei eine gewisse Arbeit verrichtet worden. Die Energie, die einer Kraft von einem N über den Abstand eines m entspricht, heisst 1 JOULE (J). Die Einheit Joule entspricht einem N·m, also einem $\frac{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg}}{\mathrm{s}^2}$. 1 J ist ungefähr die Energie, die wir brauchen, um einen Stein von 100 g Masse um einen m anzuheben. Die Energie[24] ist von der Zeitspanne, die es braucht, um sie zu verbrauchen (besser: umzuwandeln) unabhängig.

Sind wir an der Energie interessiert, die innerhalb einer gewissen Zeitspanne umgewandelt wird, so brauchen wir den Begriff der LEISTUNG. Die Leistung ist der Quotient zwischen der Energie und der Zeit und wird in WATT (W) gemessen. Das Watt lässt sich unter Anwendung der Grundeinheiten folgendermassen ausdrücken:

$$1\,\mathrm{W} = 1\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = 1\frac{m^2\,\mathrm{kg}}{s^3}$$

Um die in der Akustik üblichen quantitativen Masseinheiten auszudrücken brauchen wir noch zwei weitere Definitionen, nämlich die des Drucks und die der Intensität.

---

[24] Analog kann gesagt werden: *Die Arbeit ist von der Zeitspanne, die es braucht, um sie zu verrichten, unabhängig.*

Der DRUCK ist die auf eine Oberfläche angewandte Kraft und wird in PASCAL (Pa) gemessen. Man spricht von einem Pa Druck, wenn die Kraft von einem N auf eine Oberfläche von einem m^2 wirkt.

$$1\,\mathrm{Pa} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{m^2} = 1\,\frac{\mathrm{m}\cdot\mathrm{kg}}{s^2\cdot\mathrm{m}^2} = 1\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^2}$$

Jeder kennt intuitiv die Erscheinung des Drucks, wie er etwa in einem Wasserschlauch wirkt. Hier interessiert uns vor allem der von den Schallschwingungen erzeugte akustische Druck. Die Lautstärke steht in direktem Verhältnis zum Quadrat des akustischen Drucks.

Die INTENSITÄT ist durch die Wirkung einer bestimmten Leistung auf eine konstante Oberfläche gegeben. Sie wird als $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ ausgedrückt. Mitunter wird die Intensität auch als Leistungsdichte bezeichnet. Bei der Wahrnehmung eines Tons ist die physikalische Intensität der auf unser Trommelfell auftreffenden Schallwellen ein ausschlaggebender Faktor. Bald aber werden wir sehen, dass bei der Lautstärkenempfindung noch ganz andere Faktoren mitspielen.

Die Stärke des psychologischen Empfindens ist nicht zur Intensität des auslösenden Reizes proportional. Diese Tatsache wurde von Weber untersucht, der 1834 das Gesetz[25] prägte:

"DIE KLEINSTE NOCH WAHRNEHMBARE ZUNAHME EINES REIZES IST EIN KONSTANTER BRUCHTEIL DES WAHRGENOMMENEN WERTES."

Die Verallgemeinerung dieses Gesetzes durch Fechner ist die heute als Weber-Fechnersches Gesetz bekannte Tatsache:

"DIE EMPFINDUNGEN SIND PROPORTIONAL ZUM LOGARITHMUS DES REIZES."

Unabhängig von Weber und Fechner, kam schon um 1836 der Astronom, Physiker und Fabrikant optischer Präzisionsinstrumente C. A. Steinheil zum Schluss, dass die scheinbaren Helligkeiten der Sterne sich verhalten, wie die Logarithmen ihrer physikalischen Leucht-Intensität.

Zünden wir zum Beispiel in einem von einer einzigen Kerze beleuchteten Raum eine zweite Kerze an, empfinden wir nicht die

---

[25] Man findet meist die folgende, gleichwertige Formulierung: *"Der Zuwachs zu einem Reiz muss in einem bestimmten, gleichbleibenden Verhältnis zu diesem stehen, damit ein merklicher Empfindungsunterschied stattfindet."*

doppelte Lichtmenge. Zünden wir andererseits eine dritte Kerze an, empfinden wir eine gleiche Zunahme, wie wenn wir die Beleuchtung in einem Raum mit 8 Kerzen durch 4 weitere Kerzen ergänzen.

Brauchen wir beim Anheben eines Gewichtes von 2 kg Masse ein Minimum von 0,3 kg um den Gewichtsunterschied feststellen zu können, so brauchen wir bei einer Masse von 10 kg eine Zunahme von 1,5 kg.

Ein weiteres Beispiel aus dem Bereich der Frequenzen: Ein bestimmtes Intervall, wie etwa eine Quinte, ist durch eine proportionale Frequenzzunahme bestimmt, nicht durch eine lineare Zunahme. Das gleiche ist natürlich auch bei der Wahrnehmung akustischer Lautstärke der Fall.

Um die physikalischen Einheiten den psychischen Wahrnehmungen anzupassen wurde die Einheit Bel[26] festgelegt, eine logarithmische Einheit, die die proportionale Zunahme an Intensität beschreibt. Das Bel ist also eine physikalische Einheit, nicht eine psychologische, wie manchmal behauptet wird. Für praktische Zwecke wird das Bel üblicherweise in 10 Dezibel (dB) unterteilt.

Ein in dB ausgedrückter Wert bezieht sich also nicht auf eine bestimmte Intensität, sondern auf das Verhältnis zwischen zwei Intensitäten. Trotzdem kann eine Intensitätsskala in dB aufgestellt werden, wenn von einer Grundintensität ausgegangen wird, die dem Grad 0 der Skala entspricht. Als Grundintensität pflegt man die kleinste von einem durchschnittlichen Menschen noch wahrnehmbare physikalische Intensität zu wählen. Dieser unglaublich kleine Wert von etwa $10^{-16}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{cm}^2}$ entspricht einem akustischen Druck von etwa $2\ \cdot 10^{-5}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$.

Wird von einer Grund-Intensität von I_g ausgegangen, kann jede Intensität durch Anwendung der folgenden Formel in Bel umgewandelt werden, wobei das Symbol lg für den Zehnerlogarithmus steht:

$$\text{Anzahl Bel} = \lg \frac{I}{I_g}$$

Um die Anzahl dB zu erhalten, muss der Wert in Bel lediglich mit 10 multipliziert werden[27].

---

[26] Zu Ehren von Alexander Graham Bell (1847-1922), dem Erfinder des Telephons.

[27] Da die Intensität mit dem Quadrat des akustischen Drucks zunimmt, müssen wir unsere Formel leicht anpassen, wenn wir die Intensitätsznahme anhand der Zunahme des akustischen Drucks von p auf q berechnen wollen: $\text{Anzahl dB} = 10 \cdot \lg\left(\frac{p}{q}\right)^2 = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{q}\right)$

Die Anwendung der Einheit dB beschränkt sich nicht auf die Akustik. In unserem Beispiel mit den Kerzen können wir die Anzahl dB zwischen der Beleuchtung mit einer oder mit zwei Kerzen berechnen:

$$10 \cdot \log (2/1) = 3{,}0102\ dB$$

Bis jetzt ist alles berechenbar. Aber zwei Effekte komplizierten die Verhältnisse: Erstens ist das menschliche Gehör in den verschiedenen Frequenzbereichen nicht gleich empfindlich und zweitens ist das Gesetz von Weber und Fechner nicht mit mathematischer Genauigkeit anwendbar.

Die Empfindlichkeitsverteilung des Gehörs wird im ISOSONIE-DIAGRAMM dargestellt, das zu Ehre seines Schöpfers Harvey Fletcher meist als FLETCHER-DIAGRAMM bezeichnet wird. Die Abszissenachse des Diagramms entspricht den Frequenzen der sinusoidalen Töne, die es zu hören gilt; die Ordinatenachse entspricht der Intensität in dB. Die unterste Kurve entspricht der HÖRGRENZE für die betreffenden Töne. Am empfindlichsten ist das Gehör im Bereich von 3000 Hz. Man beachte, dass die Ordinate logarithmisch ist, um die grossen Unterschiede in der Empfindlichkeit unseres Gehörsinns in den verschiedenen Frequenzbereichen richtig einschätzen zu können. So muss etwa ein Ton von 50 Hz mit einem fast 100 mal höheren akustischen Druck erzeugt werden, um gleich laut empfunden zu werden wie ein Ton von 3000 Hz, was einer Intensitätszunahme um einen Faktor 10000 entspricht. Wir finden noch wesentlich grössere Werte, wenn wir Frequenzen unter 50 Hz oder über 15000 Hz betrachten.

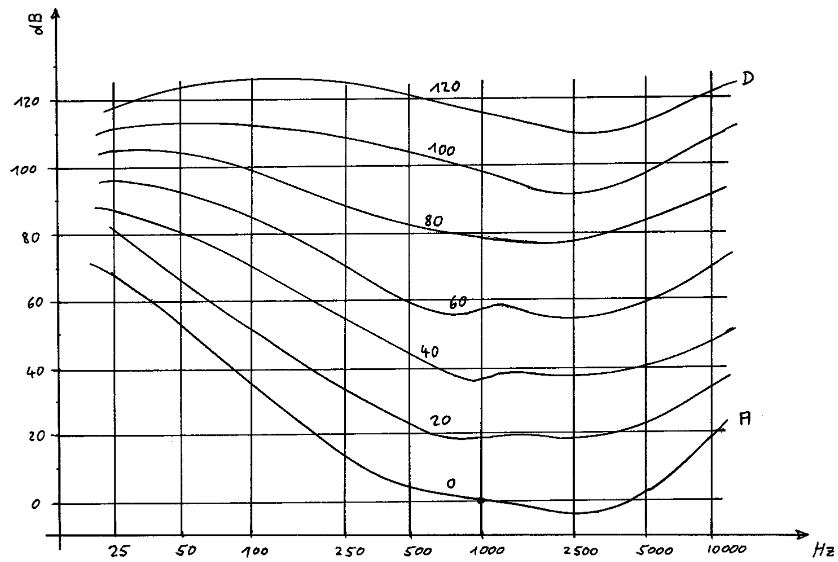


Diagramm von Fletcher

Die Fläche unterhalb der Hörgrenze ist die Zone des Unhörbaren. Erhöhen wir aber die physikalische Intensität einer Sinusschwingung beliebig, werden wir von einer gewissen Intensität an Schmerzen verspüren und es besteht sogar die Gefahr einer unwiederbringlichen Schädigung unseres Gehörs. Die oberste Kurve im Diagramm entspricht der SCHMERZGRENZE für die verschiedenen Frequenzen. Die Zone zwischen der Hörgrenze und der Schmerzgrenze entspricht den hörbaren Tönen.

Wie schon erwähnt, gilt das Gesetz von Weber-Fechner nicht mit mathematischer Genauigkeit, sondern bildet nur eine Annäherung an die Verhältnisse. Aber für Frequenzen um 1000 Hz ist das Gesetz ziemlich genau. Fletcher nutzte diese Tatsache aus, um eine psychologische Einheit zu schaffen, mit welcher sich die Wahrnehmung von Tönen quantitativ erfassen lässt, das PHON.

DEFINITIONSGEMÄSS IST DIE ANZAHL dB EINES SINUSTONS VON 1000 HZ GLEICH DER ANZAHL PHON.

Die anderen Werte werden durch experimentalen Vergleich der Lautstärken des zu prüfenden Tons mit verschiedenen Lautstärken des Referenztons von 1000 Hz ermittelt. Die Hörgrenze, also die Kurve, welche die hörbaren von den unhörbaren Tönen trennt, enthält alle Töne von 0 Phon. Schmerz pflegt sich ab 120 Phon einzustellen. Wir empfinden alle Töne von beispielsweise 40 Phon als gleichlaut.

Wie alle psychologischen Masseinheiten, variiert die Phontafel von einer Person zur anderen, da jedem einzelnen Gehör individuelle Isosonie-Kurven entsprechen. Aber dies ist nicht der Grund, welcher Anlass zur Begründung einer weiteren Masseinheit für Lautstärken, des SONS, gegeben hat. Das Motiv ist, dass die Phon-Werte nicht additiv sind. So weist etwa ein Ton mit der doppelten psychologischen Lautstärke eines Tons von 30 Phon nicht 60 Phon auf.

Für Töne mittlerer Höhe und Intensität (bei 1000 Hz) entspricht eine Zunahme von 10 dB ungefähr einer Verdoppelung der Lautstärkeempfindung. In diesem Fall nimmt die physikalische Energie um einen Faktor 10 zu, da $10 \cdot \lg(10) = 10$ ist. Aber das lässt uns keine Regel herleiten, da diese auf mittlere Lautstärken und Frequenzen beschränkt wäre.

Definitionsgemäss wurde der Wert von 40 Phon einem Son gleichgesetzt. Die anderen Werte wurden experimentell ermittelt und das Resultat war die folgende Tafel, welche die psychologischen Masseinheiten Phon und Son einander gegenüberlegt:

Phon	10	20	30	40	60	80	100	120
Son	0,015	0,1	0,4	1	4	20	100	600

Dieser Tafel können wir etwa entnehmen, dass wir zwischen einem Ton mit 20 und einem anderen mit 30 Phon (10 Phon Zunahme) eine vierfache Lautstärkenzunahme empfinden. Die gleiche Zunahme haben wir zwischen Tönen von 40 und 60 Phon (20 Phon Zunahme).

Im gleichen Sinn, wie die Wahrnehmung der Lautstärken das Weber-Fechnersche Gesetz nicht strikte erfüllen, finden wir auch bei der Wahrnehmung der Tonhöhen (also der Frequenzen) gewisse Abweichungen. Tatsächlich ist es so, dass beim Messen der als rein empfundenen Intervalle (Terzen, Quarten, Quinten, Oktaven, ...) in verschiedenen Frequenzbereichen, gewisse charakteristische Abweichungen festgestellt werden.

Diese Tatsache hat zur Schaffung einer psychologischen Frequenzskala geführt, dessen Einheit das Mel ist. Die allgemeine Tendenz des Gehörs besteht darin, hohen Frequenzen zu niedrige und tiefen Frequenzen zu hohe Werte beizumessen. Das Experiment hat gezeigt, dass die psychologische Tonhöhe nicht ausschliesslich von der Frequenz des Tons, sondern auch von dessen Intensität, von seinen Partialtönen (die weitgehend die Klangfarbe bestimmen), von seiner Dauer und von ein paar anderen Faktoren abhängt.

Einheit	Beschreibung
Bel, dB	Physikalische Einheiten für die Intensitätszunahme
Phon	Psychologische Einheit für die Intensitätszunahme
Son	Additive psychologische Einheit für die Intensitätszunahme
Hz	Physikalische Einheit für die Frequenz und Tonhöhe
Mel	Psychologische Einheit für die Tonhöhe

Das Gehör

Wie jedermann weiss, ist das Organ unseres Gehörsinns das Ohr. Aber viele sind sich nicht bewusst, dass das menschliche Ohr ein weiteres wichtiges Sinnesorgan birgt. In der Tat verbirgt sich in unserem Innenohr auch der Gleichgewichtssinn, dessen Bedeutung vielfach verkannt wird, und den der Volksmund in seiner Formel von den fünf Sinnen ganz einfach ignoriert und beim sechsten Sinn an Esoterik und Aberglauben denkt.

Auch der Wissenschaft blieb der Gleichgewichtssinn lange verborgen, und nur dank den grausamen Vivisektions-Experimenten von Flourens, Goltz und anderer Forscher des XIX Jahrhunderts wurde es schliesslich möglich, den Sitz des Gleichgewichtsorganes der Vögel und der Säugetiere zu orten.

In diesem Zusammenhang beschränkt sich unser Interesse für das menschliche Ohr auf den Gesichtspunkt des Gehörs. Die anatomischen Zeichnungen, die diese kleine Einführung begleiten sind streng schematisch gehalten und dienen hauptsächlich der Erläuterung des Weges, den die Schallwellen nach ihrem Eintritt durch die Ohrmuschel bis zum empfindlichen Teil des Gehörs, dem Cortischen Organ, zurücklegen. Die Entdeckung dieses kleinen, schwer zugänglichen und sorgfältig verborgenen Bestandteils unseres Gehörorgans war ein Bravourstück, das Alfonso Corti bereits 1846 vollbrachte.

Üblicherweise wird das Ohr in drei Gebiete aufgeteilt: Das äussere Ohr, das hauptsächlich aus der Ohrmuschel (5) und dem äusseren Gehörgang (1) besteht, das Mittelohr und das Innenohr. Im ersten Gebiet verbreiten sich die Schallwellen in der Luft ab. Im zweiten Gebiet werden die Schwingungen durch festes Material, nämlich Knochen, geleitet. Im Innenohr schliesslich, wo die Schallwellen in Nervenimpulse verwandelt werden, ist der Kommunikationsträger flüssig.

Eine Membran, das Trommelfell (2), trennt die ersten beiden Gebiete des Gehörs voneinander, zwei weitere Membranen begrenzen das Mittelohr vom Innenohr: das ovale Fensterchen (3) und das runde Fensterchen (4).

Der sichtbare Teil des Aussenohrs besteht aus der Ohrmuschel (5). Obwohl diese bei der Wahrnehmung von Musik oder einem Gespräch nicht unentbehrlich ist, ist doch experimentell festgestellt worden, dass sie bei der Ortung von Schallquellen eine wichtige Rolle spielt.

Durch den äusseren Gehörgang (1), ein leicht gekrümmtes Rohr von etwa 2,5 cm Länge, breiten sich die Schallwellen fort und übertragen ihre Schwingungen auf das Trommelfell (2), das die Grenze zwischen äusserem Ohr und Mittelohr bildet.

Das Mittelohr ist in einer Aussparung im Felsenbein gelagert, der sogenannten PAUKENHÖHLE. Auf seiner inneren Seite leitet das Trommelfell die Schwingungen an den HAMMER *(Malleus)* (6) weiter, das erste Element einer aus drei Knöchelchen aufgebauten Kette. Dieser leitet die Schwingungen an das zweite, scharnierartig angebrachte Knöchelchen weiter, den sogenannten AMBOSS *(Incus)* (7), der seinerseits mit dem dritten Knöchelchen, dem STEIGBÜGEL *(Stapes)* (8) verbunden ist. Letzterer haftet auf einer der beiden Membranen, die das Mittelohr vom Innenohr begrenzen, dem ovalen Fensterchen oder Vorhoffenster (3). Die Figur *"Anatomische Teile des Gehörs"* lässt den Weg der Schallschwingungen durch die drei Knöchelchen erkennen. Ein Muskel, der *Musculus tensor tympani* (9) erlaubt es, die Intensität der Schallwellen auf ihrem Weg zum Innenohr zu dämpfen. Bei älteren Leuten arbeitet dieser Muskel oft nicht mehr einwandfrei, was die Schmerzgrenze herabsetzt und das Paradoxon erklärt, dass gerade Leute mit reduziertem Hörvermögen am meisten über den Lärm klagen. Dieser Muskel erfüllt eine ähnliche Aufgabe wie das antagonistische Muskelpaar[28] das die Erweiterung der Iris unseres Auges reguliert.

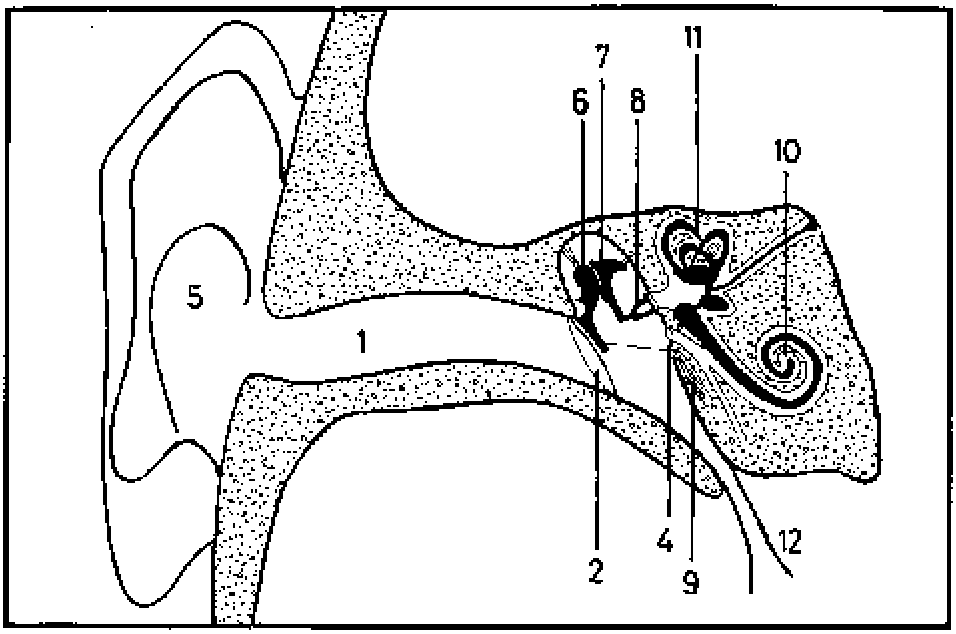
Das Mittelohr ist über die OHRTROMPETE *(Tuba auditiva*, nach ihrem Entdecker, Bartolomeo Eustachio (1524-1574) auch Eustachische Röhre genannt) mit dem Rachenraum verbunden, was ermöglicht, den Luftdruck im Mittelohr den atmosphärischen Verhältnissen anzupassen. Fahren wir etwa mit dem Auto eine Passstrasse hinunter, merken wir, wie sich der Druck beim Schlucken oder Gähnen ausgleicht. Ist die Öffnung bei einer Erkältung verstopft, kann der Druckunterschied zwischen Mittelohr und Umwelt sehr störend sein; beim Tauchen kann ungenügender Druckausgleich dem Trommelfell schweren Schaden zufügen.

Das Innenohr ist ein extrem komplizierter Apparat, der hauptsächlich aus dem LABYRINTH besteht, welches das von PERILYMPHE

[28] Das Paar besteht aus dem Musculus sphincter pupillae und dem Musculus dilatator p upillae.

umgebene HÄUTIGE LABYRINTH enthält. Das Häutige Labyrinth seinerseits enthält eine andere Flüssigkeit, die ENDOLYMPHE.

Das knöcherne Labyrinth wird in zwei Sektionen aufgeteilt, die SCHNECKE (10), die das eigentliche Hörorgan beherbergt und die BOGENGÄNGE (11) welche dem Gleichgewichtssinn angehören. Beide Sektionen sind durch das *Vestibulum* oder Vorhof (13) (im Bereich des Vorhoffensters (3), das die Schallschwingungen des Steigbügels weiterleitet) voneinander abgegrenzt.



Querschnitt durch das Ohr

Ein Kanal, der PERILYMPHGANG oder *Ductus perilymphaticus* (14) verbindet das Gehörorgan mit dem subarachnoidalraum des Gehirns.

Im knöchernen Labyrinth, im Schutze des Felsenbeins, fliesst die Perilymphe, in welcher das häutige Labyrinth schwimmt, das zwei deutliche Bläschen aufweist: das GROSSE VORHOFSÄCKCHEN *(Utriculus)* (15), in das die Bogengänge münden, und das KLEINE VORHOFSÄCKCHEN *(Sacculus)*. Die beiden Bläschen sind miteinander durch den *CANALIS UTRICCULOSACCULARIS* verbunden, von dem ein dünner Schlauch abzweigt, der *DUCTUS ENDOLYMPHATICUS* (17), der blind endet.

Sowohl der *Utriculus*, wie der *Sacculus* enthalten Sinnesepithel (*Macula sacculi* und *Macula utriculi*). Die Bogengänge *(Ductus semicirculares)* haben Hufeisenform und sind in zueinander annähernd senkrechten Ebenen gelegen. Die Bogengänge sind in Vögeln besser entwickelt, die zum Überleben einen weit besseren Raumorientierungssinn brauchen als wir Menschen.

Die Schnecke beschreibt ungefähr zweieinhalb Windungen. In unserer schematischen Darstellung haben wir den Verlauf des Schneckengangs reduziert. Die Schallwellen werden über das ovale Fensterchen (auch Vorhoffenster genannt) übermittelt und durchlaufen die VORHOFTREPPE (18) oder *Scala vestibuli* bis zur Spitze der Schnecke, von wo aus sie über die PAUKENTREPPE (19) oder *Scala tympani* bis zum runden Fensterchen (auch Schneckenfenster genannt) gelangen.

Die Zone, in der die Vorhoftreppe und die Paukentreppe zusammenlaufen, die Spitze der Schnecke, heisst SCHNECKENLOCH oder *Helicotrema* (20). Die Schallwellen bewegen sich also durch die Perilymphe der knöchernen Schnecke und bringen dabei die Schnekkenkanal (26) oder Ductus cochlearis[29] enthaltene Endolymphe zum Schwingen. Das letzte Teilbild unserer Abbildung stellt einen Querschnitt durch den Schneckenkanal dar, umgeben von der Vorhoftreppe (oben links im Bild), der *STRIA VASCULARIS* (rechts im Bild) und der Paukentreppe (unten). Im Schneckenkanal liegen die eigentlichen Sinneszellen, angeordnet im Cortischen Organ (27). Die gerasterten Zonen des Bilds entsprechen der Perilymphe, die weisse Zone der Endolymphe.

Die Endolymphe ist also in einem Kanal von annähernd dreieckigem Querschnitt enthalten. Angrenzend an die Paukentreppe, auf der als Basilarmembran (21) oder *Lamina basiliaris* bezeichneten Zone liegt, unter einer gallertartigen Schicht, der *LAMINA TECTORIAL* (24) das eigentliche CORTISCHE ORGAN.

Dieses besteht im wesentlichen aus zwei mit bewimperten Sinneszellen bestückten Bändern, dessen Haarzellen gegen die *Lamina tectorial* ausgerichtet sind. Es konnte bisher nicht abgeklärt werden, ob die Härchen der Sinneszellen die Lamina tectorial berühren, oder ob sie ausschliesslich durch die Bewegung der Endolymphe gereizt werden.

Drei Kanäle begleiten das Cortische Organ auf seiner gesamten Länge. Deren Funktion ist bisher nicht aufgeklärt worden, aber es scheint, als ob sie eine der Perilymphe ähnliche Flüssigkeit enthielte. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass die von den Sinneszellen des Cortischen Organs abgegebenen Impulse über den *NERVUS COCHLEARIS* (25) ins Gehirn geleitet werden. In Wirklichkeit sind die Verhältnisse wesentlich komplizierter und eine detaillierte Beschreibung ginge weit über die Absicht dieses Buches.

---

[29] Der Schneckenkanal bildet einen Abschnitt des häutigen Labyrinths.

1 Äusserer Gehörgang, Meatus	14 Perilymphgang
2 Trommelfell	15 Grosses Vorhofsäckchen, Utriculus
3 Vorhoffenster, Fenestra vestibuli	16 Kleines Vorhofsäckchen, Sacculus
4 Schneckenfenster, Fenestra cochlea	17 Endolymphatischer Gang, Ductus endolymphaticus
5 Ohrmuschel	18 Vorhoftreppe, Scala vestibularis
6 Hammer, Malleus	19 Paukentreppe, Scala tympani
7 Amboss, Incus	20 Schneckenloch, Helicotrema
8 Steigbügel, Stapes	21 Basilarmembran, Lamina basilaris
9 Trommelfellspanner, M. tensor tympani	22 Reissnersche Membrane
10 Schnecke, Cochlea	23 Stria vascularis
11 Bogengänge, Ductus semicirculares	24 Lamina tectorial
12 Ohrtrompete, Eustachische Röhre	25 Nervus cochlearis
13 Vorhof, Vestibulum	26 Schneckenkanal, Ductus cochlearis
	27 Cortisches Organ

Die Schallwellen, die die Perilymphe durchqueren, vermitteln ihre Schwingungen der Basilarmembran, auf welcher die Sinneszellen des Cortischen Organs nacheinander auf die verschiedenen Frequenzen zwischen ca. 20 und über 20.000 Hz ansprechen.

Die Zellen aus der niederen Region der Schnecke, also die an das Schneckenfenster angrenzende Zone, entsprechen den hohen Frequenzen, während die Sinneszellen in der Nähe des Schneckenlochs (Helicotrema) auf die niederen Frequenzen ansprechen.

Helmholtz vermutete, dass die Härchen der Sinneszellen in einer bestimmten Eigenfrequenz mitschwingen und jede der durch diese Schwingung gereizten Sinneszellen nervöse Impulse mit der entsprechenden Frequenz weiterleitete. Es existierte auch die Theorie, wonach die Basilarmembran aus einer ganzen Reihe von Segmenten bestand, die je auf eine ganz bestimmte Frequenz abgestimmt waren. Die Resonanztheorie, die Helmholtz um 1855 wissenschaftlich untermauern wollte, war schon durch die Anatomen des XVII Jahrhunderts intuitiv formuliert worden, wie es die folgenden Schriften beweisen:

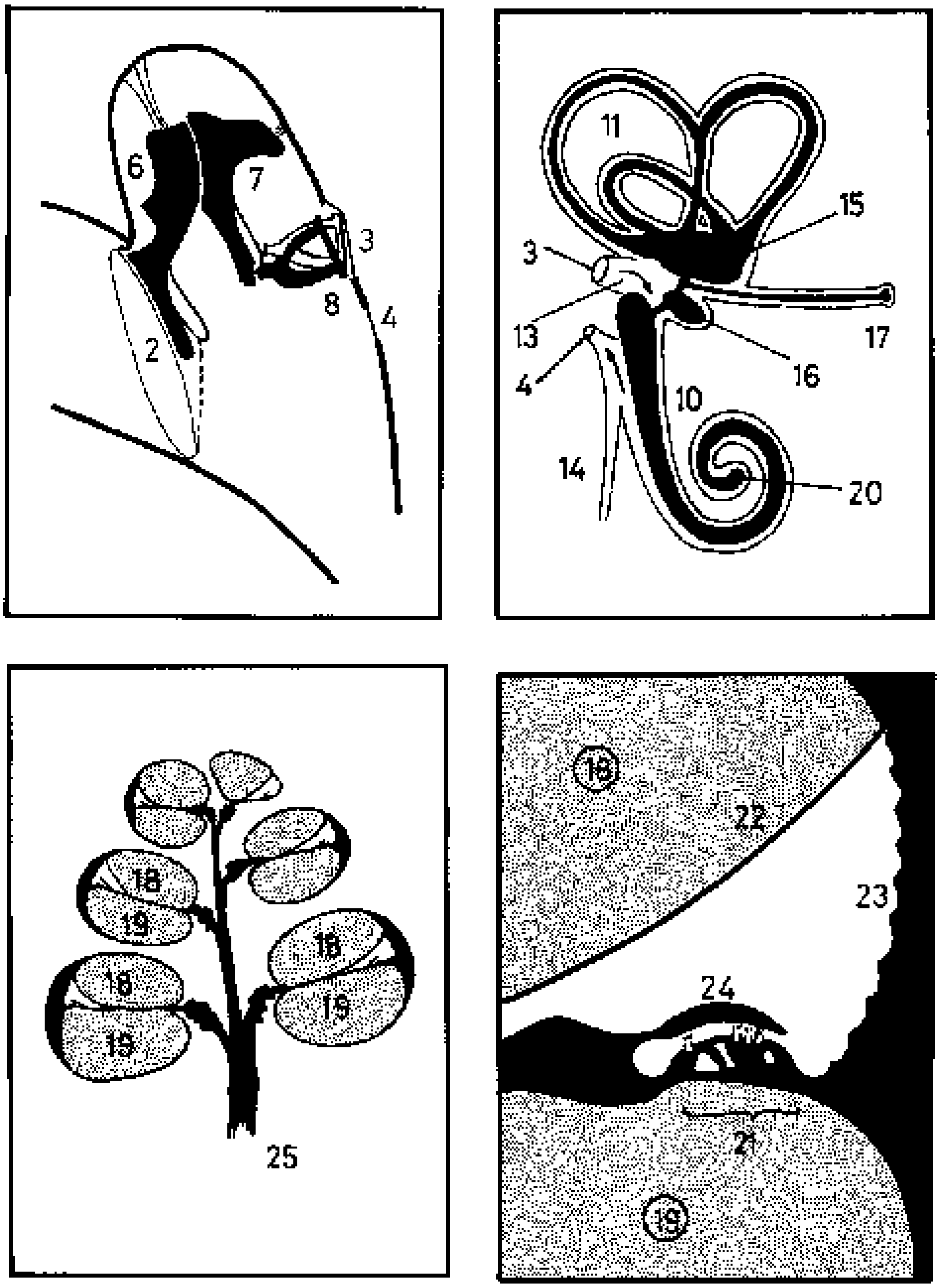
Valsalva: "De Aure Humana tractatus"

Duverney: "Traité de l'organe de l'ouïe..."

Aber die Resonanztheorie von Helmholtz vermochte gewisse unbestrittene Hörerscheinungen nicht zu erklären:

- Hören wir einen aus verschiedenen Frequenzen aufgebauten Klang, ordnet ihm unser Gehör in vielen Fällen eine Tonhöhe zu, die dem grössten gemeinsamen Teiler der beteiligten Frequenzen entspricht, selbst dann, wenn die entsprechende Frequenz selber nicht im Klang vorkommt. Die Überlagerung dreier Töne mit Frequenzen von 1100, 1200 und 1300 Hz lässt uns einen Ton von 100 Hz hören, der dem ersten Partialton eines Tons mit den harmonischen Partialtönen 11, 12 und 13 entspricht.

- Die Resonanztheorie von Helmholtz vermag die nichtlinearen Distorsionen, wie etwa Differenztöne, Summentöne und subjektiven Partialtöne nicht zu erklären, da nachgewiesen wurde, dass die Distorsion nicht im Bereiche der Hörknöchelchen des Mittelohres entstehen, wie Helmholtz fälschlicherweise vermutete, sondern in der Schnecke selber.



Anatomische Teile des Gehörs

- Die spezifische Empfindlichkeit jedes einzelnen Segments der Basilarmembran auf eine gewisse Frequenz, würde neben ihrer Breite und Dicke, die in den verschiedenen Bereichen verschieden sind, eine beträchtliche Spannung der ganzen Basilarmembran voraussetzen; der Medizin-Nobelpreisträger von 1961, György Békésy, der viele Jahre seines Lebens dem Studium des Gehörs gewidmet hatte, bewies jedoch, dass die Basilarmembran keinerlei Spannung ausgesetzt ist. Auch die Theorie, wonach die Härchen der empfindlichen Zellen des Cortischen Organs wie Resonatoren wirkten, wie wenn es sich beim Cortischen Organ um ein kleines Klavier handelte, dessen Saiten auf Frequenzen zwischen 20 und 20.000 Hz abgestimmt waren, war unhaltbar.

Eine Alternative zur Helmholtzschen Resonanztheorie wurde 1866 von W. Rutherford vorgeschlagen und ist als "Telephontheorie" oder PERIODIZITÄTSTHEORIE bekannt geworden. Rutherford beachtete die Schneckenform nicht und stellte sich vor, dass sich die Aufgabe der Sinneszellen des Cortischen Organs unabhängig von ihrer Lage darauf beschränkten, dem Gehirn die akustischen Druckveränderungen mitzuteilen, etwa wie wenn es sich um eine Art phonographischer Kurve handelte, die es galt, im Gehirn zu analysieren.

Der Periodizitätstheorie können vor allem die beiden folgenden Argumente entgegengehalten werden:

- Einerseits führte die Ablehnung der Lokalisation der verschiedenen Frequenzbereiche auf der Basilarmembran zu einem Widerspruch zu gewissen experimentellen Resultaten. Es kann in der Tat gezeigt werden, dass auf bestimmte Zonen der Basilarmembran beschränkte Verletzungen Hörverluste in den entsprechenden Frequenzbereichen zur Folge haben. Sogar das umgekehrte Experiment konnte durchgeführt werden: Setzt man ein Versuchstier einem intensiven Ton einer bestimmten Frequenz aus, kann das Cortische Organ in einem ganz bestimmten Bereich verletzt werden. Diese Tatsache spricht eindeutig für eine Lokalisationstheorie.

- Andererseits wurde eine Tatsache entdeckt, die auf den ersten Blick alle Kriterien für eine Periodizitätstheorie, wie sie Rutherford vertrat, vernichtete: Eine Neurone kann höchstens 1000 Nervenimpulse pro Sekunde vermitteln. Wie wäre unter diesen Umständen etwa die Wahrnehmung eines Tons von 3.000 Hz mit der Theorie von Rutherford zu erklären?

Die ENTLADUNGSTHEORIE (auf Englisch: *Volley Theory*) von Wever behauptet, dass bei der Übertragung der Töne mit über 1.000 Hz Gruppen von zwei oder mehr Neuronen gleichzeitig tätig werden, die einander ablösen.

Offenbar reichen weder die Lokalisationstheorien im Sinne von Helmholtz noch die Periodizitätstheorien im Sinne von Rutherford für sich alleine aus, um die Funktion des menschlichen Gehörs vollständig zu erklären. Die meisten heutigen Wissenschafter sind der Meinung, dass die beiden Prinzipien zusammen auftreten.

- Für die niedrigen Frequenzen existiert kein entsprechender Ort auf der Basilarmembran. Für diese Frequenzen werden offenbar die Töne anhand der synchron mit den Schwingungen abgegebenen Impulse der Sinneszellen im Gehirn gedeutet.
- Für die hohen Frequenzen hingegen, scheint ausschliesslich die Lokalisation auf der Basilarmembran zuständig zu sein.
- Für mittlere Frequenzen wird die Lokalisation sinnvoll mit der Periodizität kombiniert.

Nebenbei gesagt, scheint es erwiesen, dass die hochfrequenten Töne nicht den Weg über die drei Hörknöchelchen nehmen, sondern die Schädeldecke durchwandern, um schliesslich auf die Schnecke einzuwirken.

Einzelne Autoren behaupten, dass beim Hören von extrem tiefen Tönen auch die Bogengänge eine Rolle spielen, was nicht ganz auszuschliessen ist.

Aber wie funktioniert die Lokalisation auf der Basilarmembran, wenn wir die Resonanzmechanismen ausschliessen müssen? Die Antwort auf diese Frage verdanken wir dem Nobelträger der Medizin von 1961, György Békésy. Békésy experimentierte mit massstabsgetreu vergrösserten Modellen der Schnecke. Später ging er zu Modellen im Massstab eins zu eins über und er experimentierte sogar mit menschlichen Schnecken. Das Resultat dieser langjährigen Arbeit war die HYDRODYNAMISCHE THEORIE des Gehörs, die man folgendermassen kurz zusammenfassen kann:

Die durch die Schwingungen des Vorhoffensters erzeugte Welle durchläuft die Perilymphe der Vorhoftreppe und anschliessend die Paukentreppe, bis sie am Schneckenfenster reflektiert wird. Da die beiden Gänge nicht zylindrisch, sondern eher konisch sind, formt sich ein Wirbel, der seine grösste Intensität je nach der Frequenz des zu hörenden Tons in einem bestimmten Punkt der Basilarmembran aufweist.

Besteht der zu hörende Ton aus mehreren Sinusschwingungen, entstehen entsprechend viele Wirbel, welche die Basilarmembran in den entsprechenden Punkten zum Schwingen bringen, und damit die nächstgelegenen Sinneszellen des Cortischen Organs.

Im Gegensatz zum Auge kann das Gehör eine Analyse der gehörten Töne vornehmen. Diese Tatsache wird deutlich, wenn ein Musiker imstande ist, die verschiedenen in einem Akkord enthaltenen Töne aufzuzählen. Hören wir einen konstanten periodischen Ton, kann unser Ohr die einzelnen Obertöne heraushören. Eine Person mit einem durchschnittlichen Gehör kann mit etwas Übung lernen, den einen oder anderen Oberton aus einem Klavierton herauszuhören. Da wir auch eine nichtperiodische Mischung von Sinustönen[30] in seine Komponenten zerlegen können, formulierte Ohm sein Akustikgesetz, das kurz folgendermassen formuliert werden kann:

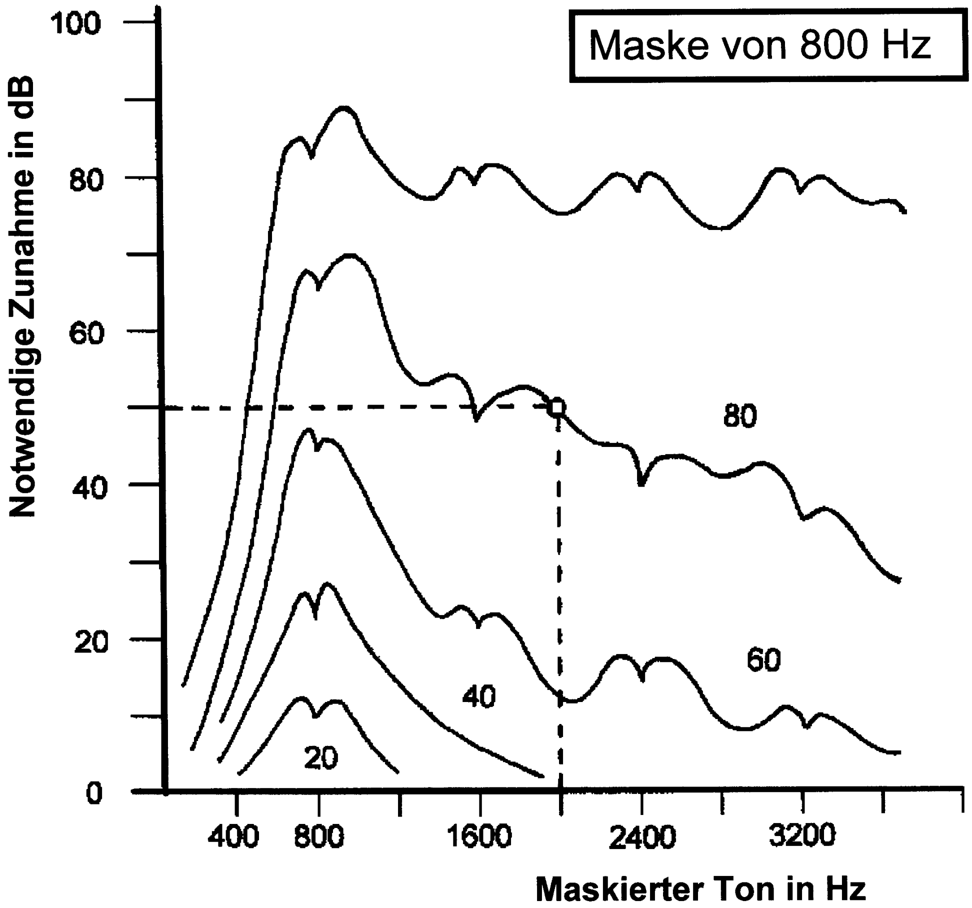
JEDER AUS DER ÜBERLAGERUNG MUSIKALISCHER TÖNE GEBILDETE KLANG KANN DURCH DAS GEHÖR IN PERIODISCHE SCHWINGUNGEN ZERLEGT WERDEN, DIE ALLE EINEM BESTIMMTEN REINEN TON ENTSPRECHEN.

Dieses Gesetz, das nur für lang genug dauernde Töne sinnvoll ist, muss als Annäherung betrachtet werden, da infolge der Wechselwirkung zwischen einzelnen analysierten Tönen gewisse Ausnahmen auftreten.

So ist etwa die Erscheinung der Schwebungen mit dem Ohmschen Gesetz nicht vereinbar. Kombinieren wir etwa einen Ton von 435 Hz und einen anderen mit 440 Hz, erhalten wir einen Ton, dessen Frequenz zwischen den beiden Frequenzen gelegen ist, und der mit einer Frequenz von 5 Hz auf- und abschwillt. Dabei ist es uns unmöglich, die beiden individuellen Töne herauszuhören. Man könnte argumentieren, das Gehör fange bereits einen Ton auf, der die Summe zweier anderer Töne sei. Aber es ist bewiesen, dass akustische Wellen normaler Intensität sich bei ihrer Verbreitung in der Luft durchdringen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Eine andere Erscheinung, die dem Ohmschen Gesetz widerspricht ist die MASKIERUNG eines Tons durch einen anderen. Wie jedermann aus Erfahrung weiss, ist es schwieriger, einem Gespräch an einem lärmenden Ort zu folgen, als an einem ruhigen. Das rührt daher, dass ein gewisser Ton, M, die subjektive Intensität eines Tons anderen Tons, T, reduzieren, und unter Umständen sogar vollständig ausschalten kann. Schon im Jahre 1876 beschrieb A. A. Mayer diese Erscheinung und kam zum Schluss, dass ein tiefer Ton die Wahrnehmung eines höheren teilweise oder ganz ausschalten kann, während ein hoher Ton die Wahrnehmung eines tieferen kaum oder gar nicht zu beeinflussen vermag.

[30] Also eine Überlagerung von periodischen Tönen mit inkomensurablen Frequenzen, dh Frequenzen, die keinen (hörbaren) gemeinsamen Teiler haben.



Maskierkurven

Aber die Dinge sind nicht so einfach, wie es schien und H. Fletcher führte eine Reihe Experimente mit verschiedenen Personen durch. Das Grundexperiment hat vier Variablen: Die Frequenz und die Intensität des Maskierungstons M (den wir hier als MASKE bezeichnen werden), die Frequenz des maskierten Tones (hier: TESTTON), und schliesslich die Intensität I von T, die es mindestens braucht, um in Gegenwart der Maske hörbar zu sein. Diese Intensität ist also eine Funktion der anderen drei Variablen. Entsprechend benutzte Fletcher für die graphische Darstellung der Resultate, die er für I erhalten hatte eine Reihe zweidimensionaler kartesischer Koordinatensysteme, eines für jede betrachtete Maskenfrequenz.

In diesen Diagrammen entspricht die Abszisse den Frequenzen der verschiedenen Testtöne, die mit der für das ganze Diagramm gültigen Maske maskiert werden. Die Ordinate entspricht der Charakteristik der Maske für den entsprechenden Testton, also der Anzahl dB, den der Testton über die Hörgrenze angehoben werden muss, um in Gegenwart der Maske wahrgenommen zu werden, wenn diese die Lautstärke in dB (von der Hörgrenze an gerechnet) aufweist, die der entsprechenden Kurve des Diagramms entspricht (in unserer Abbildung wurden die Kurven für 20, 40, 60, 80 i 100 dB dargestellt). Hier sei nur eines der Koordinatensysteme dargestellt, nämlich dasjenige der Maske von 800 Hz.

Unsere Figur ist schematisch gehalten und entspricht nicht der Charakteristik einer bestimmten Person. Aber es ist zu beachten, dass diese Kurven für jedes Individuum anders ausfallen. Da das Gehör, wie jedes andere Organ, einer gewissen Ermüdung unterworfen ist, werden selbst bei einer gleichen Person temporär verschiedene Resultate erreicht. So kann etwa eine längere Exposition an eine gleiche Frequenz die Empfindlichkeit des Gehörs für die betreffende Frequenz zeitweilig herabsetzen[31].

BEISPIEL: Welche Intensität muss ein Testton T von 2000 Hz aufweisen, um in Gegenwart eines Maskiertons M von 800 Hz und einer Intensität von 80 dB noch hörbar zu sein?

(Nach Diagramm: 50 dB)

Die Maskierungstafeln von Fletcher sind aufgrund von reinen Tönen entstanden. Selbstverständlich kompliziert die Gegenwart von Obertönen die Situation wesentlich.

In der Figur können wir eine Zunahme des Maskierungseffekts beobachten, wenn T sich der Frequenz der Maske nähert. In unmittelbarer Umgebung von 800 Hz schwächt sich der Effekt wieder etwas ab, bedingt durch die Schwebungen. Obwohl die Messungen mit reinen Tönen vorgenommen wurden, wiederholt sich dieses Verhalten in der Umgebung von 1600 Hz, der Frequenz, die dem ersten Oberton von M entspricht. Das verdanken wir den im Gehör erzeugten nichtlinearen Distorsionen, welche subjektive Obertöne zusammen mit den entsprechenden Schwebungen erzeugt.

Man könnte die verschiedenen Koordinatensysteme in einem einzigen dreidimensionalen System zusammenfassen, wenn wir die den verschiedenen Masken entsprechenden Diagramme auf durchsichtiges Material mit einer gewissen Dicke ausdruckten und das ganze Paket nach Frequenzen sortiert übereinander legten. So erhielten wir für jede Intensität der Maske (z.B. 40 dB) eine Annährung an eine stetige Fläche.

BINAURALE[32] EFFEKTE

Das gepaarte Vorkommen unseres Gehörorgans ist nicht ausschliesslich darin begründet, dass es gut ist, eine Reserve zu haben,

---

[31] In extremen Fällen kann sogar ein dauernder Empfindlichkeitsverlust auftreten.

[32] Binaural, auf beide Ohren bezogen, im Gegensatz zu monaural, nur auf ein Ohr bezogen.

wie bei anderen menschlichen Organen, wie etwa bei der Niere. Vielmehr dient diese Gegenwart von zwei symmetrischen Organen, wie übrigens auch im Falle der Augen, der räumlichen Orientierung.

Man könnte sich fragen, ob ein Ton M, der dank einem Kopfhörer ausschliesslich auf das linke Ohr einwirkt einen Testton T, der ausschliesslich auf das rechte Ohr einwirkt, maskieren kann. Das Experiment bestätigt dies. Würden wir bei der Beschränkung jedes Tones auf ein einziges Ohr die gleichen Kurven erhalten? Nein, die Wechselbeziehung ist im Falle der getrennten binauralen Exposition viel schwächer. Trotzdem beweist die Gegenwart des Maskeneffektes, dass die Maskierung nicht ausschliesslich im Ohr, sondern vor allem im Gehirn stattfindet. Etwas ähnliches geschieht mit den Schwebungen, da viele Leute auch dann Schwebungen vernehmen, wenn zwei leicht voneinander abweichende Töne individuell jedem einzelnen Ohr zugeführt werden.

Um abzuklären, inwieweit die binauralen Effekte denjenigen Schallwellen zuzuschreiben sind, die sich durch den Schädel fortbewegen, wurden Experimente mit Leuten durchgeführt, die auf einem Ohr taub sind. Die Folgerung war, dass von einer Differenz von 50 dB an die Knochenleitung die Resultate in erheblichem Masse verfälscht.

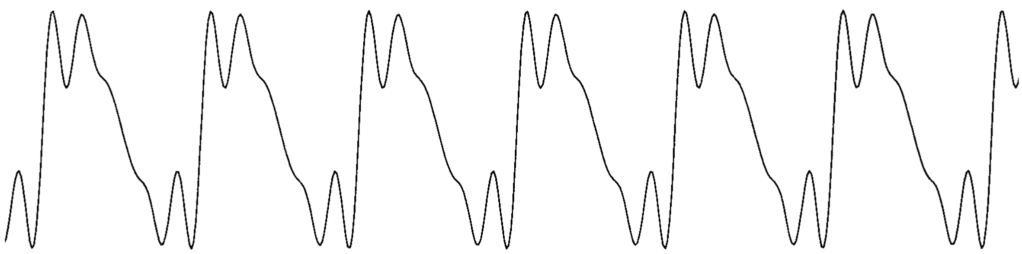
Wir erlauben uns, die binauralen Effekte mit einem visuellen Experiment zu vergleichen, das zur Zeit im Wissenschaftsmuseum von Barcelona nachvollzogen werden kann: In einem binokularen Apparat sieht das linke Auge eine schwarze Silhouette auf einem weissen Hintergrund, während das Auge nur einen weissen Hintergrund sieht. Drückt man auf einen Knopf, so erscheint im rechten Bild eine andere schwarze Silhouette in Form eines Besens, der schnell hin- und herwedelt. Während der Bewegung des Besens verschwindet für das linke Auge die Silhouette.

Die Raumorientierung ist vor allem darauf begründet, dass unser Hirn einen extrem kurzen Zeitabschnitt zwischen der Wahrnehmung eines bestimmten Geräusches durch die beiden Ohren richtig zu interpretieren vermag. Es können Unterschiede in der Grössenordnung von 0,03 Tausendstelsekunden festgestellt werden. Aber es ist uns zudem auch möglich, den Ursprung eines länger andauernden Tons zu bestimmen. Dies verdanken wir der Fähigkeit unseres Gehörapparates, Phasendifferenzen zu erfassen, was unserem Bewusstsein allerdings entgeht. Diese Fähigkeit ist auf nicht allzu hohe Töne beschränkt, was erklärt, wieso es äusserst schwierig ist, Tonquellen mit sehr hohen Frequenzen zu orten. Wir denken dabei etwa an jene Mücken, die so schwierig zu schnappen sind.

DER SATZ VON FOURIER

Im Kapitel 'DIE SAITE ALS TONERZEUGER' wurde beschrieben, wie eine quer schwingende Saite ausser dem Grundton noch mehrere Obertöne produziert. Wir haben gesehen, dass die Frequenzen der von einer idealen Saite erzeugten Obertöne natürliche Vielfache der Grundfrequenz darstellen; man spricht in diesem Zusammenhang von harmonischen Obertönen und der so erzeugte Klang ist periodisch. Die periodischen Schwingungen sind aber gerade diejenigen, die uns am meisten interessieren, da sie musikalische Töne produzieren.

Wir haben gesehen, dass sich die verschiedenen harmonischen Partialtöne mit einem Satz akustischer Resonatoren, aber auch mit elektronischen Filtern oder im Rahmen der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes sogar mit dem Menschlichen Gehör bestimmen lassen, wenn die betreffende Person genügend dazu ausgebildet ist. In diesem letzten Fall muss aber auch die Existenz der vom Gehör selber gebildeten subjektiven Partialtöne beachtet werden.



Kann so eine Kurve mittels Sinuskurven dargestellt werden?

Im Kapitel 'TONÜBERLAGERUNGEN' sahen wir, dass auch Luftsäulen, wie in der Kundtschen Röhre oder in Blasinstrumenten in harmonische Partialtöne zerlegbare periodische Töne erzeugen. Offenbar muss der von einer Lochsirene[33] erzeugte Ton strikt periodisch sein, da er das Resultat eines absolut periodischen Vorganges darstellt, und in diesem Sinne muss zugegeben werden, dass die Sirene einen musikalischen Ton von sich gibt. Das zeigt, dass das Adjektiv

[33] Die Sirene besteht schematisch aus einer in regelmässigen Abständen gelochten kreisrunden Scheibe, durch deren Löcher während ihrer Rotation Pressluft gejagt wird.

'musikalisch', wie es von Helmholtz definiert wurde, nicht unbedingt 'schön' oder 'angenehm' bedeutet. Dieses Beispiel lässt auch die Frage aufkommen, ob sich der Ton einer Sirene in harmonische Partialtöne zerlegen lässt. Oders anders gefragt: Lässt sich jede periodische Kurve in Sinuskurven zerlegen?

Auf den ersten Anblick scheint es unmöglich, eine beliebige periodische Kurve, wie die in der Figur dargestellte, als Überlagerung von lauter Sinuskurven zu interpretieren. Aber vielleicht, wenn wir die Möglichkeit hätten, eine unendliche Menge von Sinuskurven heranzuziehen, könnten wir eine Lösung finden? Oder mehr als eine?

Die Antwort auf diese Frage ist uns durch den berühmten Satz von Fourier gegeben, den heutzutage alle Mathematik- oder Physikstudenten kennen. Der Satz, der erstmals im Jahre 1822 im Buch von Fourier *"Théorie analytique de la chaleur"* veröffentlicht wurde, lässt sich folgendermassen formulieren:

JEDE BELIEBIGE PERIODISCHE FUNKTION KANN AUF GENAU[34] EINE WEISE ALS SUMME VON SINUSFUNKTIONEN DARGESTELLT WERDEN, DEREN PERIODEN JE EIN, ZWEI, DREI, ... MAL IN DER PERIODE DER ORIGINALFUNKTION ENTHALTEN IST.

Auf die Musik angewandt, kann dieser Satz folgendermassen formuliert werden:

JEDE PERIODISCHE LUFTSCHWINGUNG STALLT EINEN TON DAR, DER AUF GENAU EINE WEISE IN SINUSSCHWINGUNGEN (DIE PARTIALTÖNE) ZERLEGT WERDEN KANN, DEREN FREQUENZEN GANZZAHLIGE VIELFACHE DER GRUNDFREQUENZ SIND (ES HANDELT SICH ALSO UM HARMONISCHE OBERTÖNE).

Fourier fand für die Zerlegung einer beliebigen Funktion f (x) mit der Periode P in Sinusfunktionen die folgende Formel:

$$f(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2 \pi n x}{P} + b_n \sin \frac{2 \pi n x}{P}\right)$$

Mit den folgenden Koeffizienten:

$$a_n = \frac{2}{P} \int_0^P f(x) \cdot \cos \frac{2 \pi n x}{P} \, dx \qquad ; n = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

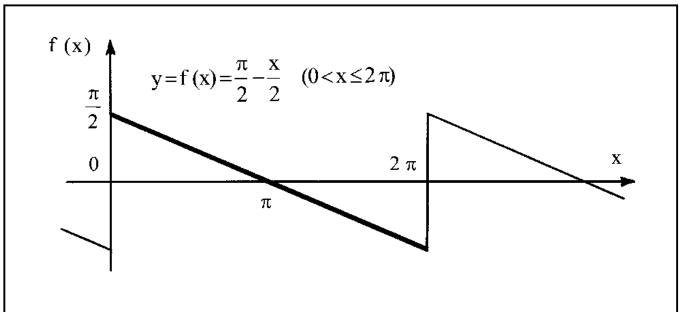
[34] *Genau eine* bedeutet *eine und nur eine.*

$$b_n = \frac{2}{P}\int_0^P f(x) \cdot \sin\frac{2\pi n x}{P}\,dx \qquad ; n = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Wenn wir berücksichtigen, dass $\cos(x) = \sin(x+\pi/2)$, sehen wir, dass $f(x)$ als Summe von unendlich vielen Sinusfunktionen und einer Konstanten $\frac{\mathbf{a_0}}{\mathbf{2}}$ darstellbar ist, wobei die Konstante ausschliesslich eine senkrechte Verschiebung der Kurve im Koordinatensystem anzeigt und keine Bedeutung im Bereich der Akustik hat.

Die Koeffizienten $\mathbf{a_n}$ und $\mathbf{b_n}$ vertreten die Amplitude des entsprechenden harmonischen Partialtons. Der Wert n, der mit x multipliziert wird stellt die Nummer des Partialtons dar. Der erste Partialton, oder Grundton, entspricht n = 1.

Die SÄGEKURVE ist eine gute Annäherung an die charakteristische Schwingungsform einer gestrichenen Saite, wie etwa bei der Violine. Die Sägekurve stellt einen Spezialfall dar, in dem alle harmonischen Partialtöne zugleich auftreten, wobei die Amplitude jedes einzelnen zu seinem Index umgekehrt proportional ist.



Sägekurve

Anschliessend wollen wir die Sägekurve als Fourier-Reihe darstellen. Unsre Kurve hat im Intervall $[0, 2\pi]$ die folgende Funktionsformel:

$$f(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{x}{2} \qquad ; \text{Periode } P = 2\pi$$

$$a_n = \frac{2}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{x}{2}\right) \cdot \cos\frac{2\pi \cdot n \cdot x}{2\pi}\,dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{x}{2}\right) \cdot \cos nx\,dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \cos nx - \frac{x}{2} \cdot \cos nx\right) dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sin nx - \frac{1}{2n}(x \cdot \sin x) - \frac{1}{2n^2}\cos nx\right]_0^{2\pi}$$

$$= \frac{1}{\pi}\left(\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{1}{n}\sin 2n\pi - \frac{1}{2n}\cdot 2\pi\cdot\sin 2n\pi - \frac{1}{2\,n^2}\cos 2\,n\pi\right)\right.$$

$$\left. - \left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{1}{n}\cdot\sin n\cdot 0 - \frac{1}{2n}\cdot 0 - \frac{1}{2n^2}\cdot\cos 0\right)\right)$$

Die Formel wird dank der folgenden Identitäten wesentlich vereinfacht:

sin 2nπ = 0
cos 2nπ = 1
cos 0 = 1

$$= \frac{1}{\pi}\left(-\frac{1}{2n^2}+\frac{1}{2n^2}\right) = 0$$

; für $n \neq 0$

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{x}{2}\right)\cdot\cos(0\cdot x)\,dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{x}{2}\right)\cdot dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\frac{\pi x}{2}-\frac{x^2}{4}\right]_0^{2\pi} = \frac{1}{\pi}\left(\frac{\pi\cdot 2\pi}{2}-\frac{4\pi^2}{4}\right) = \frac{1}{\pi}\left(\pi^2-\pi^2\right) = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\cdot\sin\frac{2\pi\cdot n\cdot x}{2\pi}\,dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\pi}{2}-\frac{x}{2}\right)\cdot\sin nx\,dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\pi}{2}\cdot\sin nx - \frac{x}{2}\cdot\sin nx\right)dx$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-\frac{\pi}{2}\cdot\frac{1}{n}\cdot\cos nx - \left(\frac{\sin nx}{2\,n^2}-\frac{x\cdot\cos nx}{2\,n}\right)\right]_0^{2\pi}$$

$$= \frac{1}{\pi}\left(\left(-\frac{2\pi}{n}\cdot\cos 2n\pi - \frac{\sin 2n\pi}{2n^2} + \frac{2\pi\cdot\cos 2n\pi}{2n}\right)\right.$$

$$\left.-\left(-\frac{\pi}{2n}\cdot\cos 0 - \frac{\sin 0\cdot 1}{2n^2} - \frac{0\cdot\cos 0}{2n}\right)\right)$$

$$= \frac{1}{\pi}\left(-\frac{\pi}{2n} + \frac{2\pi}{2n} + \frac{\pi}{2n}\right) = \frac{1}{\pi}\cdot\frac{\pi}{n} = \frac{1}{n}$$

$$F = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\cdot\sin\frac{2\pi n x}{2\pi}$$

$$F = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin nx}{n}$$

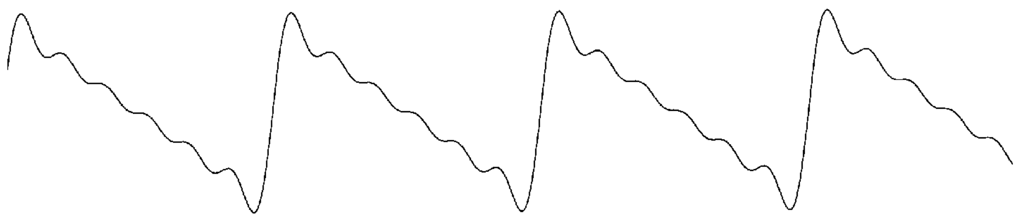
<u>KOROLLAR:</u> Wenden wir diese Fourier-Reihe auf den Punkt $x = \frac{\pi}{2}$ an, erhalten wir als Korollar eine berühmte Reihe, die zu Ehren seines Entdeckers als Leibnitzsche Reihe bezeichnet wird. Das Verdienst von Leibnitz ist in der Tatsache begründet, dass zu seiner Zeit die Fourier-Reihen noch unbekannt waren.

$$f\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{4} = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin n x}{n}$$

$$= \frac{1}{1} + \frac{0}{2} + \frac{-1}{3} + \frac{0}{4} + \frac{1}{5} + \frac{0}{6} + \frac{-1}{7} + \ldots$$

$$\frac{\pi}{4} = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + - \ldots$$

Wenn wir anstelle einer unendlichen Menge von Summanden nur die ersten k Glieder einer Fourier-Reihe betrachten (wenn wir also die k-te Partialsumme betrachten), erhalten wir nacheinander verschiedene Annäherungen an die Funktionskurve. Die Abbildung zeigt die Annäherung an die Sägekurve für k = 6.



Annäherung an die Sägekurve

Da die Sägekurve alle harmonischen Partialtöne enthält, wird sie in gewissen elektronischen Synthesizern eingesetzt, die durch Filterung der geeigneten Obertöne aus einem Ton, der sämtliche möglichen harmonischen Partialtöne enthält einen Ton mit den gewünschten harmonischen Partialtönen gewinnen können.

Eine andere 'extreme' Kurve, die unsere Beachtung verdient ist die in der Figur dargestellte rechteckige Kurve.

Diese ist aus sämtlichen UNgeraden Elementen aufgebaut, die zur Sägekurve gehören. Das bedeutet, dass ein Ton, dessen phonographische Kurve diesen Aspekt aufweist, alle Partialtöne mit ungeraden Indices enthält und klingt, wie wenn er einer geschlossenen Orgelpfeife entstammte.

Oben: Annäherung an die rechteckige Kurve. Unten: Dieselben Partialtöne mit Phasenverschiebung

Unter der Darstellung der Annäherung an die rechteckige Kurve haben wir eine andere Kurve dargestellt, die aus der Überlagerung derselben Sinuskurven besteht. In diesem zweiten Fall wurden einige der Sinuskurven verschoben (das heisst in der Praxis, die Sinus-Funktion wurden statt auf x auf (x+v) angewandt). Wie wir im Kapitel 'DIE KLANGFARBE' sehen werden, kann unser Gehör die beiden entsprechenden Töne nicht unterscheiden.

Der Satz von Fourier erklärt die Anwesenheit der harmonischen Partialtöne im Ton einer Lochsirene. Er erklärt auch die Erzeugung von Partialtönen durch Distorsion in einem Transduktor, wie etwa in einem Mikrophon oder einem Pick-up (phonographischen Tonabnehmer). Eine perfekt sinusförmige phonographische Kurve erfährt eine gewisse Verformung. Da die Periode unverändert geblieben ist (die Tonhöhe also von der Verformung nicht beeinflusst wurde), ist der erste Partialton (Grundton) mit demjenigen der ursprünglichen Reihe identisch. Die Kompensierung der Verformung muss aufgrund höherer harmonischer Partialtöne erfolgen. Das erklärt auch das Auftreten subjektiver Partialtöne in dem speziellen Transduktor, den unser Ohr darstellt.

TONERZEUGUNG IN MUSIKALISCHEN INSTRUMENTEN

Es gibt hauptsächlich zwei Arten, Schall zu erzeugen. Im ersten Fall wird der Schall durch eine einmalige Energieabgabe erzeugt, die sich in akustische Energie verwandelt. Es entstehen sogenannte Übergangsschwingungen. Solche werden etwa beim Niederdrücken einer Klaviertaste oder beim Anschlagen einer Glocke mit dem Klöppel erzeugt. Übergansgschwingungen haben eine begrenzte Dauer, da sich die beigetragene Energie allmählich in Wärmeenergie verwandelt. Die zweite Art der Tonerzeugung beruht auf der stetigen Zufuhr von Energie und erlaubt theoretisch, zeitlich unbegrenzte Töne zu erzeugen. Man spricht von unterhaltenen Schwingungen. Sobald die Energiezufuhr unterbrochen wird, befinden sich die Schwingungen in einer ähnlichen Lage, wie die Übergangsschwingungen und flauen ab. Wie schon Tyndall in seinem Buch "Lectures on Sound" bemerkte, äussert sich die Reibung immer in rhythmischer, nicht in kontinuierlicher Form, und dieser Rhythmus liegt dem erzeugten Ton zugrunde. So kann etwa das Pfeifen eines Geschosses in der Luft, aber auch das Anstreichen eines Bogens auf einer Violinsaite als Beispiel angeführt werden.

Wie wir es bereits im Kapitel 'DIE SAITE ALS TONERZEUGER' sahen, kann eine gespannte Saite Schwingungen der beiden hier besprochenen Arten erzeugen. Im Fall der Geige werden die beiden Schwingungsarten in einem einzigen Instrument vereint, werden die Saiten der Geige doch zumeist mit dem Bogen angestrichen, zeitweise aber auch mit den Fingern angezupft, was mit dem italienischen Namen *Pizzicato* bezeichnet wird.

Ohne uns weiter mit den Saiteninstrumenten zu beschäftigen, gehen wir hier zu einer ganz anderen Schallquelle über, dem Rohr (oder Pfeife), in dem eine Luftsäule in Eigenresonanz schwingt. Die Luftsäule bildet die Grundlage der meisten Blasinstrumente. Ihr Typ entspricht fast ausschliesslich den unterhaltenen Schwingungen.

Wir erwähnten bereits ein schönes Beispiel einer Schwingenden Luftsäule, nämlich die in der Kundtschen Röhre schwingende, um die Erscheinung der STEHENDEN WELLE zu erläutern. Die Kundtsche

Röhre ist beidseitig abgeschlossen. Eine an einem Ende der Röhre erzeugte Welle durchläuft die ganze Röhre, wird an der gegenüberliegenden Wand reflektiert, durchläuft die Röhre im entgegengesetzten Sinn und wird an der ersten Wand reflektiert. Stimmt die Periode T der erzeugten Schwingung mit der Zeit überein, welche die Welle braucht, um den erwähnten Weg zurückzulegen, befindet sich die Luft im Rohr in Resonanz und es entsteht eine stehende Welle mit einem Knoten an jedem Ende der Röhre. Da die beiden Formeln $2 \cdot L = v \cdot T$ und $f = \frac{1}{T}$ gelten, ist die Grundfrequenz der Resonanz in einer Röhre $f = \frac{v}{2 \cdot L}$.

Wird die Luft in der Röhre mit einer der Frequenzen 2·f, 3·f, 4·f, ..., n·f gereizt, entsteht wieder Eigenresonanz, aber diesmal mit einer stehenden Welle mit n+1 Knoten.

Dank dieser Tatsache kann die Kundtsche Röhre zur indirekten Messung der Schallgeschwindigkeit in der Luft (oder einem anderen in der Röhre befindlichen Gas) dienen. Newton hatte eine Formel erarbeitet, um diese Geschwindigkeit zu berechnen. Leider ist die Übereinstimmung der experimentell ermittelten Resultate und der theoretischen Werte unbefriedigend. Die Formel wurde von Laplace verbessert und die neue Formel wurde 1829 durch Dulong erprobt, der die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen ermittelte, wobei er eine der Kundtschen Röhre ähnliche Einrichtung verwandte. Dulong versetzte die Röhre in Resonanz, indem er einen Luftstrahl einblies, der schnell genug war, um höhere Partialtöne zu erwecken. Dann wurde der Kolben vorgeschoben, bis der gleiche Ton wieder zu hören war. Nun hatte es einen Bauch und einen Knoten weniger und der Abstand zwischen den beiden Kolbenstellungen entsprach der halben Wellenlänge des Tons. Eine Laborsirene erlaubte es, die Höhe des Prüftons genau zu ermitteln. Dies sind ein paar der von Dulong gefundenen Resultate:

Gas	Schallgeschwindigkeit in m/s
Luft	333,00
Sauerstoff	317,17
Wasserstoff	1269,50
Kohlendioxid	261,60
Kohlenmonoxid	337,40

Die Bauweise der in Musikinstrumenten eingesetzten Rohre haben mit der Kundtschen Röhre im allgemeinen nicht viel gemeinsam. Vielmehr kommen ein- oder beidseitig offene Röhren zur Anwendung.

Mit einem einseitig offenen Rohr kann ein ähnliches Experiment, wie mit der Kundtschen Röhre angestellt werden. Diese Anordnung entspricht dem weiter oben beschriebenen Resonator. Um uns die Lage besser vorstellen zu können, stellen wir uns vor, die Luftsäule sei in eine Folge von Scheiben mit veränderlichem Druck aufgeteilt. Die Welle besteht aus der Weitergabe eines gewissen Überdrucks von einer Scheibe zur nächstfolgenden. Stösst am Ende der Röhre die Welle gegen eine Wand, wird die Richtung der Übermittlung des Überdrucks umgekehrt, die Welle wird reflektiert. Was aber geschieht, wenn das Ende der Röhre offen ist? Die Kompressionswelle wird durch die Öffnung dringen und hinter sich eine Unterdruckzone mit umgekehrter Fortsetzungsrichtung hinterlassen. Hier findet eine Reflexion mit umgekehrtem Vorzeichen statt, die mit der Reflexion der letzten Kugel des Wellenmodells am Anfang dieses Buches vergleichbar ist, wenn die Kugel nicht an die Wand prallt. Also wurde die Überdruck-Zone (oder Scheibe) zur Unterdruck-Zone, die in gegenläufigen Sinn das Rohr durchlaufen wird, bis sie auf die Wand auftritt, wo sie (ohne Vorzeichenwechsel) reflektiert wird. Dann bewegt sie sich wieder in Richtung der Öffnung fort.

Wir sehen also, dass bei einem offenen Rohr die Welle das Rohr 4 mal durchlaufen muss, um einen Zyklus zu beenden. Ähnlich wie bei der Kundtschen Röhre können wir für die Grundfrequenz den folgenden Wert berechnen:

$$f = \frac{v}{4 \cdot L}$$

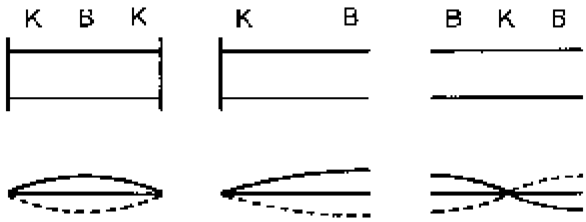
Diese Formel, sowie die nächste, die den Fall der beidseitig offenen Röhre beschreibt, wird dem Mathematiker Daniel Bernoulli zugeschrieben.

Schaffen wir schliesslich eine Überdruckzone in einem beidseitig offenen Rohr, wird der zu durchlaufende Weg folgendermassen aussehen: Reflektion mit verändertem Vorzeichen an einem Ende, Bildung einer Unterdruckwelle, welche das Rohr gegen die andere Öffnung hin durcheilt, wo sie unter Vorzeichenwechsel reflektiert wird, so dass eine neue Überdruckwelle entsteht. In diesem Fall muss die Welle nur zwei Rohrlängen durchlaufen, um einen Zyklus zu vollenden. Die Formel von Bernoulli kann abgeleitet werden:

$$f = \frac{v}{2 \cdot L}$$

Die stehende Welle in einer Kundtschen Röhre weist bei der Grundfrequenz einen Knoten an jedem Ende und einen bauch in der Mitte auf. Das Gegenteil ist bei der beidseitig offenen Röhre de Fall.

Wir symbolisieren diese Tatsache mit (kbk) im ersten und (bkb) im zweiten Fall. Verdoppeln wir die Frequenz, erhalten wir (kbkbk) im ersten und (bkbkb) im zweiten Fall.



Vergleich der Rohre mit den Saiten

Bei der einseitig geschlossenen Röhre finden wir die Konfiguration (kb). Betrachten wir die nächste mögliche Konfiguration, (kbkb) bemerken wir, dass das Rohr in drei Segmente aufgeteilt wurde. Die nächste mögliche Unterteilung (kbkbkb) weist 5 Segmente auf. Daraus können wir den folgenden Schluss ziehen:

Eine beidseitig offene (oder beidseitig geschlossene) Röhre steht zu allen natürlichen Vielfachen der Grundfrequenz in Resonanz, während eine einseitig geschlossene Röhre nur mit den ungeraden vielfachen der Grundfrequenz in Resonanz steht.

Auf den Gegenstand der Musik angewandt, kann diese Tatsache wie folgt ausgedrückt werden:

BEIDSEITIG OFFENE (ODER GESCHLOSSENE) ROHRE KÖNNEN ALLE HARMONISCHEN PARTIALTÖNE DES GRUNDTONS WIEDERGEBEN; EINSEITIG OFFENE (ODER GESCHLOSSENE) ROHRE KÖNNEN NUR DIE UNGERADEN PARTIALTÖNE ERZEUGEN.

Es sei auf die Tatsache hingewiesen, dass sich in diesem Zusammenhang (wie auch bei den schwingenden Saiten) die Begriffe von Knoten und Bäuchen auf die Geschwindigkeit der Partikel (nicht Frequenz!) in der entsprechenden Zone beziehen. Betrachten wir an Stelle der Geschwindigkeiten den Druck in den entsprechenden Zonen, entsprechen den Druck-Bäuchen Geschwindigkeits-Knoten und umgekehrt.

Die Praxis hat gezeigt, dass die Formeln von Bernoulli nur eine gute Annäherung an die Wirklichkeit bieten. Die Abweichungen von den Formeln wurden mittels komplizierter mathematischer Modelle zu erklären versucht, die aber nie volle Befriedigung gebracht haben.

Das ist vor allem in der Tatsache begründet, dass die offenen Enden eines Rohrs nie genau einem Bauch entsprechen, wie dies die

Theorie verlangt. Die Instrumentenbauer haben diesen Mangel stets durch empirisch ermittelte Formeln auszugleichen versucht, wie etwa die vom berühmten Orgelbauer Aristide Cavaillé-Coll entwikkelten.

Wie bei jedem beliebigen Resonator, muss auch die Luftsäule in einem Rohr erst angeregt werden. Dazu werden in den verschiedenen Blasinstrumenten verschiedene Mundstücke eingesetzt. Diese können in zwei Gruppen unterteilt werden: die ausschliesslich auf Luftschwingungen begründeten und die anderen, bei denen ein Bestandteil durch die strömende Luft zum Schwingen angehalten werden.

Die erste Gruppe von Mundstücken, die Flötenmundstücke oder Lippenpfeifen, funktionieren aufgrund von Wirbeln, die die strömende Luft hinter einem Hindernis bilden. Die Frequenz mit der sich diese Wirbeln bilden, die man mit den Wirbeln vergleichen kann, die sich in einem Fluss hinter einem Stein bilden, bestimmt die Höhe des Tons, der meist geringe Intensität aufweist, die aber doch dazu ausreicht, die Luft im Rohr zur Resonanz anzuregen. Diese Art Mundstücke erzeugt Töne derselben Klasse, wie das Pfeifen, das starker Wind erzeugt, wenn er sich an ein Hindernis, wie etwa an eine Fernsehantenne, stösst.

Das Flötenmundstück kann mit einem Schnabel versehen sein, wie im Fall der Blockflöte. Bei der Querflöte haben wir es mit einem anderen Mundstück zu tun, bei dem die Resonanz im Rohr durch Blasen über ein Querloch erzeugt wird, was eine grössere Klangfarben-Variation zulässt, als das Schnabelmundstück. Es handelt sich um das gleiche Prinzip, wie bei der Panflöte. Je schärfer die Kante ist, über die geblasen wird, desto reicher ist der entstehende Ton an Partialtönen.

Die Blattmundstücke oder Zungenpfeifen können in drei Typen eingeteilt werden, die Mundstücke mit einfachem Rohrblatt, wie in der Klarinette oder dem Saxophon, die Mundstücke mit doppeltem Rohrblatt, wie bei der Oboe, und schliesslich die Mundstücke mit tönender Metallzunge, wie im Harmonium oder der Ziehharmonika.

Das Mundstück der Trompete und der meisten Metallblasinstrumente können als Spezialfall der Mundstücke mit doppeltem Rohrblatt angesehen werden, wobei die Lippen des Spielers die Funktion der beiden Blätter übernimmt. Die Form des Mundstücks und die Stellung der Lippen sind zwei Faktoren, welche die Klangfarbe dieser Instrumente wesentlich beeinflussen.

In einer Luftsäule können verschiedene harmonische Töne erzeugt werden. Harmonische Töne sind nicht mit Obertönen oder Partialtönen zu verwechseln, da ein Partialton (oder Oberton) einen reinen

Sinuston darstellt, während ein harmonischer Ton mit der gleichen Frequenz seine eigenen Partialtöne aufweist. Dies gilt natürlich für alle Tonquellen, insbesondere auch für Saiteninstrumente.

Um die Blasinstrumente von ihrer Beschränkung auf die harmonischen Töne zu befreien wurden verschiedene Systeme eingesetzt. Das erste ist die Anordnung von verschiedenen Rohren, jedes für eine bestimmte Note, wie bei der Orgel oder der Panflöte. Im Fall der Blechblasinstrumente bemerkten die Musiker schon seit dem XVIII Jahrhundert, dass sie durch Einführen der Hand in den Schalltrichter die wirksame Länge des Rohrs verändern konnten, was eine gewisse Veränderung der Tonhöhe bewirkte. Aber diese Manipulation zog auch eine meist unerwünschte Veränderung der Klangfarbe nach sich.

Später wurden die Ventile entwickelt, eine Art Hähne, die es erlaubten, ein zusätzliches Stück Rohr per Knopfdruck dazwischenzuschalten. Mit drei oder vier Ventilen wurden die meisten Blechblasinstrumente zu chromatischen Instrumenten.

Im Fall der Flöte, der Klarinette usw. ist das Rohr in verschiedenen Abständen mit Löchern versehen, und man könnte meinen, der Abstand vom Mundstück zum ersten offenen Loch bestimme die effektive Länge des Rohres. Aber die Dinge sind nicht so einfach, und eine Flöte benimmt sich auch ein wenig wie ein Resonator von Helmholtz, bei dem die Frequenz sich hauptsächlich in Funktion der inneren Oberfläche verändert. Die Anordnung der Löcher in einem Blasinstrument ist Frucht der Erfahrung von Generationen von Instrumentenbauern und kann nicht in eine einfache mathematische Formel gekleidet werden.

Hier sei auch ein weiterer Nachteil der Blasinstrumente erwähnt, der sich vor allem in den Epochen äusserte, als die Höhe des Las Ortsabhängig war: Das Problem der Stimmung. Eine Flöte kann durch Einstellen des Abstandes zwischen dem Mundstück und dem ersten Loch gestimmt werden. Aber nur in einem ganz bestimmten Abstand behalten die Frequenzen der verschiedenen Töne die optimalen Verhältnisse zueinander. Andererseits muss beachtet werden, dass bei kräftigem Blasen der Ton einer Flöte leicht anzusteigen pflegt, was dazu ausgenutzt werden könnte, kleine Stimmungsdifferenzen auszugleichen.

Ein durch seine spezielle Anfertigung auffallendes Musikinstrument verdient es, hier erwähnt zu werden, nämlich die OKARINA, ein ganz aus Terrakotta bestehendes Blasinstrument. Es handelt sich dabei im wesentlichen um einen Helmholtzschen Resonator mit einem Flötenmundstück und einer Anzahl Löcher, um die Resonanzfrequenz zu variieren. Normalerweise hat es zwei Lochgrössen, eine für die Halbtöne, eine für die Ganztöne. Jedes mit einem Finger verstopfte Loch erniedrigt die Tonhöhe um den der Lochgrösse entsprechenden Betrag, wobei, zumindest theoretisch, die Lage des Lochs keinen Einfluss hat. Nur seine Oberfläche ist ausschlaggebend.

Obwohl die Saiteninstrumente und die Blasinstrumente die beiden wichtigsten Gruppen von Musikinstrumenten darstellen, können die Orchester auf eine weitere Gruppe von Instrumenten nicht verzichten, die besser geeignet ist, den Rhythmus zu markieren, als die Melodie und die Harmonie darzustellen. Wir beziehen uns auf die Schlaginstrumente[35]. Diese sind meist auf die von STANGEN, PLATTEN und MEMBRANEN hervorgerufenen Schwingungen begründet.

Die Stangen in Form eines Parallelepipeds können im Wesentlichen auf vier Arten schwingen: Längsschwingungen, Querschwingungen in die eine oder andere Richtung und Drehschwingungen. Die Kombination der verschiedenen Schwingungen hängt im wesentlichen von der Anregung (also vom Ort, der Richtung, der Kraft des Anschlags oder der Reibung, von der Konsistenz des anregenden Objekts usw.), von der Befestigung der Stange (an einem Punkt oder einem anderen, an zwei Punkten) und schliesslich vom Material ab, aus dem der Stab besteht. So schwingt etwa ein elastischer und verhältnismässig homogener Stab aus Stahl nicht gleich wie ein Stab aus einem ausgeprägt anisotropischen Material, wie Holz.

Der von Stäben erzeugte Schall ist nicht harmonisch. Oft ist der Ton, den wir einem Stab zuordnen nicht scharf festgelegt und stellt nur ein Maximum in einer stetigen Verteilung von Frequenzen dar. Dies ist etwa bei den Holzstäben der Fall, die zu einem Xylophon gehören.

Ein anderes auf die Stange begründetes Instrument ist der Triangel, den man als ein in zwei Punkten gekrümmter zylindrischer Stab auffassen kann.

Auch vom Stab abgeleitet ist die Stimmgabel, in der Form, wie sie 1711 durch John Shore erfunden wurde. Wie jedermann weiss, bildet die Stimmgabel kein Musikinstrument im strengen Sinn, dient aber gewissermassen als speziell geeignetes Kaliber um Musikinstrumente zu stimmen, da sein Grundton seine nichtharmonischen Partialtöne deutlich übertönt. Zudem ist der zweite Partialton weit vom Grundton entfernt, so dass das Gehör praktisch einen Sinuston vernimmt. Die Stimmgabel kann als ein in einem Punkt gekrümmter Stab oder auch als Zusammenschluss von Zwei Teilstäben auf einem gemeinsamen Griff betrachtet werden.

---

[35] Wir sprechen hier nicht vom Klavier, das die Charakteristika des Schlaginstruments und des Saitenisntruments in sich vereinigt.

Wie im Fall der Saiten, muss auch der Ton der Stimmgabel mit einem Resonanzboden verstärkt werden, etwa mit einem beliebigen Brett oder Tisch. Wie stark die Intensitätsverteilung der verschiedenen Partialtöne vom Anschlagspunkt und von der Beschaffenheit des anschlagenden Objekts abhängt, kann auf einfache Weise gezeigt werden, indem man eine Stimmgabel einmal mit einem weichen Schlägel (etwa einem Gummihammer) und ein anderes Mal mit einem harten Gegenstand, wie etwa einer Stahlstange, anschlägt.

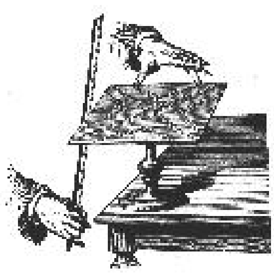
Im ersten Fall erhalten wir einen fast ausschliesslich aus dem Grundton bestehenden Schall, während wir im zweiten Fall hohe Partialtöne vernehmen, die den Eindruck eines schrillen, unangenehmen Tons erwecken.

Im Laufe der Geschichte wurden verschiedene auf der Stimmgabel begründete Tasteninstrumente erbaut. So sind etwa das *Dulcitone,* das *Typophone* und das *Adiaphon* zu erwähnen, die nur kurzzeitigen Erfolg aufwiesen.

Unter den heute noch gebräuchlichen Instrumenten, ist dasjenige, das diesen historischen Instrumenten am nächsten kommt, die von Mustel erfundene *Celesta.*

In der Akustik versteht man unter einer PLATTE eine Tafel aus konsistentem Material, die zum Schwingen befähigt ist. Vor allem runde und quadratische Platten sind wichtig. Je nach der Befestigung und der Anregung können Platten auf recht komplizierte Arten schwingen, wie Chladni bereits um 1787 beobachtete.

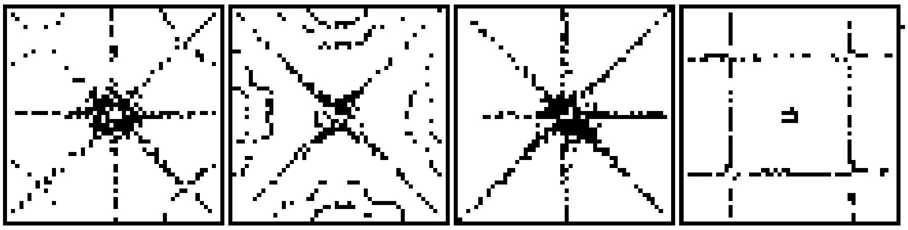
Chladni befestigte eine quadratische Metallplatte mit einer Schraube durch den Schnittpunkt der beiden Diagonalen auf einem senkrechten Stab. Auf die Plattenoberfläche streute er feinen Sand oder Korkpulver und brachte die Platte durch Anstreichen mit einem Geigenbogen gegen die Kante zum Schwingen. Auf der Plattenoberfläche formten sich mehr oder weniger komplizierte Figuren von Knoten und Bäuchen. Die Zonen mit der stärksten Schwingung, die Bäuche, durchrüttelten das feine Pulver, das sich in den ruhigen Zonen, den Knoten anhäufte. Berührt man zudem gewisse Punkte des Plattenrandes oder der unteren Plattenseite, werden diese Punkte zu Knoten, wodurch die Zeichnung auf der Platte vollständig verändert wird[36]. Chladni erzeugte bereits mehr als 200 verschiedene Figuren auf diese Weise. Die Abbildung stellt schematisch eine Auswahl der



Eine Platte zum Schwingen bringen

[36] Die Abbildungen "Eine Platte zum Schwingen bringen" und "Chladnische Figuren" wurden einem Physikbuch des XIX Jh. entnommen.

möglichen Chladnischen Figuren auf quadratischer Platte dar. Diese Figuren stellen nicht nur ein brillantes Experiment dar, sie boten später auch den Geigenbauern ein nützliches Werkzeug um die Instrumentenböden vor dem Zusammenbau der Instrumente zu vollenden. Die Erfahrung von Generationen von Geigenbauern hat nämlich gezeigt, dass die Instrumentenböden (die sich wie komplizierte akustische Platten verhalten) ganz bestimmte Chladnische Figuren erzeugen müssen, wenn sie auf bestimmte Weise fixiert und in den vorbestimmten Punkten angestrichen oder angeklopft werden.



Figuren von Chladni

Auch die GLOCKEN können als gekrümmte schwingende Platten aufgefasst werden. Wegen der grossen mathematischen Komplexität der Glockenschwingungen, ist der Glockenguss ein Handwerk, das auf Jahrhundertealte Erfahrung beruht, und heute gibt es nur noch ein paar wenige Werkstätten, die qualitativ zufriedenstellende Glokken erzeugen.

Die in diesem Zusammenhang fälschlicherweise als Membranen bezeichneten Platten finden in verschiedenen akustischen oder elektroakustischen Transduktoren ihre Anwendung, wie etwa in der phonographischen Kapsel von Koenig, im Telephon, usw.

Auch die Kelchgläser der Glasharmonika oder Glasharfe können als gekrümmte Platten bezeichnet werden. Die Glasharmonika, die durch Anstreichen der Glasränder mit fettfreien Fingern gespielt wird, wobei die Stimmung jedes Kelches durch Einfüllen einiger Tropfen Wasser vorgenommen wird, genoss in der klassizistischen Epoche eine gewisse Beliebtheit, und die meisten damaligen Komponisten schrieben die eine oder andere Komposition für dieses kuriose Instrument. Aber der schrille, an unharmonischen Partialtönen reiche Klang mit den entsprechenden Schwebungen, und vielleicht nicht zuletzt auch der Glaube, dass die Klänge der Glasharmonika Nervenkrankheiten hervorrufen könnte, trugen zum allmählichen Verschwinden des Instrumentes bei. Und heute können wir den Klang der Glasharmonika fast ausschliesslich dank der Tonaufzeichnungen eines der letzten grossen Virtuosen dieses Instruments vernehmen, Bruno Hoffmann.

Während die Schwingungen der Platten auf deren Elastizität begründet ist, schwingen die Membranen, weil sie gespannt sind, wie dies bei den Trommeln der Fall ist. Man könnte eine Membrane als eine zweidimensionale Saite interpretieren: Die Spannkraft und die Ausbreitung liegen im Fall der Saite auf einer Geraden, im Fall der Membrane in einer Ebene. Die Membrane hat viele akustische Eigenschaften mit der Platte gemeinsam.

Schliesslich sei ein mechanischer Tonerzeuger beschrieben, der strikt periodische Töne erzeugt, keine musikalische Anwendung findet, aber für die Forscher des XIX Jh. ein wichtiges Werkzeug darstellte. Wir beziehen uns auf die 1819 durch den französischen Ingenieur Cagniard de la Tour erfundene LOCHSIRENE. Der Name Sirene soll von der Tatsache herstammen, dass diese auch unter Wasser Töne erzeugen kann. Das einfachste Modell einer Sirene besteht aus einer konzentrisch in regelmässigen Abständen gelochten Drehscheibe, deren Löcher nacheinander bei ihrem Vorbeiflitzen vor der entsprechenden Düse einen Luftstrom passieren lassen. Die Frequenz des erzeugten Tons entspricht genau der Anzahl Löcher, die pro Sekunde vor der Luftdüse vorbeijagen.

Die hier beschriebene Sirene ist nur ein Vorführmodell, aber die in der Praxis eingesetzten Sirenen sind auf dem selben Prinzip begründet. Es soll hier nicht von den verbesserten Modellen der Sirene die Rede sein, aber es sei erwähnt, dass verschiedene Labormodelle gebaut wurden, welche die Erzeugung eines Tons mit genau festgelegter Frequenz erlaubten. Dank ihrem schrillen Klang und der Möglichkeit, sehr laute Töne zu erzeugen, wird die Sirene auch heute noch als akustisches Alarmgerät eingesetzt. Solche Sirenen pflegen variable Drehgeschwindigkeit aufzuweisen, so dass sich die Tonfrequenz ständig verändert.

DIE KLANGFARBE

Im ersten Kapitel seines Buches "Die Lehre von den Tonempfindungen", unterscheidet Helmholtz zwischen MUSIKALISCHEN TÖNEN, die periodisch sind und den aperiodischen GERÄUSCHEN oder LÄRM. Die meisten Musikinstrumente können (zumindest annähernd) periodische Töne, also Töne mit harmonischen Partialtönen, erzeugen. Es gibt Ausnahmen, vor allem im Bereich der Schlaginstrumente. Helmholtz wies den musikalischen Tönen drei grundlegende Eigenschaften zu: ihre Intensität, ihre Tonhöhe (Frequenz) und schliesslich ihre Klangfarbe. Bisher haben wir von den ersten beiden Charakteristika gesprochen und die dritte und komplexeste Eigenschaft, die Klangfarbe, nur andeutungsweise erwähnt. Die Klangfarbe ist aus dem Gesichtspunkt der Wahrnehmung das Kennzeichen, das es erlaubt, Töne gleicher Lautstärke und Frequenz voneinander zu unterscheiden. So ist es jedem Menschen mit einem durchschnittlichen Gehör möglich, das von einer Klarinette erzeugte La mit 440 Hz, vom gleichen Ton zu unterscheiden, der von einem Klavier oder einer Geige erzeugt wird.

Einer der wichtigsten Faktoren, der zum Aufbau einer Klangfarbe eines bestimmten Tons beiträgt, ist sein Partialtonspektrum. Reine Sinustöne unterscheiden sich voneinander ausschliesslich durch zwei der drei Charakteristika der periodischen Töne, nämlich durch Frequenz und Lautstärke. Zwei Töne hingegen, die je aus dem selben Grundton und dem zweiten harmonischen Partialton (also einem Oberton, der die doppelte Grundfrequenz aufweist) bestehen, unterscheiden sich voneinander durch ihre Klangfarbe, die dem Intensitätsverhältnis zwischen dem Grundton und dem einzigen Oberton entspricht. Das selbe ist der Fall für periodische Töne, welche einen gemeinsamen Grundton und 3, 4, ..., n harmonische Partialtöne aufweisen. Ist die Intensität der ersten Partialtöne verhältnismässig hoch, vernehmen wir einen süssen, weichen Ton. Weisen im Gegenteil die hohen Partialtöne hohe Intensitäten auf, haben wir es mit einem schrillen Ton zu tun. Zwischen den beiden Extremfällen sind alle Kombinationen möglich. Einen bemerkenswerten Spezialfall finden wir bei den einseitig gedeckten Orgelpfeifen, die ausschliesslich Partialtöne mit ungeradem Index erzeugen. Die Sirene jedoch erzeugt eine beinahe dreieckige Welle (Sägekurve), in der wir praktisch harmonische Partialtöne mit beliebigem Index finden können, wenn wir uns des Satzes von Fourier erinnern. Das erklärt den schrillen Ton der Sirene.

Je nach der Tonerzeugung werden verschiedene Partialtonstrukturen erzielt, die von der Erregung jedes einzelnen Partialtons abhängen. Das erklärt etwa den unterschied in der Klangfarbe eines gleichen Klaviers, je nach der Härte und Beschaffenheit der Hämmer und dem Anschlagpunkt auf der Saite.

Bisher haben wir den Einfluss der Phasendifferenzen auf die Klangfarbe eines konstanten Tons nicht berücksichtigt. Dazu sei das sogenannte HELMHOLTZSCHE GESETZ ÜBER DIE PHASEN der Partialtöne zitiert:

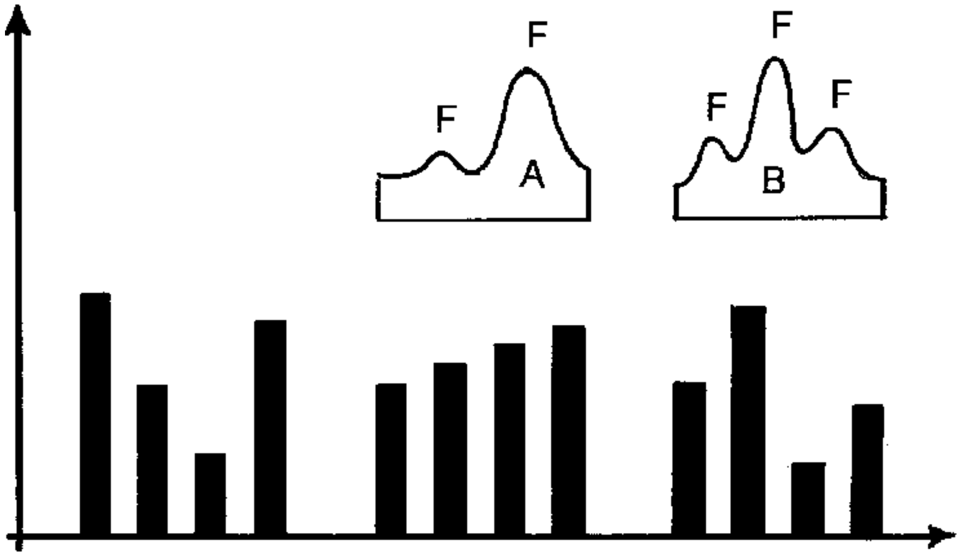
DIE KLANGFARBEN DER MUSIKALISCHEN TÖNE SIND DURCH DIE ANWESENHEIT (ODER ABWESENHEIT) DER EINZELNEN HARMONISCHEN PARTIALTÖNE BESTIMMT, UND SIND VON DEN PHASENDIFFERENZEN UNABHÄNGIG.

Obwohl es möglich ist, künstlich Beispiele zu konstruieren, bei denen die Klangfarbe eines Tons unter der Veränderung der Phasen der Partialtöne leicht variiert, beschreibt das Helmholtzsche Gesetz die Lage recht gut. Daher beschreibt die sonographische Darstellung eines Tons (welche die Phasendifferenzen nicht berücksichtigt) die betrachteten Schallstrukturen recht zuverlässig.

Ohne die (relative) Gültigkeit des Helmholtzschen Gesetzes wäre ein Telephongespräch kaum verständlich, da in diesem Fall die Phasen der Töne in Funktion ihrer Frequenz verschoben werden. Fletcher zitiert ein Beispiel einer Phasenverschiebung, die zur Quadratwurzel der Frequenz proportional ist. Trotzdem verursacht diese Verschiebung keine Klangfarbenverwechslung, und das ist ein Glück, denn die Klangfarbe ist die einzige Charakteristik, die es uns erlaubt, die Vokale voneinander akustisch zu unterscheiden, wie wir später sehen werden.

Dank den verschiedenen Stellungen, die zwei oder mehr Sinuskurven zueinander haben können, ist es praktisch unmöglich, die Zerlegung einer periodischen Phonographischen Kurve in Sinuskurven visuell vorzunehmen. Indem wir zwischen den verschiedenen harmonischen Partialtönen eines musikalischen Tons Phasenverschiebungen vornehmen, können wir Kurven erzeugen, deren Visueller Aspekt vollständig voneinander abweicht. Diese Tatsache wird in den Teilbildern 3 und 4 der Abbildung des Kapitels 'GRAPHISCHE

DARSTELLUNG DES TONS UND MASSEINHEITEN' mit dem Titel "4 periodische Kurven" gezeigt. Es ist auch möglich, wenn auch etwas schwieriger, anhand von total verschiedenen Partialtonstrukturen zwei phonographische Kurven zu konstruieren, die sehr ähnlich aussehen.



Wirkung der Formanten

Spannen wir eine gleiche Violinsaite auf zwei verschiedenen Violinen auf, pflegen die resultierenden Klangfarben meist stark voneinander ab. Die Resonanzboden der beiden Instrumente sprechen auf die verschiedenen Frequenzen nicht gleich gut an. Ein Ton oder eine Region von Frequenzen, die von der Resonanztafel eines Instruments besonders wirkungsvoll verstärkt wird, heisst ein FORMANT. Da die Formanten bei zwei Violinen ungleich verteilt sind, variieren die Frequenzspektren der verschiedenen Töne von einem Instrument zum anderen in einer für jedes Instrument charakteristischen Weise. Um diese Erscheinung graphisch darzustellen, zeigt uns die Figur "Die Formanten" die Verwandlung eines gleichen Frequenzspektrums aus zueinander harmonischen Frequenzen durch zwei verschiedene Verstärkungskurven A und B. Die mit F bezeichneten Punkte entsprechen den Formanten des Beispiels der Figur.

Die Geigenbauer oder Erbauer beliebiger mit Resonanzböden versehener Instrumente versuchen eine Verstärkungskurve mit ganz bestimmten Eigenschaften zu erreichen. Unter anderem müssen stark betonte Formanten im Bereich des Tonumfangs vermieden werden, da sonst einzelne Töne unerwünscht stark hervortreten würden. Die

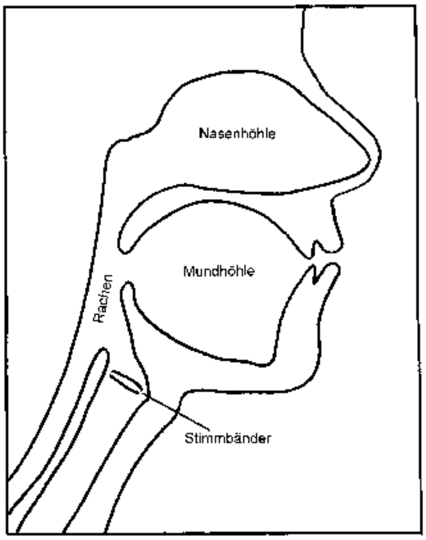
Erfahrung hat gezeigt, dass erstklassige Violinen in der Region um 1500 Hz eine Mulde, und eine starke Erhebung zwischen 2000 und 3000 Hz aufweisen.

Mit Saiteninstrumenten können besonders weiche Töne erzeugt werden, wenn die Saite in einem seiner Knoten mit einem Finger leicht berührt wird, während die Saite auf die übliche Art angestrichen wird. Diese Töne werden harmonische Töne oder INSTRUMENTALE HARMONISCHE TÖNE genannt und es soll wieder daran erinnert werden, dass diese von den harmonischen Partialtönen zu unterscheiden sind, da die harmonischen Töne aus einem Grundton und einer Reihe von Partialtönen bestehen, während ein Partialton ein reiner Ton ist, also ein Sinuston ohne eigene Partialtöne. Instrumentale harmonische Töne stellen ein typisches Hilfsmittel der gestrichenen Saiteninstrumente dar, insbesondere der Violine.

Die Formanten spielen nicht nur für die Klangfarbe der Musikinstrumente eine hervorragende Rolle, sie sind auch für die phonetische Unterscheidung der gesprochenen Vokale ausschlaggebend. Die verschiedenen Vokale, die die menschliche Stimme erzeugen kann unterscheiden sich tatsächlich nur durch ihre Klangfarbe, denn wir können ein 'o' und ein 'u' nacheinander auf der gleichen Tonhöhe und während derselben Dauer singen, ohne sie zu verwechseln. Offenbar erahnte der englische Physiker Wheatstone um 1837 als einer der ersten diese Tatsache. Unsere Stimmbänder erzeugen einen annähernd periodischen Ton, mit einem einigermassen ausgeglichenen Partialtonspektrum. Die Frequenz dieses Tons ist individuell verschieden und hängt vor allem von Alter und Geschlecht ab. Der von den Stimmbändern abgegebener Ton wird in drei Körperhöhlen verstärkt, die wie Resonatoren wirken: Der Rachen, die Mundhöhle und die Nasenhöhle. Der Gaumensegel übernimmt die Aufgabe, die Luft auf die beiden letztgenannten Körperhöhlen zu verteilen. Die Eigenresonanzfrequenz der Mundhöhle kann durch die verschiedenen Stellungen der Zunge, der Lippen und der Kieferknochen zueinander variiert werden. In beschränktem Mass gilt dasselbe auch für den Rachen und die Nasenhöhle. Alle drei Körperhöhlen verhalten sich also wie abstimmbare Resonatoren, welche die drei Hauptformanten jedes Vokals darstellen, den wir von uns geben. Es ist interessant festzustellen, dass sich zwar der Grundton der Stimme dem Alter und Geschlecht anpasst, nicht aber die Formanten der Vokale. So entsprechen etwa dem 'a' Formanten im Bereich der Noten Fa # (4), Do # (5) und Re # (6), ganz egal, ob das 'a' von einem zehnjährigen Mädchen oder einem erwachsenen Mann ausgesprochen wird. Natürlich variieren die Formanten je nach der gesprochenen Sprache oder Dialekt. Die Figur stellt auf stark schematisierte Art die Lage der drei Körperhöhlen und der Stimmbänder zueinander.

Wir verstehen jetzt auch, wieso es so schwierig ist, auf einer mit doppelter Geschwindigkeit wiedergegebenen Tonaufzeichnung das gesprochene Wort zu verstehen, selbst dann, wenn der Sprecher auf der Originalaufzeichnung mit tiefer Stimme, speziell langsam und deutlich spricht.

Dank den für jeden Vokal charakteristischen Formanten, hängt die Klangfarbe einer gesungenen Komposition von den in jeder Tonhöhe gesungenen Vokalen ab. Andererseits wird durch die Verteilung der Formanten das Singen einzelner Vokale in einzelnen Stimmlagen geradezu verunmöglicht; so kann etwa der Vokal 'o' auf einem sehr hohen Ton nicht wiedergegeben werden. Diese beiden Tatsachen bieten den Gegnern der Übersetzung von Vokalmusik eine gut begründete Argumentation.



Entstehung der Vokale

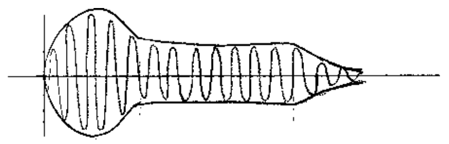
Um 1855 baute Helmholtz ein Gerät, das man als den ersten Tonsynthesizer betrachten kann. Das Gerät bestand aus einer Reihe von Stimmgabeln, die mittels Elektromagneten zum Schwingen angeregt wurden. Mit diesem Gerät konnte jeder beliebige Vokal aufgrund seiner Formanten erzeugt werden.

Dank dem elementaren Prinzip der Vokalerzeugung konnte um 1870 der Amerikaner Faber seine Zeitgenossen mit einer selbstgebauten sprechenden Maschine in Erstaunen versetzen. Das Gerät war auf akustische Resonatoren mit verstellbaren Wänden begründet, die mit einer Tastatur gekoppelt waren. Gewisse Quellen berichten uns von einem sprechenden Kopf, den schon der Philosoph Albert der Grosse im XIII Jh. besessen haben soll, und der für seine Zeitgenossen als teuflische Erfindung gegolten hätte. Es heisst, Sankt Thomas von Aquino hätte schliesslich den Apparat zerstört. Dies spräche für dessen Funktionstüchtigkeit.

Neben den Vokalen gibt es im Zusammenhang mit der Sprache noch andere wichtige Erscheinungen, wie etwa die kurzen, nicht periodischen Konsonanten. Bei den Konsonanten spielen die Übergangserscheinungen von einer Schwingungsart zur anderen, eine wichtige Rolle, die auch entscheidend zur Klangfarbe verschiedener

Instrumente beitragen. Die periodischen Schwingingen werden dabei durch eine sogenannte Lautstärkehüllkurve moduliert.

Nimmt man den Ton eines Klaviers oder einer Gitarre auf Band auf und klebt dann einen Abschnitt dieses Bandes zu einer Schleife zusammen, so dass sich beim Abspielen ein kleiner Abschnitt der Aufnahme ständig wiederholt, werden wir mit Verblüffung feststellen, dass wir den charakteristischen Klang eines Klaviers oder einer Gitarre plötzlich nicht mehr erkennen können. Das kommt von der Ausschaltung der Übergangserscheinungen, also vor allem von der Lautstärkenkurve, die unseren Ton durchläuft. Ein normaler musikalischer Ton weist in der Tat während seiner Existenz nicht eine konstante Lautstärke auf, so dass er streng genommen nicht während seiner ganzen Dauer periodisch ist. Die Dauer eines Tons wird üblicherweise in drei Phasen unterteilt: Den Anklang, die periodische Phase und das Abklingen. Diese drei Phasen sind nicht mit mathematischer Genauigkeit aufzufassen.



Die Übergangsphasen

Soll der Klang eines Instruments mit elektronischen Hilfsmitteln nachempfunden werden, müssen selbstverständlich die Übergangserscheinungen berücksichtigt werden, und eine periodische Kurve muss entsprechend moduliert werden, wie in der Figur schematisiert.

Aber die Dinge sind komplizierter, als es scheint: kürzlich unternommene Untersuchungen haben ergeben, dass in den meisten Fällen jeder Partialton seine eigene Übergangskurve aufzuweisen pflegt, und dass vor allem in der Phase des Anschlags (die bei einzelnen Orgelpfeifen eine halbe Sekunde überschreiten kann) stetig oder zufällig verteilte Frequenzen auftreten können. Das alles vermag die grossen Schwierigkeiten zu erklären, die mit der vom ästhetischen Standpunkt befriedigenden elektronischen Reproduktion (mit Synthesizern oder dem Computer) der Klänge der herkömmlichen Musikinstrumente verbunden ist.

Obwohl sich dieses Werk speziell der Untersuchung musikalischer Töne widmet, also der periodischen oder annähernd periodischen Schwingungen, darf nicht vergessen werden, dass die meisten Töne nicht musikalisch sind, sondern dem Bereich der Geräusche angehören.

Es kann seltsam anmuten, dass unter gewissen Bedingungen unser Gehör die Tendenz hat, sogar den Geräuschen eine gewisse Tonhöhe zuzuordnen, auch wenn diese nicht so klar festgelegt ist, wie im Falle eines Sinustons. In der Tat kann unser Gehörorgan aus einem

Geräusch eine mittlere Frequenz oder eine durch überdurchschnittliche Lautstärke ausgezeichnete Frequenz heraushören, also einem Geräusch etwas wie eine statistische Tonhöhe zuordnen. Dieser Effekt kann etwa dadurch gezeigt werden, dass wir mit einem Hammer verschiedene Bretter anklopfen. Wenn wir auf das erste Brett schlagen, wird es uns vermutlich schwierig sein, mit dem Geräusch eine gewisse Tonhöhe in Verbindung zu bringen. Aber sobald wir das zweite Brett anklopfen, werden wir imstande sein, zu entscheiden, ob das entstandene Geräusch als höher oder tiefer eingestuft werden kann als das erste. Mit speziell auserwählten Brettern kann auf diese Weise eine richtige Geräuschtonleiter zusammengesucht werden.

Ist ein Geräusch aus einer homogenen Verteilung aller hörbaren Frequenzen zusammengesetzt, spricht man von einem weissen oder Gaussschen[37] Geräusch.

In früheren Kapiteln haben wir gesehen, dass zwei Töne untereinander Schwebungen, Differenztöne und sogar Summentöne erzeugen können. Diese Erscheinungen werden objektiv genannt, wenn sie ausserhalb des Gehörs zustandekommen. In diesem Fall bilden sie eine physikalische Realität, die auch gemessen werden kann, zum Beispiel unter Zuhilfenahme von Resonatoren. Kombinationstöne werden oft im Gehör selber erzeugt und sind in diesem Fall als subjektiv einzustufen. In derselben Weise wie zwei Sinustöne zusammenwirken und objektive oder subjektive Schwebungen oder Kombinationstöne erzeugen oder einander maskieren können, können auch Partialtöne zweier zusammengesetzter Töne oder sogar Partialtöne eines einzelnen zusammengesetzten Tons zusammenwirken.

So würde die Quinte (Do (3), Sol (3)) eines gleichmässig temperiert gestimmten Klaviers keine hörbaren Schwebungen erzeugen, wenn die beiden Töne keine Partialtöne hätten. Der dritte harmonische Partialton von Do (3) und der zweite von Sol (3) fallen beinahe zusammen (sie würden sogar genau zusammentreffen, wenn die Quinte natürlich wäre, wenn also das Schwingungsverhältnis der beiden Töne 3 : 2 wäre). Wie wir leicht berechnen können, entspricht der dritte Partialton von Do (mit 261,625 Hz) einer Frequenz von 784,876 Hz, während der zweite Partialton (die Oktave) von Sol (mit 391,995 Hz) die Frequenz von 783,990 Hz aufweist. Wir erhalten ganz langsame Schwebungen von 0,88 Hz. Diese Schwebungen verleihen dem Klavierton eine Spannung, die er nicht hätte, würde das Instrument nach der natürlichen Tonleiter (auch Tonleiter von Zarlino genannt) gestimmt. Wir sehen also, dass sogar die Ton-

[37] Nach dem grossen deutschen Mathematiker Carl Friedrich Gauss (1777-1855).

leiter, nach der das Instrument gestimmt wird, dessen Klangfarbe beeinflussen kann.

Ein ähnlicher Klangfarbeneffekt kommt zustande, wenn in einem Orchester mehrere Instrumente dieselbe Melodie spielen. Da die verschiedenen Instrumente nicht mit mathematischer Präzision spielen, kommen zwischen den leicht voneinander abweichenden Tonhöhen Schwebungen zustande, die zumeist zu langsam sind, um als solche wahrgenommen zu werden. Aber die Schwebungen der zweiten Partialtöne (welche die doppelten Frequenzen aufweisen) weisen ihrerseits auch die doppelten Frequenzen auf. Das Zusammenspiel der Schwebungen zwischen allen Partialtönen beeinflusst die Klangfarbe, und das erklärt, wieso eine Violine aus 3 m Abstand nicht gleich tönt, wie vier Violinen aus 6 m Abstand[38].

Hier sei bemerkt, dass in einem periodischen Ton alle zwischen den Partialtönen auftretenden Differenztöne oder Summentöne ein ganzzahliges Vielfaches des Grundtons darstellen. Andererseits darf nicht vergessen werden, dass viele der in der Musik verwandten Töne nur annähernd periodisch sind.

Experimentell konnte festgestellt werden, dass das Gehör sogar Differenztöne zwischen zwei bereits dem Ultraschall angehörenden Frequenzen zu erzeugen vermag. Das bedeutet, dass zwei an sich dank ihrer hohen Frequenz unhörbare Obertöne einen Differenzton zu erzeugen vermögen, der die Partialtonstruktur und somit die Klangfarbe beeinflussen kann. Diese Tatsache wirft die Frage auf, ob der Tonumfang elektroakustischer Geräte auf den Bereich der hörbaren Töne beschränkt sein darf, oder ob sich eine echte Qualitätssteigerung durch die Erweiterung bis in den Ultraschallbereich erreichen lässt.

Die Begriffe der KONSONANZ und der DISSONANZ sind stark mit dem Klangfarbenbegriff Verbunden. Im Laufe der Geschichte wurde der Begriff der Konsonanz unterschiedlich erklärt. Schon Pythagoras stellte fest, dass sich alle konsonanten Intervalle durch ein kleines ganzzahliges Verhältnis zwischen den Tonfrequenzen auszeichneten. Das absolut konsonante Intervall, die Oktave, entspricht dem Verhältnis 2 :1, die natürliche Quinte dem Verhältnis 3 :2, usw. In der ersten Hälfte des XVIII Jh. schlug Euler vor, den grössten gemeinsamen Teiler des Verhältnisses (in seiner vollständig gekürzten Form) der in einem Akkord vorkommenden Töne als Mass für die Dissonanz einzusetzen. So entspräche etwa dem Akkord (Do (1),

---

[38] Auch nicht, was die Lautstärke anbelangt; denn die Lautstärken zweier Violinen werden nicht addiert, da ein Teil der abgestrahlten Schallwellen sich gegenseitig kompensieren. Glücklicherweise tritt dieser Effekt auch im Strassenlärm auf, der sonst unerträgliche Masse annehmen würde.

Mi (5/4), Sol (3/2)) mit der Proportion 4 : 5 : 6 ein Dissonanzgrad von 60. Diese Definition führt schnell einmal zu allen möglichen Widersprüchen und muss daher verworfen werden. So entspräche etwa der "natürlichen" Quinte mit der Proportion 3 : 2 ein Dissonanzgrad von 6. Würde unsere Quinte ganz leicht auf die Proportion 2213 : 1477 = 1,49830 verstimmt, wüchse der Dissonanzgrad au f 3268601. Diese Quinte liegt zwischen der "natürlichen" und der temperierten Quinte. Verstimmen wir nun unsere Quinte wesentlich stärker, bis zur Proportion 31 : 21 =1,47619, vermindert sich der Dissonanzgrad auf 651, was offensichtlich absurd ist. Hier irrte sich

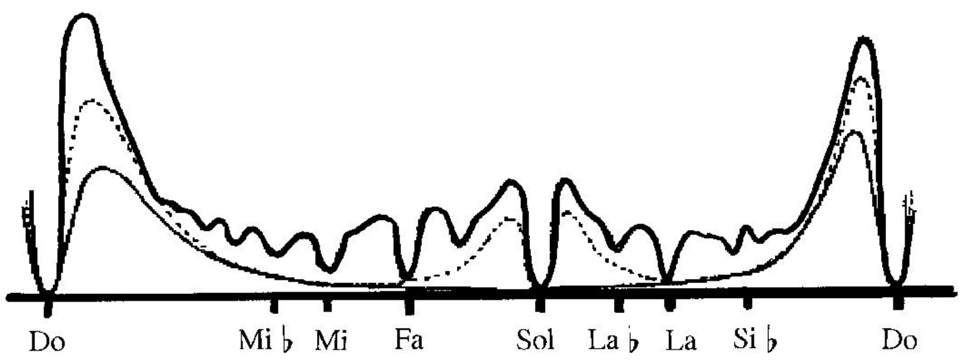


Diagramm von Helmholtz

der grosse Euler.

Helmholtz erklärte den Konsonanzeffekt anhand der Schwebungen zwischen den Partialtönen der Töne eines bestimmten Intervalls. Nach dieser Theorie von Helmholtz hängt der Grad der Konsonanz von den Klangfarben der zusammenklingenden Töne ab, was die Praxis bestätigt. Helmholtz stellte fest, dass die Härte eines aus Sinustönen bestehenden Intervalls dann am ausgeprägtesten ist, wenn eine Schwebung von 33 Hz auftritt, und dass dann das Intervall sowohl bei Annäherung, wie bei Entfernung der beiden Töne weicher wurde. Helmholtz berechnete den Dissonanzgrad eines Intervalls, indem er alle auf Schwebungen zwischen den Partialtönen zurückzuführenden "Härten" addierte.

Die folgenden Bedingungen lieferten das sogenannte Helmholtzdiagramm: Es wurde der Zusammenklang zweier Violintöne betrachtet, wobei der erste konstant dem Do (3) entsprach. Der zweite bewegte sich im dem durch Do (3) und Do (4) begrenzten Intervall. Das Diagramm weist mehrere Kurven auf: Die erste berücksichtigt nur die Grundtöne. Die zweite Kurve berücksichtigt die ersten beiden Partialtöne, usw. In unserer Abbildung werden nur die dem Grundton alleine und die den ersten 5 Partialtönen entsprechenden

Kurven dargestellt (punktierte Linie). Offensichtlich ist der Dissonanzgrad minimal, wenn eine Höchstzahl an Partialtönen zusammentreffen. Diese Theorie von Helmholtz liefert ein gewichtiges Argument zugunsten der natürlichen Tonleiter, befriedigt aber auch nicht ganz. Wird etwa das Diagramm für die nächste Oktave erstellt, erhält man bereits abweichende Resultate, da alle Partialtöne doppelte Frequenzen gegenüber den entsprechenden Tönen in der unteren Oktave aufweisen. So werden gegenüber dieser Oktave einzelne "Härten" gemildert, während andere verschärft werden. Untersuchen wir die niedrigen Tasten des Klaviers im Lichte der Helmholtzschen Theorie, müsste die Quinte (Do (1), Sol (1)) vollständig dissonant sein, erzeugen doch die Grundtöne untereinander Schwebungen von 32,6 Hz. Andererseits können laut der Helmholtzschen Theorie zwei reine Sinustöne keine Dissonanz erzeugen, wenn sie nur weit genug auseinanderliegen. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass sogar bei Sinustönen, die zu weit auseinander liegen, um hörbare Schwebungen zu erzeugen, subjektive harmonische Obertöne vernommen werden können, wenn die beiden Sinusschwingungen im Gehörapparat verzerrt wurden. Diese Obertöne sind in der Fourierzerlegung der verzerrten Sinuskurven begründet. Dank der Schwebungen zwischen diesen Obertönen der beiden verzerrten Sinustöne können wir einen gewissen Grad von Dissonanz zwischen den beiden reinen Sinustönen empfinden.

Die Physiologen des XX Jh. stellten fest, dass zwei mit demselben Ohr gehörte Töne ein unangenehmes Gefühl erzeugen, wenn sie zu nahe beieinander liegen. Dieser Eindruck verschwindet, sobald die beiden Töne aus einer gewissen kritischen Bandbreite gerückt werden, die jeden Ton umgibt, oder aber, wenn die beiden Töne je von einem einzelnen Ohr vernommen werden. Diese Theorie führt zu ganz ähnlichen Resultaten, wie die Theorie von Helmholtz, erlaubt es aber, gewisse Erscheinungen zu interpretieren, die mit dem Helmholtzschen Dissonanzbegriff nicht auf befriedigende Weise erklärt werden können.

So konnte etwa die Härte eines periodischen Tons mit hohen Partialtönen nicht mit der Helmholtzschen Theorie erklärt werden, da in diesem Fall jede Differenz zwischen den Frequenzen von zwei Partialtönen ein ganzzahliges Vielfaches der Grundtonfrequenz darstellt. Ist die Frequenz des Grundtons höher als 100 Hz, schwingen sämtliche Schwebungen oder Differenztöne mit Frequenzen von mindestens 100 Hz.

Mit der Bandbreitentheorie jedoch, kann die Härte erklärt werden: Ab einem bestimmten Partialtonindex finden wir Schwingungen, die in die kritische Bandbreite eines ihrer Nachbarn fallen. Das heisst, dass ein einzelner periodischer Ton eine Art innere Dissonanz aufweisen kann!

Es muss unterstrichen werden, dass die beiden Dissonanztheorien, die Schwebungstheorie von Helmholtz und die Bandbreitentheorie auch auf Töne Anwendung finden, die unharmonische Partialtöne aufweisen, also streng genommen unperiodische Töne, wie etwa die von Glocken erzeugten.

Die musikalische Wirklichkeit bildet eine gewisse Annäherung an den Fall der periodischen Töne. So haben etwa Saiteninstrumente fast-harmonische Partialtöne, da keine Saite den Idealfall erfüllt. Wie wir später sehen werden, bewirkt diese Tatsache im Falle des Klaviers eine gewisse Abweichung von der errechneten temperierten Tonleiter. Ferner erschwert auch dieser Effekt die elektronische Synthese der den akustischen Instrumenten eigenen Klangfarben.

Bis hierher haben wir die Begriffe Konsonanz und Dissonanz wie Antagonisten behandelt: Je grösser die Konsonanz, desto kleiner die Dissonanz, und umgekehrt. In den Fünfzigerjahren des XX Jh. durchgeführte Experimente weisen jedoch daraufhin dass die Konsonanz eine zentral im Gehirn erzeugte Sinnesempfindung darstellt, während die Dissonanz bereits im Ohr entsteht. Mit Kopfhörern wurde jedem einzelnen Ohr je ein verschiedener Sinuston zugeleitet. Man hört den unangenehmen Effekt von nicht klar festgelegten Intervallen und manchmal, je nach den Frequenzen empfindet man so etwas wie eine Konsonanz. Werden die beiden Sinustöne durch zusammengesetzte Töne (mit harmonischen Partialtönen) ersetzt, hörte man Konsonanz, aber nie Dissonanz. Um zu zeigen, dass die binauralen Töne auf ähnliche Weise schmolzen, wie es die monauralen zu tun pflegen, wurde das folgende Experiment vorgenommen: Eine Teilmenge der harmonischen Obertöne eines synthetisierten Tons wurde einem einzelnen Ohr zugeführt, der Rest dem anderen. Dabei empfand der Hörer ungefähr dasselbe, wie beim Anhören des gesamten Tons auf die gewohnte Weise, also mit beiden Ohren. Der unbedeutende Unterschied in der Klangfarbe ist der Abwesenheit gewisser Differenztöne zuzuschreiben.

Schliesslich stossen wir auf eine verblüffende Tatsache: Die Klangfarbe verändert sich je nach der Lautstärke, mit der ein Musikstück angehört wird. Möchten wir etwa mit unserer Stereoanlage eine bestmögliche Klangfarbentreue erreichen, müssten wir theoretisch den Verstärker so einstellen, dass wir die Musik in Originallautstärke vernehmen. Wie ist diese Tatsache zu erklären? Den Isosonie-Kurven im Diagramm von Fletcher können wir folgendes entnehmen: Vermindern wir die Lautstärke von zwei verschiedenen Tönen um die gleiche Anzahl dB (physikalische Einheit), werden die entsprechenden Werte in Phon (psychologische Einheit) nicht unbedingt um den gleichen Betrag vermindert. Wird die Lautstärke generell abgeschwächt, verändert sich etwa die Wahrnehmung der Töne mit niederer Frequenz und schwacher Intensität stärker als die Wahrnehmung der Töne mittlerer Frequenzen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, werden moderne Stereoanlagen vielfach mit einem EQUALIZER ausgerüstet, mit dem die Intensitäten verschiedener Frequenzbereiche individuell geregelt werden können.

DIE REPRODUKTION DES SCHALLS

Unter diesem Titel wollen wir nicht die verschiedenen Aspekte der Wiedergabe einer musikalischen Komposition anhand seiner Partitur besprechen, eventuell mit Hilfe von schriftlichen Zeugnissen aus der Zeit des Komponisten, vielleicht sogar unter Einsatz von Originalinstrumenten, um die akustische Atmosphäre des Zeitalters des Komponisten möglichst treu wiederzugeben. Nebenbei sei erwähnt, dass eine derartig treue Widergabe aus dem Künstlerischen Standpunkt nicht unbedingt wertvoller ist, als eine Widergabe mit geeigneten modernen Instrumenten. Ich glaube zum Beispiel, dass Bach seine meisten Werke für Cembalo dem Klavier gewidmet hätte, wären damals so perfekte Instrumente zu seiner Verfügung gestanden, wie die modernen Flügel von *Steinway & Sons*, *Bösendorfer* oder *Bechstein.* Ich glaube ferner, dass man zwischen der Musik unterscheiden muss, die speziell der Technik eines bestimmten Instruments gewidmet ist und der universellen Musik, die praktisch jeder beliebigen Instrumentierung angepasst werden kann, ohne an Essenz einzubüssen, sofern die gewählten Instrumente dies erlauben. So kann eine Fuge von Bach auf dem Cembalo, dem Klavier oder durch mehrere Instrumente gespielt werden. Aber die Nocturnes von Chopin dürfen nicht auf einem Cembalo wiedergegeben werden. Dies aber sind rein persönliche Ansichten.

Dieses Kapitel behandelt ein anderes Thema, nämlich die automatische Reproduktion der Musik, der menschlichen Stimme und sogar beliebigen Schalls. Das Kapitel ist in zwei Hauptabschnitte unterteilt: Die INDIREKTE REPRODUKTION, bei der ein automatisiertes Musikinstrument eingesetzt wird, und die DIREKTE REPRODUKTION, bei der es sich um Vorrichtungen handelt, die den Schall direkt reproduzieren, ohne sich um dessen Herkunft zu kümmern.

Die Entwicklung der Musikautomaten im Laufe der Geschichte läuft mit dem Fortschritt der Mechanik, insbesondere der Uhrmacherkunst einher. Wir können die Glockenspiele[39] als die frühesten musikalischen Offenbarungen im Bereich der Uhrmacherkunst be-

[39] Das französische Wort "Carillon" stammt ethymologisch vom lateinischen *quaternio*, Vierergruppe (von Glocken) ab.

trachten. Im Laufe der Zeit entstanden dank der zunehmenden mechanischen Perfektion regelrechte Wunderwerke, wie etwa das um 1802 von Maelzel erbaute *Panharmonicon* mit einer Gruppe von 42 Musikautomaten, die ein Orchester formten, das imstande war, mit mechanischer Vollkommenheit verschiedene Kompositionen des klassischen Repertoires wiederzugeben. Es ist bemerkenswert, dass Beethoven seine Ouvertüre op. 91 *(Der Sieg von Wellington)* für diesen Automaten und nicht für ein richtiges Orchester schrieb.

45 Jahre später konstruierte der Patriarch der Firma Welte, Michael Welte, ein *Orchestrion* mit 590 Instrumenten.

Zweifelsohne schufen die herrlichen Automaten jener Zeit die Eingebung für die märchenhafte Olympia aus einer der berühmten Hoffmannschen Erzählungen. Die schöne, aber etwas kühle Olympia aus der Dichtung spielt mit grosser Virtuosität Klavier und tanzt im Rhythmus der Musik. Welch schreckliche Enttäuschung musste der verliebte Anbeter erleiden, als er erfuhr, dass seine Geliebte nichts anderes als ein mechanisch perfekter Automat war.

In der ersten Zeit war die Grenze zwischen Uhr und Musikautomaten unscharf, wie der Ausdruck 'Flötenuhr' bezeugt, der im XVIII Jh. auf einen von Johann Gottfried Kauffmann erbauten Musikautomaten angewandt wurde, der keine Zeitangabe bot. Eines der ersten mechanischen Geräte zur automatischen Widergabe von Musik ist im Buch von 1615 "Les raisons des forces mouvantes" des französischen Ingenieurs De Caus beschrieben. Diese Maschine arbeitete bereits mit einer Stiftwalze, welche die chronologische Abfolge der einzelnen Töne koordinierte.

Die Tatsache, dass anerkannte Künstler wie Friedemann Bach, Haydn und Mozart Werke für Musikautomaten schrieben, beweist, dass diese damals nicht ausschliesslich als mechanische Kuriositäten oder als Jahrmarktsattraktionen betrachtet wurden.

Um 1800 wurde eine Walzenorgel unter den ambulanten Musikanten unter dem Namen "Orgue de Barbarie" populär, ein Ausdruck, der etymologisch auf den Namen des vermutlichen italienischen Erbauers hinzuweisen scheint, Barberi oder Barbieri.

Auch die beiden Automaten die Vaucanson 1738 in Paris vorstellte wurden mit einem Zylinder koordiniert.

Engramelle stellte auf methodische Art und Weise die Technik der musikalischen Programmierung von Zylindern in seinem 1775 erschienenen Buch "La Tonotechnie..." dar

Im Laufe des XIX Jh. wuchs die Automatenkonstruktion zu einem wichtigen Industriezweig heran, und gegen 1900 widmeten sich alleine in Deutschland über 50 Fabriken dieser Tätigkeit. Heutzutage hat die elektroakustische Reproduktion von Musik die Musikautomaten abgelöst, wenn wir von einigen nostalgischen Ausnahmen, wie der Fabrikation von Musikdosen absehen.

Die von Jacquard erfundene Lochkarte, welche für die Automatisierung von Webstühlen gedacht war, trug entscheidend zur Entwicklung der automatischen Musikinstrumente bei, indem sie die Zylinder weitgehend ablöste, in einzelnen Fällen auch in Form von Lochbändern oder Lochscheiben.

Unter allen automatischen Musikinstrumenten, die im Laufe der Geschichte erbaut wurden und denjenigen, die uns nur durch die Legende bekannt sind, werden wir uns hier auf einen der nobelsten Vertreter beschränken, auf das mechanische Klavier oder Pianola[40].

Der Automat kann fest in ein Klavier eingebaut werden oder aber als individuelles Gerät vor die Tastatur eines beliebigen Klaviers geschoben werden, wobei jedes seiner mit Filz bezogenen "Finger" über die entsprechende Taste zu liegen kommen muss, so dass der Automat gewissermassen die Funktion des Pianisten übernimmt. Ein solches Gerät wird üblicherweise mit dem deutschen Namen *Vorsetzer* bezeichnet. Der *Vorsetzer* hat den Vorteil, dass er vor einen grossen Konzertflügel gestellt werden kann, ohne diesen zu verderben, will man etwa anhand Schallplattenaufnahmen anhand von Klavierrollen herstellen, die von einem berühmten Pianisten bespielt wurden.

Im Laufe des XIX Jahrhunderts erfuhr das mechanische Klavier eine intensive technische Entwicklung, die in den Produkten der Firmen Welte, Hupfeld und Aeolian gipfelte, um nur die wichtigsten zu nennen. Eines der ersten funktionstüchtigen Modelle wurde durch Debain erbaut, der auch das *Harmonium* erfand.

Während die Musikautomaten damals zumeist durch Stiftwalzen gesteuert wurden, gingen die fortschrittlichsten Erbauer zu den Lochstreifen über, die wesentlich längere Kompositionen enthalten konnten und sich aufrollen liessen. Ab 1883 baute die Firma Welte solche Rollen in ihre Musikautomaten ein, wobei vorerst ein pneumatisches Überdrucksystem eingesetzt wurde, das ab 1890 durch ein Vakuumsystem abgelöst wurde, das gegenüber dem Überdrucksystem gewisse Vorteile bot.

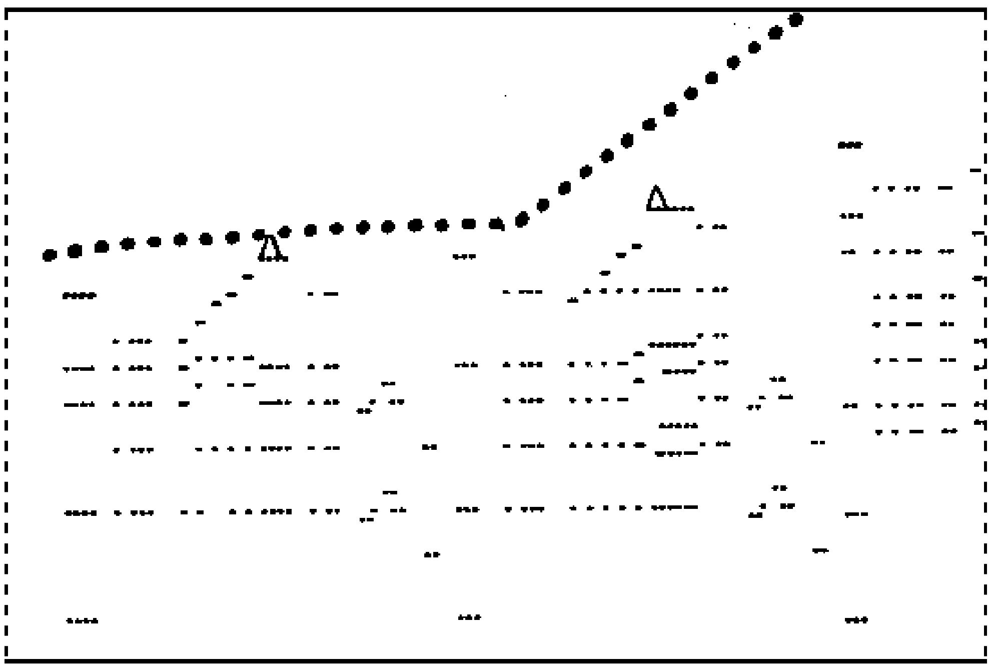
Um 1880 hatten die ersten Musikrollen eine Breite von ca. 15 bis 20 cm und erlaubten die Wiedergabe in einem Tonumfang von etwa 15 oder 20 Noten. Allmählich wuchs die Breite der Bänder, während zugleich der Abstand zwischen den Pisten abnahm, bis die klassischen 28,5 cm breiten Rollen entstanden, die anlässlich des Kon-

[40] "Pianola" war eigentlich der Markenname des 1900 von Votey erschaffenen mechanischen Klaviers, aber heute wird der Begriff allgemein auf beliebeige mechanische Klaviere angewandt.

gresses der wichtigsten Nordamerikanischen Klavierfabrikanten in Buffalo im Jahr 1908 zur Norm erwählt wurden. Diese Rolle war dazu vorgesehen, die Lochspuren der 88 Klaviertasten aufzunehmen, nebst einer Spur, die das Pedal steuerte, und ein paar Zusatzspuren.

Die mechanischen Klaviere können in drei Hauptgruppen unterteilt werden, nämlich die ELEKTROMECHANISCHEN KLAVIERE, auch elektrische Klaviere genannt, die normalen PIANOLAS und die REPRODUKTIONSKLAVIERE.

Die elektromechanischen Klaviere zeichnen sich durch einen vollständigen Automatismus aus, bei dem kein menschlicher Eingriff zur Regulierung der Geschwindigkeit oder der Lautstärke vorgesehen ist. Diese Klaviere pflegten mit einem von einem Elektromotor angetriebenen pneumatischen System ausgerüstet zu sein. Es han-



Ausschnitt aus einer Klavierrolle

delte sich hier um das typische Rollenklavier, wie es gegen Ende des XIX Jh. in gewissen öffentlichen Lokalen anzutreffen war, meist mit endlosen Lochstreifen versehen, um den Rollenwechsel vermeiden zu können. Elektromechanische Klaviere schliessen manchmal dem Klavier fremde Klangerzeuger mit ein, wie etwa Orgelpfeifen oder Glocken. Die Bedienung erfolgte in vielen Fällen über einen Münzautomaten.

Während das elektromechanische Klavier vornehmlich den lärmigen Effekten gewidmet war, erlaubt das klassische Pianola, das meist mittels Pedalen mit Energie versorgt wird (wie im Falle des

Harmoniums), die manuelle Regulierung der Dynamik und des Tempos mit den dafür vorgesehenen Hebeln. Die klassischen Klavierrollen sind meist mit aneinandergereihten aufgedruckten Farbklecksen versehen, welche die DYNAMISCHE MODULATIONSLINIE darstellen[41]. Der entsprechende Hebel ist so angeordnet, dass der vom Hersteller empfohlenen Modulationslinie mühelos gefolgt werden kann, ohne aber dazu gezwungen zu sein. So kann eine gewisse Interpretationsfreiheit anhand von serienmässig metronomisch gelochten Streifen gewährt werden. Später fingen einige Hersteller an, eine weitere Linie einzufügen, die METROSTYLISCHE LINIE, welche die in jedem Moment optimale Geschwindigkeit vermittelte.

In den früheren Pianolas mussten alle gleichzeitig gespielten Noten mit derselben Lautstärke wiedergegeben werden, so dass es unmöglich war, die Melodie vor der Begleitung hervorzuheben. Um dieser Beschränkung auszuweichen, führte ab 1900 die amerikanische Firma Aeolian unter dem Namen THEMODIST Rollen mit zusätzlichen Lochungen ein, welche die so markierten Noten akzentuierte. Ein ähnliches System wurde 1908 von der Firma Hupfeld unter dem Namen SOLODANT vertrieben. Wie aber wurde erreicht, dass aus einem Akkord eine einzelne Note (oder zwei, drei Noten) akzentuiert werden konnten? Dazu wurden die entsprechenden Töne den anderen zeitlich leicht vorangesetzt (oder nachgesetzt), was damals übrigens auch namhafte Pianisten zu tun pflegten.

Um die Papierrollen herzustellen, mussten vorerst die den einzelnen Tönen entsprechenden Löcher aufs Papier gezeichnet werden, metronomisch genau nach Partitur und unter Zuhilfenahme von Schablonen. Dann wurden die einzelnen Noten mit Lochgeräten, die sich in den entsprechenden Pisten bewegen konnten, perforiert. Die so bearbeitete Rolle konnte auf einem Pianola geprüft werden. Jede Art von Korrektur war noch möglich: es konnten neue Lochungen angebracht werden, oder durch Überkleben mit Papier konnten bestehende Lochungen beseitigt werden. Die so entstandene Originalrolle wurde in eine spezielle Kopiermaschine gegeben, mit der eine beliebige Anzahl von Kopien hergestellt werden konnten. Zuletzt wurden die Hinweise auf Dynamik und Agogik so aufgedruckt, dass sie von dem vor dem Pianola sitzenden Menschen verfolgt werden können. Zuletzt musste der Streifen nur noch aufgespult werden. In den ersten Jahrzehnten des XX Jh. beschäftigte die Herstellung von Klavierrollen einen beachtlichen Industriezweig. In Katalonien wurde etwa die erste Fabrik 1912 in *la Garriga* gegründet.

---

[41] Unsere Abbildung "Teilansicht einer Pianola-Rolle" zeigt diese Linie im Falle der Rolle Nummer 2089 der Serie *'Rollos Victoria'*, welche die sogenannte Militär-Polonaise Op. 40, Nummer 1 von Chopin wiedergibt.

Ab 1905 begannen verschiedene Klavierrollenhersteller die metrostylische Linie durch rhythmisch flexible Lochungen abzulösen, welche der reellen Geschwindigkeit angepasst wurde, anstelle der herkömmlichen metronomischen Lochung. Das setzte die Herstellung unter der Aufsicht eines kompetenten Musikers voraus, der dem Produkt selbstverständlich einen gewissen Grad an Subjektivität aufprägte, welche allerdings im Moment des Abspielens wieder weitgehend mit dem Geschwindigkeitshebel des Pianolas kompensiert werden konnte. Diese Rollen, die nicht uneingeschränkt akzeptiert wurden, trugen die Bezeichnung "Künstlerrolle". Auch bei den Künstlerrollen musste die Dynamik noch manuell eingestellt werden, indem man mit dem entsprechenden Hebelchen der gedruckten Modulationslinie oder der eigenen Inspiration folgte.

Schliesslich entstanden die sogenannten Reproduktionsklaviere, welche die anhand der Interpretation eines Künstlers hergestellten Klavierrollen abspielen, wobei auf erstaunliche Weise die Agogik und die dynamische Modulierung des Pianisten wiedergegeben wird. Einzelne Fachleute meinen, eine derartige mechanische Reproduktion könne nie den gleichen klanglichen und gefühlsmässigen Reichtum wiedergeben, wie die direkte Interpretation eines sensiblen Pianisten. Dieser Ansicht können allerdings verschiedene Argumente entgegengehalten werden. Erstens müssen wir feststellen, dass beim Niederdrücken einer Taste die Klangfarbe nur von der Geschwindigkeit des Impulses (die durch die auf die Taste angewandte Kraft bestimmt ist) abhängt, da sich die Bewegung des Hammers nachträglich nicht mehr beeinflussen lässt. Die phonographischen Kurven und die auf elektronischem Weg aufgezeichneten Sonogramme haben bestätigt, dass sich ein Klavierton, der durch Niederfallen eines Gewichts auf die Taste erzeugt wurde nicht von einem Ton unterscheiden lässt, den ein sensibler Künstler durch Niederdrücken derselben Taste erzeugte. Dieses und andere Experimente widerrufen aus dem wissenschaftlichen Standpunkt manche der romantischen Ansichten über den Einfluss des Anschlags auf die Klangfarbe.

Ein einzelner Klavierton ist also durch die Kraft des Anschlags und die Dauer des Tones sonographisch vollständig festgelegt. Diese beiden Faktoren können, zumindest theoretisch, auf mechanischem Weg aufgezeichnet und wiedergegeben werden, so dass sich die Reproduktion durch nichts von der Originalinterpretation unterscheidet.

Wir haben gesagt 'theoretisch', da die Reproduktionsklaviere des beginnenden XX Jh. (die Firma Welte baute das erste Reproduktionsklavier im Jahr 1904) die beiden Faktoren (Kraft und Dauer) nicht für jede einzelne Note individuell notierte.

Aber die Annäherung gelang so gut, dass die meisten Klavierwerke mit erstaunenswerter Treue wiedergegeben wurden.

Die Idee, ein Tasteninstrument zu bauen, das jedes darauf gespielte Stück aufzeichnen könnte, war nicht neu, als die Firma Welte ihr Modell "*Welte Mignon*" schuf. Man denke etwa an die Legende, die bereits Engramelle eine Maschine zuschrieb, die auf einem Tasteninstrument gespielte Improvisationen notieren konnte. Ein solcher Apparat, der *Mélographe*, wurde gegen Ende des XIX Jh. durch den französischen Ingenieur Carpentier erbaut. Carpentier schuf auch den Wiedergabeapparat zu seinem *Mélographe*, den er *Mélotrope* benannte. Die beiden Geräte von Carpentier kannten noch keine dynamische Differenzierung.

Auch bei den Reproduktionsklavieren war die Dynamische Differenzierung eingeschränkt. Einzelne Modelle wiesen eine bestimmte Anzahl Lautstärkenstufen auf. Die Psychologen haben festgestellt, dass die meisten Leute, darunter auch Berufsmusiker, nicht imstande sind, mehr als 6 oder 8 Lautstärkestufen voneinander zu unterscheiden. Es sollte daher ausreichen, wenn ein Reproduktionsklavier 8 Lautstärkestufen besitzt. Aber selbst wenn wir bei Einzeltönen nur 8 Intensitätsbereiche unterscheiden können, sind wir befähigt, in einer Reihe von aufeinanderfolgenden Tönen feinere Abstufungen wahrzunehmen, als diejenigen zwischen den 8 Lautstärkepegeln. Diese Erscheinung tritt auch im visuellen Bereich auf: Unser Gedächtnis vermag 6 oder 8 Graustufen zu unterscheiden, aber wenn wir eine Graustufenskala vor uns haben, vermögen wir viel mehr Grauwerte voneinander zu unterscheiden.

Wir sehen also, dass 8 Lautstärkestufen genügen, um die generellen dynamischen Eigenschaften eines Werks wiederzugeben; aber für die treue Wiedergabe aller *Crescendi* und *Diminuendi* reichen diese Abstufungen nicht aus, wodurch die Reproduktion gegenüber der Originalinterpretation etwas verfälscht wird. Die Firma Welte versuchte diesen Mangel folgendermassen auszugleichen: ihre Reproduktionsklaviere wiesen 3 starre Lautstärkestufen auf, die wir als *pp*, *mf* und *ff* bezeichnen könnten. Um von einer Stufe zur anderen zu wechseln, verfügten die Instrumente über zwei pneumatische Systeme, die ein stufenloses *Crescendo*, respektive ein stufenloses *Diminuendo* bewirkten. Der Hauptnachteil bestand darin, dass es praktisch unmöglich war eine zwischen zwei Stufen gelegene Lautstärke konstant einzuhalten.

Die zweite Beschränkung in der dynamischen Differenzierung bestand in der mangelnden Unabhängigkeit der 88 Töne des Tonumfangs. So arbeiteten die Reproduktionsklaviere mit einer Aufteilung der Tastatur in 2 oder mehr Regionen. Im Fall der Reproduktionsklaviere der Firma Welte wurde die Tastatur zwischen Fa # (3) und Sol (3) in zwei Zonen aufgeteilt. Für viele Kompositionen ist diese Unterteilung ungenügend, was in der Praxis durch manuelles Bearbeiten der Lochstreifen geschah, wobei künstliche Arpeggien geschaffen wurden, ähnlich wie beim *Themodist* des berühmten Pianolas der Firma Aeolian.

Der schwedische Ingenieur Nyström erfand ein Reproduktionsklavier mit Aufnahme und Wiedergabe, bei dem die Eigenart jeder einzelnen Note erfasst wurde. Leider wurden die mit der serienmässigen Herstellung des Instruments verbundenen Probleme nie gelöst, so dass nur ein paar wenige Exemplare gebaut wurden. Ein ähnliches Schicksal erfuhr ein Reproduktionsklavier der amerikanischen Firma "AMerican PIano COmpany", bekannt unter dem Namen "Ampico".

Heutzutage sind alle Einzelheiten der Funktionsweise der verschiedenen Reproduktionsklaviere bekannt, da die vielen noch erhaltenen Instrumente, zusammen mit den bespielten Rollen, wie sie zum Teil heute noch für die Einspielung auf Schallplatten der Interpretationen der grossen Pianisten von damals eingesetzt werden, uns keine technischen Geheimnisse vorbehalten können. Das Geheimnis hingegen, mit dem die Aufnahmetechnik in den Tonstudios der grossen Firmen umhüllt wurde, konnte bis heute nicht restlos geklärt werden, und es leben heute nur noch ganz wenige Zeugen, die damals bei den Aufnahmearbeiten mitwirkten. Der Aufnahmemechanismus wurde damals sogar vor den Betriebstechnikern, wie etwa den Klavierstimmern, geheimgehalten. Heute kann man nur Vermutungen darüber anstellen, wie die Töne, ihre Dauer und ihre Lautstärke in den verschiedenen Klavierrollen-Aufnahmestudios aufgezeichnet wurden. Verschiedene spezialisierte Autoren behaupten, dass unter jeder Taste ein senkrechtes Stäbchen angebracht war, das beim Niederdrücken in ein Quecksilberbad getaucht wurde, wodurch ein elektrischer Stromkreis solange geschlossen wurde, wie die Taste niedergehalten wurde. Diese Autoren meinen ferner, die Eintauchtiefe, die mit der Anschlagskraft variierte, sei anhand des elektrischen Widerstandes gemessen worden und hätte die Lautstärke des betreffenden Tons bestimmt. Es ist auch möglich, dass beim Niederdrücken der Taste zuerst ein Stromkreis unterbrochen wurde, der dann beim Eintauchen des Stiftes ins Quecksilberbad wieder geschlossen wurde. Aus der Länge des Unterbruchs wäre dann die Lautstärke ablesbar gewesen. In jedem Fall musste das künstliche Arpeggio zur Differenzierung der Dynamik zweier in derselben Unterteilung der Tastatur gelegener Töne von Hand vorgenommen werden. Und wir vermuten, dass dies nicht die einzige Retusche war, die nach der Einspielung vorgenommen wurde. Es konnten relativ problemlos falsche Noten, unsaubere Rhythmen oder fehlende Noten korrigiert werden. Pedaleffekte wurden mitunter durch Aushalten gewisser Noten (Fingerpedal) ersetzt, was die Anatomie der Hand vielfach nicht ermöglicht. Andererseits wurde der Einsatz des linken Pedals nicht aufgezeichnet. Halbpedaleffekte gingen ebenfalls verloren.

Trotz allem können Klavierrollenaufnahmen für das Studium des Stils und der Technik von historischen Pianisten äusserst nützlich sein. Man bedenke, dass die Pianisten selber die durchzuführenden Retuschen zu überwachen pflegten. Schon seit Jahren werden die interessantesten Aufnahmen auf Schallplatten und neuerdings auf CD übertragen und so dem grossen Publikum zur Verfügung gestellt. Heute bieten viele Rollenaufnahmen den einzigen Weg, um auf annehmbar objektive Art die Interpretation vieler Pianisten des frühen XX Jh. zu bewerten.

Neben grossen Virtuosen wie Eugène d'Albert, Joseph Hofmann, Frédéric Lamond oder Paderewsky, unter vielen anderen, haben auch mehrere grosse Komponisten Aufnahmen ihrer Werke auf Klavierrollen hinterlassen. Hier seien die Aufnahmen von Claude Debussy, Maurice Ravel, Enric Granados, Alexandre Scriabin und Sergej Rachmaninof erwähnt.

Das Pianola hat neben seinem reproduktiven Aspekt auch eine kreative Seite: verschiedene Künstler des XX Jh. haben Werke für Pianola geschrieben, die für einen Pianisten unspielbar wären, schon wegen der anatomischen Eigenschaften der Hand oder wegen anderen unbesiegbaren technischen Schwierigkeiten. Diese Komponisten haben die Möglichkeit, die Papierrolle manuell zu perforieren. Einer der ersten grossen Komponisten, der diese Möglichkeiten ausschöpfte war Strawinsky mit seiner "*Étude pour Pianola*" (op. 7, N° 1). Andere Komponisten, die Werke für Pianola geschrieben haben, sind Eugene Goossens, Herbert Howells, Hindemith (*Toccata für Mechanisches Klavier*, 1926) und Malipiero.

In der Mitte des XX Jh. schien das Zeitalter des mechanischen Klaviers definitiv beendet zu sein. Aber gegen Ende des Jh. gesellte sich die mikroelektronische Technologie zur Idee des Reproduktionsklaviers und die Firma Yamaha stellte ihr Disklavier vor. Diese System erlaubt es, die auf dem mit der entsprechenden Apparatur eingerichteten Klavier gespielte Musik auf einer Diskette festzuhalten, die mit dem PC-Format kompatibel ist. Das heikle Medium der gelochten Klavierrolle mit 88 Pisten wurde durch ein elektronisches Medium ersetzt, mit dem die pianistischen Interpretationen mit einem Computerprogramm elektronisch bearbeitet, kopiert und sogar per E-Mail versandt werden können.

Die wichtigsten direkten Schallwiedergabeapparate, die anschliessend kurz beschrieben werden, sind die folgenden: Das Telephon, der Phonograph und das Tonbandgerät (Magnetophon). Das Telephon, wie die meisten komplexen Erfindungen, wurde nicht von einem einzelnen Menschen entwickelt, obwohl zweifelsohne der wichtigste Name im Zusammenhang mit der Telephonie A.G. Bell lautet. Bevor hier das elektrische Telephon vorgestellt wird, sollen zwei Systeme akustischer Telephonie kurz erwähnt werden. Das erste System, das Schnurtelephon, hat sein Stadium als Physikexperiment und Kinderspielzeug nie überschritten. Dieses Tonübertragungssystem besteht aus zwei Bechern aus Blech oder Pappe, dessen Boden in der Mitte gelocht wurde, um den Knoten einer Schnur aufzunehmen. Wird die Schnur zwischen den beiden Bechern gespannt, kann der Schall von einem Becher zum anderen übertragen werden: an einem Ende der Leitung hält eine Versuchsperson ihr Ohr an den Becher, während auf der anderen Seite die andere Versuchsperson leise in den Becher spricht.

Ein anderes akustisches Telephonsystem ist in der Eigenschaft der Röhren begründet, den Schall ohne wesentliche Abschwächung über grössere Distanzen weiterzuleiten. Eine Person, die ihr Ohr an ein Ende der Röhre hält, vermag die Worte der Person zu verstehen, die am anderen Ende leise in die Röhre spricht, wenn auch mit der entsprechenden Verzögerung. Dieses System kann etwa zwischen dem Speisesaal und der Küche eines Hotels eingesetzt werden oder an Bord eines Schiffs, obwohl heutzutage in den meisten Fällen elektroakustische Systeme das Rohrtelephon abgelöst haben.

Die Beschreibung aller Versuche, die schliesslich zum heutigen Telephon geführt haben könnten den Inhalt eines ganzen Buchs bilden. Hier werden wir uns auf ein paar der wichtigsten Daten beschränken müssen. Eine notwendige Bedingung für die Entwicklung aller elektrischen Telephonsysteme bildete die Entdeckung des Elektromagnetismus durch Örsted im Jahre 1819. Örsted bemerkte, dass ein elektrischer Strom ein elektromagnetisches Feld induziert und umgekehrt.

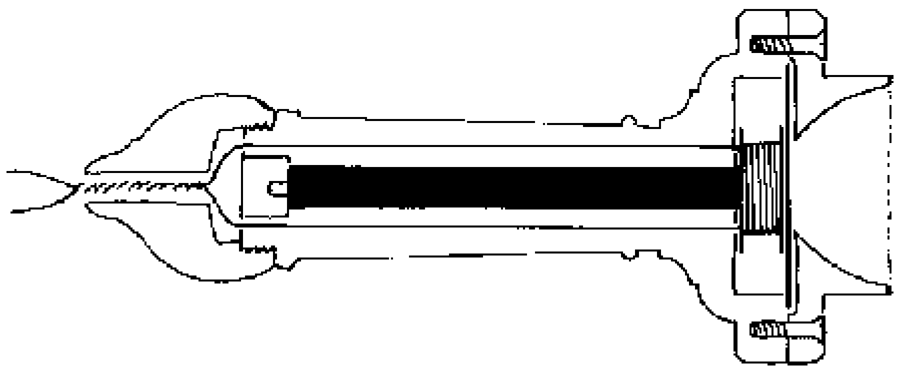
Eine andere Entdeckung führte direkt zum Telephon von Reis, dem Gerät, das wir als erstes elektrisches Telephon betrachten können, nämlich die Entdeckung des Page-Effekts. Page war ein amerikanischer Professor, der 1837 bewies, dass eine rasche Folge von Magnetisierung und Entmagnetisierung eines Eisenstabs durch hochfrequenten elektrischen Wechselstrom von einer akustischen Erscheinung begleitet werden: Es wird ein Ton mit der Frequenz des elektrischen Wechselstromes abgegeben. Heute wissen wir, dass die Magnetisierung eines Eisenstabs durch elektrischen Strom mit einer extrem kleinen Längenveränderung des Stabs einhergeht, die mit der Orientierung seiner Atome zusammenhängt. Durchläuft etwa ein Wechselstrom von 50 Hz die Windungen eines Elektromagnets, wird der Eisenkern 100 Längenveränderungen pro Sekunde ausgesetzt werden, was bewirkt, dass er einen extrem schwachen Ton von 50 Hz von sich gibt, welcher nicht zu verwechseln ist mit dem Ton, den ein VOR DEM STAB angeordnetes magnetisiertes Stück Stahlblech von sich gibt, weil es alternierend angezogen und abgestossen wird. Dieser Ton ist auch von demjenigen verschieden, den ein VOR DEM STAB angeordnetes NICHT MAGNETISIERTES Stück Stahlblech von sich gibt, das unabhängig von der Polarität des Eisenstabs 100 Mal pro Sekunde angezogen wird, und damit einen um eine Oktave höheren Ton von sich gibt.

Der Page-Effekt bildet auch die Grundlage einer verhältnismässig neueren industriellen Anwendung: die Bearbeitung von Materialien unter Anwendung von Ultraschall. In der üblichen Anordnung wird ein Stahlstab mittels einer von Hochfrequenzstrom durchströmten Spule in Schwingung gebracht. Unter Mitwirkung eines Schleifmittels dringt der Stab in das zu bearbeitende Werkstück ein. Dank dieser Technik können prismatische Löcher beliebigen Querschnitts erzeugt werden, während ein herkömmlicher Bohrer nur zylindrische Löcher liefert. Es kommen meist Frequenzen von über 20000 Hz zur Anwendung. Die Anwendung des Ultraschalls dehnt sich auch auf das Schweissen von Kunststoffen und auf die Präzisionsmessungen aus.

Einer der Vorgänger des heutigen Telephons war das 1861 vom Deutschen Reis vorgestellte Gerät. Reis scheint auch der Schöpfer des Ausdrucks *"Telephon"* gewesen zu sein. Durch seine Bauart eignete sich das Telephon von Reis besonders für die Übertragung von Tönen (nicht von Schall im allgemeinen Sinn) und war daher für die Übertragung der Sprache weniger geeignet, was auch erklärt, warum das Gerät von Zeitgenossen als "musikalisches Telephon" bezeichnet wurde.

Der Überträger oder Sender des Reisschen Telephons besteht aus einem Kasten, der in einen Trichter mündet. Eine Wand des Kastens wird durch eine Membrane aus Pergament ersetzt, in dessen Mitte sich eine mit einem Pol einer Batterie verbundene Platinscheibe befindet, während der andere Pol der Batterie mit der Linie verbunden ist, welche den Sender mit dem Empfänger verbindet. Eine in kurzem Abstand von der Scheibe angebrachter Stift ist mit der zweiten

Phase der Linie verbunden. Der Empfänger besteht aus einem geraden Elektromagneten mit einem dünnen Eisenkern, der über zwei Stege mit einer Resonanzplatte verbunden ist. Wird die Membran mit einer Frequenz n in Schwingung versetzt, findet zwischen der Platinscheibe und der entsprechend eingestellten Platinspitze eine Reihe von Verbindungen und Unterbrechungen des Batteriestromes statt, in einer Anzahl von n pro Sekunde. In der Empfängerstation wird der Elektromagnet n mal pro Sekunde magnetisiert und wieder entmagnetisiert; durch den Page-Effekt wird der Kern in diesem Rhythmus verlängert und verkürzt. Diese Schwingung wird auf den Resonanzboden übertragen und unter idealen Bedingungen an die umgebende Luft in Form einer hörbaren Schallwelle abgestrahlt.

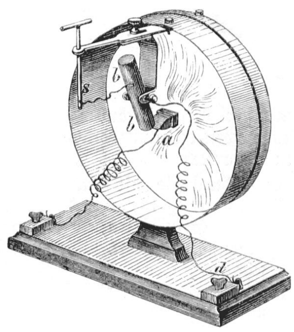


Das Telephon von Bell

Was geschieht, wenn die Lautstärke des Tons von n Hz, der die Membrane zum Schwingen bringt, plötzlich zunimmt? Die Membrane des Überträgers schwingt mit einer grösseren Amplitude mit, aber der Takt der Unterbrechungen zwischen der Platinscheibe und der Spitze bleibt unverändert; an der Empfangsstation wird keine Lautstärkesteigerung hörbar. Darum beschränkt sich das "musikalische Telephon" von Reis im wesentlichen auf die Übertragung der Grundfrequenzen der Töne, ohne Intensitäten und Klangfarben zu unterscheiden.

Das Telephon von Bell aus dem Jahr 1876 liefert uns ein schönes Beispiel für die Verwandlung der Energie von einer Form in die andere. Ein Gerät, das Energie von einer Form in eine andere verwandelt, heisst ein TRANSDUKTOR. Das Bellsche Telephon ist im wesentlichen ein mit einer Wicklung aus dünnem Kabel umgebener zylindrischer Permanentmagnet, vor dem senkrecht eine dünne runde Eisenblechplatte an der Umgrenzung festgehalten wird, die (fälschlicherweise) als Membrane bezeichnet wird, obwohl es sich streng genommen um eine schwingende Platte handelt. Fängt nun diese Membran unter dem Einfluss der Schallwellen der menschlichen Stimme zu schwingen an, werden in den Windungen des Magnets elektrische Spannungen im Takt der Schallschwingungen induziert. Der so erzeugte Wechselstrom wird durch die Leitung dem in einiger Entfernung gelegenen anderen Gerät zugeführt, das in seinem Aufbau identisch ist. Hier erzeugen die elektrischen Schwingungen entsprechende Veränderungen in der Stärke des Elektromagnets, so dass in diesem zweiten Apparat die Membrane zum Schwingen angeregt wird. Dasselbe Gerät dient also als Sender und Empfänger und benötigt dazu nicht einmal eine Energiequelle, wie etwa eine Batterie, da die akustische Energie alleine ausreicht, um es zu betreiben.

Im Gegensatz zum Reisschen Telephon reproduziert das Bellsche Telephon die Frequenz, die Lautstärke und die Klangfarbe, da der im Sender induzierte Strom wie eine phonographische Kurve verläuft, wenn wir die Distorsionen vernachlässigen. Die Symmetrie des Bellschen Telephons ist so perfekt, wie die des Schnurtelephons oder des Rohrtelephons, da der Überträger gleichzeitig als Sender dient. Aber der Widerstandsverlust und die von unabhängiger Seite induzierten Parasitenströme begrenzen den Einsatz dieses Telephons auf sehr kurze Strecken. Wie bei allen elektroakustischen Transduktoren ist es wichtig, dass die Eigenfrequenzen der Membrane ausserhalb des Tonumfanges des zu vermittelnden Schalls fallen.


Das Mikrophon von Hughes

Die nächste entscheidende Erfindung im Bereich der Telephonie war das Mikrophon von im Jahr 1877. Ein Mikrophon ist ein Transduktor, der Schallwellen in elektrische Schwingungen verwandelt. Im weiteren Sinn bildet das Bellsche Telephon bereits ein Mikrophon. Das Mikrophon von Hughes ist ein im Takt der Schwingungen veränderlicher elektrischer Widerstand. Es ist auf der Tatsache begründet, dass sich der elektrische Widerstand zwischen zwei Kohlen oder anderen elektrischen Leitern mit dem Druck zwischen den Kontaktpunkten verändert.

Ein einfaches Modell eines Hugheschen Mikrophons kann mit drei Eisennägeln gebaut werden. Zwei davon werden parallel auf eine isolierte Platte befestigt und folgendermassen angeschlossen: der erste Nagel entspricht einem Pol einer Batterie, der andere wird mit einem Pol eines Lautsprechers oder eines Bellschen Telephons verbunden, während der verbleibende Pol des Lautsprechers mit dem noch freien Pol der Batterie verbunden wird. Der Stromkreis wird geschlossen, indem der dritte Nagel quer auf die beiden Nägel gelegt wird. Wird das Experiment unter günstigen Bedingungen durchgeführt, erzeugen kleine Erschütterungen und lauter Schall entsprechende Geräusche im Lautsprechers. Das gängigste Modell eines Hugheschen Mikrophons bestand aus einem an beiden Enden zugespitzten Kohlenzylinder, der senkrecht zwischen zwei Griffen aus demselben Material angebracht wurde. Diese Anordnung wird von einem senkrechten Holzbrettchen getragen, das als Resonanzboden wirkt. Jede Schwingung, die das Brettchen in Bewegung versetzt, verändert rhythmisch den Druck, den die beiden Zylinderspitzen auf die beiden Träger ausübt, und mit ihm den elektrischen Widerstand zwischen den beiden Trägern. Ein mit diesem Mikrophon und einer Batterie in Serie geschaltetes Telephon oder Lautsprecher reproduziert mit einer gewissen Treue die Töne, die den Resonanzboden zum Schwingen gebracht haben. Es wurden schon bald verbesserte Versionen des Hugheschen Mikrophons gebaut, wie etwa das in der Figur anhand eines zeitgenössischen Holzstichs abgebildete Modell. Verschiedene Erfinder änderten die Erfindung von Hughes in mannigfaltiger Art und Weise ab. Hier sei nur eine der ausgereiftesten Versionen des Kohlenmikrophons erwähnt, das Modell von Edison, bei dem der senkrechte Kohlenstab durch eine Füllung aus Kohlenkügelchen ersetzt wurde. Unsere Figur, welche anhand eines Holzstichs aus dem frühen XX Jh. reproduziert wurde, stellt einen Querschnitt durch eine perfektionierte Ausführung eines solchen Mikrophons dar. Im Zentrum der Membran, gleich gegenüber dem Sprechtrichter befindet sich eine Schraube, die auf die Metallplatte, die das mit Kohlekügelchen gefüllte Gefäss abschliesst, Druck ausübt. Die Wände des Behälters bestehen aus isolierendem Material, heute meist Kunststoff, während die beiden Membranen, die die Kohlenkügelchen einschliessen aus Metall bestehen und den beiden Anschlusspolen des Mikrophons entsprechen. Je nach der momentanen Stellung des Bodens und der schwingenden Membrane zueinander sind die Körnchen mehr oder weniger Druck ausgesetzt, der einen indirekt proportionalen elektrischen Widerstand und damit einen direkt proportionalen elektrischen Stromfluss zur Folge hat. Da die Körnchen zur Zusammenballung neigen, sollten solche Mikrophone ab und zu etwas geschüttelt werden. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen wurde schon bald die Induktionsspule eingesetzt, welche wie ein Transformator wirkt und auf ähnliche Art geschaltet wird, wie dies beim weiter unten erwähnten sprechenden Lichtbogens von Duddell der Fall ist.

Aber erst dank der Verstärkerröhre wurde es später möglich, Telephongespräche ohne Lautstärkenverluste über grössere Strecken zu führen. Heute wurde die auf der Verstärkerröhre begründete Technologie weitgehend durch die Halbleitertechnik (Transistor) ersetzt.

Der Fall des Mikrophons bietet eine glänzende Gelegenheit, um die verschiedenen Sorten von Transduktoren vorzustellen, die im Laufe der Geschichte eingesetzt wurden.

Das KOHLENMIKROPHON ist zweifelsohne eines der ältesten Systeme, da das Telephon von Reis schon einen Spezialfall derselben Anordnung darstellt. Und in seiner modernsten Form, als Kohlenkörnchenmikrophon können wir es auch heute noch antreffen.

Das ELEKTROMAGNETISCHE MIKROPHON ist ein direkter Nachfolger des Bellschen Telephons. Während bei der Fassung von Bell der Transduktor selber als Stromversorger wirkte, wird beim elektromagnetischen Mikrophon ein Elektromagnet von einem Gleichstrom durchflossen, dessen Intensität durch die Schwingungen der eisernen Membran, die vor dem Eisenkern angebracht ist, moduliert wird.

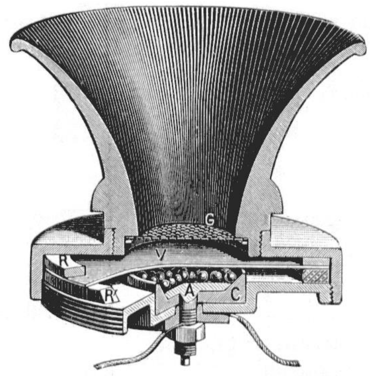
Das ELEKTRODYNAMISCHE MIKROPHON oder TAUCHSPULENMIKROPHON ist eine verbesserte Bauart davon, bei der die Spule auf dem Eisenkern hin- und herschwingt. Da die Spule leichter ins Schwingen gebracht werden kann, als die eiserne Membrane, ist diese Anordnung empfindlicher.

Das PIEZOELEKTRISCHE MIKROPHON oder STATISCHE MIKROPHON ist auf der Eigenschaft gewisser Kristalle, wie etwa dem Quarz, begründet, elektrische Spannungen zu erzeugen, wenn sie zusammengepresst oder wieder gedehnt werden. In einem piezoelektrischen Mikrophon bewirken die akustischen Schwingungen Druckänderungen in den Kristallen, die sich als veränderliche elektrische Potentiale bemerkbar machen, die mittels Elektroden von den Kristalloberflächen abgelesen werden können.

Im KONDENSATORMIKROPHON wird eine der beiden Platten eines elektrischen Kondensators durch die akustischen Schwingungen bewegt, wodurch die elektrische Kapazität entsprechenden rhythmischen Veränderungen unterworfen wird.

Das MAGNET-KONSTRIKTIONS-MIKROPHON beruht auf der Eigenschaft von Magneten aus geeignetem Material, ihre Anziehungskraft je nach dem Druck, dem sie ausgesetzt werden, zu verändern.

Das GLÜHFADEN-MIKROPHON weist extrem dünne Platindrähtchen auf, die mit Gleichstrom geheizt werden und unter dem Einfluss des allerkleinsten Luftzugs, wie ihn die akustischen Schwingungen zu erzeugen vermögen, ihren elektrischen Widerstand (fast) augenblicklich verändern.



Das Kohlenmikrophon

Die meisten dieser Prinzipien sind auch auf den Tonabnehmer (Pick-up) anwendbar. Die inversen Anordnungen sind weitgehend auf den entgegengesetzten Transduktor anwendbar, nämlich auf den Lautsprecher.

Ein guter Transduktor sollte möglichst lineare Resultate liefern. Man spricht von linearem Verhalten eines Transduktor, wenn die Ausgabe eine lineare Funktion (im algebraischen Sinn des Ausdrucks) der Eingabe ist:

$$\text{Ausgabe} = a \cdot \text{Eingabe} + b$$

Ist dies nicht der Fall, spricht man von NICHTLINEAREN DISTORSIONEN.

Bei der normalen Schaltung zwischen der telephonischen Sendestation und der Empfängerstation mittels zwei Phasen kann einer der beiden Drähte weggelassen werden, indem man die Erde als zweiten Leiter benutzt. Wie jedermann weiss, kann beim Senden von Schallwellen mittels RUNDFUNK[42] ganz auf Leitungslinien verzichtet werden. Die Grundlagen zu dieser grossartigen Erfindung wurden gegen 1900 von Marconi und Popov entwickelt. Der Rundfunk beruht auf der Modulation der von einem Sendegerät ausgestrahlten Hertzschen Wellen[43] durch die phonographische Kurve des Schalls. Bei der AMPLITUDENMODULATION, AM, besteht die Modulation aus einer Kombination der von einem elektronischen Schwingkreis erzeugten sinusförmigen Trägerwelle und der phonographischen Kurve des Schalls. Da letztere streng genommen fortlaufend die Fre-

---

[42] Man spricht auch von Radiotelephonie, Radiophonie oder kurz Radio.

[43] Die elektromagnetischen Wellen werden zu Ehren ihres Entdeckers Heinrich Hertz (1857-94) auch als Hertzsche Wellen bezeichnet.

quenz der Trägerwelle modifiziert, darf sich der Empfänger nicht auf die Erfassung einer einzigen Wellenlänge beschränken; vielmehr wird der Empfänger so eingestellt, dass eine kleine Bandbreite aufgenommen wird, in dessen Zentrum sich die Frequenz der Trägerwelle befindet. Daher kommt der Effekt, dass mit einer allzu grossen Trennschärfe eines Empfängers eine Einbusse der Tonqualität einher geht. Der Rundfunkempfänger trennt die Trägerwelle wieder von der phonographischen Kurve, die schliesslich auf elektronischem Weg verstärkt wird. Die technischen Einzelheiten, die in vielen spezialisierten Büchern nachzulesen sind können hier nicht beschrieben werden.

Ein anderes wichtiges Rundfunksystem besteht in der Modulation der Frequenz der Trägerwelle, anstatt der Amplitude. Es handelt sich um das unter dem Namen FREQUENZMODULATION, FM, bekannte Verfahren.

Zur Zeit wird mit einem neuen Verfahren experimentiert, dem digitalen Rundfunk, bei dem der zu sendende Schall vor der Ausstrahlung in digitale Form gebracht wird. Digital dargestellte Daten haben den Vorteil, dass sie ohne jeglichen Qualitätsverlust mit entsprechenden Vorrichtungen beliebig oft hintereinander kopiert werden können.

Aber bereits schon vor der Erfindung des Rundfunks konnte der Schall drahtlos übertragen werden. Unter den verschiedenen Systemen sei hier das Verfahren erwähnt, das Ruhmer gegen Ende des XIX Jh. entwickelte. Dieses Gerät arbeitete mit einer manometrischen Kapsel von Koenig. Das von der Flamme abgestrahlte Licht wurde über einen Parabolspiegel zur Empfangsstation weitergeleitet, wo das im Rhythmus des Schalls schwankende Licht auf eine photoelektrische Zelle einwirkte (einen Seleniumhalbleiter, dessen elektrischer Widerstand sich mit der Lichtintensität verändert), die als Transduktor wirkte, wie eine Art Mikrophon. Abgesehen von der mangelhaften Qualität, die heutzutage durch Einsatz einer weniger trägen Lichtquelle, etwa eines Laserstrahls, wesentlich verbessert werden könnte, hat das System den Nachteil, dass sich das Licht auf einer geraden Linie verbreiten muss, die leicht durch irgendwelche Hindernisse, wie etwa eine Wolke oder einen Vogel unterbrochen werden kann.

Wie alte Legenden beweisen, war es schon immer ein Traum der Menschheit gewesen, einen Apparat zu besitzen, mit dem jederzeit der Schall, vor allem die menschliche Stimme, aufgenommen und später wieder abgespielt werden könnte. Es sei etwa der utopische Roman von Cyrano de Bergerac "Histoire comique des États et Empires de la Lune" aus dem Jahr 1656 erwähnt, in welchem ein phantastisches Buch beschrieben wird, das spricht, wenn eine Nadel auf das entsprechende Kapitel gelegt wird. Wir denken auch an das phantastische Abenteuer des Freiherrn von Münchhausen, in dem bei bitterer Kälte die Töne eines Jagdhorns einfroren. Später, beim Auftauen spielte das Horn selbständig seine Melodien...

Vermutlich bestand der erste Schritt zur technischen Verwirklichung der Schallaufzeichnung aus dem Apparat von Young, der um 1807 die phonographische Kurve des Tons einer Stimmgabel auf einen mit Russ bedeckten Stahlzylinder aufzeichnete.

Eine Verallgemeinerung dieses Verfahrens wurde im Jahre 1857 von Scott entwickelt, der sein Gerät als *Phonautographe* bezeichnete. Jetzt fehlte "nur" noch das System, das es erlaubte, die vom *Phonautographe* aufgezeichneten Kurven wieder in Form von Schall wiederzugeben. Schliesslich wurden sich 1877 zwei Erfinder, Edison und Charles Cros, offenbar unabhängig voneinander, bewusst, dass die Maschine von Scott umkehrbar war und es entstand die Urform des Phonographen. Jetzt wo wir die Lösung des Problems kennen, scheint uns der 1877 vollführte Schritt trivial und wir staunen, dass es so lange gebraucht hatte, um zu diesem Schluss zu kommen. Genau wie beim berühmten Ei des Columbus. Aber es ist doch interessant festzustellen, dass weder Scott, noch die berühmten zeitgenössischen Physiker, wie Helmholtz oder Koenig, die mit der Maschine von Scott gearbeitet hatten, den entscheidenden Schritt vollbrachten.

Der erste Phonograph von Edison (der Apparat von Cros wurde nie gebaut) bestand aus einem Zylinder auf einer gewundenen Achse, der sich bei jeder Umdrehung einer Kurbel um eine der Windung entsprechende Distanz seitlich fortbewegt und einer Membran, unter der eine Gravurnadel angebracht ist. Wird die Membran in Aufnahmestellung gebracht, wird die Nadel auf den Zylinder gedrückt, der von einem hauchdünnen Zinnblech überdeckt wurde, in das der Weg der Nadel leicht eingegraben wurde. Wird der Zylinder gleichmässig gedreht, während in den über der Membrane angebrachten Schalltrichter gesprochen wird, gräbt sich die Nadel im Rhythmus der Schwingungen mehr oder weniger tief in die Zinnschicht ein, so dass von der Seite her betrachtet eine phonographische Kurve entsteht. Man spricht von Tiefengravur. Nach der Aufnahme wird die Membrane zusammen mit der Nadel wieder in die Ausgangsstellung gerückt. Versetzen wir nun den Zylinder wieder in gleichmässige Rotation, folgt die Nadel wieder der Rille und wird in dieselben Schwingungen versetzt, die bei der Aufnahme in das weiche Metall gedrückt wurden, womit der Schall einigermassen treu wiedergegeben wird, wenn wir die Distorsionen vernachlässigen. Leider kann der auf diese Art aufgenommene Schall nur wenige Male angehört werden, bis die Rille endgültig von der Nadel zerstört wird.

Eine wesentliche Verbesserung in der Wiedergabequalität des Phonographen wurde 1888 von G. Bell, Chichester Bell und Tainter mit dem Einsatz von mit Wachs beschichteten Zylindern erzielt. Der angepasste Apparat wurde von seinen Erfindern als *Graphophone* bezeichnet. Bei der Phonographie auf Wachszylinder wurden zwei verschiedene Nadeln eingesetzt, eine Stichelförmige für die Aufnahme, die andere mit einer abgerundeten Spitze für die Wiedergabe. Durch die geeignete Auswahl der meist aus Parafin, Bienenwachs und Carnaubawachs zusammengesetzten Schicht konnte eine fast unbegrenzte Anzahl Wiederholungen erreicht werden. Gegen Ende des Jh. wurden Phonographen in grossen Serien für den Haushalt hergestellt und die Herstellung bespielter Zylinder wurde zu einem wichtigen Industriezweig. In dieser ersten Epoche der Phonographie wurden die Aufnahmen mit rein akustischen Mitteln produziert, ohne elektroakustische Transduktoren. Vor den Orchestern und den Solisten mussten grosse Schalltrichter aufgestellt werden und der so eingefangene Schall wurde über Schläuche den Aufnahmegeräten zugeführt. Gegen Ende des Jh. erfand der Deutsche A. Stroh eine extravagant aufgebaute Violine, die keinen Resonanzboden hatte; vielmehr wurden bei der Strohgeige die Schwingungen des Steges einer Membrane mit einem Schalltrichter weitergeleitet, wie bei einem Phonographen. Dieses Instrument, das heute nur noch ein kurioses Museumsstück darstellt, verrichtete für die damalige phonographische Industrie wertvolle Dienste, da der Schalltrichter gegen einen akustischen Schlauch ausgetauscht werden konnte, der den Schall direkt einem Aufnahmegerät zuführte. Vermutlich haben wir die meisten qualitativ akzeptablen Aufnahmen berühmter Violinisten jener Zeit, wie etwa von Joseph Joachim, der Strohgeige zu verdanken.

Ab 1925 oder 1930 gingen die Aufnahmestudios zur elektroakustischen Tonaufnahme über. Der Schall wurde dabei mit einem Mikrophon aufgenommen und elektronisch verstärkt. Der Grabstichel arbeitete auf ähnliche Weise wie beim reinen akustischen Verfahren, wurden aber mit einem Transduktor gesteuert, der die vom Verstärker gelieferten Schwingungen in entsprechende mechanische Schwingungen verwandelte, ähnlich wie dies bei einem Lautsprecher geschieht. Später wurde auch das der Wiedergabe entsprechende Gegenstück dazu entwickelt, der Tonabnehmer oder Pick-up, der die Membrane und den Schalltrichter ablöste und die phonographische Kurve der Rille direkt in elektrische Schwingungen verwandelte. Heutzutage arbeiten die meisten der noch eingesetzten Pick-ups elektrodynamisch, aber es gibt auch piezoelektrische Pick-ups.

Ungefähr ab 1895 begann ein neuer phonographischer Tonträger den Zylinder abzulösen, die 1887 von Berliner erfundene Grammophonplatte. Die Rillen dieses neuen Mediums wurden quer geschnitten (seitliche Aufzeichnung), im Gegensatz zu dem bei den Zylindern üblichen Tiefenschnitt (oder senkrechte Aufzeichnung). Betrachten wir also eine Platte von Berliner unter einem Mikroskop, können wir eine schlängelnde Linie beobachte, während die entsprechende Linie bei den Zylindern senkrecht verläuft und punktweise veränderliche Tiefen aufweist.

In den ersten von Berliner hergestellten Platten verlief die eingegrabene spiralförmige Rille von einer Zone in der Nähe des Zentrums gegen aussen. Auch Edison schuf ein auf Platten gegründetes phonographisches System, allerdings mit vertikaler Gravur, wie bei den Zylindern. Später wurde universell die Quergravur auf Platten mit einem Durchmesser von 30 cm mit der Spirale von aussen nach innen und 78 Umdrehungen pro Minute als Standard eingeführt.

Um den Vertrieb in grossen Auflagen zu erlauben, war die Industrie auf Verfahren angewiesen, die es erlaubten, die Platten serienmässig herzustellen. Schon früh entwickelte Berliner ein System, mit dem er seine quer geschnittenen Platten vervielfältigen konnte: Die Originalaufnahme wurde auf eine mit einer Wachsschicht belegten Zinkplatte vorgenommen. Der Grabstichel aus Platiniridium war über eine Membrane mit einem Schallrohr verbunden. Um die bei der Aufnahme entstehenden Wachsspäne vom Grabstichel zu entfernen, wurde der Rotationsteller vollständig in ein Wasserbecken untergetaucht, so dass die Späne an die Oberfläche auftauchen. Nach der abgeschlossenen Tonaufnahme wurde die Platte in ein Säurebad getaucht und geätzt, wie eine Radierung, bei der die Wachsschicht als Ätzreserve diente. Anhand dieser Aufnahme wurden auf galvanischem Wege Matrizen gemacht, die ihrerseits der Prägung der endgültigen Schallplatten auf thermoplastischem Material dienten.

Dieses Verfahren hatte einen Nachteil, der in der ersten Zeit wohl nicht richtig beurteilt wurde und der möglicherweise die Hauptursache für den geringen wirtschaftlichen Erfolg darstellte, den diese Platten im Vergleich zu den Zylindern hatten. Die Säuren haben die Eigenschaft, die kristalline Struktur des Metalls an der angeätzten Oberfläche hervorzuheben. Im Fall der Platten von Berliner verursachte dieser Effekt ein Grundrauschen bei der Wiedergabe, das die Qualität der Wiedergabe wesentlich beeinträchtigte. Ab 1897 wurden die galvanischen Matrizen direkt ab der Originalwachsschicht hergestellt, und das wird auch heute noch so gemacht.

Heutzutage[44] wird die Originalplatte aus Wachs anhand einer Tonbandaufnahme hergestellt. Das Wachsrelief wird auf elektrolytischem Wege mit einer Metallschicht bedeckt, wonach der Wachs weggeschmolzen wird. Wegen der Feinheit seines Korns wird zuallererst eine dünne Goldschicht aufgetragen. Daher der Ausdruck "Goldene Schallplatte". Nachher folgt meist eine Kupferschicht. Die so entstehende Matrize könnte bereits zum Pressen der Auflageplatten dienen. Meist werden aber von dieser ersten Matrize eine Anzahl Gegenreliefs gebildet, die als Patrize bezeichnet werden. Erst von diesen Patrizen werden die definitiven Matrizen gewonnen. Schliesslich werden die Matrizen für die Prägung in einer vorgeheizten Presse gegen ein Stück thermoplastisches Material (heute meist Vinyl) gepresst. Zuletzt wird die Matrize[45] der Presse entnommen, gekühlt und von der Platte getrennt, welche nur noch in einer Art Drehbank abgerundet werden muss.

Die Hersteller von Phonographenzylindern mussten ein wesentlich schwierigeres Problem lösen, denn es scheint auf den ersten Blick unmöglich, einen bespielten Zylinder durch eine Pressung oder Injektion von Material zu duplizieren, da danach das Original nicht mehr von der Kopie getrennt werden könnte. Es boten sich damals folgende Auswege an:

- Das Musikstück so oft mal spielen lassen, wie Zylinder hergestellt werden mussten.
- Die Schallwellen mittels akustischer Rohre auf mehrere Aufnahmegeräte verteilen.
- Einen bespielten Zylinder mit einem speziellen Kopiergerät auf einen oder mehrere Rohzylinder überspielen.

Wenn man bedenkt, dass die bespielte Wachsschicht nicht dauerhaft genug war, um beliebig viele Kopien davon herstellen zu können, waren die Aussichten der Fabrikanten eher düster. Edison und seinen Mitarbeitern gelang 1903 nach vielem Experimentieren der entscheidende Durchbruch dank einer genialen Idee, die es ihnen erlaubte, praktisch beliebig viele Kopien von einer Wachswalze herzustellen. Das Verfahren war folgendes:

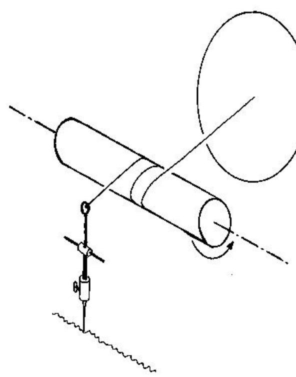
Das erste Problem war die Behandlung der bespielten Wachsschicht, so dass diese die Elektrizität leitete. Zuerst versuchten sie, den zu bespielenden Zylinder mit einer Mischung aus Wachs und Graphit zu beschichten, wie sie bei der Anfertigung von Galvanos für das Druckereigewerbe eingesetzt wurde. Aber das Resultat war für die Zwecke der Tonaufnahme zu grob, vielleicht weil es nicht

---

[44] Die meisten Tonaufnahmen werden inzwischen ausschliesslich auf CD vertrieben; die Tage der herkömmlichen Schallplatte sind gezählt.

[45] Normalerweise handelt es sich um zwei Matrizen, eine für jede Seite der Platte.

möglich war, einen genügend reinen und feinen Graphit zu gewinnen. Schliesslich gelang es, die bespielten Zylinder mit einer hauchdünnen Goldschicht zu bedecken, und zwar in einer Vakuumkammer, in der der Zylinder gleichmässig zwischen zwei Goldplatten rotierte, zwischen denen ein elektrischer Bogen unterhalten wurde. Die Elektronen, die von der Kathode zur Anode sprangen, entrissen der Goldplatte ein paar Goldatome, die auf der Wachsschicht der Zylinder haften blieben.



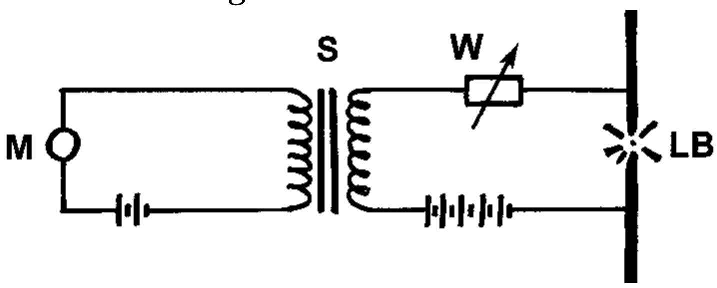
Anordnung von Wawrina

Diese hauchdünne Goldschicht erlaubte es, den Zylinder auf galvanoplastischem Weg mit einer Kupferschicht zu überziehen. Die Wachsschicht des Originalzylinders wurde anschliessend mit entsprechenden Lösungsmitteln abgelöst und die Kupfermatrize wurde in ein Messingrohr mit etwa 5 mm Wandstärke eingebaut. Um einen Abdruck dieses Zylinders zu erhalten, wurde das Rohr senkrecht in ein Bad aus einer Art flüssigem Wachs mit einer bestimmten Temperatur getaucht und diesem sofort wieder entnommen. Nach dem Abkühlen haftete eine dünne und harte Wachsschicht im Inneren des Rohrs. Da sich beim Abkühlen der Wachs stärker zusammenzog als das kalte Metallrohr und andererseits die Tiefe der Rillen minimal war (etwa in der Grössenordnung eines Zehntelmillimeters) erlaubte es dieser Grössenunterschied, die Kopie aus dem Rohr zu schieben. Der Prozess wurde mit einem mechanischen Vorgang abgeschlossen, der dem Zylinder die definitive Form gab.

Ein anderes Problem, das mit der Phonographie der ersten Epoche verbunden war, war die Schallverstärkung. Wie jedermann weiss, wird der Schall heute auf elektronischem Wege verstärkt. Die elektronische Verstärkung wurde durch die TRIODE möglich, die um 1907 von Lee De Forest erfunden wurde. Ab 1950 wurde die auf Vakuumröhren basierte Technologie durch die auf den Halbleitern begründete Elektronik abgelöst. Der TRANSISTOR war der Ersatz für die Verstärkerröhre. Aber war die Schallverstärkung vor dem Zeitalter der Elektronik überhaupt möglich? Wie konnte etwa eine Schallplatte einem ganzen Saal voller Publikum hörbar gemacht werden?

Anschliessend seien drei verschiedene Verfahren beschrieben, die etwa ab 1900 zu diesem Zweck eingesetzt wurden. Das erste Verfahren, um den Schall des Phonographen zu verstärken, der SPRECHEN-

DE LICHTBOGEN, ist auf einer verblüffenden Erscheinung begründet: Werden die beiden Pole einer starken Gleichstromquelle mit je einer Kohlenelektrode verbunden, können wir einen Lichtbogen erzeugen, indem wir die beiden Elektroden kurz berühren und dann sofort bis auf eine kleine Distanz voneinander zurückziehen. Ganz ähnlich wie beim elektrischen Schweissen. Auf diese Weise erhalten wir einen extrem grellen Lichtbogen, dessen Temperatur bei über 3'500 ºC liegen kann. Um 1900 wurde der von Davy erfundene Lichtbogen bei der Strassenbeleuchtung eingesetzt. Heute wird der Lichtbogen fast ausschliesslich zum Schweissen von Metallen verwendet. Der englische Ingenieur Duddell hatte beobachtet, dass der Bogen dazu neigte, bei kleinsten Spannungsschwankungen Geräusche zu erzeugen. Er hatte den Einfall, diese Spannungsschwankungen mit einem Mikrophon bewusst zu erzeugen.



Schema des sprechenden Lichtbogens

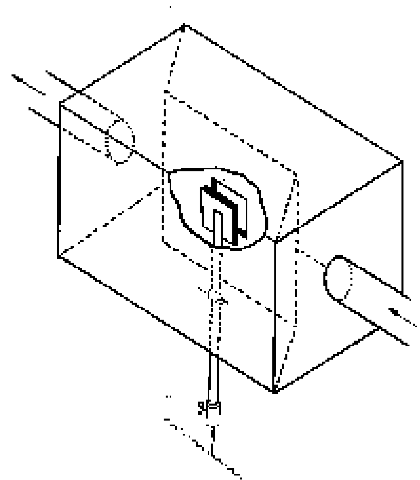
In dieser Anwendung des Lichtbogens ist es wichtig, über eine möglichst gleichmässige Stromquelle zu verfügen, und aus diesem Grunde ist eine Batterie oder ein Akkumulator als Stromquelle einem dynamo-elektrischen Generator vorzuziehen. Das Mikrophon darf nicht in den Haupt-Stromkreis eingeschlossen werden, da Lichtbogen nur unter Stromintensitäten zustandekommen, die jedes Mikrophon sofort zerstören würden. In der einfachsten Anordnung des sprechenden Lichtbogens von Duddell, wirkt das Mikrophon über eine Induktionsspule, eine Art Transformator, auf den Stromfluss des Hauptstromkreises. Die Buchstaben in der Figur bedeuten: M Mikrophon, S Induktionsspule, W Wechselwiderstand, LB sprechender Lichtbogen. Das Mikrophon bewirkt unter dem Einfluss der Schallwellen im Nebenstromkreis kleine Spannungsschwankungen, welche dank dem Transformator im Hauptstromkreis entsprechende Schwankungen erzeugen. Letztere schwingen im Einklang mit dem Schall, der sie erzeugte und bringen ihrerseits den Lichtbogen dazu, den ursprünglichen Schall verstärkt wiederzugeben.

Wird der von der Membran eines Phonographen abgegebene Schall über einen Schlauch dem Mikrophon zugeleitet, können phonographische Aufnahmen vor einem zahlreichen Publikum abgespielt werden, wie bei einer elektronischen Verstärkeranlage. Aber trotz den experimentellen Erfolgen hat dieses System nie kommerziellen Erfolg erzielen können, vermutlich nicht zuletzt wegen des beträchtlichen Energiebedarfs. Man bedenke, dass elektrische Lichtbogen ab 100 V Spannung und über 20 A Stromstärke funktionieren. Beim elektrischen Schweissen werden Stromstärken eingesetzt, die manchmal 200 A übertreffen können.

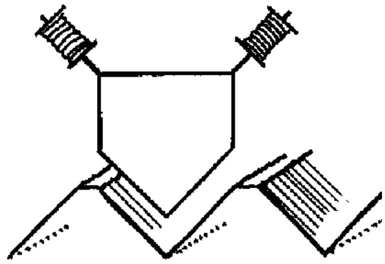
Der FADENVERSTÄRKER, ein auf Reibung begründetes Verstärkersystem wird dem Erfinder Wawrina zugeschrieben. Ein Faden, der zwei- oder dreimal um einen drehenden Stahlzylinder gewickelt ist verbindet die Nadel eines Phonographen mit einer grossen Membrane, die einen wesentlich grösseren Durchmesser aufweist, als dies bei Phonographen üblich ist. Wird der Faden leicht in Richtung der Nadel gezogen, zieht sich dieser über den Drehzylinder zusammen, wodurch der Widerstand anwächst, so sich der Faden zwischen dem Zylinder und der Membran spannt und letztere gegen den Zylinder hin angezogen wird. Sobald der Zug seitens der Nadel gelockert wird, nimmt die Reibungskraft ab und die Membrane wird freigegeben. Diese Erscheinung kann dazu eingesetzt werden, um die schwachen Schwingungen, welche die Schallplattenrille der Phonographennadel mitteilt, mechanisch zu verstärken.

Ein mechanische Verfahren zur Schallverstärkung, das bis zu einem gewissen Masse Erfolg aufwies, war das AKUSTISCHE VENTIL. Bei diesem System wird ein starker Luftstrahl mit einem Ventil reguliert, das sich durch die von der Rille einer Grammophonplatte gelieferten Schallwellen steuern lässt. Das Resultat war eine kräftige Verstärkung des Schalls. Die Luft pflegte aus einer Gasflasche zugeführt zu werden. Die ersten Modelle von akustischen Ventilen arbeiteten nach dem in unseren Figur dargestellten Schema. Später wurden dazu Kämme eingesetzt, welche im Rhythmus der Schallwellen quer zueinander hin und her glitten, was weitgehend die Rückkopplungseffekte der Pressluft auf den Schwingungserzeuger unterband. Die Ähnlichkeit der Schemata des akustischen Ventils, der Verstärkerröhre und des Transistors ist beachtenswert.

Die Platte mit 78 Umdrehungen war pro Seite auf ungefähr 5 Minuten Musik beschränkt. So mussten unter anderem die meisten Symphonischen Sätze in Abschnitte aufgeteilt werden. Um längere Musikstücke auf eine Plattenseite unterbringen zu können, mussten vor allem zwei Probleme gelöst werden: Die Drehgeschwindigkeit musste reduziert werden und die Rille musste verschmälert werden, beides ohne Qualitätseinbusse. Schon ab 1931 führte Leopold Stokowski eine Anzahl Experimente durch, die auf die Lösung der beiden Probleme und die Einführung von Platten mit 33 1/3 Umdrehungen pro Minute abzielten. Das System kam um 1950 auf den Markt und konnte sich gute 50 Jahre lang bewähren.



Das akustische Ventil



Tonabnahme an den Rillenflanken

Bei diesen als LP (Long Play) bezeichneten Platten wurde der Schellack, der lange zur Erzeugung der Platten gedient hatte, durch Vinyl und manchmal durch PVC ersetzt, was den grossen Vorteil hatte, dass die neuen Platten unzerbrechlich waren. Eine neue Technik erlaubte den Tonschnitt der Originalplatte mit einem heissen Grabstichel. Anfangs war ein grosses Problem zu lösen: die Rille musste breit genug sein, um auch die breitesten Amplituden aufzunehmen. Das folgende Verfahren wurde eingesetzt, um eine Rille mit variabler Breite zu erhalten: Während der Aufnahme anhand eines Tonbands, wurde dieses nacheinander vor zwei Tonabnehmern durchgezogen, mit einem Abstand, der ungefähr der Zeit entsprach, welche die Platte brauchte, um eine Umdrehung durchzuführen, also ungefähr 1,8 Sekunden. Die vom ersten Tonabnehmer ermittelten Daten dienen im wesentlichen dazu, den Betrag zu bestimmen, um den sich die Nadel im Laufe der nächsten Umdrehung dem Zentrum der Platte nähern muss. So wird erreicht, dass die Rille immer gerade breit genug ist, um sich der Lautstärke des aufzuzeichnenden Tonmaterials anzupassen, was in den meisten Fällen das Fassungsvermögen der Platte steigert. Da bei musikalischen Aufnahmen die Schwingungen der Töne unterhalb von 440 Hz die grössten Amplituden einnehmen, wurde ein weiterer Trick eingesetzt: die Töne werden einer elektronischen Bearbeitung unterworfen, bei welcher ihnen für jede Oktave, die sie unter 400 Hz liegen, eine gewisse Anzahl dB abgezogen wird. Die Grenze von 400 Hz wurde willkürlich festgelegt. Der Reproduktionsapparat muss mit einem elektronischen System ausgerüstet werden, das diese Manipulation wieder kompensiert. Auf diese Weise kann die Breite der Rille besonders in tiefen und lauten Passagen wesentlich vermindert werden.

Um den kleinen Störungen entgegenzuwirken, die sich besonders im Bereich der höheren Frequenzen dank Materialfehlern störend bemerkbar machen, wurde das komplementäre System eingesetzt: Die Amplitude der Frequenzen über 2500 Hz wurden proportional zur Anzahl Oktaven, die sie über dieser Grenze lagen, gestaucht.

Gegen Ende der Fünfzigerjahre erschienen stereophonische Schallplatten auf dem Handel. Diese funktionieren folgendermassen: Jede Flanke der Rille entsprach je einem der beiden Aufnahmekanäle. Der phonographische Tonabnehmer oder Pick-up, mit einer einzigen Nadel ausgerüstet, enthält zwei Spulen (im Falle eines elektrodynamischen Tonabnehmers), die räumlich so ausgerichtet sind, dass jeder die Schwingungen der senkrecht zu seiner Achse stehenden Rillenflanke aufnimmt. Die Figur stellt dieses System in stark schematisierter Form dar.

Die Möglichkeit stereophonischer Übertragung von Musik wurde zum ersten Mal 1881 anlässlich der elektrischen Ausstellung in Paris durch Clément Ader organisiert. Dabei wurde die Musik direkt aus der Pariser Oper über Telephonleitungen den Kopfhörern der Zuhörer zugeführt.

Ab 1958 wurde es möglich, stereophonische Schallplatten herzustellen. Damals erschienen auch die ersten stereophonischen Tonbandgeräte auf dem Markt. In den Sechzigerjahren wurde der stereophonische Rundfunk eingeführt.

Die als binaurales Aufnahmeverfahren bekannte Technik arbeitet mit einem Kunstkopf aus Kunststoff, in dem die Mikrophone der beiden Kanäle in der unserem Gehörorgan entsprechenden Stellung untergebracht werden. Damit wird ein besonders wirklichkeitstreues Resultat erreicht.

In den Siebzigerjahren erschienen auf dem Markt verschiedene 4-Kanalsysteme. Das bekannteste Beispiel ist die Quadrophonie, die eine gewisse Erfolgsquote erreichen konnte.

Während sich im Bereich der HiFi-Elektronik die Mehrkanalverfahren kaum durchsetzen konnten, gehören diese im Bereich des Tonfilms zur Standardausrüstung und werden etwa mit dem Begriff *Surround* bezeichnet.

Seit bald 20 Jahren werden die Vinylplatten mit 33 1/3 Umdrehungen immer mehr durch die digitalen CDs[46] abgelöst, die mittels eines Laserstrahls eingelesen werden und daher keinem mechani-

[46] Compact Disc.

schen Verschleiss mehr unterworfen sind. Was bedeutet hier das Wort *'digital'?* Beim herkömmlichen Verfahren wird die Schallinformation durch eine stetige Kurve dargestellt. Man spricht von *analogem* Verfahren. Jede kleinste Verformung dieser Kurve zieht eine Verfälschung des Schalls nach sich. Eine solche analogische Kurve kann durch numerische Daten beliebig genau angenähert werden. Dadurch erhält man eine DIGITALE DARSTELLUNG des Schalls. Ist das "Gitter", anhand dessen die phonographische Kurve digitalisiert wird, nur fein genug, so unterscheidet sich die digitalisierte Kurve nicht merklich von der Originalkurve. Diese Technik ist mit der autotypischen Rasterung vergleichbar, die etwa im Offsetdruck eingesetzt wird, um Halbtonoriginale reproduzieren zu können. Ist der Raster fein genug, wird er vom Laien nicht mehr wahrgenommen. Bei der phonographischen Tonaufnahme bestimmt unser Gehör die nötige Feinheit des Gitters. Welchen Vorteil hat diese Art der Darstellung? Vor allem die absolute Unveränderlichkeit der Daten im laufe der Zeit: Verändert sich nämlich aus irgend einem Grund der Wert einer Zahl, die etwa auf einem magnetischen Träger gespeichert ist, rundet ihn der Wiedergabeapparat wieder auf den Originalwert, sofern die Abweichung nicht allzu gross geworden ist und sich die Zahl dadurch näher bei einem Nachbarwert befindet, als beim Ursprünglichen. Liest also etwa das Wiedergabegerät die Zahlenfolge 3,02 5,998 4,1 7,02 ein, rundet er sie automatisch auf 3 6 4 7. Diese Eigenschaft der digitalisierten Daten erlaubt es, ein digitalisiertes Musikstück hintereinander auf verschiedene Träger zu kopieren, ohne den geringsten Datenverlust zu erleiden[47]. Bei einer analogischen Aufnahme hingegen müssen wir bei jedem Kopiervorgang einen Qualitätsverlust hinnehmen, der sich bis zur Unkenntlichkeit steigern kann. Dasselbe passiert beim Kopieren der sogenannten Sicherheitsschlüssel: die Kopie der dritten oder vierten Generation[48] schliesst meist die Tür nicht mehr auf.

Ein anderer Vorteil des digitalen Formats besteht auch darin, dass die Daten mit einem PC weiterverarbeitet werden können.

Auf der CD werden die digitalen Werte in Form von mikroskopischen Vertiefungen gespeichert, die ein optisches System mit Laserlicht durch eine durchsichtige Kunststoffschicht ablesen kann. Letztere ist dick genug, um zu verhindern, dass kleinste Staubpartikel auf der Oberfläche die Ablesung beeinträchtigen können, da diese nicht mehr in den Schärfenbereich der Optik fallen. Kontrollpisten, welche die Hauptspur in einigem Abstand begleiten sorgen dafür, dass

---

[47] Dies gilt übrigens auch für die Daten, mit denen unser PC arbeitet.

[48] Dasselbe kennen wir bei der Photokopie: kopiert man Kopien, erhält man zuletzt ein unleserliches Dokument.

kleine Fabrikationsfehler und die unvermeidlichen Kratzer die Platte unlesbar machen. Diese sind in gewissen Systemen so wirkungsvoll, dass kleine Löcher durch die ganze Platte von einem halben Millimeter Durchmesser auf einem guten Abspielgerät kompensiert werden können. Es ist sogar so, dass eine Kopie einer solchen Platte wieder mit der unbeschädigten Originalplatte übereinstimmt[49].

Im Bellschen Telephon erzeugen die Bewegungen im Takt der Schallwellen der Membran vor dem mit einer Spule versehenen Permanentmagneten einen Wechselstrom, der es erlaubt, in der Empfangsstation den Schall zu reproduzieren. Könnten wir statt der Distanz zwischen dem Magneten und der Membrane die Magnetisierung der Membrane im Takt der Schallwellen verändern, würden wir ein ähnliches Resultat erhalten. Der nächste Schritt in diesem Gedankenexperiment besteht darin, die Membrane durch eine Abfolge von Membranen mit vorbestimmten Magnetisierungen zu ersetzen, etwa wie bei einem Film die Einzelbilder. Stellen wir uns vor, diese Einzelmembranen laufen auf einem Fliessband vor dem Elektromagneten des Bellschen Telephons durch, haben wir hier bereits eine Anordnung, die vage an das MAGNETOPHON oder Tonbandgerät erinnert, welches mit einem stetigen magnetisierbaren Band arbeitet. So etwa dürfte der Gedankengang sein, der den Dänen Poulsen gegen 1900 zur Erfindung seines *Telegraphone* führte, das heute als der Hauptvorläufer des Tonbandgeräts gilt.

Vor allem zwei technische Schwierigkeiten standen dem strahlenden Erfolg der Erfindung von Poulsen im Weg. Einerseits verfügte Poulsen noch über keine ausreichende Möglichkeit der elektronischen Tonverstärkung. Andererseits war das von Poulsen eingesetzte magnetische Material nicht für Montagen geeignet, wie die heute verwendeten Tonbänder. Anstelle von Band verwendete Poulsen nämlich einen dünnen Stahldraht, der auf einen Zylinder fest aufgewickelt war. Später wurden Stahlbänder eingesetzt. Erst ungefähr ab 1935 wurden diese Materialien durch ein vollständig neues Medium abgelöst: Das einseitig mit einer Emulsion von feinstem Eisenpulver beschichtete Kunststoffband. Diese Kombination bildet auch heute noch den hauptsächlichen Tonträger des Tonbandgeräts, sowie des Magnetoskops (Video).

Das Fundament der Magnetophonie ist die Möglichkeit ein Stück Eisen mit einem Magnet zu magnetisieren. Je nach Material ist die Magnetisierung nur vorübergehend (remanent), wie im Fall des Roheisens, oder aber dauerhaft (permanent), wie bei den meisten

---

[49] Siehe den Artikel "*Reproducción digital del sonido*" in der Zeitschrift *"Investigación y Ciencia"*, Februar 1985. *(Investigación y Ciencia* ist die spanische Ausgabe von *Scientific American.)*

Stahlsorten. Wir können uns die Magnetisierung wie eine Ausrichtung der Elementarteilchen vorstellen, die in ihrem natürlichen Zustand ungeordnet in alle Richtungen schauen.

Wird das Tonbandgerät zum Aufnehmen eingesetzt, fliesst das Band zuerst vor einem Magnetkopf durch, der mit Hochfrequenz arbeitet und das Band löscht, indem er die Partikeln ausrichtet, was die Empfindlichkeit des Bandes erhöht. Das *Telegraphone* von Poulsen sah noch keinen Löschkopf vor. Die Polarisation mit Gleichstrom wurde 1903 durch Poulsen eingeführt. Die Polarisation mit hochfrequentem Wechselstrom kam etwa um 1927 auf.

Nach dieser Phase fliesst das Band vor dem Schreibkopf durch (der etwa wie ein Bellsches Telephon in Empfangsfunktion arbeitet) und schafft auf dem Band nicht polarisierte Zonen, dessen Dichte in jedem Moment direkt proportional zur Amplitude der phonographischen Kurve des Schalls ist, der dem Schreibkopf in Form von elektrischen Schwingungen zugeleitet wurde.

Wird das Gerät zur Wiedergabe eingesetzt, werden die beiden genannten Köpfe ausgeschaltet, währen der dritte Kopf, der Lesekopf, eine dem Mikrophon ähnliche Funktion übernimmt. Die Polarisationsdifferenzen des vor dem Kopf vorbei fliessenden Tonbands wird in elektrische Schwingungen übersetzt, die dem aufgenommenen Schall entsprechen.

Im Laufe der technischen Entwicklung des Tonbandgeräts wurden die Bänder immer schmäler und die Geschwindigkeiten immer niedriger, so dass jedesmal mit weniger Bandmaterial ausgekommen werden konnte. Als in den Sechzigerjahren Philips die Audio-Kassette entwickelte, wurde das Grundrauschen bei den schmalen Bändern zum Problem. Der Amerikaner Ray Dolby entwickelte ein System, mit dem das Rauschen effektiv unterdrückt werden konnte. Das Dolby-System arbeitet folgendermassen: Bei der Aufnahme werden ausschliesslich die leisen Stellen des Schalls speziell verstärkt, während die lauten Stellen normal verstärkt werden. Beim Abspielen erkennt der Dolby-Decoder die bei der Aufnahme künstlich verstärkten Stellen und schwächt diese wieder auf die richtige Lautstärke ab. Da das Bandrauschen vor allem in den leisen Passagen störend vernommen werden, wird mit diesem System das Problem weitgehend behoben.

Bis vor kurzem war das Magnetband noch das von den Profis am meisten eingesetzte Medium, vor allem wegen der Möglichkeit, mit Schere und Klebeband Montagen auszuführen. Diese Möglichkeit bildet auch den Grundstein der ELEKTROAKUSTISCHEN MUSIK, die um 1945 aufkam. Andererseits können die Tonbänder auf verschiedenen Spuren bespielt werden, deren Anzahl nur durch die Breite des Bandes und den verwendeten Aufnahmeapparat beschränkt ist.

Seit es Tonbandgeräte mit einer guten Wiedergabequalität gibt, werden die Platten nicht mehr direkt aufgenommen, sondern anhand einer Tonbandaufnahme, die oft aus einzelnen Abschnitten zusammengesetzt wird, wobei jedem Mikrophon eine einzelne Spur zugewiesen wird, was bei der Anfertigung der Wachsmatrize ermöglicht, jede Spur hinsichtlich Lautstärke und anderen Faktoren individuell zu korrigieren.

Schliesslich sei ein System erwähnt, das es ermöglicht, Tonaufnahmen auf photographischen Film vorzunehmen, das Lichttonverfahren. Das LICHTTONVERFAHREN erlaubt es, auf einer speziell dafür vorgesehenen Spur auf dem in der Filmindustrie üblichen 35 mm-Film Tonaufnahmen auf photographischem Wege festzuhalten. Dadurch wird eine perfekte Synchronisierung[50] des Tons und des Bilds erreicht.

Die verschiedenen Lichttonverfahren können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden, je nach dem angewandten Aufnahmeverfahren: Die flächenvariablen und die dichtenvariablen Systeme. Bei der Wiedergabe sind die beiden Systeme weitgehend ko mpatibel.

Bei den flächenvariablen Verfahren werden die elektrischen Schwingungen, die den Schallwellen entsprechen einem optischen System zugeleitet, das den Film so belichtet, dass nach der Entwicklung ein (meist symmetrisches) schwarz-weisses Band mit variabler Breite entsteht. Die Grenzen zwischen der schwarzen und der weissen Zone entsprechen genau der phonographischen Kurve des aufgenommenen Schalls.

Bei den dichtenvariablen Verfahren wird eine Lichtquelle eingesetzt, die praktisch jeglicher Trägheit entbehrt und deren Helligkeit in jedem Augenblick der Amplitude der phonographischen Kurve des Schalls entspricht. Das Licht dieser Lichtquelle wird durch einen dünnen Spalt (quer zur Fortbewegungsrichtung des Films) auf das empfindliche Material geworfen. Der Film wird auf der ganzen Breite der Tonspur gleichmässig beleuchtet. Nach der Entwicklung entspricht die Dichte jedes Querstreifens dem entsprechenden Abschnitt der phonographischen Kurve, aber auch der Breite des Bandes einer entsprechenden flächenvariablen Lichttonspur.

---

[50] Die Verschiebung zwischen dem belichteten Bild und dem belichteten Lichttonstreifen in der Filmkamera, die gewöhnlich etwa 21 Bilder beträgt, muss bei der Projektion wieder kompensiert werden.

In Wirklichkeit existieren viele verschiedene Lichttonverfahren, die alle von den beiden hier beschriebenen Grundschemata abgeleitet sind. Es wurden sogar Systeme erprobt, welche die beiden Grundverfahren kombinieren. Für die Kenner der graphischen Techniken, erlaube ich mir hier, das flächenvariable Lichttonverfahren mit dem autotypischen Rotationstiefdruck und das dichtenvariable Verfahren mit dem herkömmlichen Rotationstiefdruck zu vergleichen.

Die hauptsächlichen Lichttonsysteme

Das Wiedergabegerät projiziert die Tonspur durch einen schmalen Spalt auf eine photoelektrische Zelle mit möglichst wenig Trägheit. Die Zelle lässt den elektrischen Strom im Takte des eintreffenden Lichts durch. Dieser Strom wird in einem elektronischen Verstärker bearbeitet und einem Lautsprecher zugeführt, der den aufgezeichneten Schall wiedergibt.

Es ist nur noch das Problem der ruckartigen Fortbewegung des Kinofilms vor dem Objektiv (sowohl bei der Aufnahme, wie bei der Wiedergabe) zu lösen. Um dieses Problem ein für allemal aus der Welt zu schaffen, hat die Filmindustrie eine Distanz von 21 Photogrammen zwischen dem Tonsystem und dem zu projizierenden Bild als Norm festgelegt.

Die frühen Versuche, Schallplatten mit Kinofilmen zu synchronisieren wurden durch die Entwicklung des Lichttonfilms obsolet.

Der berühmte Film von Disney aus dem Jahr 1940 "Fantasia" war der erste kommerzielle Film mit Stereoton. Zur Projektion mussten zwei synchron laufende Projektoren eingesetzt werden: Einer projizierte die Bilder, während der andere vom zweiten Filmstreifen die drei Lichttonspuren und eine Kontrollspur einlas. Der Film wurde übrigens im *Technicolor*-Verfahren hergestellt.

In den Fünfzigerjahren wurde der Lichtton in vielen Filmen durch Magnetton abgelöst, wobei ein schmales Tonband auf dem Filmmaterial angebracht wurde.

Schon bald einmal wurde der Filmton digitalisiert. Eines der ersten Systeme war das 1990 von Eastman Kodak eingeführte CDS, bei dem der herkömmliche Lichttonstreifen durch Digitalcode ersetzt wurde. Das System arbeitete mit komprimierter 6-Kanal Dolby Rauschunterdrückung und lieferte eine hervorragende Tonqualität. Das System konnte sowohl auf 35- wie auf 70-mm-Film eingesetzt werden. Dass der kommerzielle Erfolg ausblieb ist vor allem zwei

Faktoren zu verdanken: Die Filme konnten nur in speziell eingerichteten Kinos projiziert werden, und für den Fall einer Panne war keine herkömmliche Tonspur vorgesehen.

1993 kam das DTS-System auf, bei dem zwischen der Lichttonspur und den Bildern eine schmale Spur (Time-Code-Spur) eingesetzt wird, mit der die Synchronisierung der Projektion mit dem Ton kontrolliert wird, wobei sich das Schallmaterial separat auf einer Audio-CD befindet. Die Time-Code-Spur sieht aus, wie ein Morse-Code. Auf die konventionelle Lichttonspur wird trotzdem nicht verzichtet, einerseits für den Fall einer Panne, andererseits für Kinos, die nicht auf DTS eingerichtet sind. Ein Vorteil des Systems besteht in der Leichtigkeit, mit der Versionen in verschiedenen Sprachen ausgetauscht werden können.

In Frankreich erschien bereits um 1991 das L.C. Concept von Pascal Chedeville, das ähnlich wie das CDS-System arbeitete. Der Misserfolg des Systems ist wohl darin zu suchen, dass es von den grossen multinationalen Firmen nicht unterstützt wurde.

1994 führte die Firma Dolby ihr Lichttonsystem ein, bei welchem der digitalisierte Schal in Form von Punktmustern zwischen der Perforation des Films angebracht wird. Die traditionelle Lichttonspur wird beibehalten.

In den Siebzigerjahren war eine spezielle Mehrkanaltechnik Mode geworden, bei der ein Kanal dem Infraschall unter 20 Hz vorbehalten war, das Sensurround. Dieser Infraschall wurde dann mit speziellen Lautsprechern verstärkt, so dass man die Vibrationen körperlich fühlen konnte, was besonders bei Erdbebenfilmen ein unheimliches Gefühl aufkommen lässt. Einzelne Gebäude sollen dabei beschädigt worden sein, was uns an die Trompeter von Jericho denken lässt.

DIE MUSIKALISCHEN TONLEITERN

Während die Grundtonleiter der alten Griechen und Chinesen aus den sieben Tönen bestand, die wir heute als Do, Re, ..., Si bezeichnen, und unserer DIATONISCHEN TONLEITER entsprechen, brachte uns das spätere Bedürfnis, zu modulieren, also eine bestimmte Melodie mit einem beliebigen anderen Ton der Skala anzufangen ohne die Intervalle zwischen den Tönen abzuändern, die alterierten Töne. Soll etwa die Tonleiter Do, Re, ..., Si, Do um eine Quinte erhöht werden, also mit Sol begonnen werden, werden wir eine neue Note zwischen Fa und Sol einführen müssen, die dem VII Grad unserer Skala entspricht. Wir bezeichnen diese neue Note als Fa #. Soll hingegen unsere Tonleiter mit der Note beginnen, die eine Quinte unter Do gelegen ist, also mit Fa, sind wir gezwungen eine neue Note zwischen La und Si einzusetzen, die wir als Si $\flat$ bezeichnen und die dem IV Grad unserer neuen Skala entspricht.

Fügen wir zwischen allen Ganztonintervallen unserer diatonischen Tonleiter je einen Halbton ein, erhalten wir eine CHROMATISCHE TONLEITER mit 12 Tönen. Im gleichmässig temperierten System können diese 12 Töne mit den Zahlen 1, 2, ..., 12 dargestellt werden, welche die Grundlage der Zwölftonmusik und der seriellen Musik bilden.

Die klassischen Griechen waren die Vorläufer der arithmetischen Auslegungen der musikalischen Tonleiter. Es ist nicht erstaunlich, dass die erste überlieferte mathematische Theorie der musikalischen Noten gerade Pythagoras zugeschrieben wird, dessen Philosophie sich dadurch auszeichnete, dass sie alle Tatsachen der physikalischen Welt mit Zahlenbeziehungen zu erklären versuchte. Pythagoras, der für seine Untersuchungen ein Monochord einsetzte, drückte sich noch nicht in der Terminologie der Frequenzen aus, sondern studierte die Beziehung der Töne zu den entsprechenden Saitenlängen. Da wir heute wissen, dass die Frequenz des von einer Saite erzeugten Tons zur Länge der Saite umgekehrt proportional ist, wenn sich alle anderen Faktoren (Material, Spannung, Dicke) nicht verändern, ist es legitim, die Theorien von Pythagoras in der Terminologie der Frequenzen auszudrücken.

Nach Pythagoras haben sich viele Musiker und Wissenschafter bemüht, die in der Musik verwandten Töne auf eine solide mathematische Grundlage zu stellen. Die verschiedenen Auslegungen können den Tönen der Tonleiter ziemlich abweichende Zahlenwerte zuordnen. Die Psychologen haben festgestellt, dass die Gehörkriterien über die melodischen Intervalle vor allem durch die Gewöhnung geprägt sind. Die harmonischen Intervalle aber sind in gewissen Tonsystemen objektiv konsonanter als in anderen. Die gleichmässig temperierte Tonleiter, die heute zum Stimmen der Instrumente mit unveränderlichen Tönen (Klavier, Orgel) fast ausschliesslich zum Einsatz kommt, liefert eine gute Annäherung an die meisten anderen Tonleitern. Obwohl sie gewisse Puristen nicht akzeptieren, muss beachtet werden, dass einer der grössten Musiker aller Zeiten, Johann Sebastian Bach, ein eifriger Befürworter der temperierten Stimmung war. Es sei bemerkt, dass die heute angewandte gleichmässig temperierte Stimmung ein extrem einfacher Spezialfall unter einer ganzen Reihe von historischen temperierten Stimmungen[51] darstellt, die andererseits in gewissen Nordamerikanischen Kreisen teilweise wieder eingesetzt werden.

Dieses Kapitel soll eine kurze Einführung in die mathematischen Interpretationen der abendländischen musikalischen Tonleiter einführen. Es wird nicht von den exotischen Tonleitern die Rede sein, die übrigens im Buch von Ellis, "Über die Tonleitern verschiedener Völker", München, 1922, ausführlich besprochen werden.

Die Pythagoreische Tonleiter ist wie folgt aufgebaut:
Nehmen wir an, auf einem Monochord sei eine Saite mit Länge 1 (zum Beispiel 1 m) und eine andere mit Länge 3/2 aufgespannt. Die

[51] Unter den verschiedenen Temperaturen, die alle die Möglichkeit anzielten, auf einem gleichen Tasteninstrument Kompositionen in möglichst vielen verschiedenen Tonarten spielen zu können, spielten vor allem die sogenannten Haupttonstimmungen eine hervorragende Rolle, bei denen eine bestimmte Tonart optimale Resultate erzielte, während drei oder vier verwandte Tonarten noch annehmbare Resultate lieferten. Aber alle diese Stimmungen wiesen ein paar besonders ungünstige Intervalle auf, die in dem Zusammenhang als Wölfe bezeichnet wurden, wohl als Anspielung auf das Geheul dieser Tiere. In den letzten Jahrzehnten gibt es wieder zahlreiche Verfechter dieser historischen Stimmungen und das unten erwähnte Buch von Jorgensen gibt genaue Stimmanleitungen für eine grosse Anzahl historischer Stimmungen, zusammen mit Frequenztafeln, aber leider ohne näher auf deren mathematische Strukturen einzugehen.
Zur Zeit vertreibt der amerikanische Verlag Gasparo (www.gasparo.com) eine interessante Schallplatte unter dem Titel "Beethoven in the Temperaments", auf der die Einspielung einiger berühmten Beethovensonaten durch die Pianistin Enid Katahn auf einem nach verschiedenen historischen Temperaturen gestimmten Steinway-Flügel zu hören sind. Das Klavier wurde durch Edward Foote gestimmt, der auch auf der Webseite http://www.uk-piano.org/edfoote/ von den historischen Temperaturen spricht. Der Hauptnachteil ist sicher, dass der Flügel für jede Tonart anders gestimmt werden muss...

Längeneinheit ist in diesem Zusammenhang nicht massgebend. Nehmen wir ferner an, die Frequenz der Saite mit Länge 1 sei 1. Nach der Formel von Taylor können wir den Schluss ziehen[52], dass die längere Saite einen Ton von 2/3 von sich gibt. Wir stellen fest, dass das Intervall zwischen den beiden Tönen einer Quinte entspricht und wir bezeichnen den Ton mit der Frequenz 1 als Do und den anderen mit der Frequenz von 2/3 als Fa.

Pythagoras, der bereits festgestellt hatte, dass man eine reine Oktave erhält, wenn man die Länge einer Saite halbiert, definierte die reine Quinte als das Intervall, das man erhält, wenn man genau zwei Drittel der Länge einer Saite schwingen lässt. Wir erinnern uns, dass die Quinte bei der gleichmässig temperierten Tonleiter durch die Charakteristik 1,4983... festgelegt ist, und bemerken, dass dieser Wert eine gute Annäherung an den Bruch 3/2 bildet.

Unterteilen wir mehrmals hintereinander die Saite in zwei Drittel ihrer Länge, erhalten wir eine Tonfolge, in der jeder Ton eine Quinte mit ihrem Vorgänger bildet. Die ersten sieben Glieder dieser Folge pflegt man als Fa, Do, Sol, Re, La, Mi, Si zu benennen.

Reduzieren wir diese Noten auf die Hauptoktave zwischen Do und der Oktave desselben, indem wir jeweils ihre Frequenz mit der geeigneten Zweierpotenz dividieren (oder mit ihr multiplizieren), und ordnen wir diese Noten anschliessend der Grösse nach, erhalten wir die folgende Tafel:

	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
Glied der Folge	2	4	6	1	3	5	7	
Charakteristik	1	$\left(\frac{3}{2}\right)^2$	$\left(\frac{3}{2}\right)^4$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\left(\frac{3}{2}\right)^3$	$\left(\frac{3}{2}\right)^5$	
Charakteristik der auf die Grundoktave reduzierten Note	1	$\frac{3^2}{2^3}$	$\frac{3^4}{2^6}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3^3}{2^4}$	$\frac{3^5}{2^7}$	2
Charakteristik als Dezimalbruch	1	1,125	1,26562	1,33333	1,5	1,6875	1,89843	2
Vergleichswert der gleichmässig temperierten Tonleiter	1	1,12246	1,25992	1,33483	1,49830	1,68179	1,88774	2

Die aus diesen 7 pythagoreischen Tönen bestehende Tonleiter entspricht ungefähr unserer temperierten diatonischen Tonleiter, wie der Vergleich zwischen den Charakteristischen Werten zeigt.

Diese Töne alleine bieten aber keine Möglichkeit, die Melodien zu modulieren. Wie wir gleich sehen werden, gibt es zwei gleich-

[52] Da die Spannung und die anderen Eigenschaften der Saite konstant bleiben.

wertige Systeme, um die nötigen alterierten Noten zu berechnen, um die Modulation in jede beliebige Tonart vornehmen zu können.

Zuallererst werden wir die zwischen je zwei aufeinanderfolgenden pythagoreischen Tönen bestehenden Intervalle untersuchen. Dividieren wir den charakteristischen Bruch jeder Note durch denjenigen seines Vorgängers, bemerken wir bald einmal, dass nur zwei verschiedene Intervalle vorkommen, der pythagoreische Ganzton, dem der Wert 9/8 (Symbol T) entspricht und das sogenannte Limma[53] (Symbol t) mit der Charakteristik 256/243, das etwas kleiner als ein halber pythagoreischer Ton ist. Es sei in Erinnerung gerufen, dass die Hälfte eines Tons oder eines beliebigen Intervalls sich als Quadratwurzel des charakteristischen Bruchs berechnen lässt, in unserem Fall also als Quadratwurzel aus 9/8. Ein halber pythagoreischer Ton entspricht also einem Zahlenwert von 1,06066, während ein Limma der Zahl 1,05349 entspricht.

Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
T	T	t	T	T	T	t	

Soll unsere Tonleiter um eine Quinte nach oben transportiert werden, um mit Sol zu beginnen, muss eine Folge von Noten entstehen, welche durch die aufeinanderfolgenden Intervalle T, T, t, T, T, T, t getrennt werden. Wir finden folgendes Resultat:

Sol	La	Si	Do	Re	Mi	Fa #	Sol
T	T	t	T	T	T	t	

Der Wert des Fa # ist das um T erhöhte Mi:

Mi (Oktave) = 81/32

T = 9/8

Fa # = 81/32 · 9/8 = 729/256

Auf die Oktave reduziert, erhält man für Fa # den Wert 729/512 $= \frac{3^6}{2^9}$.

Entsprechend erhält man das Do #, wenn man die Tonleiter bei Re (Quinte von Sol) ansetzt, usw.

Wollen wir hingegen die Tonleiter eine Quinte tiefer ansetzen und bei Fa einsetzen, finden wir die folgenden Noten:

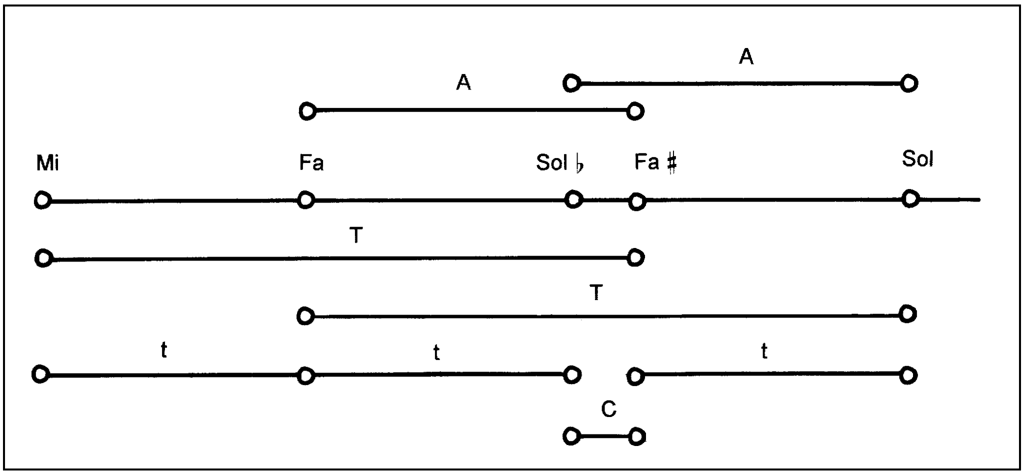
[53] In gewissen Quellen finden wir die Schreibweise *Leimma*.

Fa	Sol	La	Si ♭	Do	Re	Mi	Fa
	T	T	t	T	T	T	t

La (untere Oktave) = 27/32
t = 256/243
Si ♭ = 27/32 · 256/243 = 8/9

Auf die Grundoktave reduziert erhält man für Si ♭ den Wert 16/9.

Hier sei bemerkt, dass man das selbe Resultat erhält, wenn man das La um ein Limma (t) erhöht, wie wenn man das Do um einen Ganzton (T) senkt.



Die Intervalle der Tonleiter von Pythagoras

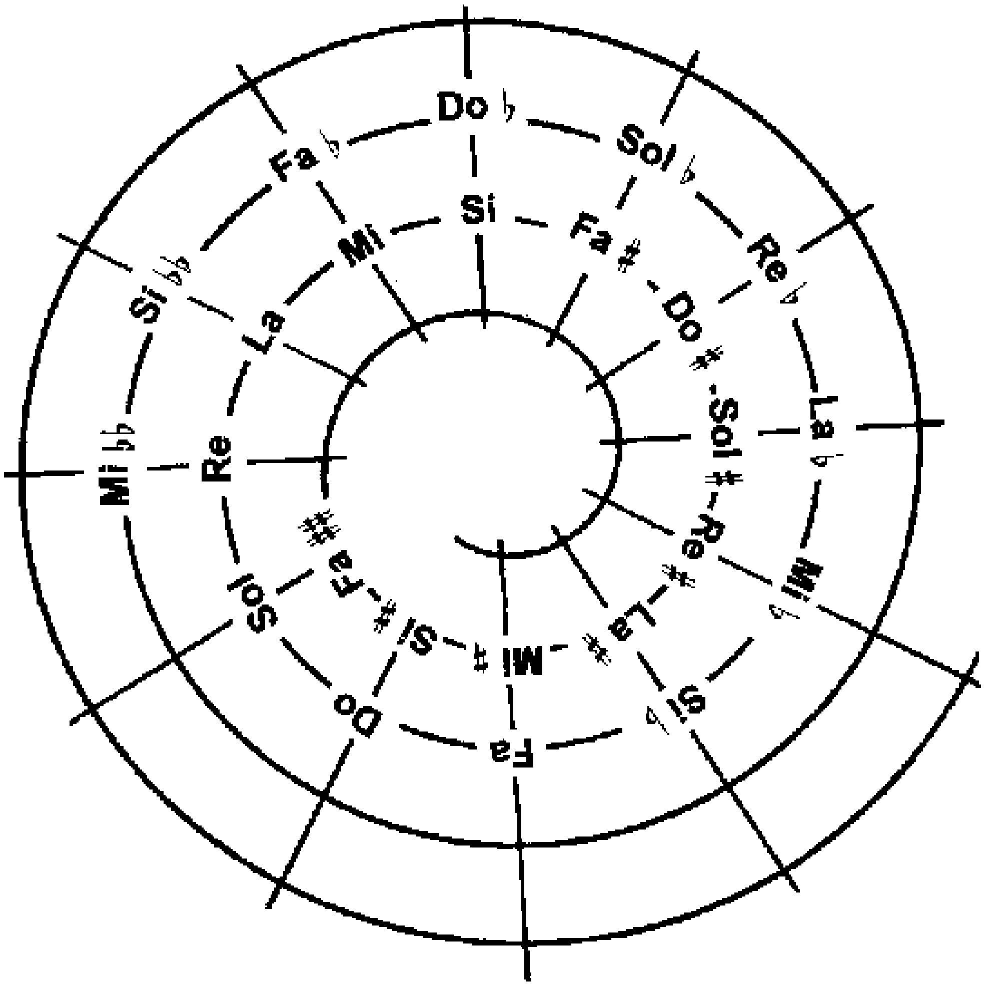
Entsprechend erhält man das Mi ♭, indem man die Tonleiter bei Si ♭ (Quinte gegen unten von Fa) ansetzt, usw.

Eine einfache Rechnung zeigt uns, dass das Intervall zwischen einer Note und ihrer Alteration (etwa zwischen Fa und Fa #) den Wert 2187/2048 $=\frac{3^7}{2^{11}}$ aufweist. Dieses Intervall wird als Apotom (Symbol A) bezeichnet.

Aus der graphischen Darstellung ersehen wir, dass in der Pythagoreischen Tonleiter die Noten Fa # und Sol♭, im Gegensatz zur temperierten Tonleiter voneinander abweichen. Nehmen wir zwei beliebige, durch einen Ganzton T getrennte Noten der pythagoreischen Tonleiter, so finden wir zwischen der nach oben alterierten unteren Note und der nach unten alterierten oberen Note ein kleines Intervall, das wir als das pythagoreische Komma (Symbol CP) bezeichnen. Das Pythagoreische Komma hat den Zahlenwert $\frac{3^{12}}{2^{19}} = \frac{531441}{524288} = 1{,}01364...$

Drücken wir die Intervalle der pythagoreischen Tonleiter mit der logarithmischen Einheit *Cent* aus, finden wir folgende Situation:

	Bruch	**Dezimalbruch**	***Cent***
Pythagoreischer Ton (T)	9/8	1,12500	203,91
Limma (t)	256/243	1,05349	90,224
Apotom (A)	2187/2048	1,06787	113,68
Komma (CP)	531441/524288	1,01364	23,460



Die Tonleiter von Pythagoras in Spiralform

Da wir nun wissen, dass zwischen einer Note und der entsprechenden alterierten Note das Intervall eines Apotoms besteht, ist es uns leicht möglich, die alterierten Noten jeder beliebigen Note der Tonleiter von Pythagoras zu berechnen. Hätten wir nicht genug an den einfach alterierten Noten, könnten wir auf die gleiche Art und Weise bereits alterierte Noten alterieren, um etwa zu Noten wie Fa ## oder Si ♭♭ zu gelangen.

Wir bemerken auch sofort, dass Mi # nicht mit Fa zusammenfällt, wie dies bei der temperierten Tonleiter der Fall wäre. Auch hier haben wir den Unterschied eines pythagoreischen Kommas.

Wir sagten, es gebe zwei verschiedene Wege, um die Noten der pythagoreischen Tonleiter zu berechnen. Betrachten wir die Situation also aus einem ganz anderen Standpunkt. Lasst uns auf der Tastatur eines Klaviers von einer beliebigen Note der Grundoktave [Do (3), Si (3)] ausgehen und folgenden Vorgang wiederholen:

> Wir erhöhen den Ton um eine Quinte.
> Wir suchen den entsprechenden Ton in der Grundoktave.

Führen wir die beiden Schritte 12 mal hintereinander durch, befinden wir uns wieder in der Ausgangslage. Man sagt, der Quintenzirkel habe sich geschlossen.

Versuchen wir, das entsprechende Verfahren mit reinen Quinten durchzuführen, wie sie bei Pythagoras gebräuchlich sind, werden wir nach 12 Schritten eine kleine Abweichung im Wert eines pythagoreischen Kommas feststellen. So haben wir etwa ein Komma zwischen Fa und Mi ♯ oder zwischen Do und Si ♯. Hier schliesst sich der Quintenzirkel nicht und wir können unendlich viele verschiedene Noten berechnen.

Gehen wir von Fa aus, erhalten wir durch jeweiliges Hinzufügen einer Quinte alle Noten ohne Vorzeichen. Als letzte erhalten wir Si. Fügen wir Si wieder eine Quinte hinzu, erhalten wir Fa ♯.

Um die verminderten Noten zu erhalten, vertiefen wir Fa wiederholt um eine Quinte, um nacheinander Si ♭, Mi ♭, usw. zu erhalten.

Wir können daraus folgern, dass alle Noten der Tonleiter die Form $f = c \cdot \frac{2^m}{3^n}$ aufweisen, wobei c eine durch den Grundton festgelegte Konstante ist. m und n sind ganze Zahlen, welche positiv, negativ oder 0 sein können. Es ist leicht zu beweisen, dass $\frac{2^m}{3^n} = \frac{2^p}{3^q}$ $m = p$ und $n = q$ zur Folge hat.

Die Tonleiter von Pythagoras ist für Tasteninstrumente nicht geeignet, da zum Modulieren eine beträchtliche Tastenmenge zur Verfügung stehen müsste. Aber grosse Violin- und Cellovirtuosen befürworten diese Tonleiter und genaue Messungen anhand von Plattenaufnahmen haben ergeben, dass unter grossen Künstlern tatsächlich die Tendenz besteht, die Intervalle dieser Tonleiter einzusetzen.

DIE TONLEITER VON ARISTOXENOS

Bereits Archytas von Tarent) hatte versucht, eine musikalische Tonleiter zu konstruieren, begründet auf der Beobachtung, dass die meisten der von ihm untersuchten Intervalle eine gute Annäherung an die Formel $\frac{n+1}{n}$ bildeten, wobei n eine natürliche Zahl ist. Wir finden in der Tat für n = 1 die Oktave, für n = 2 die Quinte, für n = 3 die Quarte, für n = 4 die grosse Terz (die damals als dissonant betrachtet wurde), für n = 5 die kleine Terz und für n = 8 den Pythagoreischen Ganzton. Offenbar konnte Archytas das Problem der Konstruktion der Tonleiter nicht lösen. Aber er brachte es fertig, die drei Intervalle seines aus vier Saiten bestehenden Tetrachords in drei Intervalle der Form $\frac{n+1}{n}$ aufzuteilen: 10/9, 9/8 und 16/15.

Aristoxenos wird die Idee zugeschrieben, seine Tonleiter als Überlagerung von zwei Tetrachorden zu aufzubauen, so dass jedes eine Quart umspannt und der höchste und der tiefste Ton des Systems eine Oktave umfasst.

Werden die beiden Quarten nach der von Archytas vorgeschlagenen Formel aufgeteilt, erhalten wir die folgende Tonleiter:

Do	Re	Mi	Fa		Sol	La	Si	Do
1	9/8	5/4	4/3		3/2	27/16	15/8	2
	9/8	10/9	16/15	9/8		9/8	10/9	16/15

Es fällt auf, dass wir in dieser Tonleiter eine Quinte finden können, die nicht dem Wert 3/2 entspricht. Zwischen La und Mi besteht nämlich ein Intervall von

$$\frac{5}{4}:\frac{27}{32}=\frac{40}{27}=1{,}4814\,.$$

Aus dem heutigen Standpunkt ist vor allem die Ähnlichkeit zwischen den Tonleitern von Aristoxenos und Zarlino beachtenswert, welche im folgenden Abschnitt besprochen wird.

DIE TONLEITER VON ZARLINO

Die Ehre, als erster die Tonleiter definiert zu haben, die als die Tonleiter der Physiker oder als natürliche Tonleiter bekannt wurde, kommt dem italienischen Musiktheoretiker Giuseppe[54] Zarlino (1517-90) zu, und es ist daher üblich, von der Tonleiter von Zarlino zu sprechen.

Das genaue Beibehalten aller charakteristischen Intervalle der Tonleiter von Zarlino durch einen Musiker in den verschiedenen Tonarten wird manchmal als genaue Intonation bezeichnet.

Die Tonleiter von Zarlino basiert auf dem perfekten Durakkord (Do, Mi, Sol). Diese Noten wurden unter den ersten harmonischen Tönen von Do ausgewählt, was ihnen einen Höchstgrad an Konsonanz gewährt. Zarlino kannte übrigens die Theorie der harmonischen Partialtöne noch nicht, die erst über hundert Jahre später durch Rameau und Sauveur begründet wurde.

Die drei Töne der harmonischen Skala mit den Nummern 1, 3 und 5 entsprechen den Werten 1 (Do), 5/4 (Mi) und 3/2 (Sol), nachdem sie auf die Grundoktave reduziert und der Grösse nach geordnet wurden. Die vier Noten, die noch fehlen, um die diatonische Tonleiter zu vervollständigen können folgendermassen ermittelt werden:

- Sol wird als Grundnote eines Durakkords betrachtet.
Die Note Si, die mit Sol eine grosse Terz bildet, wird berechnet: $\frac{3}{2} \cdot \frac{5}{4} = \frac{15}{8}$.
Die Note Re, die mit Sol eine Quinte bildet: $\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$.
Die Reduktion auf die Grundoktave ergibt $\frac{9}{8}$.

- Do wird als Quinte eines Durakkords betrachtet.
Erniedrigen wir Do um eine Quinte, erhalten wir Fa: $1 : \frac{3}{2} = \frac{2}{3}$.
Die Reduktion auf die Grundoktave ergibt $\frac{4}{3}$.
Wenn wir diese letzte Note um eine grosse Terz erhöhen, erhalten wir das La: $\frac{4}{3} \cdot \frac{5}{4} = \frac{5}{3}$.

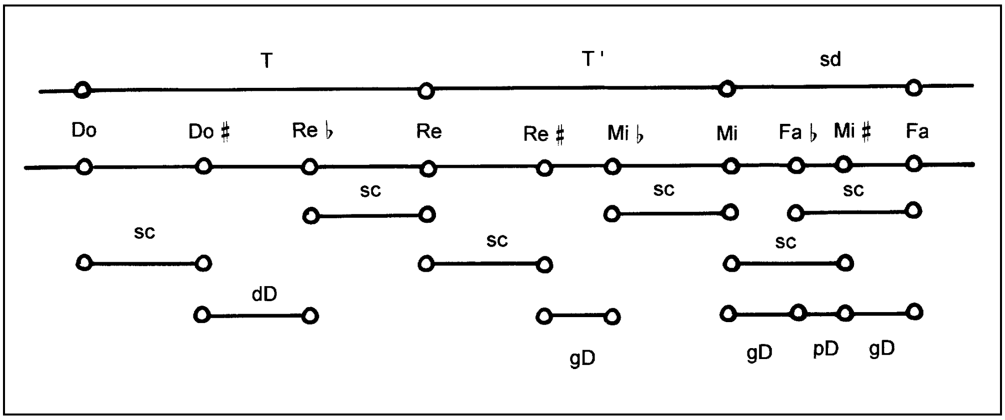
Endresultat:

Do	Re	Mi	Fa		Sol	La	Si	Do
1	9/8	5/4	4/3		3/2	5/3	15/8	2

9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15

[54] In vielen Quellen finden wir den Namen Gioseffo.

Wir stellen fest, dass die unterschiede zwischen der Tonleiter von Zarlino und derjenigen von Aristoxenos ausschliesslich in der Verteilung der Ganztöne (9/8, T) und der kleinen Töne (10/9, T') besteht.



Intervalle der Tonleiter von Zarlino

Bevor wir die Formel vorstellen, die uns Zarlino liefert, um die Noten seiner Tonleiter zu alterieren, soll kurz von seiner Interpretation der Moll-Tonleiter gesprochen werden.

In der Epoche von Zarlino wurden die Moll-Akkorde als den Dur-Akkorden unterlegen empfunden (daher der italienische Ausdruck *minore*, gegenüber *maggiore*). Während Zarlino die harmonischen Noten benutzte, um den Dur-Akkord zu legitimieren, setzte er die arithmetisch reziproken Noten eine, um den Moll-Akkord zu rechtfertigen, und mit ihm die Formel zur Alterierung der Noten. In seinen theoretischen Schriften unterschied Zarlino zwischen *Divisione Armonica* (harmonischer Tonleiter) und *Divisione Aritmetica* (reziproker Tonleiter).

Betrachten wir anstelle der Noten, welche die Hälfte, der Drittel, der Viertel einer Saite erzeugen, die von der Saite doppelter, dreifacher, vierfacher Länge erzeugten Noten, finden wir folgende Werte:

1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, ...

Reduktion auf die Grundoktave:

1, 2, 4/3, 1, 8/5, 4/3, 8/7, ...

Die Glieder mit den Nummern 2, 3 und 5 der Folge, bilden der Grösse nach geordnet einen Moll-Akkord: 4/3, 8/5, 2. Wir wissen bereits, dass 4/3 der Note Fa und 2 dem Do entsprechen. Der Bruch 8/5 entspricht daher dem La ♭. Berechnen wir den Quotienten zwischen La und La ♭, finden wir:

$$5/3 : 8/5 = 5/3 \cdot 5/8 = 25/24$$

Hier haben wir bereits die allgemeine Regel zur Alterierung der Noten der Tonleiter von Zarlino. Die erhöhte Note jeder beliebigen Note wird erhalten, indem man ihre Charakteristik (die für Do gleich 1 ist) mit 25/24 multipliziert. Um die erniedrigte Note zu erhalten, muss mit 24/25 multipliziert (oder durch 25/24 dividiert) werden.

Anhand der bisher angeführten Regeln ist es leicht, den Wert jeder beliebigen Note der Tonleiter von Zarlino zu berechnen. Aber die Untersuchung der Intervalle zwischen den verschiedenen Elementen dieser Tonleiter ist wesentlich komplizierter als im Fall der Pythagoreischen Tonleiter. Im folgenden seien die bedeutendsten Intervalle der Tonleiter von Zarlino kurz vorgestellt:

Wir werden hier den GANZTON wie den Ganzton von Pythagoras mit T bezeichnen, da die beiden zahlenmässig identisch sind (9/8). Den KLEINEN TON von Zarlino mit der Charakteristik (10/9) werden wir mit T' bezeichnen. Der Unterschied zwischen dem Ganzton und dem kleinen Ton wird als Komma von Didymus bezeichnet und hat den Zahlenwert 81/80.

$$9/8 : 10/9 = 9/8 \cdot 9/10 = 81/80$$

Der DIATONISCHE HALBTON (sd), wie er zwischen Mi und Fa und zwischen Si und Do vorkommt, hat den Wert 16/15.

Tonleiter von Zarlino

T	sc
	dD
	sc
T'	sc
	gD
	sc
sd	gD
	pD
	gD
T	sc
	dD
	sc
T'	sc
	gD
	sc
T	sc
	dD
	sc
sd	gD
	pD
	gD

Name	Bruch	Dezmalbruch	*Cents*
Do	1	1,0000	0,0000
Do #	25/24	1,0416	70,672
Re ♭	27/25	1,08	133,23
Re	9/8	1,125	203,91
Re #	75/64	1,1718	274,58
Mi ♭	6/5	1,2	315,64
Mi	5/4	1,25	386,31
Fa ♭	32/25	1,28	427,47
Mi #	125/96	1,3020	456,98
Fa	4/3	1,3333	498,04
Fa #	25/18	1,3888	568,71
Sol ♭	36/25	1,44	631,28
Sol	3/2	1,5	701,95
Sol #	25/16	1,5625	772,62
La ♭	8/5	1,6	813,68
La	5/3	1,6666	884,35
La #	125/72	1,7361	955,03
Si ♭	9/5	1,8	1017,5
Si	15/8	1,875	1088,2
Do ♭	48/25	1,92	1129,3
Si #	125/64	1,953	1158,9
Do	2	2	1200

Der Bruch 25/24, der zur Alterierung der Noten der Tonleiter dient, entspricht der Differenz zwischen einem kleinen Ton T' und einem diatonischen Halbton sd mit der Charakteristik 16/15.

10/9 : 16/15 = 25/24

Das durch diesen Bruch dargestellte Intervall wird in diesem Zusammenhang als CHROMATISCHER HALBTON (sc) bezeichnet.

Die Differenz zwischen dem Ganzton und dem diatonischen Halbton pflegt man als das GROSSE LIMMA (gl) zu bezeichnen; dieses hat den numerischen Wert:

9/8 : 16/15 = 135/128

Im Prinzip reichen die bisher erwähnten Intervalle völlig aus, um jedes Intervall in der Tonleiter von Zarlino numerisch auszudrücken. Trotzdem ist es üblich, noch ein paar weitere Intervalle einzuführen, nämlich die KLEINE DIESIS (pD), die GROSSE DIESIS (gD) und die DOPPELTE DIESIS (dD).

So heisst etwa innerhalb eines Intervalls, das einen diatonischen Halbton umspannt (zum Beispiel [Mi, Fa]) das Intervall zwischen der nach unten alterierten oberen Grenznote und der nach oben alterierten unteren Grenznote (in unserem Fall also das Intervall zwischen Mi # i Fa♭) die KLEINE DIESIS (pD) und hat den Wert 3125/3072. Es ist zu bemerken, dass im Gegensatz zu den alterierten Grenznoten in Intervallen, die einen Ganzton oder einen kleinen Ton umspannen, beim diatonischen Halbton die erniedrigte obere Note tiefer als die erhöhte untere Note ist (Fa ♭ liegt tiefer als Mi #)[55].

In den einen kleinen Ton umspannenden Intervallen, heisst das Analogon zur kleinen Diesis GROSSE DIESIS (gD)[56] und hat den Wert 128/125.

In den einen Ganzton umspannenden Intervallen, heisst die Differenz zwischen den alterierten Grenztönen die DOPPELTE DIESIS (dD) und hat den Wert 648/625.

Der chromatische Halbton (sc) ist die Summe der grossen Diesis und der kleinen Diesis. Es ist leicht nachzuweisen, dass die doppelte Diesis die Summe der grossen Diesis und des Kommas von Didymus ist.

Dank der drei Typen von Noten (T, T', sd) der Tonleiter von Zar-

[55] Zwischen Mi und Fa ♭ oder zwischen Mi # und Fa finden wir ein als grosse Diesis bezeichnetes Intervall, das anschliessend definiert wird.
[56] In gewissen Werken wird dieses Intervall auch als Viertelton bezeichnet.

lino sind die Dur-Intervalle auch nicht homogen: So finden wir etwa drei Sorten von Quinten: die als natürlich bezeichnete Quinte 3/2 (zwischen Do und Sol), die Quinte mit der Charakteristik 40/27 (zwischen Re und La) und schliesslich die Quinte 45/32 (zwischen Si und Fa).

Es wäre sinnlos, eine Liste aller Intervalle zusammenzustellen, die in der Tonleiter von Zarlino vorkommen. Die Tafel zeigt den Aufbau und die Verteilung des Ganztons [Do, Re], des kleinen Tons [Re, Mi] und des diatonischen Halbtons [Mi, Fa].

Die numerischen Werte der Intervalle der Tafel werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Symbol	Bruch	Name	Definition	Cents
T	9/8	Ganzton		203,91
T'	10/9	Kleiner Ton		182,40
sd	16/15	Diatonischer Halbton		111,73
Cd	81/80	Komma von Didymus	T : T'	21,506
sc	25/24	Chromatischer Halbton	T' : sd	70,672
gl	135/128	Grosses Limma	T : sd	92,178
pD	3125/3072	Kleine Diesis	[Fa ♭, Mi #]	29,613
gD	128/125	Grosse Diesis	[Re #, Mi ♭]	41,058
dD	648/625	Doppelte Diesis	[Do #, Re ♭]	62,565

TRANSPOSITION

Die Tonleiter von Zarlino erlaubt die Transposition auf jede gewünschte Tonart, aber wir werden gleich sehen, dass hier eine Schwierigkeit auftritt, die im Pythagoreischen System nicht existiert: eine gleiche Note muss in den Tonleitern von zwei verschiedenen Tonarten nicht unbedingt übereinstimmen. So ist etwa das La der Tonleiter in *Sol maggiore*[57] um ein Komma höher als das La der Tonleiter in *Do maggiore*[58]. In diesem Fall könnte man das La als La (+Cd) bezeichnen. In dieser Tatsache ist die Schwierigkeit begründet, die Tonleiter von Zarlino für Instrumente mit fixen Inter-

[57] Zu Deutsch G-Dur. Wie am Anfang des Buches angekündigt, will ich die italienische Nomenklatur beibehalten. "Sol-Dur" klingt unschön und "G-Dur" könnte den Leser, der sich nicht mit der deutschen Nomenklatur auseinandergesetzt hat, verwirren.

[58] C-Dur.

vallen einzusetzen. Denken wir etwa an einen Flötisten, dessen Flöte perfekt auf die Tonleiter von Zarlino in *Do maggiore*[59] abgestimmt wäre. Spielt dieser ein Stück in *Sol maggiore*[60], bemerkt ein Zuhörer mit einem ausserordentlichen Gehör, dass das La der Flöte etwas falsch tönt.

Lasset uns anschliessend die Werte der Noten der nach *Sol maggiore* und nach *Si maggiore* transponierten Tonleiter von Zarlino berechnen, wie sie in der nachfolgenden Tafel dargestellt sind:

SOL MAGGIORE:

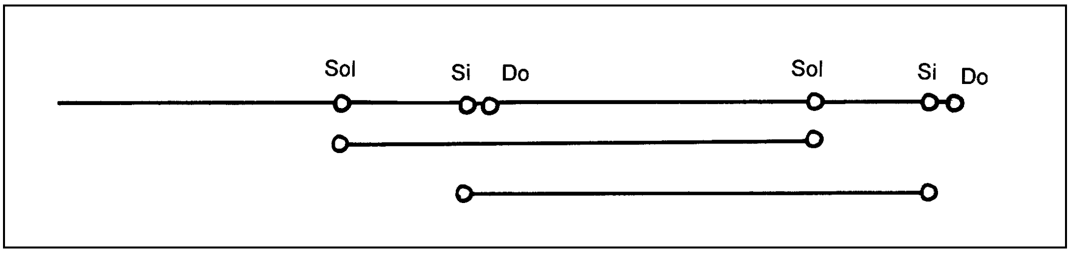
Anhand von aufeinanderfolgenden Quinten können wir erkennen, dass die Note Fa zu Fa # wird.

	Sol	3/2
T		
	La	3/2 · 9/8 = 27/16
T'		
	Si	27/16 · 16/9 = 15/8
sd		
	Do	15/8 · 16/15 = 2; auf die Oktave reduziert: 1
T		
	Re	1 · 9/8 = 9/8
T'		
	Mi	9/8 · 10/9 = 5/4
T		
	Fa #	5/4 · 9/8 = 45/32
sd		
	Sol	45/32 · 16/15 = 3/2

Das natürliche Fa wird folgendermassen erhalten:

Fa = FA # ♭ = 24/25 · 45/32 = 27/20.

[59] C-Dur.
[60] G-Dur.



Transposition nach Sol maggiore und nach Si maggiore

SI MAGGIORE:

Anhand von aufeinanderfolgenden Quinten können wir erkennen, dass hier die Noten Fa, Do, Sol, Re und La alteriert werden.

	Si	15/8
T		
	Do #	15/8 · 9/8 = 135/64; auf die Oktave reduziert: 135/128
T'		
	Re #	135/128 · 10/9 = 75/64
sd		
	Mi	75/64 · 16/15 = 5/4
T		
	Fa #	5/4 · 9/8 = 45/32
T'		
	Sol #	45/32 · 10/9 = 25/16
T		
	La #	25/16 · 9/8 = 225/128
Sd		
	Si	225/128 · 16/15 = 15/8

Auch hier können die alterierten Noten folgendermassen berechnet werden: N = N #♭. In *Sol maggiore* finden wir ein je um ein Komma erhöhtes La und Fa #, während in *Si maggiore* das Do #, das Fa # und das La # ein Komma höher sind als in *Do maggiore*.

DAS SYSTEM VON MERCATOR-HOLDER

Im XVII Jh. schufen zwei voneinander unabhängige Forscher ein System, um die Pythagoreische Tonleiter durch eine Unterteilung der Oktave in 53 gleichgrosse Mikrointervalle anzunähern. Dieses Intervall heisst KOMMA VON MERCATOR (CM) und entspricht der dreiundfünfzigsten Wurzel aus 2. Einer der Erfinder des Systems, das später als die Tonleiter der Musiker benannt wurde, war der Engländer William Holder (1614-96); der andere war der als Nicolaus Mercator[61] bekannte Deutsche, der berühmte Mathematiker und Astronom, dem wir unter anderem eine tiefe Untersuchung im Bereich der konvergenten Reihen und der Logarithmen verdanken. Mercator fand die Reihe

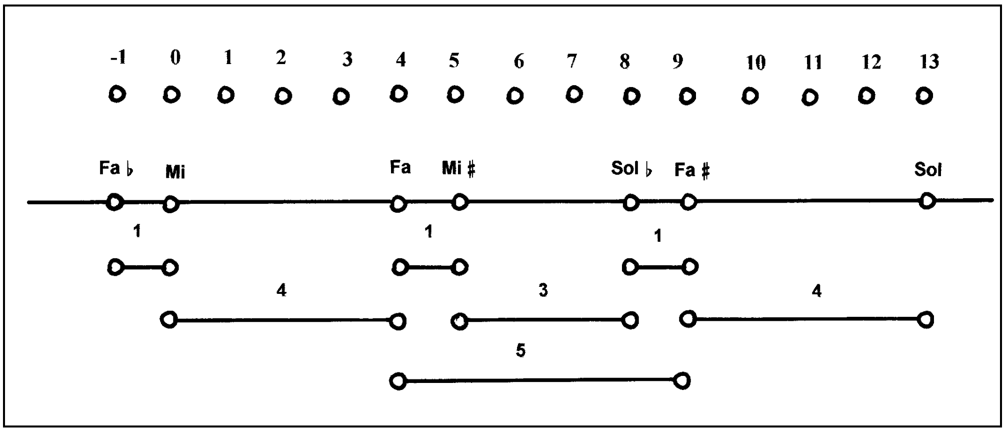
$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

vor der berühmten Formel von Taylor, und schrieb das Buch *Logarithmotechnia.*

Im System von Mercator und Holder, wird der Ton in 9 Mikrointervalle (CM) mit dem Wert $\sqrt[53]{2} = 1{,}0131\dots$ unterteilt. Der Diatonische Halbton (zum Beispiel zwischen Si und Do) entspricht 4 CM und der chromatische Halbton ([Si ♭, Si] oder [Fa, Fa #]) entspricht 5 CM. Die Oktave besteht also aus

$$5 \cdot 9 + 2 \cdot 4 = 53$$

Kommas von Mercator. Betrachten wir wie im Fall der Tonleiter von Pythagoras eine graphische Darstellung des Intervalls [Mi, Sol]:



Intervalle der Tonleiter von Mercator

Lasset uns die numerischen Werte der Intervalle der Tonleitern von Pythagoras und von Mercator-Holder miteinander vergleichen:

[61] Latinisierung von Kaufmann.

Pythagoreisches Intervall	*Cents*	Intervalle von Mercator	Anzahl Kommas	*Cents*	Differenz in *Cents*
Limma	90,224	Diatonischer Halbton	4	90,566	0,34104
Apotom	113,68	Chromatischer Halbton	5	113,20	0,47745
Ton (von P.)	203,91	Ton (von M.)	9	203,77	0,13641
Terz	407,82	Terz	18	407,54	0,27283
Quinte	701,95	Quinte	31	701,88	0,068208

Jetzt taucht die Frage auf: Warum wird im System von Mercator-Holder die Oktave ausgerechnet in 53 Kommas aufgeteilt und nicht in eine andere Anzahl Mikrointervalle? Wie wurde vorgegangen, um auf die Zahl 53 zu stossen?

Anschliessend seien zwei Wege angegeben um zu diesem Resultat zu gelangen. Beide standen bereits den Wissenschaftern des XVII Jh. zur Verfügung.

ERSTE LÖSUNG

Stellen wir uns zuerst ein System vor, bei dem der Ganzton aus $r + s$ Kommas aufgebaut ist, die chromatischen Halbtöne aus r und die diatonischen Halbtöne aus s Kommas bestehen. Je nach den Werten für r und s erhalten wir verschiedene Werte für das Komma. Betrachten wir graphisch die Situation für r grösser als s.

Die Oktave enthält	$5 \cdot r + 7 \cdot s$	Kommas
Die Quinte enthält	$3 \cdot r + 4 \cdot s$	Kommas
Die Terz enthält	$2 \cdot r + 2 \cdot s$	Kommas

r muss nicht unbedingt grösser als s sein; r kann kleiner als s oder sogar gleich gross wie s sein.

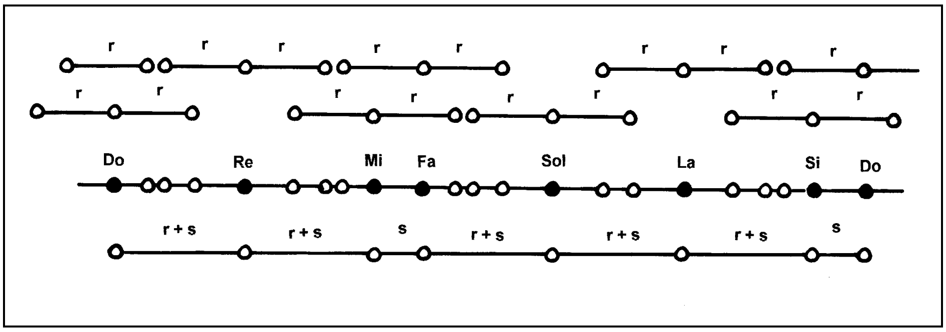
Nun können wir systematisch die verschiedenen Fälle berechnen, die sich ergeben, wenn wir für r und s je eine kleine natürliche Zahl einsetzen. Hier beschränken wir uns auf die Fälle, bei denen r grösser als s ist und der grösste gemeinsame Teiler (ggT) von r und s gleich 1 ist[62].

[62] r und s sollen also Teilerfremd sein.

r	2	3	4	…	3	5	…	4	5	…	5	7	…
s	1	1	1		2	2		3	3		4	4	

Für jedes geordnete Wertepaar (r, s) können wir die entsprechenden Werte für das Komma, den diatonischen Halbton, den chromatischen Halbton, den Ganzton, die Terz und die Quinte berechnen.

Unter all den hier betrachteten Wertepaaren liefert der Fall (r, s) = (5, 4) die reinste Quinte, da diese um weniger als dem zehnten Teil eines *Cent* von der reinen Quinte 3/2 abweicht. Auch die Annäherungen für das Apotom (hier für den chromatischen Halbton), das Limma (hier für den diatonischen Halbton), den pythagoreischen Ganzton (hier für den Ganzton) und die Terz sind sehr befriedigend.



Konstruktion der Tonleiter von Mercator

Jede bessere Annäherung an die pythagoreische Tonleiter muss die Oktave in eine grössere Anzahl Kommas aufteilen. Wie wir beim zweiten Lösungsweg auf der Suche nach der Zahl 53 sehen werden, wäre die nächste Näherung, die das Resultat verbessern würde 306; wenn wir bedenken, dass die Zahl 53 bereits zu gross ist, um sich in die musikalische Praxis umsetzen zu lassen, insbesondere was die Konstruktion von Tasteninstrumenten anbelangt, ist es offensichtlich, dass die Unterteilung der Oktave in 306 Kommas nur eine theoretische Unterhaltung wäre.

Tafel von Mercator

		Werte in Cents					
r, s	Anzahl Kommas in einer Oktave	Komma	Chromatischer Halbton	Diatonischer Halbton	Ganzton	Terz	Quinte
2, 1	17	70,588	141,17	70,588	211,76	423,52	705,88
3, 1	22	54,545	163,63	54,545	218,18	436,36	709,09
4, 1	27	44,444	177,77	44,444	222,22	444,44	711,11
3, 2	29	41,379	124,13	82,758	206,89	413,79	703,44
5, 2	39	30,769	153,84	61,538	215,38	430,76	707,69
4, 3	41	29,268	117,07	87,804	204,87	409,75	702,43
5, 3	46	26,086	130,43	78,260	208,69	417,39	704,34
5, 4	**53**	22,641	113,2	90,566	203,77	407,54	701,88
7, 4	63	19,047	133,33	76,190	209,52	419,04	704,76
Vergleich mit der pythagoreischen Tonleiter		Komma von P. **CP**	Apotom **A**	Limma **t**	Ganzton **T**	Pythagoreische Terz	Pythagoreische Quinte
		23,460	113,68	90,224	203,91	407,82	701,95

In unserer Lösung haben wir ausschliesslich die Fälle betrachtet, bei denen r grösser als s ist. Die Fälle mit r kleiner als s liefern gewisse Annäherungen an die Tonleiter von Zarlino. Die Fälle mit r = s entsprechen dem gleichmässigen Temperament. Der Fall r = s = 1 liefert das in der Musik üblichste Temperament, bei dem die Oktave in 12 gleichgrosse Halbtöne eingeteilt wird, wie es bei einem richtig gestimmten Klavier der Fall ist.

Für r = s = 2 erhalten wir die Vierteltöne von Haba, für r = s = 3 finden wir Sechsteltöne, wie sie etwa Ferruccio Busoni vorschlug.

Obwohl sich die 53-Stufen-Tonleiter in der Praxis nie durchsetzen konnte, pflegen die Musiker noch heute zu sagen, ein Ton entspreche 9 Kommas, was streng genommen nur für die Tonleiter von Mercator-Holder korrekt ist, obwohl 9 Kommas von Pythagoras eine recht gute Annäherung an den pythagoreischen Ganzton bilden und andererseits 9 Kommas von Didymus ebenfalls eine gute Annäherung an den kleinen Ton von Zarlino bilden.

Zweite Lösung

Der zweite Lösungsweg um die Zahl 53 als ideale Zahl für die Unterteilung der Oktave in Kommas zu finden, geht von der Minimierung des Intervalls aus, das dem pythagoreischen Komma entspricht.

Da unser Gehör der Quinte die grösste Empfindung von Konsonanz nach der Oktave beimisst, sind wir daran interessiert, dass alle Quinten eine gute Annäherung an den Wert 3/2 aufweisen. Überlagern wir im System von Pythagoras von einer Grundnote aus (mit Frequenz 1) 12 Quinten und überlagern wir andererseits von der gleichen Grundnote ausgehend 7 Oktaven, erhalten wir zwei Noten, die sich nur durch ein kleines Intervall unterscheiden, das wir als das Komma von Pythagoras mit dem Wert $\frac{3^{12}}{2^{19}}$ kennen.

In der gleichmässig temperierten Tonleiter wird dieses Komma gleichmässig auf die einzelnen Töne verteilt. Wäre das Komma von Pythagoras noch kleiner, würden sich die Quinten noch genauer dem Wert 3/2 nähern. Wir versuchen also, folgendes Problem zu lösen:

Es sind zwei natürliche Zahlen p und q gesucht, so dass das Intervall zwischen einem um p Quinten erhöhten Ton und dem um q Oktaven erhöhten Ton möglichst klein wird.

Wie muss man vorgehen um die optimalen Zahlen p und q zu ermitteln? Verfügt man über einen elektronischen Computer (Mercator und Holder hatten keinen) oder sehr viel Geduld, kann die folgende Tafel berechnet werden, bis man auf ein befriedigendes Resultat stösst (wir suchen eine Annäherung an 1, wenn wir uns in Bruchform ausdrücken, an 0, wenn wir mit logarithmischen Masseinheiten rechnen). Unter den ersten Werten, die berechnet wurden, zeichnet sich der Wert p = 12 aus, der uns das Komma von Pythagoras liefert. Hier wird uns klar, dass die Zahl 12 in welche die Oktave in der modernen gleichmässig temperierten Tonleiter aufgeteilt wird, alles andere als zufällig oder willkürlich ist.

p	q	Erster Ton	Zweiter Ton	Komma	Dezimalwert	*Cents*
1	1	3/2	2	4/3	1,3333	498,04
2	1	9/4	2	9/8	1,125	203,91
3	2	27/8	4	32/27	1,1851	294,13
4	2	81/16	4	81/64	1,2656	407,82
5	3	243/32	8	256/243	1,0534	90,224
6	4	729/64	16	1024/729	1,4046	588,26
7	4	$\frac{2187}{128}$	16	$\frac{2187}{2048}$	1,0678	113,68
8	5	$\frac{6561}{256}$	32	$\frac{8192}{6561}$	1,2485	384,35
9	5	$\frac{19683}{512}$	32	$\frac{19683}{16384}$	1,2013	317,59
10	6	$\frac{59049}{1024}$	64	$\frac{65536}{59049}$	1,1098	180,44
11	6	$\frac{177147}{2048}$	64	$\frac{177147}{131072}$	1,3515	521,5
12	7	$\frac{531441}{4096}$	128	$\frac{531441}{524288}$	1,0136	23,460
13	8	$\frac{1594323}{8192}$	256	$\frac{2097152}{1594323}$	1,3153	474,58
...						

Aber offensichtlich haben Mercator und Holder als intelligente Personen die Zahl 53 nicht durch stures Berechnen aller möglichen Kombinationen dieser Tafel ermittelt. Man bedenke, dass dies mit einer enormen Arbeit verbunden gewesen wäre, da die Grösse der Zweier- und Dreierpotenzen die Rechnungen wesentlich erschwert hätten. Si ist etwa 2^{25} bereits eine Zahl mit 8 Dezimalstellen.

Im XVII Jh. verfügten die Wissenschafter bereits über die im vorangehenden Jh. von John Neper (1550-1617) und Jost Bürgi eingeführten Logarithmen, sowie über die Rechnung mit Kettenbrüchen, die auf den italienischen Mathematiker Bombelli (1522(?)-1572) zurückgeht.

Unser Problem kann folgendermassen formuliert werden: Es müssen p und q gefunden werden, so dass $\left(\frac{3}{2}\right)^p$ eine möglichst gute Annäherung an 2^q bildet. Wenn es möglich wäre ein Komma zu finden mit dem Wert 1 (oder mit dem Wert 0 in der logarithmischen Einheit), würde sich in dem betreffenden System der Quintenzirkel wieder schliessen. Dies ist aber leider nicht möglich, denn sonst könnten wir die Gleichung $\left(\frac{3}{2}\right)^p = 2^q$ erfüllen, die wir auch so ausdrücken können: $3^p = 2^{p+q}$

Diese Gleichung ist offensichtlich unerfüllbar, da eine Potenz mit Base 3 nur dann einer Potenz mit Base 2 gleich sein kann, wenn der Exponent 0 ist. Wenn wir beide Seiten der Gleichung logarithmieren, finden wir:

$$p \cdot \log 3 = (p + q) \cdot \log 2$$

$$\frac{p}{p+q} = \frac{\log 2}{\log 3}$$

Könnte die Zahl $\frac{\log 2}{\log 3}$ als Quotient von zwei ganzen Zahlen, p und (p + q) ausgedrückt werden, wäre die um p Quinten erhöhte Note gleich der um q Oktaven erhöhten Note. Dieser Fall ist aber unmöglich, weil die obige Gleichung nicht erfüllt werden kann, und weil der Quotient $\frac{\log 2}{\log 3}$ irrational ist. Daraus kann auch geschlossen werden, dass es unmöglich ist in einem auf der natürlichen Quinte basierten System, die Schwierigkeiten, die uns das Komma schafft, aus dem Weg zu räumen.

Obwohl die Grenzsituation nicht existiert, haben wir die Möglichkeit, sie beliebig anzunähern. Zu diesem Zwecke können wir die Rechnung mit Kettenbrüchen einsetzen, die hier kurz vorgestellt wird.

Ein Bruch F mit der Form $F = P_1 + \cfrac{1}{P_2 + \cfrac{1}{P_3 + \cfrac{1}{P_4 + \ldots + \cfrac{1}{P_K + \ldots}}}}$

in dem alle P_i natürliche Zahlen oder 0 sind, heisst ein Kettenbruch. Dieser kann endlich oder unendlich sein. Aus praktischen Gründen stellen wir unseren Kettenbruch F folgendermassen dar:

$$F = [P_1, P_2, P_3, \ldots, P_k, \ldots]$$

Die Kettenbrüche erlauben es, jede beliebige reelle Zahl (dabei spielt es keine Rolle, ob diese rational oder irrational ist) als Quotient von zwei ganzen Zahlen beliebig anzunähern.

Hier sei die Technik beschrieben, die wir anwenden, wenn wir eine beliebige reelle Zahl R annähern wollen:

Zuerst berechnen wir die für unsere Annäherung notwendigen P_i. Jede Annäherung entsteht, indem wir nur die ersten n Elemente unter den P_i beachten und die anderen vernachlässigen. Oder mit anderen Worten: wir erhalten die n-te Approximation, indem wir P_i gleich 0 setzen für alle i grösser als n.

Dann wird der Ausdruck, den wir erhalten, nach den Regeln der Bruchrechnung umgeformt.

Lasset uns diese Technik an der Zerlegung in einen Kettenbruch der Zahl 2,15 erproben. P_1 ist der ganzzahlige Anteil von R und entspricht zugleich der ersten Annäherung an R. Der ganzzahlige Anteil von 2,15 ist 2.

R wird als Summe von P_1 und einem Bruch dargestellt, der 1 als Zähler und den Reziprokwert des Rests (von 0,15 in unserem Beispiel) als Nenner hat. In unserem Beispiel ist der Nenner 6,666... Dieser Nenner wird wieder in seinen ganzzahligen Anteil (6 im Beispiel) und den Rest (0,666...) aufgeteilt. Der ganzzahlige Anteil entspricht dem nächsten P_i; der Reziprokwert des Rests wird zum Nenner des nächsten Teilbruchs und muss wiederum in den ganzzahligen Anteil und den Rest unterteilt werden, usw.

Wir haben einen Anhang der Programmierung der Zerlegung einer Zahl in Kettenbrüche gewidmet. In diesem Anhang, den wir 'EIN PROGRAMM IN PASCAL' betitelt haben, wird ein System vorgestellt, mit dem Rechnungen mit ganzen Zahlen beliebiger Stellenzahl durchgeführt werden können.

Im Fall von R = 2,15 erhalten wir den folgenden Kettenbruch: F=[2,6,1,2]

Berechnen wir die aufeinanderfolgenden Annäherungen in unserem Beispiel anhand der herkömmlichen Regeln der Bruchrechnung, erhalten wir:

Annäherung Nummer	Bruch	Dezimalwert
1	2	2
2	13/6	2,1666
3	15/7	2,1428
4	43/20	2,15

Im Fall von rationalen Zahlen, führen aufeinanderfolgende Annäherungen stets zu der genauen Zahl.

BEISPIEL: Die Zerlegung der Quadratwurzel aus 2 (1,41421356...) in einen Kettenbruch gibt uns das folgende Resultat:

F = [1, 2, 2, 2, 2, ...]

Annäherung Nummer	Bruch	Dezimalwert
1	1	1
2	3/2	1,5
3	7/5	1,4
4	17/12	1,4166
5	41/29	1,4137

BEISPIEL: Der durch den Wert $\frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0{,}6180339...$ festgelegte Goldene Schnitt, gibt uns:

F = [0, 1, 1, 1, 1, ...]

Annäherung Nummer	Bruch	Dezimalwert
1	0/1	0
2	1/1	1
3	1/2	0,5
4	2/3	0,666...
5	3/5	0,6

In diesem speziellen Beispiel beobachten wir, dass sowohl die Zähler, als auch die Nenner der aufeinanderfolgenden Annäherungen die Glieder der Folge von Fibonacci[63] durchlaufen.

BEISPIEL: Die Zerlegung von Pi (π = 3,1415926...) in einen Kettenbruch gibt uns die folgenden Werte:

Annäherung Nummer	Bruch	Dezimalwert
1	3	3
2	22/7	3,142857
3	333/106	3,141509
4	355/113	3,141592

Der Zweck dieses kleinen Ausflugs in den Bereich der Kettenbrüche hatte den Zweck, aufeinanderfolgende Annäherungen an den

[63] Auch Leonardo di Pisa oder Leonardo Bonacci.

Wert $\frac{p}{p+q} = \frac{\log 2}{\log 3} = 0{,}630929753...$ finden zu können. Dabei muss bemerkt werden, dass der Wert dieses Quotienten vom verwendeten Logarithmensystem unabhängig ist. Entwickeln wir nun diesen Wert in einen Kettenbruch, erhalten wir die folgenden Werte für die P_i:

F = [0, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 1, 5, 2, 23, 2, 2, ...]

Die ersten 13 Annäherungen sind in der folgenden Tafel dargestellt:

N°	Bruch	Quinte	Oktave	Komma
1	0	-	-	-
2	1	1	0	701,96
3	1/2	1	1	498,04
4	2/3	2	1	203,91
5	5/8	5	3	90,224
6	12/19	**12**	7	23,460
7	41/65	41	24	19,844

N°	Bruch	Quinte	Oktave	Komma
8	53/84	**53**	31	3,6150
9	306/485	306	179	1,7697
10	665/1054	665	389	0,075575
11	$\frac{1560}{24727}$	15601	9126	0,031520
12	$\frac{31867}{50508}$	31867	18641	0,012534
13	$\frac{79335}{125743}$	79335	46408	

Es sei in Erinnerung gerufen, dass die Zähler der Brüche der Anzahl Quinten, die Nenner der Summe der Anzahl Quinten und Oktaven entsprechen. Die letzte Reihe gibt das Komma in *Cents* an, das den verschiedenen Systemen entspräche.

Die Tafel 'Die Noten von Mercator', die mit der Tabellenkalkulation *StarCalc 5.1* des Programms *StarOffice v.5.1a* von *Sun Microsystems, Inc*. berechnet wurde, stellt die numerischen Werte der Tonleiter von Mercator dar. Das Programm konnte auf der Webseite www.sun.com/download/ gratis runtergeladen werden.

Die nächste Tafel zeigt, wie das Rechnungsblatt konstruiert wurde. Die Pfeile zeigen an, in welcher Richtung die Zellen kopiert werden müssen, um das Blatt zu vervollständigen.

	A	B	C	D	E	F
26		▲	▲	▲	▲	▲
27		▲	=CONCATENATE(C34;A30)	▲	▲	▲
28		MOD(B29+22;53)	Fa	▲	▲	▲
29		0	Do	=(2^(1/53))^B30	▲	▲
30	♭	MOD(B29+31;53)	Sol	▼	▲	▲
31	♯	▼	Re	▼	=E$32*(2^(1/53))^(B31-B$32)	▲
32		▼	La	▼	440	1200*(LOG10(D32)/LOG10(2))
33		▼	Mi	▼	=E$32*(2^(1/53))^(B33-B$32)	▼
34		▼	Si	▼	▼	▼
35		▼	=CONCATENATE(C28;A31)	▼	▼	▼
36		▼	▼	▼	▼	▼

Die Noten von Mercator

Potenz	Note	Charakteristik für Do = 1	Frequenz für La=440	Intervall zu Do in *Cents*
51	Mi ♭♭♭♭	1,948365	508,078246	1154,716981
29	Si ♭♭♭♭	1,461216	381,043671	656,603774
7	Fa ♭♭♭	1,095869	285,771494	158,490566
38	Do ♭♭♭	1,643739	428,640353	860,377358
16	Sol ♭♭♭	1,232756	321,467599	362,264151
47	Re ♭♭♭	1,849061	482,182401	1064,150943
25	La ♭♭♭	1,386741	361,622553	566,037736
3	Mi ♭♭♭	1,040015	271,206229	67,924528
34	Si ♭♭♭	1,559960	406,793317	769,811321
12	Fa ♭♭	1,169924	305,082967	271,698113
43	Do ♭♭	1,754817	457,606422	973,584906
21	Sol ♭♭	1,316061	343,191295	475,471698
52	Re ♭♭	1,974014	514,766660	1177,358491
30	La ♭♭	1,480452	386,059785	679,245283
8	Mi ♭♭	1,110295	289,533431	181,132075
39	Si ♭♭	1,665377	434,283036	883,018868
17	Fa ♭	1,248984	325,699445	384,905660
48	Do ♭	1,873402	488,529919	1086,792453
26	Sol ♭	1,404996	366,383004	588,679245
4	Re ♭	1,053705	274,776427	90,566038
35	La ♭	1,580496	412,148402	792,452830
13	Mi ♭	1,185325	309,099123	294,339623
44	Si ♭	1,777918	463,630418	996,226415
22	Fa	1,333386	347,709114	498,113208
0	Do	1	260,771561	0
31	Sol	1,499941	391,141931	701,886792
9	Re	1,124911	293,344891	203,773585
40	La	1,687301	**440**	905,660377
18	Mi	1,265426	329,986999	407,547170
49	Si	1,898064	494,960997	1109,433962
27	Fa #	1,423492	371,206122	611,320755
5	Do #	1,067577	278,393623	113,207547
36	Sol #	1,601302	417,573982	815,094340
14	Re #	1,200929	313,168148	316,981132
45	La #	1,801323	469,733715	1018,867925
23	Mi #	1,350939	352,286406	520,754717
1	Si #	1,013164	264,204395	22,641509
32	Fa ##	1,519686	396,290979	724,528302
10	Do #	1,139720	297,206525	226,415094
41	Sol ##	1,709512	445,792223	928,301887
19	Re ##	1,282084	334,330995	430,188679
50	La ##	1,923050	501,476734	1132,075472
28	Mi ##	1,442231	376,092733	633,962264
6	Si ##	1,081630	282,058437	135,849057
37	Fa ###	1,622382	423,070986	837,735849
15	Do ###	1,216738	317,290738	339,622642
46	Sol ###	1,825036	475,917357	1041,509434
24	Re ###	1,368723	356,923955	543,396226
2	La ###	1,026502	267,682420	45,283019
33	Mi ###	1,539692	401,507810	747,169811
11	Si ###	1,154723	301,118994	249,056604
42	Fa ####	1,732017	451,660696	950,943396
20	Do ####	1,298961	338,732176	452,830189
51	Sol ####	1,948365	508,078246	1154,716981

In diesem Kapitel benutzte Kürzel		
Symbol	Bedeutung	System
T	Ganzton 9/8	P und Z
t	Limma	P
A	Apotom	P
CP	Komma von Pythagoras	P
T'	Kleiner Ton 10/9	Z
sd	Diatonsicher Halbton 16/15	Z
sc	Chromatischer Halbton 24/25	Z
Cd	Komma von Didymus	Z
gl	Grosses Limma	Z
pD	Kleine Diesis	Z
gD	Grosse Diesis	Z
dD	Doppelte Diesis	Z
CM	Komma von Mercator	53

Traditionsgemäss wird manchmal die pythagoreische Tonleiter als Tonleiter der Violinisten, die Tonleiter von Zarlino als die Tonleiter der Physiker, die Tonleiter von Mercator und Holder als Tonleiter der Musiker und schliesslich die gleichmässig temperierte Tonleiter als Tonleiter der Pianisten bezeichnet.

Dieses Kapitel soll keinen allgemeinen Überblick über das grosse Gebiet der musikalischen Tonleitern und der verschiedenen temperierten Stimmungen bieten. Hier wurden nur ein paar der wichtigsten Systeme als Einführung in das Gebiet herausgepflückt[64].

[64] Hier seien die folgenden Werke aufgeführt:
Blackwood, Easly, *The Structure of Recognisable Diatonic Tunings*. Princeton, 1985.
Gandillot, Maurice, *Essai sur la gamme*. Gauthier-Villars, Paris, 1906.
Isacoff, Stuart, *Temperament: The Idea That Solved Music's Greatest Riddle,* Ed. Alfred A. Knopf.
Jorgensen, Owen H., Tuning, Containing The Perfection of Eighteenth-Century Temperament, The Lost Art of Nineteenth-Century Temperament and The Science of Equal Temperament, Michigan State University Press, East Lansing, 1991.
Neumaier, Wilfried, *Was ist ein Tonsystem?* Peter Lang, Frankfurt am Main, 1986.
Piles Estellés, Jaime, *Intervalos y gamas*. Valencia, 1982.

Elektroakustische Instrumente

Ein Buch, das sich hauptsächlich mit der Erzeugung und der Wahrnehmung von Schall, insbesondere von Musikalischem Klang auseinandersetzt, wäre unvollständig, wenn nicht wenigstens auf die elektroakustischen und elektronischen (wie wir gleich sehen werden, sind die beiden Begriffe nicht identisch) Instrumente hingewiesen wäre.

Die Grenze zwischen einem elektroakustischen und einem elektronischen Instrument ist nicht immer scharf gezeichnet. Üblicherweise wird eine Musikinstrument als ELEKTROAKUSTISCH bezeichnet, wenn der Schall mit Mitteln erzeugt wird, die der klassischen Akustik angehören, um anschliessend auf elektronischem Wege verstärkt zu werden. In den ELEKTRONISCHEN INSTRUMENTEN hingegen wird der Schall direkt auf elektronischem Wege erzeugt, ohne Unterstützung von Schallwellen. Es gibt natürlich Zwischenstufen.

Leider lassen sich die Begriffe aus dem Bereich der Tonproduktion nicht auf den Bereich der musikalischen Komposition übertragen: die auf der Manipulation von Tonbandaufnahmen akustischer Erscheinungen basierte Musik wird nicht als elektroakustische Musik bezeichnet, wie es zu erwarten wäre, sondern als konkrete Musik, nach dem Vorschlag eines der Vorkämpfer dieser Sorte von Musik, Pierre Schaeffer. Die Erschaffer Konkreter Musik gehen von Tonbandaufnahmen alltäglicher Geräusche aus, die dann im Sinne eines *Collage* zusammengeklebt werden, vielfach nach deren elektronischen Bearbeitung.

Das Zeitalter der konkreten Musik wurde dank dem Erscheinen auf dem Markt der ersten Tonbandgeräte in den Vierzigerjahren des XX Jh. möglich, da das auf Platten festgehaltene Schallmaterial nicht geklebt werden konnte, und die Montage von Lichttonstreifen, etwa nach dem Verfahren von Vogt, das seit den Zwanzigerjahren bekannt war, zu langsam und zu teuer war.

Als ELEKTRONISCHE MUSIK bezeichnet man die Musik, die ausschliesslich auf elektronischem Weg erzeugte Töne einsetzt. Die Kombination der Techniken der konkreten Musik und der elektronischen Musik wird als ELEKTROAKUSTISCHE MUSIK bezeichnet.

Schliesslich wurde die KYBERNETISCHE MUSIK geschaffen, die auch als COMPUTERMUSIK bezeichnet wird, und bei welcher der Schall restlos mit einem digitalen Computer berechnet wird.

Aber lasset uns zu unseren elektroakustischen und elektronischen Instrumenten zurückkehren. Eines der populärsten elektroakustischen Instrumente ist die ELEKTRISCHE GITARRE. Die elektrischen Gitarren tauchten ungefähr ab 1935 auf dem Markt auf. Wir haben es hier mit einem typischen elektroakustischen Instrument zu tun, da die Schwingungen mit einem Medium der klassischen Akustik, der schwingenden Saite, erzeugt werden. Spielen wir aber auf der elektrischen Gitarre ohne den elektronischen Verstärker einzuschalten, erhalten wir eine wesentlich schwächere Wiedergabe, als bei der klassischen Gitarre, da die elektrische Gitarre keinen eigentlichen Resonanzboden aufweist. Die Funktionsweise dieses Instrumentes kann mit derjenigen des ersten Telephons von Bell verglichen werden. Eine Spule, der Pick-up, meist mit einem magnetisierten Kern versehen, befindet sich in geringer Entfernung von jeder einzelnen Saite. Da die Saiten aus Stahl sind, beeinflussen die Schwingungen derselben das magnetische Feld der Spulenkerne, wodurch schwache Wechselspannungen entstehen, die elektronisch verstärkt werden können. Der so erhaltene Schall kann auf elektronischem Wege weiter verarbeitet werden, um einen grossen Klangreichtum zu erhalten. Die Lage der Pick-ups hat einen entscheidenden Einfluss auf die Klangfarbe und die Intensität der erzeugten Töne. Rüsten wir eine elektrische Gitarre mit nichtmetallischen Saiten aus, bleibt uns nur noch eine akustische Gitarre ohne Resonanzboden übrig.

Ein Instrument, das durch die Art, die Schwingungen zu erfassen an die elektrische Gitarre erinnert, ist das elektrische Klavier, das um 1930 durch den Physiker Nernst zusammen mit der berühmten Klavierfabrik Bechstein erbaut wurde. Das Resultat war das als Neo-Bechstein bekannte Instrument. Beim elektrischen Klavier kann die Intensität des Tons noch nach dem Niederdrücken der Taste mit einem Pedal dosiert werden. Der mechanische Teil und die Funktion des rechten Pedals wurden vom klassischen Klavier übernommen. Bei modernen elektrischen Klaviere pflegen Stahlstäbe die Funktion der Saiten zu erfüllen.

Um 1935 erschuf der Pfarrer Pujet von Paris einen Riesen unter den elektroakustischen Instrumenten, die er als *"Orgue Radio-Synthétique"* bezeichnete. Es handelte sich dabei um eine grossräumig angelegte Orgel mit vier Manualen und einem Pedalier. Die Partialtöne wurden mit Mikrophonen individuell erfasst. Mehr als 50 Register dienten dazu, die Intensität einzustellen, mit der die verschiedenen Kanäle an der elektronischen Synthese teilnehmen sollten.

In den modernen elektronischen Instrumenten, Synthesizern und Orgeln, werden die Klänge aus in elektronischen Schwingkreisen erzeugten Tönen zusammengesetzt.

Eine mögliche Form der Synthese besteht in der Überlagerung von sinusförmigen Partialtönen. Andere Systeme arbeiten mit Oszillatoren, die periodische Wellen in verschiedenen Formen erzeugen. Eine weitere Art, Töne mit verschiedenen Klangfarben herzustellen, besteht im Herausfiltern einzelner Frequenzen aus einer Sägekurve (die bekanntlich alle sinusoidalen Partialtöne enthält, wobei die Amplituden umgekehrt proportional zum jeweiligen Index sind) oder einer rechteckigen Kurve mit elektronischen Filtern. Dieses letztere System kann als subtraktiv bezeichnet werden. Die Übergangserscheinungen können angenähert werden, indem man die so erhaltenen Wellen mit verschiedenen Formen moduliert. Nicht alle historischen Instrumente beruhten auf diesem Prinzip, wie wir am Beispiel des *Trautoniums* und der *Hammondorgel* sehen werden.

Eines der ersten elektronischen Instrumente war das *Dynamophone* von Cahill, das um 1906 konstruiert wurde. Es handelte sich um einen elektronischen Synthesizer im modernen Sinne des Wortes. Der durch Helmholtz erbaute Synthesizer zur Erzeugung von Vokalen und derjenige, den R. Koenig aus Sirenen aufbaute verdienen das Adjektiv 'elektronisch' nicht. Ein elektronischer Synthesizer ist ein Gerät, das nach gewissen Regeln die Partialtöne eines Tons mischt, um eine gewisse Klangfarbe zu erreichen. Der Synthesizer von Cahill war eine Riesenmaschine, die nach zeitgenössischen Zeugen mehrere Tonnen schwer war. Es handelte sich um ein Tasteninstrument, an das verschiedene Manuale angeschlossen werden konnten. Da mit dem Gerät Töne mit beliebigen Frequenzen erzeugt werden konnten, fand Ferruccio Busoni in ihr ein geeignetes Werkzeug zur Erzeugung seiner Mikrointervalle und er lobte die Erfindung in seinem Buch *"Entwurf einer neuen Ästhetik der Tonkunst"*.

Das *Superpiano* von Spielmann aus dem Jahr 1922 war ein Tasteninstrument, bei dem die Töne auf photoelektrischem Wege erzeugt wurden: gleichmässig kreisende Scheiben spiegelten einen Lichtstrahl auf eine Photozelle, die den Strom im Takt der schwarzen und spiegelnden Zonen auf der Scheibe unterbrachen.

Ein anderes bemerkenswertes historisches Instrument ist das *Trautonium* (nach seinem Erfinder Trautwein), aus dem Jahre 1930. Dieses Instrument besteht im Wesentlichen aus einer Metallstange, auf welche in kurzem Abstand eine Stahlsaite aufgezogen wurde. Sowohl die Stange, wie auch die Saite, die voneinander elektrisch isoliert sind, sind mit einem elektronischen Schwingungserreger verbunden. Das *Trautonium* wird gespielt, indem man mit dem Finger in bestimmten Abständen die Saite auf die Stange drückt. Je nach der Position des Kontaktes, verändert sich der elektrische Widerstand und die Frequenz des erzeugten Tons verändert sich demenstprechend. Dieses Instrument bietet ähnliche Möglichkeiten, wie eine Violine, wobei der Bogen durch die verschiedenen elektrischen Steuerungen ersetzt wird.

Unter allen elektroakustischen Instrumenten, ist eines der populärsten die *Hammondorgel*, welche im Jahr 1934 erbaut und über Jahrzehnte ständig verbessert wurde. Wie beim *Superpiano* von Spielmann, handelt es sich auch hier um ein elektromechanisches Instrument, da die Tonerzeugung auf drehende Räder begründet ist. In der Hammondorgel befinden sich drehende Zahnräder, welche vor Elektromagneten mit magnetischen Eisenkernen rotieren, so dass schwache Wechselströme erzeugt werden, ähnlich wie beim Bellschen Telephon, allerdings kräftiger. Anschliessend werden diese Ströme auf elektronischem Weg verstärkt, bearbeitet und gemischt. Die Form der Zähne beeinflusst wesentlich die Klangfarbe der Töne, ähnlich wie bei einer Sirene die Lochform.

Die tonerzeugenden Räder, welche die Grundtöne erzeugen (je einer für jede Taste der Tastatur) drehen sich auf einer der zwölf Wellen[65] des Systems, wobei sich jede Welle 1,059 (zwölfte Wurzel aus 2) mal schneller dreht als ihr Vorgänger. Von einer Oktave zur anderen enthalten die Zahnräder derselben Welle die doppelte Anzahl Zähne. Bei der Tonsynthese werden die Partialtöne mit den Noten aus der gleichmässig temperierten Tonleiter angenähert. Der bedeutendste Nachteil dieses Systems ist vermutlich die schlechte Annäherung an den siebten Partialton, dessen grosse Bedeutung für die musikalische Ästhetik eines Klanges experimentell nachgewiesen wurde, obwohl es sich um einen dissonanten Partialton handelt.

Die Verfechter der Hammondorgel versichern, dass mit ihr über 20 Millionen Klangfarben erzeugt werden können. Aus der Sicht der mathematischen Kombinatorik ist dieses Argument zweifelsohne unanfechtbar. Aber die Tatsache, dass 20 Millionen Klänge zur Verfügung stehen, beweist noch lange nicht, dass eine bestimmte Klangfarbe mit dem Instrument befriedigend angenähert werden kann. Ein Beispiel aus dem Bereich der Farben soll diese Feststellung erläutern: Mit vier Farbtöpfen, Schwarz, Weiss, Gelb und Zyanblau kann eine Anzahl Farbnuancen gemischt werden, die nur durch unsere optische Wahrnehmung begrenzt ist. Trotzdem ist es unmöglich, mit

[65] Eine Welle ist eine Achse auf der sich die Räder zusammen mit der Achse drehen.

den vier Töpfen einen Farbstoff herzustellen, der sich ans Rot, ans Magenta oder ans Orange annähert.

Die Hammondorgel muss dank einer guten Synchronisation der zwölf Wellen, welche die Konstanz zwischen den verschiedenen Intervallen gewährleistet, nie gestimmt werden. Allenfalls muss ab und zu die Drehgeschwindigkeit des Motors eingestellt werden.

In den letzten Jahrzehnten arbeiten verschiedene Forscher, wie etwa Jean-Claude Risset an der Tonsynthese mittels digitaler Computer. Anhand eines Programms berechnen diese Maschinen die Zerlegung der phonographischen Kurve des Schalls in Zahlenform (wie bei einer Compact Disk). Die einigermassen befriedigende Reproduktion der Klangfarbe der akustischen Instrumente mit elektronischen Hilfsmitteln ist eine verhältnismässig neuere Errungenschaft, da die ersten Versuche an einer allzu starken Vereinfachung der akustischen Verhältnisse scheiterten.

Es kann gesagt werden, dass der musikalische Reiz der Töne durch allzu grosse mathematische Perfektion verloren geht. Etwas ähnliches kann auch im Bereich der graphischen Künste beobachtet werden: eine gelungene Photographische Aufnahme muss ein Korn haben, eine Radierung oder die Oberfläche einer Statue muss eine gewisse Struktur aufweisen, um den Geschmack des raffinierten Kunstfreundes zu befriedigen.

Nehmen wir das Beispiel eines Klaviertons: wie wir weiter oben sahen, folgen die Noten nicht ganz strikte dem durch die geometrische Folge der temperierten Tonleiter gegebenen Muster. Vielmehr pflegen sich die hohen Töne gegenüber dem mathematischen Gesetz zu verschärfen, während in den tiefen Bereichen das Gegenteil der Fall ist. Man spricht von der Unharmonie des Klaviers. Auf ähnliche Weise sind die Partialtöne nie perfekt harmonisch. Diese kleinen Abweichungen werden durch unsere abweichende Frequenzwahrnehmung recht gut kompensiert. Es ist auch eine Übertreibung, eine ganze periodische Kurve mit einer einzigen stetigen Kurve zu modulieren, denn sehr genaue Experimente haben gezeigt, dass in der akustischen Praxis jeder einzelne Partialton durch eine eigene Kurve moduliert wird, die leicht von den anderen abweicht.

Aber wer mit dem Computer Klänge synthetisiert beschränkt sich im Allgemeinen nicht auf die Reproduktion der Töne der akustischen Instrumente, sondern strebt nach einem viel höheren Ziel: er versucht, von der instrumentalen Tradition unabhängige neue und zugleich musikalisch anziehende Klänge zu kreieren.

Zu den nobelsten elektronischen Instrumenten gehören die mit dem *Silent*-System ausgerüsteten Klaviere von Yamaha, die wahlweise als normale akustische Klaviere oder aber als elektronische

Klaviere funktionieren, wobei im letzten Fall nach Ausschaltung der Hämmer die Information über die Anschlagkraft und die Stellung der Tasten und des Pedals elektronisch ausgewertet und einem ausgereiften Synthesizer zugeführt werden, der mit verblüffender Perfektion den Ton eines Konzertflügels nachahmt.

In den letzten 30 Jahren ist die Anzahl der verschiedenen elektronischen Musikinstrumente extrem stark angewachsen. Die meisten Bausteine der elektronischen Musikanlagen, wie etwa Synthesizer, Sampler, Sequencer, Verstärker und Keyboards erfüllen mehrere Aufgaben zugleich und lassen sich miteinander vernetzen. Am Anfang war es schwierig oder beinahe unmöglich, Komponenten von verschiedenen Fabrikanten miteinander zu kombinieren, bis um 1983 eine universell akzeptierte Steuersprache kreiert wurde, die es erlaubte, alle mit einem entsprechenden Kodiergerät (Schnittstelle) ausgerüsteten elektronischen Instrumente miteinander zu verbinden, MIDI (Musical Instrument Digital Interface). Die MIDI-Sprache teilt jedem elektronischen Instrument mit, in welchem Moment es welchen Ton erzeugen muss, mit welcher Lautstärke, Klangfarbe und Dauer. Zur Simulation verschiedener akustischer Instrumente sind eine ganze Reihe von verschiedenen Kanälen vorgesehen. Die Kommunikation von zwei oder mehr elektronischen Musikgeräten mittels MIDI ist mit der Vernetzung von zwei oder mehr Komputern über ein Modem vergleichbar.

Die modernen Synthesizer erlauben es, eine Vielzahl von Klangfarben zu synthetisieren, die dann einem Verstärker zugeleitet werden. Ein Sequenzer ist ein Gerät, das Tonfolgen (heute meist MIDI-Sequenzen) speichern, bearbeiten und abspielen kann. Ein Sampler ist mit einem digitalen Tonbandgerät vergleichbar und erlaubt es, kurze Klänge oder Geräusche, sogenannte Samples, aufzunehmen, in digitaler Form zu speichern und weiter zu verarbeiten. Die Samples können etwa transponiert, gespiegelt oder auf verschiedene Arten verzerrt werden.

In letzter Zeit arbeiten die meisten elektronischen Musikinstrumente digital. Die Tendenz, welche verschiedene Bereiche des modernen Lebens grundsätzlich verändert hat, hat sich auch im Bereich der elektronischen Musik bemerkbar gemacht: Hoch spezialisierte Geräte arbeiten erst mit dem Komputer zusammen und werden dann allmählich durch ein Programm abgelöst. Ein moderner PC wird mit den meisten Ansprüchen der elektronischen Musik fertig. Über die Sound-Karte des PCs können akustische Signale in Dateiform verwandelt werden.

Der Vertrieb von Musik in Form von MIDI-Dateien, wie sie auf dem Internet vielfach angeboten werden, ist mit der Klavierrolle vergleichbar. Werden die Noten in streng metronomischer Form streng ab Partitur eingegeben, erhält man eine absolut gefühllose Wiedergabe, die sich mit derjenigen eines Pianolas vergleichen lässt. Werden die Noten von Hand editiert, mag das Ergebnis etwas besser klingen. Wesentlich besser klingen MIDI-Dateien, die anhand einer guten Interpretation auf einem Disklavier von Yamaha angefertigt werden. Auch der elektronisch nachgebildete Klavierton ist nicht immer befriedigend, aber letzterer hängt nicht von der MIDI-Datei, sondern vom eingesetzten Synthesizer ab. Wer die Sound-Karte des PCs als Synthesizer einsetzt erhält selten optimale Resultate.

Wenn auch die elektronische Interpretation von klassischer Musik selten befriedigt, kenne ich doch zur Zeit eine löbliche Ausnahme: die Einspielung des ersten Buches des *Wohltemperierten Klaviers* von J.S. Bach durch den Künstler John Grant sind absolute Spitzenklasse. Die 24 Präludien und Fugen können zur Zeit im Internet unter www.mp3.com heruntergeladen werden. Wie der Künstler angibt, setzt er für die Erstellung seiner Interpretationen das Programm *Gigasampler*, einen Sequenzer und einen Steinway-Flügel Modell B ein.

Wenn wir die eine oder andere Spur einer Audio-CD auf unseren PC übertragen wollen (das ist nicht in jedem Fall legal), erhalten wir Dateien mit der Endung WAV. Diese Dateien sind enorm gross und für die Sendung übers Internet daher nicht geeignet. Es gibt zwei Wege, um diese Dateien zu komprimieren. Man kann einen Kompressor anwenden, der es erlaubt, die Dateien wieder in identischer Form zurückzugewinnen, wie etwa PKZIP.EXE von PKWARE Inc. Aber WAV-Dateien werden dadurch leider nicht viel kleiner. Oder man kann einen Algorithmus schaffen, der aus den Musikdateien gerade diejenige Information eliminiert, welche von unserem Gehör ohnehin nicht vernommen werden kann. Das ist die Arbeit, welche im Institut Frauenhofer durchgeführt wurde und zum MPEG-Standard führte. Die mit diesem Algorithmus kompromierten Dateien erhalten die Dateiendung MP3 und sind wesentlich kleiner als die WAV-Dateien. Die MP3-Dateien können wieder zu WAV-Dateien umgeformt werden, die dann auf Audio CD kopiert werden können. Inzwischen gibt es bereits tragbare Abspielgeräte, die direkt mit MP3-Dateien arbeiten. Die Kapazität einer CD wird damit um ein Mehrfaches gesteigert.

Ein ähnlicher Algorithmus hat auch zur digitalen Videoplatte DVD geführt, die in den nächsten paar Jahren die VHS Videokassetten ablösen dürfte.

ANHANG: DAS STIMMEN EINES KLAVIERS

Obwohl das Klavier ein Instrument mit unveränderlichen Tönen ist, neigt sich die Höhe der einzelnen Töne mit der Zeit zu verändern, und es ist notwendig, es hie und da zu stimmen. Während ein Klavier zuhause normalerweise mit einer Stimmung im Jahr auskommt (je nach den Ansprüchen des Benutzers, aber auch je nach der Luftfeuchtigkeit und anderen Umständen, wie der Qualität und dem Zustand des Instrumentes), sollte ein Klavier, das für Schallplatteneinspielungen dient, vor jeder Sitzung überprüft werden.

Die erste Aufgabe des Stimmers ist die Stimmung des La (3) mit einer Stimmgabel. Normalerweise wird das la auf die Frequenz von 440 Hz gebracht, handelt es sich aber um ein sehr altes Instrument, ist es manchmal vorsichtiger, es angesichts der grossen Saitenspannung leicht tiefer zu stimmen[66].

Nachher muss der Stimmer eine oder zwei Oktaven im Bereich um das La (3) stimmen und zwar nach den temperierten Intervallen. Schliesslich werden die Töne oktavenweise auf den Rest der Klaviatur übertragen. Da die meisten Klaviertöne durch zwei oder drei nahe beieinander liegende Saiten vertreten werden, setzt der Stimmer Keile aus Gummi oder Leder ein, um die Saiten, die in einem bestimmten Augenblick nicht mitschwingen sollen, zu dämpfen. Soll etwa das La auf 440 Hz gestimmt werden, werden zuerst die beiden seitlichen Saiten des Chors gedämpft, während die mittlere mit der Stimmgabel in Einklang gebracht wird. Dann wird eine der seitlichen Saiten befreit und mit der mittleren in Einklang gebracht. Schliesslich wird die dritte Saite der Gruppe in gleicher Weise gestimmt. Der Einklang zeichnet sich durch Abwesenheit von Schwebungen zwischen den beiden gleichen Noten aus.

Die Errichtung der Temperatur ist die Arbeit, welche vom Stimmer die grösste Beherrschung erheischt. Eine korrekt durchgeführte Temperatur erlaubt es, jedes beliebige Musikstück in jede beliebige Tonart zu transportieren, ohne dabei eine vor den anderen zu begünstigen. Es sei in Erinnerung gerufen, dass die Frequenzen der Noten

---

[66] Tatsächlich übertrifft die Summe der Spannungen aller Saiten selbst in den kleinsten Klavieren leicht die Gewichtskraft einer Masse von 10 t.

der chromatischen temperierten Skala eine geometrische Folge bilden, dessen Quotient die zwölfte Wurzel aus 2 ist, die wir hier r nennen werden. (r = 1,05946309...). Im Laufe der Geschichte wurden verschiedene Hilfswekzeuge erfunden, um zu einer korrekten Temperatur zu kommen. Eines der ältesten Systeme besteht darin, die 12 Noten der chromatischen Tonleiter nach einem Satz von entsprechenden Stimmgabeln zu stimmen. Da es für die meisten Leute einfacher ist, einen Ton so zu stimmen, dass er mit dem vorgegebenen Ton eine bestimmte Anzahl Schwebungen erzeugt, wurden auch Stimmgabelsätze erzeugt, deren Frequenzen je um eine bestimmte Anzahl Hz (zum Beispiel 5 Hz) höher (oder tiefer) als der zu stimmende Ton ist. Es musste dann so gestimmt werden, dass bei jeder Note je eine Schwebung von 5 Hz entstand. Die Fähigkeit, die Geschwindigkeit der Schwebungen richtig einzuschätzen ist für einen Klavierstimmer unentbehrlich und muss mit Ausdauer meist jahrelang geübt werden. Nebenbei sei bemerkt, dass unser Satz Stimmgabeln, die sich je um 5 Hz von den Noten der gleichmässig temperierten Tonleiter unterscheiden, untereinander keine gleichmässig temperierte Tonleiter bilden, da ihre Frequenzen keine geometrische Folge bilden. Daraus kann geschlossen werden, dass ein solcher Stimmgabelsatz nur für das Stimmen auf eine ganz bestimmte Höhe eingesetzt werden können, wie etwa 440 Hz[67].

Später erschien eine Art von Sirenen auf dem Handel, mit denen Töne beliebiger Frequenz erzeugt werden konnten. Später wurden für den selben Zweck elektronische Tonerzeuger auf den Handel gebracht. Aber keines dieser Hilfsmittel konnte sich in der Praxis der Klavierstimmer durchsetzen, die von einer Verteilung auszugehen pflegen, die aufgrund von Schwebungsfrequenzen von Obertönen der verschiedenen Noten der temperierten Tonleiter erstellt wurden.

Dieses Verfahren sei vorerst an einem Beispiel erläutert: Es handelt sich darum, das Mi (4) anhand des La (3) mit 440 Hz zu stimmen. Müsste das Intervall [La, Mi] rein gestimmt werden, wie in der Tonleiter von Pythagoras, also mit einem Quotient 3 : 2, wäre die Frequenz des Mi gleich 660 Hz. Aber die temperierte Quinte ist etwas kleiner als die reine Quinte. Bezeichnen wir die zwölfte Wurzel aus zwei als r, entspricht die Quinte dem Wert $r^7 = 1{,}49830$. Um das Mi mit der nötigen Präzision stimmen zu können, muss der erste

[67] Umgekehrt kann auch gefolgert werden, dass ein Satz Stimmgabeln, die einer gleichmässig temperierten Tonleiter entsprechen, nicht dafür eingesetzt werden kann, die entpsrechenden Töne mit je 5 Schwebngen zu stimmen, wie oben beschrieben. Lassen wir jedoch die Schwebungen in Funktion der Tonhöhe von etwa 2 Hz für den tiefsten Ton bis zu 3,7754 *Hz* ($2 \cdot \left(\sqrt[12]{2}\right)^{11}$ für den höchsten Ton zu nehmen, so würden wir ein einwandfreies Ergebnis erzielen.

gemeinsame Oberton von Mi (4) und La (3) betrachtet werden, nämlich Mi (5), das mit Mi (4) eine Oktave (zweiter Partialton) und mit La (3) eine Duodezime (dritter Partialton) bildet. Nun stimmen in der gleichmässig temperierten Tonleiter diese beiden Töne nicht genau überein, da Mi (5) als Oktave von Mi (4) aufgefasst eine Frequenz von 1318,51 Hz aufweist, während die Note Mi (5) als dritter Partialton von La (3) eine Frequenz von genau 1320 Hz aufweist. Zwischen diesen beiden Tönen haben wir eine Schwebung von ca. 1,5 Hz. Selbstverständlich variiert die Frequenz der Schwebungen bei einem festen Intervall proportional zu den ausgewählten Grundnoten. Trifft andererseits der n-te Partialton einer Note mit dem m-ten Partialton einer anderen Note zusammen, so treffen auch die Partialtöne 2·n mit 2·m, 3·n mit 3·m zusammen, usw. Die Schwebungen zwischen den niedrigstmöglichen Partialtöne sind natürlich in der Praxis meist am nützlichsten. Diese Situation ist vergleichbar mit der Addition der Brüche, bei der wir das kleinste gemeinsame Vielfache (kgV) der Nenner ermitteln.

Theoretisch ist es möglich, eine perfekte Temperatur nur durch Einsatz von Quinten und Oktaven (die Oktave ist das einzige "natürliche" Intervall der temperierten Tonleiter) zu erhalten[68], aber es muss beachtet werden, dass die Anhäufung der Fehler über 12 Schritte hinweg schwierig zu zügeln ist. Normalerweise benutzen die Stimmer zur Festlegung der temperierten Grundoktave mehrere Typen von Intervallen, die anhand von Schwebungen zwischen den Obertönen ihrer Grenztöne genau justiert werden können. Die folgende Tabelle stellt die beim Stimmen am häufigsten eingesetzten Intervalle dar, zusammen mit den niedrigsten Obertönen, welche die angegebenen Schwebungen erzeugen. Die numerischen Werte wurden aufgrund eines La mit der Frequenz von 440 Hz berechnet. Ist das temperierte Intervall kleiner als das entsprechende Intervall der Tonleiter von Zarlino, wurde den Schwebungen das Zeichen "-" vorangesetzt. Das bedeutet natürlich nicht, dass die Schwebungen negativ sind, was sinnlos wäre.

Terz, 4 Halbtöne					
Noten	Frequenzen	Partialton Nummer	Gemeinsamer Partialton	Frequenzen	Schwebungen
Do	261,625	5	Mi	1308,12	10,3824
Mi	329,627	4		1318,51	

[68] Wie wir weiter unten sehen werden, ist dank einer Erscheinung, die wir als Unharmonie des Klaviers bezeichnen, auch die Oktave nicht im strengsten Sinne des Wortes "natürlich".

Quarte, 5 Halbtöne					
Noten	Frequenzen	Partialton Nummer	Gemeinsamer Partialton	Frequenzen	Schwebungen
Do	261,625	4	Do	1046,50	1,182446
Fa	349,228	3		1047,68	

Quinte, 7 Halbtöne					
Noten	Frequenzen	Partialton Nummer	Gemeinsamer Partialton	Frequenzen	Schwebungen
Do	261,625	3	Sol	784,876	-0,885794
Sol	391,995	2		783,990	

Sexte, 9 Halbtöne					
Noten	Frequenzen	Partialton Nummer	Gemeinsamer Partialton	Frequenzen	Schwebungen
Do	261,625	5	Mi	1308,12	11,8722
Mi	440,00	3		1320,00	

Dezime, 16 Halbtöne					
Noten	Frequenzen	Partialton Nummer	Gemeinsamer Partialton	Frequenzen	Schwebungen
Do	261,625	5	Mi	1308,12	10,3824
Mi	329,627	2		1318,51	

Unter den verschiedenen von den Klavierstimmern eingesetzten Verfahren zur Einteilung der Grundoktave stellen wir hier eines vor, das zwar nicht sehr verbreitet ist, aber den Vorteil einer minimalen Fehleranhäufung aufweist, da die längste Kette von hintereinander aufgrund des Vorgängers gestimmten Tönen drei Noten aufweist. Dieses System, welches in der nächsten Tafel schematisch dargestellt wird, erfordert vom Stimmer die Kenntnis der Schwebungen der temperierten Terzen, Quarten, Quinten und Sexten. Die entsprechenden Intervalle werden in der Figur mit den Zahlen 4, 5, 7 und 9 bezeichnet, also mit der Anzahl Halbtöne, welche den betreffenden Intervallen entsprechen, aber auch mit den Exponenten des Quotienten r, welche die verschiedenen Intervalle in der geometrischen Folge der gleichmässig temperierten Tonleiter charakterisieren. Es wird von einem auf die gewünschte Höhe (meist 440 Hz) gestimmten La ausgegangen. Vom La aus können 8 Noten gestimmt werden, wobei sich 6 unter ihnen durch den Namen unterscheiden:

Eine Sexte (9) tiefer finden wir das Do.
Eine Quinte (7) tiefer finden wir das Re.

Eine Quart (5) tiefer finden wir das Mi.
Eine Terz (4) tiefer finden wir das Fa.
Eine Terz höher finden wir das Do #.
Eine Quart höher finden wir das Re (Oktave des unteren Re).
Eine Quinte höher finden wir das Mi (Okt. des unteren Mi).
Eine Sexte höher finden wir das Fa #.

Die Intervalle zwischen den verschiedenen Noten erlauben es uns, ihre Exaktheit zu überprüfen. Anhand der bisher vom La abgeleiteten Noten, die wir als *Noten zweiter Generation* bezeichnen können, können wir vier weitere Noten der Tonleiter bestimmen, nämlich:

Eine Quinte über dem Do, respektive eine Quinte unter dem Re erhalten wir das Sol.

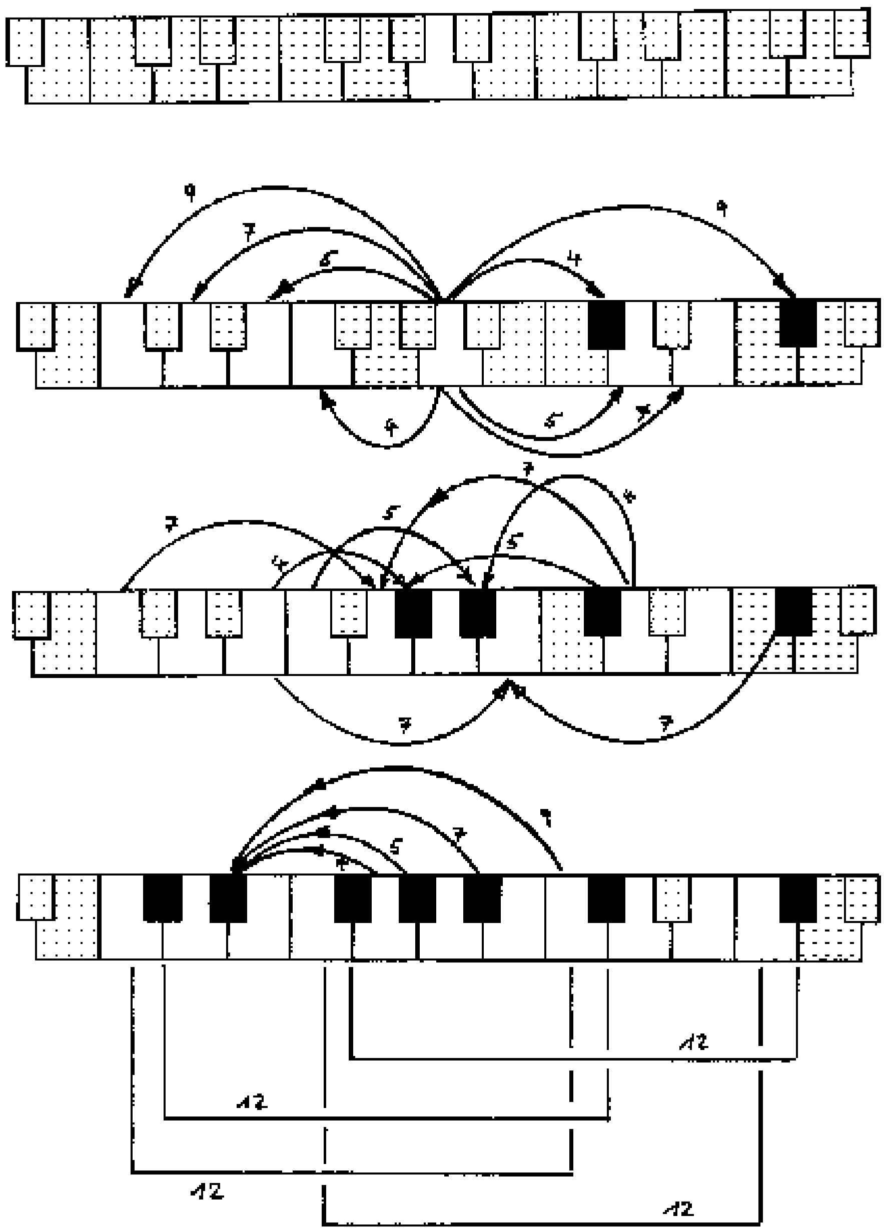
Eine Terz über dem Mi, respektive eine Quart unter dem Do # erhalten wir das Sol #.

Eine Quarte über dem Fa, respektive eine Terz unter dem Re erhalten wir das La #.

Eine Quinte über dem Mi, respektive eine Quinte unter dem Fa # erhalten wir das Si.

Nun fehlt uns nur noch das Re #, die einzige Note, die wir als Note vierter Generation bezeichnen können. Diese Note kann aber anhand jedes beliebigen der bisher betrachteten Intervalle gestimmt werden, wenn vorher die Oktaven der neu bestimmten Noten rein gestimmt wurden.

Das hier bestimmte Verfahren ist unter den Klavierstimmern bei ihrer täglichen Praxis nicht üblich. Die Schwebungen, die nämlich am besten mit dem Gehör bewertet werden können liegen zwischen 1 und 2 pro Sekunde. Im Tonumfang, den wir hier in unserem Beispiel verwenden sind die Schwebungen der grossen Terzen zu schnell, um mit genügender Genauigkeit bewertet zu werden, so dass viele Stimmer es vorziehen, den vorher beschriebenen Quintenzirkel zu schliessen, wobei die Terzen und Sexten als Kontrolle herangezogen werden.



Ein System, um das Klavier zu stimmen.

Nach dem Stimmen der Grundoktave können die Töne oktavenweise[69] auf die ganze Ausdehnung der Tastatur übertragen werden. Um eine Oktave zu stimmen, wird einer der Töne auf die Höhe des zweiten oder vierten Partialtons der anderen Note gebracht. Da aber die Saiten nicht ideale Saiten im mathematischen Sinne darstellen, und daher die Obertöne nicht genau harmonisch sind, sondern etwas höhere Frequenzen aufweisen, als den natürlichen Vielfachen der Grundfrequenz entspricht, fallen die Frequenzen der höheren Klaviertöne bei einem korrekt gestimmten Klavier stets etwas höher aus, als die aus dem La (3) berechneten Frequenzen. In den tiefen Lagen fallen die Frequenzen entsprechend niedriger aus. Diese leichte Unharmonie der Klaviertöne[70] (welche bewirkt, dass die Töne nicht mehr im strengsten mathematischen Sinn periodisch sind) ist ein wichtiger Faktor der Klangfarbe des Instruments.

Diese individuelle Abweichungen der Frequenzen von der errechneten geometrischen Folge müssen bei der elektronischen Reproduktion der Klangfarbe des Klaviers berücksichtigt werden und erschweren auch das Stimmen eines Klaviers mit einem elektronischen Hilfsgerät. Es ist eine eigentümliche Tatsache, dass sich die Töne eines korrekt gestimmten Klaviers mehr an die psychologische Skala der *Mel* annähern, als an die berechnete gleichmässig temperierte Tonleiter, vor allem in den extremen Bereichen.

Um die tiefsten Töne zu stimmen, setzen viele Stimmer einen Kunstgriff ein: Berührt man die Saite leicht in ihrem Zentralpunkt oder in einem Drittel ihrer Länge, erzeugt die Saite harmonische Töne (die wie schon gesagt nicht mit den Partialtönen zu verwechseln sind, da ein Partialton ein reiner Sinuston ist, während ein harmonischer Ton selber ein zusammengesetzter Ton sein kann, der seinerseits Obertöne enthalten kann) mit höheren Frequenzen, die das Gehör leichter bewerten kann.

Nach dem bisher Gesagten scheint jede beliebige intelligente Person, die das Glück hat, die Obertöne zu vernehmen, in der Lage zu sein, selber ihr Klavier zu stimmen. Dem ist aber nicht so. Es muss auch noch die mechanische Praxis bewältigt werden. Die Stimmnägel können nicht wie starre Zylinder, die aus dem Stimmstock ragen, behandelt werden. Es muss beachtet werden, dass sie neben der Drehung auch einer minimalen seitlichen Bewegung in Kraftrichtung

[69] Auch bei der oktavenweisen Übertragung sollten die Terzen, Quarten, Quinten, Sexten und Dezimen kontrolliert werden.

[70] Die Unharmonie ist nicht immer gleichmässig verteilt und weicht von einem Klavier zum anderen ab. Ein kompetenter Stimmer hat mir mal erklärt, dass manchmal in den extremen Lagen die Töne mit dem Gehör alleine gestimmt werden muss, weil man sich auf die Unharmonie nicht immer verlassen kann.

unterworfen sind. Ein guter Stimmer versteht es, die Kräfte so auszugleichen, dass die Stimmung auch hält. Wer die mechanische Technik des Stimmens nicht beherrscht, kann die Überraschung erleben, dass ein anscheinend perfekt gestimmtes Klavier nach ein paar Tagen aus der Stimmung kommt.

Dies ist die Technik, welche von den meisten Klavierstimmern benutzt wird:

> Zuerst wird die Saite ein wenig gelöst, um sie auf dem oberen Steg ins Rutschen zu bringen.
>
> Anschliessend wird der Ton leicht über die angestrebte Frequenz erhöht.
>
> Schliesslich wird der Ton durch mehrere Hebelbewegungen in Richtung des Steges, ohne den Stimmnagel zu drehen auf die gewünschte Frequenz abgesenkt.

Die Grundlage, um eine korrekte und stabile Stimmung zu erreichen besteht in der langjährigen Praxis. Neben der Stimmung des Instruments muss ein guter Klavierstimmer auch in der Lage sein, die Klangfarbe des Instruments einzustellen, indem er die Filzschicht der Hämmerchen mit geeigneten Nadeln in geeigneter Weise ansticht (man nennt den Vorgang "Intonieren"), die Mechanik sauber einzustellen ("Regulieren") und allerlei kleinere Reparaturarbeiten auszuführen, die Ursache von unerwünschten Resonanzen zu ermitteln und zu beseitigen, usw.

Die Tatsache, dass die meisten professionellen Pianisten ihr Klavier nicht selber stimmen, beweist, dass das Klavierstimmen grosse berufliche Erfahrung erfordert. Die Tatsache, dass berühmte Pianisten, wie etwa Arturo Benedetti Michelangeli, ihr Klavier nur ganz bestimmten Personen anvertrauen beweist, dass das Stimmen eines Klaviers nicht reine Routinearbeit ist: Klavierstimmen ist ein Kunsthandwerk.

Das heute am meisten eingesetzte elektronische Hilfsgerät für die Stimmung des Klaviers ist der *Sanderson Accu-Tuner,* welcher nicht nur Frequenzen misst und berechnet, sondern auch die Stimmung von 60 Klavieren Notenweise elektronisch speichern kann. Die Toleranz des Geräts beträgt 0,04 Cents. Eine MIDI-Schnittstelle erlaubt es, mit dem Gerät ganze Stimmungen auf den PC zu übertragen oder von ihm abzulesen.

ANHANG: SYNÄSTHESIE

Licht und Schall haben verschiedenes gemeinsam, das ihre Zusammenwirkung in Kunstwerken bevorzugt, die in diesem Zusammenhang als synästhetisch bezeichnet werden. Sowohl die akustischen, wie die optischen Erscheinungen sind auf Wellen begründet, die von einem unserer Sinnesorgane wahrgenommen werden können. Das Intervall zwischen der kürzesten und der längsten noch wahrnehmbaren Lichtwelle entspricht ungefähr dem musikalischen Analogon einer Oktave, so dass eine der natürlichsten Möglichkeiten, um jedem Ton der mittleren Oktave des Klaviers eine Farbe zuzuordnen darin bestünde, jedem diatonischen Ton je eine der Regenbogenfarben gegenüberzustellen. Den Halbtönen entspräche dann jeweils die mittlere Wellenlänge zwischen den Wellenlängen der Nachbarstöne. Gegen die Bassregion hin könnte den Farben allmählich immer mehr Schwarz und in Richtung Diskant immer mehr Weiss zugemischt werden. Wenn zudem die Reinheit der Farben zur Kraft proportional wäre, mit der die einzelnen Tasten niedergedrückt werden, wäre unsere Tastatur etwa mit dem doppelten Farbkonus von Ostwald (1853-1932) vergleichbar. Dieses System ist vom Modell abgeleitet, das Helmholtz in seinem Buch "Handbuch der physiologischen Optik" vorschlug.

Aber es gibt natürlich nicht nur eine Art, den musikalischen Klängen Farben zuzuordnen, da wie nicht nur die ähnlichen Eigenschaften von Licht und Schall, sondern auch die entgegengesetzten berücksichtigen müssen. Wie das Ohmsche Gesetz der Akustik ankündigt, ist das Gehör imstande eine Mischung aus verschiedenen Sinustönen in ihre Komponenten zu zerlegen. Das Auge jedoch ist ausserstande, die Grundfarben zu erkennen, aus denen eine bestimmte Farbe aufgebaut ist. Das heisst, wir können eine gleiche Farbe anhand verschiedener Grundfarben erhalten, was in der akustischen Analogie ausgeschlossen ist. Die Farbe ist nicht ein physikalisches Konzept, sondern ein ausschliesslich physiologisches. So ist der Dreifarbendruck[71], die Grundlage aller modernen Farbreprodukti-

[71] Der Vierfarbendruck ist im Wesentlichen ein Dreifarbendruck mit einer zusätzlichen schwarzen Platte, die vor allem der erhöhung des Kontrastes der Reproduktion dient.

onsverfahren, auf die Farbwahrnehmung begründet und nicht auf die spektrale Zusammensetzung der Farben. Die Farbe kann auf additive Weise gemischt werden, indem man farbige Lichter übereinanderprojiziert, oder aber auf subtraktive Weise, indem man durchscheinende Druckfarben übereinander druckt oder die Farbstoffe mischt. Auch dazu gibt es eine akustische Analogie: Der von zwei Musikinstrumenten abgestrahlte Schall wird addiert, während die Resonatoren, welche die Nasenhöhle und die Mundhöhle bilden vornehmlich gewisse Frequenzen durchlassen und so eine ähnliche Aufgabe erfüllen, wie ein Farbfilter in der Photographie. Eine Verallgemeinerung dieser Tatsache finden wir auch bei den Formanten der meisten akustischen Musikinstrumente.

Anstatt den verschiedenen Noten entsprechende Farben zuzuordnen, kann man die Farben auch der Klangfarbe anpassen, wobei man seine Wahl auf die spektrale Zusammensetzung der Töne begründen kann. Das wäre eine praktische Umsetzung des Begriffs Klang-Farbe.

Verschiedene Künstler haben Werke erschaffen, welche die plastischen Künste mit der Musik vereinen, aber ihre Deutung der Verhältnisse zwischen Tönen und Farben ist nicht einheitlich. Als einer der ersten erbaute der Pater Castel um 1725 ein Instrument, das Musik und Farbe kombinierte, ein Tasteninstrument, das er *Clavecin Oculaire* nannte. Eines der berühmtesten Beispiele synästhetischer Kunst ist die letzte Symphonie von Scriabin, *"Prometheus"* oder *"Le Poème du Feu"*, bei der ein *Clavier Lumière* zum Einsatz kommt. Leider verschied Scriabin bevor er sein monumentales synästhetisches Werk, das *Mysterium*, vollenden konnte, in dem er alle menschlichen Sinnesempfindungen ausdrücken wollte.

Die Tafel fasst die farblichen Interpretationen der Töne des Paters Castel, von Helmholtz und von Scriabin zusammen.

	Castel	**Helmholtz**	**Scriabin**
Do	Blau	Gelb	Rot
Re	Grün	Zyanblau	Gelb
Mi	Gelb	Indigo	Bläulich
Fa	Ocker	Violett	Rot
Sol	Rot	Rot	Orange
La	Violett	Rot	Grün
Si	Grau	Orange	Violett

Es ist eine wohlbekannte Tatsache, dass gewisse Töne, Gerüche oder Farben über die rätselhaften Mechanismen unseres Unterbewusstseins in uns Erinnerungen wecken können, uns stören oder in euphorischen Zustand versetzen können. Aber es ist weniger bekannt, dass einzelne Personen in Gegenwart eines bestimmten Tons tatsächlich eine bestimmte Farbe wahrnehmen. In letzter Zeit scheinen gewisse synästhetische Erscheinungen eine wissenschaftliche Erklärung gefunden zu haben.

Heutzutage wissen wir, dass durchschnittlich eine unter 2000 Personen als Synästhetiker bezeichnet werden kann. Bei diesen Menschen besteht eine Überschneidung von zwei oder mehr Sinnen, wobei alle möglichen Kombinationen vorkommen können: Beim Hören eines Tons sehen diese Leute eine Farbe oder Strukturen, wie Gitterwerke oder Wellenlinien, gewisse Gerüche haben Schmerzempfindungen zur Folge, der Anblick eines Bildes lässt einen Geruch aufkommen. Offenbar ist die Synästhesie genetisch bedingt, kommt sie doch in einzelnen Familien gehäuft vor. Besonders häufig scheint die Assoziation von Zahlen mit Farben zu sein, wobei meist grösseren Zahlen dunklere Farben entsprechen. Bei dieser Sinnesvernetzung spricht ein Reiz, der normalerweise einem bestimmten Sinnesorgan vorbehalten ist, zugleich andere Sinnesorgane an.

Zur Zeit erforschen die Neurologen des Universitätsspitals Zürich diese interessante Besonderheit intensiv. Gewisse Drogen, wie etwa LSD, vermögen in Leuten, die nie synästhetische Erlebnisse hatten, solche künstlich auszulösen. Aber die Wirkung dieser Drogen beschränkt sich nie auf die synästhetischen Erlebnisse und ihre Wirkung zu erproben ist nicht nur strafrechtlich verboten, sondern zudem ausserordentlich gefährlich.

ANHANG: DER DOPPLEREFFEKT

Wie die meisten Leute ab und zu beobachten können, senkt sich die Tonhöhe einer Sirene, wenn der entsprechende Wagen mit hoher Geschwindigkeit neben einem vorbeiflitzt. Dieselbe Erscheinung beobachten wir, wenn wir uns mit einer gewissen Geschwindigkeit vor einer Schallquelle vorbeibewegen, etwa mit dem Zug vor einer Fabriksirene. Unter gewissen Bedingungen können wir eine Kombination der beiden Effekte erleben, wenn sich sowohl der Beobachter, wie auch die Schallquelle bewegen. Das ist etwa dann der Fall, wenn sich auf der Landstrasse zwei hupende Fahrzeuge kreuzen, oder eines das andere überholt. Wie man leicht feststellt, wächst der Effekt bei grösseren Geschwindigkeiten, sofern die Schallgeschwindigkeit in der Luft (ungefähr 340 m/s) nicht überschritten wird. Einer der ersten Wissenschafter, welcher den Effekt, der uns hier beschäftigt, mathematisch untersuchte, war der Österreichische Physiker und Mathematiker Christian Johann Doppler (1803-53), im Jahre 1842.

Symbole und Formeln, die in den folgenden Herleitungen eingesetzt werden	
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit (der Welle)
L	Wellenlänge = c/f
F	Frequenz
T	T = 1/f = Periode
v	Geschwindigkeit = $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$

ERSTER FALL: Die Schallquelle bewegt sich zuerst auf den Beobachter zu, dann von ihm weg. Der Beobachter ist ruhig.

Wäre die Schallquelle im Ruhezustand (v = 0), wäre der Abstand zwischen zwei Impulsen (bei der Frequenz f des abgegebenen Tons) d = c/f. Da sich aber die Schallquelle in Richtung des Hörers fortbewegt, wird der Abstand zwischen zwei Impulsen (oder Schwingungen) verkürzt[72].

Die Schallquelle legt während der Zeit T den Weg $T \cdot c$ zurück; daher ist der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen (also die Wellenlänge) die folgende Differenz:

$$L = T \cdot c - T \cdot v = \frac{c}{f} - \frac{v}{f}$$

Die Frequenz des entsprechenden Tons ist

$$f_1 = \frac{c}{L} = \frac{c}{\frac{c}{f} - \frac{v}{f}} = f \cdot \frac{c}{c - v}$$

Entfernt sich die Schallquelle vom Beobachter, muss in der obigen Formel v durch (-v) ersetzt werden. Die Formel ist gültig für Geschwindigkeiten zwischen 0 und c, c selber ausgeschlossen.

Wie wir sofort sehen werden, erhält man nicht das selbe Resultat, wenn sich der Hörer bewegt und die Schallquelle in Ruhe ist.

Das Intervall zwischen dem Ton, den man vor dem Durchgang der Schallquelle vor dem Beobachter hört und dem Ton nachher ist:

$$I_1 = \frac{\frac{f \cdot c}{c - v}}{\frac{f \cdot c}{c + v}} = \frac{c + v}{c - v}$$

<u>ZWEITER FALL:</u> Die Schallquelle ist unbewegt und der Beobachter bewegt sich, zuerst zu ihr hin, dann von ihr weg.

Wenn sich der Beobachter auf die Schallquelle hin bewegt, ist der Effekt der gleiche, wie wenn die Schallgeschwindigkeit einer bereits abgestrahlten Welle plötzlich um die Geschwindigkeit des Beobachters erhöht würde. Dabei bleibt die Wellenlänge L des Tons konstant. Mit der neuen, fiktiven Ausbreitungsgeschwindigkeit (c + v) und der Wellenlänge L = c/f können wir die Frequenz des vom Hörer wahrgenommenen Tons bestimmen:

---

[72] Man stelle sich ein Fahrzeug (die Schallquelle) vor, das sich in der gleichen Richtung fortbewegt wie ein Fliessband (die Fortbewegung der Wellen in der umgebenden Luft) und in gleichmässigen Zeitabständen je ein Päckchen auf das Band ablegt. In diesem Vergleich entspricht die Geschwindig des Fliessbandes der Schallgeschwindigkeit c.

$$f_2 = \frac{c+v}{\frac{c}{v}} = f \cdot \frac{c+v}{c}$$

Entfernt sich der Beobachter von der Schallquelle, genügt es, v durch (-v) zu ersetzen.

Das Intervall zwischen dem Ton, den der Beobachter vor und nach seinem Durchgang vor der Schallquelle vernimmt ist:

$$I_2 = \frac{f \cdot \frac{c+v}{c}}{f \cdot \frac{c-v}{c}} = \frac{c+v}{c-v}$$

Zu unserer Überraschung finden wir hier wieder das selbe Intervall, wie im ersten Fall, obwohl die beteiligten Frequenzen in beiden Fällen verschieden sind.

<u>BEISPIEL:</u> Ein Auto mit einer Hupe, welche einen Ton von n Hz erzeugt, kreuzt einen Fussgänger mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h. Im zweiten Fall ist dasselbe hupende Auto parkiert, während ein Motorradfahrer mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h (= 20 m/s) neben ihm vorbeifährt. Die Schallgeschwindigkeit sei 340 m/s.

<u>ERSTER FALL</u>

Ton, den der Fussgänger bei Annäherung des Autos vernimmt:

$$f_1 = n \cdot \frac{340}{340-20} = \frac{17}{16} \cdot n$$

Ton, den er nachher vernimmt:

$$f_1^* = n \cdot \frac{340}{340+20} = \frac{17}{18} \cdot n$$

Intervall zwischen den beiden Tönen:

$$I = \frac{f_1}{f_1^*} = \frac{(17/16) \cdot n}{(17/18) \cdot n} = \frac{9}{8}$$

ZWEITER FALL

Ton, den der Motorradfahrer vor dem Vorbeifahren neben dem Auto vernimmt:

$$f_2 = n \cdot \frac{340 + 20}{340} = \frac{18}{17} \cdot n$$

Ton, den er nachher vernimmt:

$$f_2^* = n \cdot \frac{340 - 20}{340} = \frac{16}{17} \cdot n$$

Intervall zwischen den beiden Tönen:

$$I = \frac{f_2}{f_2^*} = \frac{(18/17) \cdot n}{(16/17) \cdot n} = \frac{9}{8}$$

BEISPIEL: Mit welcher Geschwindigkeit muss ein Auto neben einem Fussgänger vorbeifahren, damit der von ihm wahrgenommene Ton um eine natürliche Quinte abnimmt?

Anhand von $I = \frac{c + v}{c - v}$ berechnet man: $v = c \cdot \frac{I - 1}{I + 1}$. Der Wert von I im Falle der natürlichen Quinte beträgt 3/2.

$$v = 340 \cdot \frac{\frac{1}{2}}{\frac{5}{2}} \text{ m/s} = 68 \text{ m/s} = 244{,}8 \text{ km/h}$$

Die Tafel liefert uns die nötigen Geschwindigkeiten, um aufgrund des Dopplereffekts einige der wichtigsten musikalischen Intervalle zu produzieren, wenn sich eine bewegte Schallquelle mit einem ruhenden Beobachter kreuzt oder umgekehrt. Es wird von der Schallgeschwindigkeit von 340 m/s ausgegangen.

Intervall	Dezimalwert des Intervalls	m/s	km/h
1 *Cent*	1,000577	0,098195	0,353505
1 *Savart*	1,002305	0,391439	1,409181
Komma 81/80	1,0125	2,111801	7,602484
10 *Savarts*	1,023292	3,914221	14,09119
Diatonischer Halbton 16/15	1,066666	10,96774	39,48387
Kleiner Ton 10/9	1,111111	17,89473	64,42105
Ganzton 9:8	1,125	20	72
Temperierte Intervalle			
[Do, Do #]	1,059463	9,816855	35,34068
[Do, Re]	1,122462	19,61735	70,62248
[Do, Re #]	1,189207	29,38525	105,7869
[Do, Mi]	1,259921	39,10453	140,7763
[Do, Fa]	1,334839	48,75946	175,5340
[Do, Fa #]	1,414213	58,33477	210,0051
[Do, Sol]	1,498307	67,81568	244,1364
[Do, Sol #]	1,587401	77,18801	277,8768
[Do, La]	1,681792	86,43828	311,1778
[Do, La #]	1,781797	95,55373	343,9934
[Do, Si]	1,887748	104,5224	276,2807
Intervall zwischen dem Grundton und dem n-ten Partialton			
n = 2 (Oktave)	2	113,3333	408
n = 3	3	170	612
n = 4	4	204	734,4
n = 5	5	226,6666	816
n = 100	100	333,2673	1199,762

Die Dinge werden leicht komplizierter, wenn sich sowohl der Beobachter, wie die Schallquelle bewegen. Wir werden unsere Untersuchungen auf den Fall beschränken, bei dem sich die beiden Objekte auf der gleichen Geraden fortbewegen. Bewegen sich der Beobachter und die Schallquelle in derselben Richtung, ist die Situation gleich, wie wenn wir ausschliesslich ihre Geschwindigkeitsdifferenz betrachten und dafür als Korrekturfaktor einen Wind einführen, der die Schallgeschwindigkeit beeinflusst, und dessen Richtung im Moment der Kreuzung der beiden Objekte invertiert wird.

BEISPIEL: Nehmen wir an, die Schallquelle und der Beobachter bewegen sich in der gleichen Richtung, mit Geschwindigkeiten von 30, respektive 10 m/s.

Die Abweichungen, die in diesem Fall ein Ton von n Hz für den Beobachter erfahren, können auf zwei Arten berechnet werden.

Im ersten Fall wird davon ausgegangen, dass der Hörer still ist und sich die Schallquelle mit 20 m/s fortbewegt. Als Korrektur führen wir einen (virtuellen) Wind ein, der mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s gegen die Schallquelle bläst. Bis zum Moment der Kreuzung vermindert der Wind die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in Richtung des Beobachters um 10 m/s. Nach der Kreuzung wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in Richtung des Beobachters um 10 m/s erhöht. Da bei unserer Transformation der Beobachter als ruhend gilt, kann die erste Formel angewandt werden.

Vorher: $$n \cdot \frac{340-10}{340-10-20} = \frac{330}{310} \cdot n = n \cdot \frac{33}{31}$$

Nachher: $$n \cdot \frac{340+10}{340+10+20} = \frac{350}{370} \cdot n = n \cdot \frac{35}{37}$$

Bei der zweiten Art, das Problem zu lösen, gehen wir davon aus, dass die Schallquelle unbeweglich ist und sich der Beobachter mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s fortbewegt. Hier muss ein virtueller Wind von 30 m/s eingeführt und die zweite Formel angewandt werden:

Vorher: $$n \cdot \frac{340-30+20}{340-30} = n \cdot \frac{33}{31}$$

Nachher: $n \cdot \frac{340+30-20}{340+30} = n \cdot \frac{35}{37}$

Bis hierher haben wir nur von akustischen Wellen gesprochen, welche sich in der Luft mit einer Geschwindigkeit von 340 m/sec fortbewegen. Selbstverständlich tritt der Dopplereffekt auch auf, wenn sich die Wellen in einem anderen Medium fortbewegen. Was uns einigermassen zu erstaunen vermag, ist die Tatsache, dass der Dopplereffekt auch dann beobachtet werden kann, wenn sich eine Lichtquelle mit grosser Geschwindigkeit von uns wegbewegt (oder auf uns zu bewegt), wie dies bei gewissen Sternen der Fall ist. Es muss beachtet werden, dass auch das Licht Wellencharakter hat, wobei die auftretenden Frequenzen wesentlich grösser sind, als die in der Akustik auftretenden. So entspricht etwa das orange Licht des Regenbogens einer Frequenz von ungefähr 500 Billionen Hz. Das Licht bewegt sich mit ca. 300.000 km/s fort. Wie 1881 Michelson mit seinem berühmten Experiment nachweisen konnte, ist diese Geschwindigkeit absolut und unübertrefflich. Das sichtbare Licht besteht aus Wellen mit Wellenlängen zwischen 400 und 700 nm[73]. Bereits konnte das Sonnenlicht mit einem Prisma in ein kontinuierliches Spektrum verwandeln.

Wenn wir die spektrale Zusammensetzung des von einem Stern abgestrahlten Lichts kennen, und wir ferner wissen, dass sich dieser Stern mit grosser Geschwindigkeit gegenüber der Erde fortbewegt, wäre theoretisch zu erwarten, dass eine dem Dopplereffekt entsprechende Farbverschiebung zu beobachten wäre. Da wir aber keine Möglichkeit haben, die spektrale Zusammensetzung des Lichts eines solchen Sterns zu kennen, scheint dieses Experiment undurchführbar. Und doch ist die Farbverschiebung bei gewissen Sternen feststellbar, und das dank den Linien von Fraunhofer.

Im Jahr 1815 bemerkte der Physiker und Fabrikant optischer Instrumente Joseph von Fraunhofer (1787-1826), dass das Sonnenspektrum nicht absolut kontinuierlich war, wie bisher angenommen, sondern dass ganz bestimmte Frequenzen fehlten. Diese als Fraunhofersche Absorptionslinien bekantgewordenen Lücken sind charakteristisch für die in den Gasschichten, die das Licht durchqueren muss, enthaltenen chemischen Elemente. Die verschiedenen Elemente sind durch die Verteilung der Faunhoferschen Linien eindeutig erkennbar, und zwar auch dann, wenn sie aus dem ihnen entsprechenden Frequenzbereich gerückt werden, da die Verhältnisse zwischen ihren Abständen sie unmissverständlich identifizieren. Diese

[73] 1 nm (Nanometer) ist der tausendmillionste Teil eines Meters.

Erscheinung ist mit dem Schatten von mehreren Wäscheseilen vergleichbar: manchmal ist es schwierig, jedem Seil seinen Schatten zuzuordnen; Stecken jedoch ein paar Wäscheklammern auf den Seilen, lassen sich die Seile an den Verhältnissen zwischen den Abständen leicht erkennen.

Dank der Eindeutigkeit der Fraunhoferschen Linien war es möglich, das Helium[74], auf der Sonnenoberfläche zu bestimmen, noch bevor dieses Element auf der Erde bekannt war. Dem französischen Physiker A.H.L. Fizeau wird das Verdienst zugeschrieben, als erster die chromatische Verschiebung der Fraunhoferschen Linien durch den optischen Dopplereffekt am Licht gewisser Sterne studiert zu haben. Da die Verschiebungen nur sehr klein sind, wurden die ersten Erfolge nicht vor 1868 verzeichnet, als der Astronom William Huggins im Spektrum von Sirius eine kleine Verschiebung feststellen konnte.

Später konnten dank statistischer Rechnungen, die auf eine grosse Anzahl Sterne und ihre chromatischen Verschiebungen angewandt wurden, Rückschlüsse auf die Dimensionen unserer Galaxie und auf die Stellung unserer Erde in ihr gezogen werden. Aber diese Probleme haben mit unserem Thema nichts mehr zu tun.

[74] **Durch Pierre Jules César Janssen (1824-1907), im Jahr 1869.**

ANHANG: EIN PROGRAMM IN PASCAL

Im Kapitel 'DIE MUSIKALISCHEN TONLEITERN' wurde die Möglichkeit erwähnt, eine beliebige reelle Zahl als Kettenbruch darzustellen. Anhand eines einfachen Beispiels, das in jenem Kapitel vorgestellt wurde, werden wir zuerst ein einfaches Programm in *Pascal* schreiben, das den Prozess automatisiert.

Pascal ist zur Vorführung von Algorithmen besonders geeignet, da es vor allem aus didaktischen Gründen anfangs der Siebzigerjahre durch den berühmten Professor Niklaus Wirth an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich entwickelt wurde. Ein in *Pascal* abgefasstes Programm kann ohne grössere Probleme in jede andere modulare Computersprache übertragen werden, wie etwa in *C* oder in *C++*.

Wir haben hier den *Turbo Pascal* Compiler von Borland verwendet, der in seiner französischen Version 7.01 von der Firma Borland gratis angeboten wird, und zwar auf der folgenden Internet-Seite:

http://www.borland.fr/download/compilateurs/

Für Leser, die *Pascal* nicht kennen, sei erwähnt, dass ein *Pascal*-Programm stets vom Hauptteil aus gelesen werden muss, der mit *"begin"* eingeleitet und vom abschliessenden *"end."* beendet wird. Das Beispiel, das unseren Überlegungen zugrunde liegen wird, ist die Entwicklung der rationalen Zahl 2,15 in einen Kettenbruch.

A) DIE ARITHMETISCHE RECHNUNG

$$\begin{aligned} 2{,}15 \quad &= 215 : 100 \\ &= 2 + 15/100 \\ &= 2 + \frac{1}{100/15} \\ &= 2 + \frac{1}{6 + 10/15} \end{aligned}$$

$$= 2 + \cfrac{1}{6 + \cfrac{1}{15/10}}$$

$$= 2 + \cfrac{1}{6 + \cfrac{1}{1 + 5/10}}$$

$$= 2 + \cfrac{1}{6 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{10/5}}}$$

$$= 2 + \cfrac{1}{6 + \cfrac{1}{1 + \cfrac{1}{2}}}$$

B) Der Algorithmus

Wir benutzen hier vier Variablen mit den Namen r, s, t und u. Das Zeichen := bedeutet in der Symbolsprache von *Pascal* die Zuordnung eines Wertes an eine Variable.

1) r := 215
2) s := 100
3) t := Resultat der Division von r durch s
4) t ist das nächste Element unserer Folge
5) u := Rest der Division von r durch s
6) r := s
7) s := u
8) Ist s verschieden von 0, mit Nummer 3) weiterfahren; sonst abbrechen.

C) Das erste Programm

Um die hier skizzierte Idee in die Programmiersprache *Pascal* umzuwandeln, müssen wir bedenken, dass wir es hier mit ganzen Zahlen zu tun haben. Würden wir unser Problem mit Zahlen des Typs *real* zu lösen versuchen oder die diesen Zahlen entsprechende Division anwenden, könnten wir leicht falsche Resultate erhalten. Dasselbe würde geschehen, wenn wir unseren Algorithmus mit einem elektronischen Taschenrechner durchführen wollten.

Dieses Problem ist folgendermassen begründet: Suchen wir etwa mit einem Taschenrechner den Rest der Division von 20 durch 5, können zwei Fälle eintreten:

- Der Rechner interpretiert den Quotienten als $5 + \Delta$ (wobei Δ einen sehr kleinen positiven Wert darstellt, den auf jedem Taschenrechner unvermeidbaren Fehler); in diesem Fall ist der ganzzahlige Anteil des Quotienten gleich 5 und wir haben Glück gehabt.
- Der Rechner interpretiert den Quotienten als $5 - \Delta$; jetzt ist der ganzzahlige Anteil des Quotienten plötzlich 4 und unser Algorithmus liefert falsche Ergebnisse.

Glücklicherweise sind die meisten Programmiersprachen auf ganze Zahlen und die entsprechenden arithmetischen Operationen eingerichtet (wir werden hier den Typ *longint* einsetzen). *Pascal* bietet uns die Operationen *div*, um ganze Zahlen zu dividieren, und *mod*, um den Rest dieser Division zu bestimmen.

Die erste Fassung unseres Programms hat die folgende Form:

```
program klein;
var     r, s, t, u: longint;


procedure dividieren;
begin
  t := r div s;
  u := r mod s;

  writeln (t);

  r := s;
  s := u
end;


begin
  r := 215;
  s := 100;

  repeat
    dividieren
  until s = 0
end.
```

D) VERSION FÜR GROSSE ZAHLEN

Schliesslich stellen wir ein System vor, um die Beschränkung der meisten Compiler auf eine gewisse Anzahl Dezimalstellen zu umgehen, indem wir die verschiedenen arithmetischen Operationen von Grund auf programmieren.

G_ZAHL, die *Pascal-Unit*, die wir hiermit vorstellen, kann etwa zur Bestimmung der ersten n Dezimalstellen einer irrationalen Zahl (wie etwa π) dienen oder bei einem Programm eingesetzt werden, das mit gemeinen Brüchen rechnet. Hier ist die Anzahl Dezimalstellen der Zahlen des Typs *grosse_zahl* gleich 50. Aber es ist leicht, diese Stellenzahl bis zu den Systemeigenen Beschränkungen zu erhöhen.

Unsere Unit *G_zahl*, die den Typ *grosse_zahl* und die entsprechenden Operationen festlegt, verfügt über ein *Procedure* der Form *divi (**a, b,** t, u)* in der a und b konstante Parameter darstellen, während *t* und *u* variabel sind. Dieses *Procedure* ersetzt *t* durch den Quotienten von a und b. Der Parameter *u* gibt uns den Rest der Division zurück.

Um eine Zahl auf Null zu setzen (in unserem Fall die Variable *die_null*), haben wir das *Procedure* mit dem Namen *nullgleichmachen* geschrieben. Um eine Zahl von der Tastatur einzulesen brauchen wir das *Procedure einlesen_zahl*, das nicht nur den variablen Parameter des Typs *grosse_zahl* enthält, der zu Null gemacht werden soll, sondern auch eine logische Variable, die den Wert *true* (wahr) zurückgibt, falls bei der Eingabe die Taste *ESC* gedrückt wurde.

Um eine Zahl des Typs *grosse_zahl* am Bildschirm darzustellen, können wir das *Procedure write*, das uns *Pascal* zur Verfügung stellt, nicht gebrauchen. Wir haben dafür das *Procedure darstellen* unserer *Unit G_zahl* geschrieben.

Schliesslich brauchen wir die *Funktion gleich (a, b),* die uns nur *true* liefert, falls a und b gleich sind. Damit können wir etwa feststellen, ob ein Wert gleich *die_null* (der Null der *Unit G_zahl*) ist.

Wenn wir über eine solche *Unit* verfügen, können wir unser Programm in die folgende Form verwandeln:

```
program gross1;
uses    g_zahl;
var     r, s, t, u        : grosse_zahl;
        die_null          : grosse_zahl;
        raus              : Boolean;
```

```
procedure dividieren;
begin
  divi (r, s, t, u);

  write ('    ');
  darstellen (t);
  writeln;

  r := s;
  s := u
end;


begin
  nullgleichmachen (die_null);

  write ('r = ');
  einlesen_zahl (r, raus);
  writeln;

  write ('s = ');
  einlesen_zahl (s, raus);
  writeln;
  writeln;

  repeat
    dividieren
  until gleich (s, die_null)

end.
```

E) Eine verbesserte Version des vorigen Programms

Um unser Programms nicht unnötig aufzubauschen, haben wir in diesem ersten Beispiel auf die Anwendung der Variablen *overflow* unserer *Unit G_zahl* verzichtet; diese erlaubt es uns, festzustellen, ob in irgend einer Phase des Programmablaufs eine Operation durchgeführt wurde, die aus dem Bereich unserer Zahlen hinaus führt. So wird etwa *overflow* auf *true* gesetzt, wenn versucht wird, durch Null zu dividieren. Wir haben auch bisher aus der Variablen des Typs *Boolean*[75] des *Procedures einlesen_zahl* keinen Nutzen gezogen.

Das verbesserte Programm kann die folgende Gestalt annehmen:

```
program gross2;
uses    g_zahl;
var     r, s, t, u       : grosse_zahl;
        die_null         : grosse_zahl;
        raus             : Boolean;
```

[75] In Ehre des britischen Mathematikers George Boole (1815-1864).

```
procedure aufgeben;
begin
  writeln;
  write ('Abbrechen mit ESC...');
  halt                     { Abbruch des Programms }
end;


procedure warnung;
begin
  writeln;
  write ('Overflow! Das Resultat ist nicht zuverlässig!');
  halt
end;


procedure dividieren;
begin
  divi (r, s, t, u);

  write ('    ');
  darstellen (t);
  writeln;
  r := s; s := u
end;


begin
  nullgleichmachen (die_null);

  write ('r = ');
  einlesen_zahl (r, raus);
  if raus then aufgeben;
  writeln;

  write ('s = ');
  einlesen_zahl (s, raus);
  if raus then aufgeben;
  writeln;
  writeln;

  repeat
    dividieren
  until gleich (s, die_null);

  if overflow then warnung

end.
```

F) Eine Unit zum Rechnen mit grossen Zahlen

Schliesslich sei hier die Unit *G_zahl* aufgelistet, die es uns erlaubt mit 50-stelligen Dezimalzahlen zu rechnen. Möchten wir diese Präzision überbieten, können wir die erste Zeile des Programms abändern und zum Beispiel schreiben:

```
      const n = 60;
```

Von einer gewissen Zahl an werden wir die Verfahren zur Darstellung der Zahlen am Bildschirm und zur Eingabe der Zahlenwerte anpassen müssen. Lassen wir die Stellenzahl allzu stark anwachsen, werden wir plötzlich Schwierigkeiten mit der vom Compiler zulässigen *Array*-Grösse, sowie mit der nötigen RAM[76] bekommen. Wir könnten etwa versuchen, die Zahlen als Dateien auf der Festplatte zu definieren, was uns erlauben würde, mit wesentlich grösseren Zahlen zu rechnen, wobei die Rechengeschwindigkeit allerdings durch die vielen Zugriffe auf die Festplatte erheblich herabgesetzt würde.

Aber für alle diese Beschränkungen sind nicht die hauptsächlichen arithmetischen Verfahren verantwortlich, die von der Grössenordnung der verwendeten Zahlen unabhängig sind.

Beim programmieren dieser Algorithmen bemerken wir erst, wie kompliziert die vier Grundoperationen doch sind, welche die meisten zehn- oder zwölfjährigen Kinder durchführen können.

```
UNIT G_ZAHL;

{$O+}{$F+}

INTERFACE

USES CRT, DOS;

const n              = 50;  { Definiert die Anzahl
                                Stellen als n+1 }
      leer_kette     = '';
      abstand        = chr (32);

type   Dezimal       = 0 .. 9;  { Da wir ja im
                                    Zehnersystem rechnen }
type   kette79       = string [79];
       grosse_zahl   =  record
                          ziffer : array [0 .. n+1] of Dezimal;
                          maxpos : byte
                          { letzte signifikante Position }
                        end;
{ ----- }
       ganz        = record     { zum Rechnen mit neg. Zahlen }
                        absolut    : grosse_zahl;
                        positiv    : Boolean
                     end;
{ ----- }

var overflow    : Boolean;  { TRUE, falls eine Rechnung
                              durchgeführt
                              wurde, die aus dem Bereich von
                              grosse_zahl hinausführt }
    n_1, n_0    : grosse_zahl;

procedure einlesen (var ascii, identifizierer: byte);
```

[76] Random Access Memory.

```
procedure einlesen_zahl (var zahl_x: grosse_zahl;
                         var esc: Boolean);
procedure darstellen (zahl_x : grosse_zahl);
function  groesser (erste, zweite: grosse_zahl): Boolean;
function  gleich (erste, zweite: grosse_zahl): Boolean;
procedure eins  (var grossezahl: grosse_zahl);
procedure nullgleichmachen (var grossezahl: grosse_zahl);
procedure summe (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
procedure mult (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
procedure abzug (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
procedure divi (zaehler, nenner: grosse_zahl;
                var quocient, rest: grosse_zahl);
procedure kuerzen (var a, b: grosse_zahl);
procedure ggt (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
procedure kgv (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
{ ----- }
procedure summe_ganz (var total: ganz; a, b: ganz);
procedure swap_ganz (var erste, zweite: ganz);
procedure umkehren_ganz (var total: ganz);
procedure mult_ganz (var total: ganz; erste, zweite: ganz);
{ ----- }


IMPLEMENTATION

type              natuerlich     = byte;
    { Vorsicht: bei Zahlensystemen mit Stellenzahl über 255,
                word statt byte verwenden }

procedure einlesen;  { Liest ein Zeichen von der Tastatur ein }
var       reg     : registers;
begin
reg.AH            := 0;           { Funktionsnummer }
  intr (22, reg);                 { Interrupt 16h   }
  ascii           := reg.AL;
  identifizierer  := reg.AH
end;


function maxim (a, b: natuerlich): natuerlich;
                   { Gibt den grösseren Wert zweier
                     Dezimalzahlen a und b an }
begin
  if a > b then maxim := a else maxim := b
end;


function nimm_kette (laenge: byte): kette79;
{ Um numerisches kettchen einzugeben }
    const    symbol              = ' ';
    var      kettchen            : kette79;
             index,                { Position im kettchen }
             xx, yy,               { Ursprüngliche Cursor-Pos }
             asc, ide            : byte;    { ascii,
                                              identifizierer }
    {----------}
    procedure zurueck;     { internes procedure von nimm_kette }
    begin
      gotoxy (wherex-1, yy); { zurueck cursor }
    end;
    {----------}
```

```
procedure anfang;       { internes procedure von nimm_kette }
var       i: byte;
begin
  xx := wherex; yy := wherey;
  kettchen := leer_kette;
  index := 1;
  for i := 1 to laenge do
    begin
      kettchen := kettchen + abstand;
      write (symbol)
    end;
  write (symbol);      { +/- kompensieren }
  gotoxy (xx, yy)
end;
{----------}

begin                 { aus der funktion nimm_kette }
  textbackground (red);
  textcolor (white);
  anfang;
  repeat
    einlesen (asc, ide);

    if (asc > 47) AND
       (asc < 58) then   { falls es eine Dezimalstelle ist }
       begin
         kettchen [index] := chr (asc);
         write (chr (asc));
         if index < laenge     { falls nicht letzter
                                 Buchstabe vom kettchen }
           then     inc (index)
else     zurueck                 { falls letzter Buchstabe }
       end;

    if (   ((asc = 8) and (ide = 14))   { Pfeil nach links }
        or ((asc = 0) and (ide = 75))  )
        then
            begin
              kettchen [index] := abstand;
              write (symbol);
              zurueck;
              if index > 1 then
                begin
                  zurueck;
                  write (symbol);
                  zurueck;
                  dec (index);
                  kettchen [index] := abstand
                end
            end;

    if      ((asc = 27) and (ide = 1))    { ESC wurde
                                            gedrückt }
        or  ((index = 1) and (asc = 13))  { leere Kette }
      then
      begin
        kettchen := chr (27);
        asc := 13         { repeat überspringen }
      end;
```

```
      until asc = 13;
      while kettchen [length (kettchen)] = abstand do
        kettchen := copy (kettchen, 1, length (kettchen) - 1);
      nimm_kette := kettchen;

      { kettchen darf manipuliert werden }
      while length (kettchen) < n + 1 do
          kettchen := abstand + kettchen; { +1 kompensiert +/- }
      gotoxy (xx, yy);
      textbackground (7);
      textcolor (0);
      write (kettchen);
      normvideo
end;                                         { nimm_kette }


procedure valor (var zahl_x: grosse_zahl; cad: string);
{ verwandelt kettchen in GROSSE_ZAHL }
var      i, laenge  : byte;
         s            : string;
         v            : byte;
         code         : integer;
         pos          : byte;
begin
  laenge := length (cad);
  for i:=n+1 downto laenge do
  zahl_x.ziffer [i] := 0;
  for i:=laenge-1 downto 0 do
    begin
      val (cad [laenge-i], v, code);
      zahl_x.ziffer [i] := v
    end;
  pos := 0; { Minimalwert }
  for i:=1 to n do if zahl_x.ziffer [i] <> 0 then pos := i;
  zahl_x.maxpos := pos
end;


procedure einlesen_zahl (var zahl_x: grosse_zahl;
                        var esc: Boolean);
{ Liest eine Zahl des Typs grosse_ZAHL von der Tastatur ein }
var       kettchen : kette79;
begin
  kettchen := nimm_kette (n);
  if kettchen = chr (27) then esc := true else esc := false;
  valor (zahl_x, kettchen);
end;


procedure darstellen (zahl_x : grosse_zahl);
{ Um eine grosse_zahl am Bildschirm darzustellen }
var       i, k : natuerlich;
begin
  textcolor (15);
  textbackground (7);
  k := n;
  while ((zahl_x.ziffer [k] = 0) and (k > 0)) do dec (k);
  for i:=k+1 to n do write (' ');
  for i:=k downto 0 do write (zahl_x.ziffer [i]);
  normvideo;
end;
```

```
function groesser (erste, zweite: grosse_zahl): Boolean;
{ Prüft, ob erste grösser als zweite }
var      k    : natuerlich;
         jetzt_reichts : Boolean;
begin
  k := maxim (erste.maxpos, zweite.maxpos);
  jetzt_reichts := false;
  groesser := false;
  while not jetzt_reichts do
    begin
      if erste.ziffer [k] < zweite.ziffer [k] then
         jetzt_reichts := true;
      if erste.ziffer [k] > zweite.ziffer [k] then
         begin
           groesser := true;
           jetzt_reichts := true
         end;
       if k = 0 then jetzt_reichts := true;
       dec (k)
    end
end;


function gleich (erste, zweite: grosse_zahl): Boolean;
{ Prüft ob erste gleich zweite }
var      k    : natuerlich;
         jetzt_reichts : Boolean;
begin
  k := maxim (erste.maxpos, zweite.maxpos);
  jetzt_reichts := false;
  gleich := true;
  while not jetzt_reichts do
    begin
      if erste.ziffer [k] <> zweite.ziffer [k] then
         begin
           gleich := false;
           jetzt_reichts := true
         end;
       if k = 0 then jetzt_reichts := true;
       dec (k)
    end
end;


procedure eins  (var grossezahl: grosse_zahl);
{ weist grossezahl den Wert 1 zu }
var       i : natuerlich;
begin
  grossezahl.ziffer [0] := 1;
  for i := 1 to n+1 do grossezahl.ziffer [i] := 0;
  grossezahl.maxpos := 0
end;


procedure nullgleichmachen (var grossezahl: grosse_zahl);
{ weist grossezahl den Wert 0 zu }
begin
  eins (grossezahl);
  grossezahl.ziffer [0] := 0;
```

```
  grossezahl.maxpos := 0
end;


procedure mal10 (var a: grosse_zahl);
{ multipliziert mit 10 }
var       i           : natuerlich;
begin
  if overflow then exit;
  if a.maxpos = 0 then if a.ziffer [0] = 0 then exit;
  if a.ziffer [n] <> 0 then
    begin
      overflow := true;
      exit
    end;
  for i:=a.maxpos+1 downto 1 do a.ziffer [i] := a.ziffer [i-1];
  a.ziffer [0] := 0;
  inc (a.maxpos)
end;


procedure summe (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
{ Addiert zwei Zahlen des Typs grosse_zahl }
var       i          : natuerlich;
          s, behalte : byte;
begin
  if overflow then exit;
  nullgleichmachen (resultat);
  resultat.maxpos := maxim (a.maxpos, b.maxpos);
  behalte := 0;
  for i:=0 to    maxim (a.maxpos, b.maxpos)+1    do
    begin
      s := a.ziffer [i] + b.ziffer [i] + behalte;
      behalte := s div 10;
      resultat.ziffer [i] := s mod 10;
    end;

  if resultat.ziffer [i] <> 0 then inc (resultat.maxpos);
  if resultat.maxpos > n then overflow := true
end;


procedure mult (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
{ multipliziert 2 Zahlen des Typs grosse_zahl }
var       i, j           : natuerlich;
          behalte, p     : byte;
          partial        : grosse_zahl;
begin
  if overflow then exit;

  nullgleichmachen (resultat);

  { Ist ein Faktor 0, so ist Produkt 0: }
  if a.maxpos = 0 then if a.ziffer [0] = 0 then exit;
  if b.maxpos = 0 then if b.ziffer [0] = 0 then exit;

  { Beide Faktoren verschieden 0: }
  for j := 0 to  b.maxpos  do
  begin
    nullgleichmachen (partial);
    partial.maxpos := a.maxpos + b.maxpos;
```

```
    behalte := 0;
    for i:=0 to n+1 do
      begin
        p := b.ziffer [j] * a.ziffer [i] + behalte;
        if (i+j<=n) then partial.ziffer [i+j] := p mod 10;
        if i+j > n then if p > 0 then overflow := true;
        behalte := p div 10
      end;
    if behalte <> 0
      then
        begin
          partial.ziffer [i+j+1] := behalte;
          inc (partial.maxpos)
        end;
    summe (resultat, resultat, partial);
  end;
end;


procedure abzug (var resultat: grosse_zahl;
                     a, b    : grosse_zahl);
{ Subtraktion von Zahlen
  des Typs grosse_zahl; nur
  sinnvoll bei a > b     }
var       i, letzte         : natuerlich;
          d, behalte        : byte;
begin
  if overflow then exit;
  nullgleichmachen (resultat);
  letzte := maxim (a.maxpos, b.maxpos);
  behalte := 0;
  for i:=0 to   letzte   do
    begin
      if a.ziffer [i] >= b.ziffer [i] + behalte then
        begin
           d := a.ziffer [i] - b.ziffer [i] - behalte;
           behalte := 0
        end
                      else
        begin
           d := 10 + a.ziffer [i] - b.ziffer [i] - behalte;
           behalte := 1
        end;
      resultat.ziffer [i] := d
    end;
  if behalte <> 0 then overflow := true;

  { es können links Nullen entstanden sein: }
  resultat.maxpos := 0;
  for i:=1 to letzte do if resultat.ziffer [i] <> 0
                        then resultat.maxpos := i;
end;


procedure divi (zaehler, nenner: grosse_zahl;
                var quocient, rest: grosse_zahl);
                    { dividieren von zwei Zahlen des
                      Typs grosse_zahl mit Rest }
var       pos                : natuerlich;
          aux, Z             : grosse_zahl;
          jetzt_reichts      : Boolean;
```

```
          anzahl_mal        : byte;
          i                 : natuerlich;
begin
  if overflow then exit;
  nullgleichmachen (Z);
  if gleich (nenner, Z) then
    begin
      overflow := true;
      exit
    end;
  if groesser (nenner, zaehler) then
    begin
      nullgleichmachen (quocient);
      rest := zaehler;
      exit
    end;
  nullgleichmachen (aux);
  nullgleichmachen (quocient);
  nullgleichmachen (rest);

  pos := n; {  zaehler.maxpos; }
  aux.ziffer [0] := zaehler.ziffer [pos];
  jetzt_reichts := false;

  repeat

    anzahl_mal := 0;
    while (groesser (aux, nenner) or gleich (aux, nenner)) do
      begin
        inc (anzahl_mal);
        abzug (aux, aux, nenner)
      end;


    quocient.ziffer [pos] := anzahl_mal;
    if pos > 0 then dec (pos) else jetzt_reichts := true;
    if not jetzt_reichts then
      begin
        mal10 (aux);
        aux.ziffer [0] := zaehler.ziffer [pos];
      end

  until jetzt_reichts;
  rest := aux;

  { Die Nullen links entfernen: }

  rest.maxpos := 0;
  for i:=1 to n do if rest.ziffer [i] <> 0 then
                                          rest.maxpos := i;
  quocient.maxpos := 0;
  for i:=1 to n do if quocient.ziffer [i] <> 0 then
                                       quocient.maxpos := i;
end;


procedure ggt (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
{ Grösster Gemeinsamer Teiler }
var       quocient, rest, Z    : grosse_zahl;
begin
  nullgleichmachen (Z);
```

```
  if (gleich (a, Z) or gleich (b, Z)) then overflow := true;
  if overflow then exit;
  repeat
    divi (a, b, quocient, rest);
    a := b;
    b := rest
  until gleich (rest, Z);
  resultat := a
end;


procedure kuerzen (var a, b: grosse_zahl);
{ Bruch a/b kürzen }
var       d, rest : grosse_zahl;
begin
  ggt (d, a, b);
  divi (a,d,a,rest);
  divi (b,d,b,rest)
end;


procedure kgv (var resultat: grosse_zahl; a, b: grosse_zahl);
{ kleinstes gemeinsames Vielfaches }
var       max : grosse_zahl;
begin
  if overflow then exit;
  ggt (max, a, b);
  kuerzen (a, max);
        { da max auch a teilt, muss nur noch
          a mit b multipliziert werden) }
  mult (resultat, a, b)
end;


procedure umkehren_ganz (var total: ganz);
{ positiv zu negativ und umgekehrt }
begin
  if overflow then exit;
  if total.positiv then total.positiv := false
                   else total.positiv := true
end;


procedure summe_ganz (var total: ganz; a, b: ganz);
begin
  if overflow then exit;
  total.positiv := true; { Ausgangsannahme }

  if a.positiv and b.positiv
  then
    begin
      summe (total.absolut, a.absolut, b.absolut);
    end
  else
  if a.positiv and not b.positiv
  then
    begin
      if groesser (a.absolut, b.absolut) {*}
      then {*}
        begin
          abzug (total.absolut, a.absolut, b.absolut)
```

```
        end
      else {*}
        begin
          abzug (total.absolut, b.absolut, a.absolut);
          total.positiv := false
        end
    end
  else
  if not a.positiv and b.positiv
  then
    begin
      if groesser (b.absolut, a.absolut) {**}
      then {**}
        begin
          abzug (total.absolut, b.absolut, a.absolut)
        end
      else {**}
        begin
          abzug (total.absolut, a.absolut, b.absolut);
          total.positiv := false
        end

    end
  else
  if not a.positiv and not b.positiv
  then
    begin
      summe (total.absolut, a.absolut, b.absolut);
      total.positiv := false
    end
end;


procedure swap_ganz (var erste, zweite: ganz);
var       joker : ganz;
begin
  if overflow then exit;
  joker  := erste;
  erste  := zweite;
  zweite := joker
end;


procedure mult_ganz (var total: ganz; erste, zweite : ganz);
begin
  if overflow then exit;
  mult (total.absolut, erste.absolut, zweite.absolut);
  if erste.positiv = zweite.positiv then total.positiv := true
                                    else total.positiv := false
end;


BEGIN
  nullgleichmachen (n_0);
  eins (n_1);
  overflow := false
END.
```

HISTORISCHER ÜBERBLICK

IV Jh. v. Chr. Aristoteles stellt fest, dass die Schallgeschwindigkeit von der Tonhöhe (also von der Frequenz) unabhängig ist. Die alte Theorie, wonach die verschiedenen Tonhöhen durch verschiedene Schallgeschwindigkeiten bestimmt sind, ist hiermit widerlegt.

III Jh. v. Chr. Der Ingenieur Ctesibius von Alexandrien erfindet die Orgel.

235 v. Chr. Aristoxenos entdeckt das Komma.

I Jh. n. Chr. Vitruvius Pollio beschreibt eine Tastatur.

XIII Jh. Legendärer künstlicher Kopf von Albert dem Grossen (1193-1280).

1350, ca. Rudolf von Nürnberg erfindet ein System, um einen Draht mittels hydraulischer Kraft zu ziehen. Konsequenz: Aufkommen der Zither mit Eisendrahtsaiten.

1482 Bartolomé Ramos schlägt in seinem Buch *"De Musica Tractatus"* eine temperierte Stimmung vor.

XVI Jh. Zarlino gestaltet das 12 Modalsystem.

XVI Jh. Die grossen Anatomen der Epoche, Eustachi, Falloppio und Vesalius entdecken die Struktur des menschlichen Gehörorgans.

XVI Jh. Vicentino (1511-72) lässt ein Tasteninstrument konstruieren, in dem die erhöhten und die erniedrigten Noten nicht auf denselben Tasten zusammentreffen.

1511 Schlick beschriebt die Haupttonstimmung in seinem Buch *"Spiegel der Orgelmacher und Organisten"*.

1577 Der blinde Musiker Francisco de Salinas beschreibt die Haupttonstimmung in seinem Buch *"De Musica Libri Septem"*.

XVII Jh. Gassendi stellt fest, dass die Schallgeschwindigkeit unabhängig von der Frequenz ist.

XVII Jh. Valsalva schlägt die Hörtheorie der Resonanz vor, wonach die Tonanalyse im Ohr stattfände.

1619 Samuel Reyher (1635-1714) stellt fest, dass die musikalischen Töne ausser dem Grundton weitere Partialtöne zu enthalten pflegen.

1636 Mersenne entdeckt die Partialtöne.

1638 Galileo Galilei führt in seinem Buch *"Discorsi"* den Begriff der Frequenz einer schwingenden Saite ein und zeigt, dass diese von der Länge, der Spannung und der Masse der Saite abhängt.

1650, circa Otto von Guericke (1602-86) zeigt, dass sich der Schall nicht im Vakuum fortbewegt (wie das Licht).

1671 Samuel Morland (1625-85) erfindet ein Megaphon (Schalltrichter).

1675 Mercator schlägt die Unterteilung der Oktave in 53 Komas vor.

1677 John Wallis veröffentlicht die Entdeckung der Partialtöne durch William Noble und Thomas Pigot.

1691 Huygens schlägt eine Tonleiter von 31 Tönen vor.

1700, ca. Denner erfindet die Klarinette.

1700 Sauveur versucht, die Grenzen des menschlichen Gehörs zu ermitteln.

1707 Sauveur schlägt eine Tonleiter von 43 Tönen vor.

1709 Bartolomeo Cristofori veröffentlicht die Beschreibung des ersten Klaviers.

1711 John Shore erfindet die Stimmgabel.

1713 Sauveur beschreibt die Schwebungen.

1720, ca. Hochbrucker erfindet die Pedalharfe.

1725 Castel erfindet sein *"Clavecin Oculaire"*.

1731 Holder schlägt die Tonleiter mit 53 Tönen vor.

1738 Eine durch die *"Académie Royale des Sciences"* ernannte Wissenschafterkommission (Jacques Cassini, Maraldi, Lacaille und andere) bestimmt die Schallgeschwindigkeit und erhält den Wert von 337 m/s.

1738 Vaucanson stellt der *Académie des Sciences* einen Musikautomaten vor.

1743 Jean-Antoine Nollet (1700-1770) untersucht die Ausbreitung des Schalls im Wasser.

1745 Sorge entdeckt die Differenztöne.

1745 Giuseppe Tartini entdeckt die Differenztöne.

1760 Engramelle erfindet ein Tasteninstrument, das die gespielten Improvisationen aufzeichnet.

1761 Delaborde erfindet ein elektrisches Cembalo.

1763 Benjamin Franklin erfindet die Glasharmonika.

1773 Broadwood baut sein erstes Klavier.

1777 Sébastien Erard baut das erste französische Klavier.

1777 Joseph Priestley (1733-1804) entdeckt, das die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in einem Gas zu dessen Dichte proportional ist. Er veröffentlicht das Buch *"Experiments and Observations on Different Kinds of Air"*.

1779 Higgins beobachtet die von einer Wasserstofflamme in einem Glasrohr erzeugten Töne *(Chemische Orgel).*

1781 John Broadwood baut seinen ersten Flügel.

1783 John Broadwood erhält ein Patent für ein Klavierpedal.

1789 Erard baut seinen ersten Flügel.

1790 Chladni entdeckt die Chladnischen Figuren.

1800, ca. Young formuliert sein Gesetz der schwingenden Saite.

1802, ca. Maelzel baut sein *"Panharmonicon".*

1807 Thomas Young erfindet ein Gerät zur Aufzeichnung der Vibrationen einer Stimmgabel auf einen mit Russ bedeckten Zylinder.

1814 Entdeckung der Fraunhoferschen Linien.

1814 Laënnec erfindet das erste Stethoskop.

1817 Valentin Haüy (1745-1822) entdeckt den piezoelektrischen Effekt.

1819 Charles Cagniard de la Tour erfindet die Sirene.

1820 Oerstedt entdeckt den Elektromagnetismus.

1822 Fourier formuliert seinen Satz.

1822 Eine Gruppe Wissenschafter, darunter Humboldt, messen in Paris die Schallgeschwindigkeit.

1828 Colladon und Sturm messen die Schallgeschwindigkeit im Wasser. Die im Léman-See durchgeführten Untersuchungen ergeben eine Geschwindigkeit von 1435 m/s.

1830 Flourens lokalisiert den Gleichgewichtssinn in den Bogengängen des Gehörs.

1830 Patent von A. Babcock für einen Klavierrahmen aus Gusseisen aus einem Stück für gekreuzte Saiten.

1831 Boehm empfiehlt die Überkreuzung der Klaviersaiten.

1831 Boehm erfindet die Flöte, die seinen Namen trägt.

1834 Webster aus Birmingham produziert einen Stahldraht, der den Eisendraht im Klavierbau ablöst.

1834 E.H. Weber formuliert seinen Satz: *"Die kleinste noch wahrnehmbare Zunahme eines Reizes ist ein konstanter Bruchteil des wahrgenommenen Wertes."*

1837 Entdeckung des Page-Effekts.

1837 Wheatstone drückt seine Vokaltheorie aus.

1840 Duhamel erarbeitet ein System zur graphischen Darstellung des Schalls, ähnlich wie der *Phonautographe* von Scott.

1842 Doppler entdeckt den nach ihm benannten Effekt..

1843 J. Chickering aus Boston patentiert einen Piano-Gussrahmen.

1843 Ohm erarbeitet seine Theorie über die Klangfarbe.

1844, ca. Hipkins führt die gleichmässige Temperatur für die Stimmung der Klaviere der Firma Broadwood ein.

1845 "Orchestrion" von Michael Welte.

1846 Corti entdeckt das nach ihm benannte Organ.

1848 Fizeaustellt fest, dass der Dopplereffekt auch in der Optik auftritt.

1850 Logarithmisches Gesetz von Fechner.

1850 Debain konstruiert ein automatisches Klavier mit Kurbelantrieb.

1851 Lichtenthal von Sankt Petersburg stellt im Hyde-Park einen Flügel mit gekreuzten Saiten und zwei Resonanzböden vor.

1851 Montal erfindet das linke Klavierpedal.

1854 Charles Bourseul (1829-1912) Drückt die Möglichkeit aus, ein Telephon zu konstruieren.

1855 Die Firma Pöhlmann verbessert die Qualität und den Zug-Widerstand der Klaviersaiten.

1855, ca. Helmholtz baut seinen Stimmgabel-Synthesizer.

1856 Helmholtz entdeckt die Summentöne.

1857 Scott erfindet den *"Phonautographe"*.

1857 Helmholtz verteidigt die Gehörtheorie der Resonanz.

1860 Erscheint das Buch von G.T. Fechner *"Elemente der Psychophysik"* mit dem berühmten Gesetz, wonach die Empfindung sich verhält wie der Logarithmus des Reizes.

1861 J.P. Reis erfindet das erste elektrische Telephon.

1864 R. Koenig untersucht den Schall mit der manometrischen Kapsel und einem Drehspiegel.

1866 Quincke erfindet das Umwegsrohr.

1868 Mustel baut die *Celesta*.

1876 Telephon von Alexander Bell.

1877 Hughes erfindet sein Mikrophon.

1877 Berliner erfindet ein Mikrophon.

1877 Charles Cros und Edison erfinden (unabhängig voneinander), den Phonographen.

1880 Jules Carpentier kombiniert den Lochkartenstreifen mit der pneumatischen Steuerung.

1881 Clément Ader organisiert im Rahmen der Elektrizitätsausstellung eine direkte stereophonische Telephonübertragung aus der Pariseroper. Das Publikum trug Kopfhörer. Die eingesetzten Mikrophone fabrizierte er selber.

1882 Bongardt gründet die Stahldraht- und Klaviersaitenfabrik *"Stahl- und Drahtwerk Röslau in Röslau"*.

1882 Fischer und Fritz bauen in Leipzig das *"Adiaphon"*, ein Stimmgabelklavier.

1885 Paul Lochmann und Ellis Parr erfinden die gelochte Metallscheibe für Musikautomaten.

1886 Hörtheorie von W. Rutherford (Telephontheorie).

1887 Zusammen mit Tainter, vertreibt Edison einen Phonographen mit Wachszylindern und Elektromotor.

1887 Berliner erfindet das Grammophon (mit Schallplatten).

1888 Oberlin Smith beschreibt das Prinzip der magnetischen Aufzeichnung von Schallwellen[77].

1888 *"Graphophone"* von G. Bell, Chichester Bell und Tainter.

1895 Aeolian bringt einen *Vorsetzer* auf den Markt, der metronomisch gelochte Papierrollen reproduziert.

1896 Marconi patentiert ein System drahtloser Telegraphie, einen Vorgänger der modernen Radiotelephonie.

1896 François Dussaud stellt den ersten elektrischen Phonographen vor.

1897, ca. *Dynamophone* von Cahill.

1898 Der Deutsche Simon zeigt, dass das elektrische Bogenlicht für die Wiedergabe des von einem Mikrophon aufgenommenen Schalls geeignet ist (sprechender Lichtbogen von Duddell).

1898 Erste Versuche von Poulsen im Bereich der Magnetophonie.

1898 Formel von Sabine zur Berechnung des Nachhalls.

1899 Einsatz der Induktionsspule in den Telephoninstallationen.

1899 Augustus Stroh erhält ein Patent für seine Geige, bei welcher der Resonanzboden durch eine Phonographische Membrane und einen Trichter ersetzt wurde.

1899 Ludwig und Pfefferkorn erfinden ein phonographisches Aufzeichnungssystem mit einem heissen Stylet in einem schmelzbaren Material.

1900, gegen Marconi und Popov erfinden die Radiotelephonie (Rundfunk).

1900, ca. Die Gebrüder Pathé kaufen alle Patente Edisons auf, die mit dem Phonographen zu tun haben.

1900 Das *"Telegraphone"* von Poulsen, Vorgänger des Magnetophons, wird an der Weltausstellung vorgeführt.

1900 Edwin S. Votey baut das *"Pianola"* mit eingebautem pneumatischem Getriebe.

1901 Die Firma Aeolian führt die als *"Metrostyle"* bezeichnete Linie auf den Klavierrollen ein.

1901 Duddell erfindet den sprechenden Lichtbogen.

[77] In der Zeitschrift *Electrical World* vom 8. September 1888.

1902 Hupfeld konstruiert das *"Phonola"* (Vorsetzer), das erste in Deutschland fabrizierte Pianola.

1902 Léon Gaumont stellt den ersten Tonfilm her, unter Benutzung von Schallplatten.

1903 Edison entwickelt ein System, um phonographische Zylinder mittels einer Gussform zu vervielfältigen.

1903 Poulsen patentiert sein System, um magnetophonische Datenträger mit Gleichstrom zu polarisieren.

1903 Torres Quevedo patentiert die erste auf Radiowellen basierte Fernsteuerung unter dem Namen *'Telekino'* und dem Kommentar: "Un sistema denominado *Telekino* para gobernar a distancia un movimiento mecánico[78]".

1904 Welte patentiert ein System für die dynamische Differenzierung der Töne des Pianolas.

1904 Welte stellt sein Reproduktionsklavier vor.

1904 Vakuum-Diode von Fleming.

1905 Phonographische Verstärkung durch Reibung (Wawrina).

1906, ca. Die Firma Aeolian führt das System *"Themodist"* für die Pianolas ein.

1906 Busoni ersinnt eine Aufteilung der Oktave in Drittels- und Sechsteltöne.

1906 Ruhmer stellt eine telephonische Verbindung über einen Abstand von 3000 m mit einem Lichtbogen und einer Photozelle her.

1907 Otto Weiss erfindet das Phonoskop, ein Gerät, mit dem schwacher Schall aufgezeichnet und untersucht werden kann.

1907 Hupfeld bringt sein erstes Reproduktionsklavier, das *DEA* auf den Markt.

1907 Lee De Forest erfindet die Vakuum-Triode.

1908 Edison stellt Zylinder mit denselben Massen, aber mit doppelter Spieldauer (4 Minuten) her, die *"Amberol Cylinders"*.

1908 Auf der Konferenz von Buffalo schaffen die Amerikaner eine Norm, welche die Pianolarollen auf 88 Noten festlegt.

1908 Hupfeld stellt seine automatische Geige *"Violina"* vor.

1908 Die Firma Hupfeld führt das System *"Solodant"* für die Pianolas vor, das dem amerikanischen System *"Themodist"* entspricht.

1908 Gründung der amerikanischen Firma *"**Am**erican **Pi**ano **Co**mpany"* (Ampico) durch Zusammenschluss von drei Firmen.

1910 Léon Gaumont erfindet ein System zur pneumatischen Schall-Verstärkung mit Pressluft.

1912 In la Garriga wird die erste Klavierrollenfabrik Kataloniens gegründet.

1912 Clusters von Henry Cowell.

1912 Edison bringt unzerbrechliche Phonographenzylinder aus Zel-

[78] Ein als *Telekino* bezeichnetes System, mit dem man mechanische Bewegung aus der Ferne steuern kann.

luloid auf den Markt, die *"Blue Amberol Cylinders"*.

1912 Vorstellung des *Mélographe* von Nyström, eines Reproduktionsklaviers, das die individuelle Akzentuierung jeder Note erlaubte, aber nie serienmässig hergestellt wurde.

1913 Edison stellt Schallplatten mit senkrechter Aufzeichnung her, die *"Edison Diamond Discs"*.

1913 Die Firma *Aeolian* konstruiert den *DUO-ART* (80 Töne), der als Reproduktionsklavier und als Pianola eingesetzt werden kann.

1913 Die *"American Piano Company"* baut das Reproduktionsklavier *"Ampico"*.

1913 *Philharmonische Orgel* von Welte.

1913 Bruitisme der Futuristen.

1914 Haba kreiert die Vierteltonmusik.

1914 Strawinsky komponiert eine Étude für Pianola.

1918, ab Einsatz der Triode in der Telephonie.
1918 Armstrong erfindet den Superheterodyn-Empfänger.

1920 G.W. Stewart konstruiert den *"Phaser"*, einen Tongenerator, mit dem nach Belieben phasenverschobene Töne erzeugt werden können.

1920, ab In den Bell Laboratorien wird damit begonnen, die Digitalisierung der Töne zu studieren.

1922 Thomas Wilfried baut ein Synästhetisches Instrument, das *Clavilux*, welches Farben auf einen Bildschirm projiziert.

1922 Hans Vogt stellt in Berlin den ersten Lichttonfilm ("Ein Tag auf dem Dorfe") vor.

1922 J.Q. Stewart baut einen elektrischen Vokalen-Generator.

1923, ab Zwölftonmusik von Schönberg.

1923 Zworykin erfindet den Ikonoskop und den Kineskop, Vorläufer des Fernsehens.

1925 Aufkommen der elektromagnetischen Aufzeichnung der Schallplatten.

1926 Dr. Karl Daniel (*1905) stellt die ersten Versuche mit seinem phonographischen Schall-Band an.

1926 Der Film *Don Juan* wird in den USA projiziert, ein Tonfilm mit synchronisierten Schallplatten.

1927 *Superpiano*, Photoelektrisches Tasteninstrument von Spielmann.

1927 Carlson und Carpenter patentieren ein System, um die magnetischen Datenträger für die Magnetophonie mit Wechselstrom zu polarisieren.

1927 John Logie Baird zeichnet Fernsehbilder auf 78-er Platten auf.

1928 Martenot erfindet die *Ondes Martenot*, ein Instrument, welches die herkömmliche Akustik mit der Elektroakustik verbindet.

1928 Békésy beginnt das Gehör zu erforschen.

1928 Fritz Pfleumer patentiert eine Beschichtung von Tonband mit magnetischem Pulver.

1929 Magnetophon (Tonbandgerät) von Stille mit Stahldraht.

1930 *Trautonium* von Trautwein.

1930 Der Physiker Nernst entwickelt das elektroakustische Klavier Neo-Bechstein.

1931, ab Leopold Stokowski führt eine Serie Experimente durch, um die Geschwindigkeit der Schallplatten auf 33 1/3 Umdrehungen pro Minute zu reduzieren und gleichzeitig die Länge der Rille zu vergrössern.

1932 Der Engländer Alan Dower Blumlein stellt eine Stereo-Platte her.

1934 Harvey Fletcher führt eine öffentliche Vorführung der Stereophonie durch.

1935, ca. Magnettonband auf Kunststoffträger.
1935, ca. Pater Pujet in Paris konstruiert seine *Orgue Radio-Synthétique.*

1935, ca. Die Hammondorgel kommt auf den Markt.

1936 Leo Fender bringt eine der ersten elektrischen Gitarren auf den Markt.

1936 Dr. Karl Daniel (*1905) führt an der Berliner Radio-Ausstellung sein Tefiphon vor, eine Art Plattenspieler, der mit einem Band arbeitet, das mit einer Nadel abgetastet wird.

1936 Das Unternehmen Welte konstruiert die *Lichttonorgel.*

1937 Erstes tragbares Tonbandgerät.

1939 In den Bell Laboratorien entwickelt H.W. Dudley den *Voder*, einen Wortsynthesizer.

1939 In den Bell Laboratorien begründet A.H. Reeves ein System zur Digitalisierung des Tons, die *lineare Impuls-Kode-Modulation.*

1939 Edwin Howard Armstrong erfindet die Frequenzmodulation für den Rundfunk.

1940 CBS stellt ein Farbfernsehsystem vor.

1945, ab Elektroakustische Musik.

1948 Die Firma *Columbia* stellt die erste kommerzielle LP mit 33 1/3 Umdrehungen her.

1948, ab Bildaufzeichnung auf Magnetband (Video).

1948 Bardeen, Brattain und Shockley erfinden den Transistor in den Bell Laboratorien.

1949 RCA Victor bringt die Single-Schallplatte mit 45 Umdrehungen pro Minute auf den Markt.

1951 Aeolian stellt einen tragbaren Vorsetzer her. Hier bricht die Entwicklung des Pianolas vorläufig ab.

1951 Das *Tefiphon* von Dr. Karl Daniel (*1905) kommt in den Handel, eine Art Plattenspieler, der mit einem Band arbeitet.

1951 C. A. Culver baut ein elektronisches Gerät zur spektralen Analyse der akustischen Wellen.

1953 Schrägspuraufzeichnungsverfahren für die Videoskopie.

1957 Farbfernsehsystem SECAM.

1958 Die stereophonischen Langspielplatten und die ersten Stereotonbandgeräte erscheinen auf dem Markt.

1958 Ampex baut den ersten Farb-Video-Recorder.

1961 Beginn der FM-Stereo-Rundfunkübertragungen.

1963 Philips Compact Cassette.

1963 Farbfernsehsystem PAL.

1970 Telefunken baut die erste analoge Farbbildplatte mit mechanischer Abtastung.

1972 *Laservision* Bildplattenspieler von Philips.

1975 Ertse Filme mit Stereo-Ton und Dolby A Rauschunterdrückung.

1975 *Betamax*-Recorder von Sony.

1975 JVC führt das Video-Home-System, VHS, ein.

1979 Der Fernsehsatellit *Telstar* wird in Umlauf gebracht.

1979 Philips stellt den ersten CD-Player vor.

1982 Die ersten digitalen Audio-CDs erscheinen auf dem Markt.

1983 Sascha Reckert erfindet das *Verrophon*, ein neues Model der Glasharmonika.

1983 Die ersten *CD, Compact Disc*, kommen auf den Markt.

1987 Im Institut Fraunhofer in Erlangen wird die Möglichkeit untersucht, die informatischen Schalldateien so zu komprimieren, dass nur die Information verloren geht, die vom Gehör ohnehin nicht vernommen werden kann.

1988, ab Digitale Video-Platten.

1989 Das Institut Fraunhofer patentiert seinen Algorithmus, der später zu den MP3-Dateien führte.

1990, ca. Die Firma Yamaha bietet ihr *Disklavier* auf dem Markt an.

1994 Die MPEG-2-Spezifikationen, Grundlage des MP3, werden veröffentlicht.

1995 Die DVD-Platte wird kreiert.

1997 Tomislav Uzelac erschafft mit seinem AMP das erste Wiedergabegerät für MP3.

1997 Gründung der Webseite von www.mp3.com.

1999, ab Tragbare MP3-Wiedergabegeräte.

2000 Disney stellt den Film *Fantasia 2000* vor.

BIBLIOGRAPHIE

Alembert, Jean Le Rond d', *Éléments de musique théorique et pratique suivant les principes de M. Rameau.* Paris, 1752.

Bach, C.P.E., *Versuch über die wahre Art, das Clavier zu spielen.* Berlin, 1753.

Bédos, Dom, *L'Art du Facteur d'Orgues.* 1766.

Békésy, György, auch Georg von, *Experiments in Hearing. (Translated and edited by E.G. Wever).* New York, 1960

Blaserna, Pietro, *La teoria del suono nei suoi rapporti con la musica.* 1875.

Blaserna, Pietro, *Le son et la musique.* Paris, 1877.

Böhm, Theobald, *Über den Flötenbau und die neuesten Verbesserungen desselben.* Mainz, 1847.

Bosanquet, Robert Holford Macdowall, *Temperament of the Division of the Octave*. 1874.

Bosanquet, Robert Holford Macdowall, *An Elementary Treatise on Musical Intervals and Temperament. With an Account of an Enharmonic Harmonium...* London, 1876.

Bosanquet, Robert Holford Macdowall, *Relative Between Notes of Open and Stopped Pipes.*

Bouasse, H., *Bases physiques de la musique.* Paris, Gauthier-Villars, 1906.

Bouasse, H., *Acoustique générale (ondes aériennes).* Paris, 1926.

Bouasse, H., *Acoustique: Cordes et membranes (Instruments de musique à cordes et à membranes).* 1926.

Bouasse, H., *Tuyaux et résonateurs (Introduction à l'étude des instruments à vent).* Paris, 1929.

Bouasse, H., *Tourbillons. Forces acoustiques. Circulations diverses.* 2 Volumes, 1931/32.

Castel, Louis Bertrand Richard, *"Mercure"*, 1725

Caus, Salomon de, *Les raisons des forces mouvantes, avec diverses machines, tant utiles que plaisantes.* Frankfurt, 1615.

Chladni, Ernst Florenz Friedrich, *Die Akustik.* Leipzig, 1802.

Chladni, Ernst Florenz Friedrich, *Neue Beiträge zur Akustik.* Leipzig, 1817.

Delézenne, Charles Edouard Joseph, *Mémoire sur les valeurs numériques des notes de la gamme. (Recueil des travaux de la Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille 1826/27, pages 1-65).* Lille, 1827.

Du Moncel, Théodore Achille Louis, *Le téléphone, le microphone et le phonographe.* 1878.

Du Moncel, Théodore Achille Louis, *Le microphone, le radiophone et le phonographe.* 1882.

Dussaud, François, *Les lentilles acoustiques.* 1895.

Dussaud, François, *Le téléphone haut parleur.* 1898.

Dussaud, François, *Le téléphone sans fil.* 1898.

Dussaud, François, *Théorie des nouveaux procédés d'amplification des sons.* 1899.

Duverney, Joseph Guichard, *Traité de l'organe de l'ouïe, contenant la structure, les usages et les maladies de toutes les parties de l'oreille, par M. Du Verney.* Leide, 1731.

Ellis, Alexander J., *Über die Tonleitern verschiedener Völker.* München, 1922.

Ellis, Alexander J., *Studies in the History of Musical Pitch.* Amsterdam, 1968 (Neuauflage).

Engramelle, Le Père Marie Dominique Joseph, *La tonotechnie, ou l'art de noter les cylindres et tout ce qui est susceptible de notage dans les instruments de concerts mécaniques, ...* Paris, 1775.

Euler, Leonard, *Tentamen novae theoriae musicae,* Petropoli, 1739.

Fechner, Gustav Theodor, *Elemente der Psychophysik.* 1860.

Fechner, Gustav Theodor, *In Sachen der Psychophysik.* Leipzig, 1877.

Fletcher, Harvey, *Speech and Hearing.* 1929.

Fletcher, Harvey, *Speech and Hearing in Communication.* 1952.

Fourier, Jean Baptiste Joseph, *Théorie analytique de la chaleur.* 1822.

Gaforio, Franchino, *Franchini Gafori Landensis Musici professoris theoricum opus armonice discipline (?).* Napoli, 1480.

Glareanus, *Dodecachordon.* Basel, 1547.

Green, David M., *An Introduction to Hearing.* 1976.

Haba, Aloys, *Neue Harmonielehre des diatonischen, chromatischen, Viertel-, Drittel-, Sechstel- und Zwölftel-Tonsystems.* 1927.

Helmholtz, Hermann von, *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik.* Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1863.
(Es sei hier die Neuauflage erwähnt, welche 1954 im Verlagshaus "Dover Publications, Inc., New York" von der zweiten Ausgabe der englischen Übersetzung von A.J. Ellis gedruckt wurde: On the Sensations of Tone, übersetzt 1885)

Hipkins, A.J., *A Description and History of the Pianoforte.* London, 1896.

Holder, William, *Elements of Speech; an essay of inquiring into the natural production of letters...* London, 1669.

Holder, William, *A Treatise on the Natural Ground and Principles of Harmony.* London, 1694.

Hopkins, E.J. & Rimbault, E.F., *The Organ, its History and Construction.* London, 1870.

Kircher, Athanasius, *Musurgia Universalis sive Ars Magna Consoni et Dissoni in X Libros Digesta*, 1650.

Kircher, Athanasius, *Phonurgia Nova sive Conjugium Mechanic-physicum Artis & Naturae Paranympha Phonosophia Concinnatum*, 1673

Koenig, Rodolphe, *Catalogue des appareils d'acoustique.* 1859.

Koenig, Rodolphe, *Quelques expériences d'acoustique.* Paris, 1882.

Kundt, August Adolph Eduard Eberhard, *Über die Mittheilung des Tones longitudinal schwingender Stäbe und Röhren an die umgebende Luft.* 1865.

Kundt, August Adolph Eduard Eberhard, *Über die Schallgeschwindigkeit der Luft in Röhren.* (Aus: Monatsbericht der königlichen Akademie der Wissenschaft, Berlin, 19.12.1867)

Kundt, August Adolph Eduard Eberhard, *Über die Schwingungen der rechteckigen, insbesondere der quadratischen Luftplatten.* (Aus: Annalen der Physik und Chemie, Band CL)

Kundt, August Adolph Eduard Eberhard, *Vorlesungen über Experimentalphysik.* Braunschweig, 1903.

Kützing, Carl, *Theoretisch-praktisches Handbuch der Pianoforte-Baukunst, mit Berücksichtigung der neuesten Verbesserungen, bearbeitet von Carl Kützing.* Bern und Chur, 1833.

Kützing, Carl, *Beiträge zur praktischen Akustik als Nachtrag zur Fortepiano- und Orgelbaukunst.* Bern, 1838.

Kützing, Carl, *Theoretisch-praktisches Handbuch der Orgelbaukunst.* Bern, 1843.

Kützing, Carl, *Das Wissenschaftliche der Fortepianobaukunst.* Bern, Chur und Leipzig, 1844.

Mahillon, Victor Charles, *Éléments d'acoustique musicale et instrumentale, comprenant l'examen de la Construction théorique de tous les instruments de musique en usage dans l'orchestration moderne.* Bruxelles, 1874.

Marpurg, Friedrich Wilhelm, *Anfangsgründe der theoretischen Musik.* Leipzig, 1757. (Es gibt eine Faksimileausgabe: New York, 1966)

Marpurg, Friedrich Wilhelm, *Versuch über die musikalische Temperatur.* Breslau, 1776.

Mayer, Alfred Marshall, *Sound.* 1878.

Mersenne, Marin, *Harmonie universelle.* 1636.

Miller, Dayton Clarence, *The Science of Musical Sounds.* New York, 1916.

Montal, Claude, *Abrégé d'accorder soi-même son piano.* 1834.

Montal, Claude, *Traité complet de l'accord du piano.* 1836.

Montal, Claude, *Notice raisonnée sur les perfectionnements introduits dans la fabrication des pianos.* 1852.

Priestley, Joseph, *Experiments and Observations on Different Kinds of Air.*

Rameau, Jean Philippe, *Nouveau système de musique théorique.* Paris, 1720.

Rameau, Jean Philippe, *Traité de l'harmonie réduite à des principes naturels.* 1721.

Rameau, Jean Philippe, *Démonstration du principe de l'harmonie.* 1750.

Ramos de Pareja, Bartolomé, *De musica tractatus, sive musica practica Bononia, dum eam ibid, publice legeret.* 1482.

Rayleigh, John William Strutt, *The Theory of Sound.* 2 Volums, 1894, 1896.

Rousseau, Jean Jacques, *Dictionnaire de Musique.*

Rutherford, William, *Text Book on Physiology.*

Rutherford, William, *Outline of Practical Histology.*

Sabine, Wallace Clement, *Collected Papers on Acoustics.* Harvard, 1927.

Salinas, Francisco, *De Musica Libri septem, in quibus ejus doctrinae veritas tamquam ad harmoniam quam quae ad rhythmum pertinet, juxta sensus ac rationis judicium ostenditur.* Salamanca, 1577.

Sauveur, Joseph, *Principes d'acoustique et de musique ou système général des intervalles des sons.* Paris, 1701.

Savart, Félix, *Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archet.* Paris, 1819.

Schaeffer, Pierre, *À la recherche d'une musique concrète*, 1952.

Schlick, Arnold, *Spiegel der Orgelmacher und Organisten.* Mainz, 1511. (Es gibt eine Faksimileausgabe mit englischer Übersetzung, Knuf, 1980)

Seashore, Carl Emil, *Psychology of Music.*

Smith, Robert, *Harmonics, or the Philosophy of Musical Sounds.* Cambridge, 1749. (Es gibt eine Faksimileausgabe, New York, Da Capo Press, 1966)

Sorge, Georg Andreas, *Anweisung zur Stimmung und Temperatur in einem Gespräch.* 1744.

Sorge, Georg Andreas, *Zuverlässige Anweisung Klaviere und Orgeln gehörig zu temperieren und zu stimmen.* 1758.

Trautwein, Friedrich Adolf, *Trautoniumlehre.* 1936.

Tyndall, John, *Lectures on Sound.* 2. Ausgabe, 1869.
(Es gibt eine französische Übersetzung: *Le son*, 1869 und eine deutsche: *Der Schall,* 1869)

Unger, Johann Friedrich von, *Entwurf einer Maschine, wodurch alles, was auf dem Klavier gespielt wird, sich von selber in Noten setzt.* 1774.

Valsalva, Antonio Maria, *De Aure humana tractatus in quo integra fabrica, multis novis inventis et iconismis illustrata describitur, omniumque ejus partium usus indagantur quibus interposita est musculorum uvulae, atque pharyngis nova descriptio et delineatio, Auctore Antonio Maria Valsalva,...* 1707.

Vesalius, Andreas, *De humanis corpore libri septem.* Basel, 1543.

Vicentino, Nicholas, *Descrizione dell' archiorgano.* 1561.

Weber, Ernst Heinrich, *De aure et auditu hominis et animalium.* 1820.

Weber, Ernst Heinrich, *Der Tastsinn und das Gemeingefühl.* 1851.
Werckmeister, Andreas, *Musikalische Temperatur; oder deutlicher und wahrer mathematischer Unterricht, wie man durch Anweisung des Monochordi ein Clavier, sonderlich die Orgelwerke, Positive, Regale, Spinetten, und dergleichen wol temperirt stimmen könne.* Frankfurt und Leipzig, 1691.

Wever, Ernest Glen, *Physiological Acoustics.* Princeton, 1954.

Wever, Ernest Glen, *Theory of Hearing.* New York, 1949.

Young, Thomas, *Outlines and Experiments respecting Sound and Light.* In den *"Philosophical Transactions";* ca. 1799.

Young, Thomas, *Miscellaneous Works.* London, 1855 (4 Bände).

Zarlino, Gioseffo, *Instituzioni harmoniche, divise in quattro parti.* 1558.

BIOGRAPHISCHE ANGABEN

ADER, CLÉMENT (1841-1925) Französischer Ingenieur und Flieger, der um 1880 ein Mikrophon erfand.

ALBERT DER GROSSE (1193-1280) Philosoph und Gelehrter, Alchemist und wichtiger Verbreiter der aristotelischen Theorien. Er besass einen künstlichen Kopf, der Wörter aussprechen konnte.[79]

ARISTOXENOS VON TARENT (350-300 v. Chr., ca.) Griechischer Musiktheoretiker, der die ältesten bekannten Schriften über Musik verfasste: "Harmonische Elemente" und "Rhythmische Elemente".

BARBIERI (oder Barberi oder ähnlich) Vermutlicher italienischer Fabrikant mechanischer Orgeln, die als *"Orgues de Barbarie"* bekannt sind, Ende des XVIII Jh.

BÉKÉSY, GYÖRGY (auch: Georg von) (1899-1972) Erhielt 1961 den Nobelpreis für Medizin für seine Forschungen auf dem Gebiet des menschlichen Gehörs.

BELL, ALEXANDER GRAHAM (1847-1922) Erfinder des Telephons.

BELL, CHICHESTER Chemiker, Vetter von Alexander Graham Bell, Miterfinder des *Graphophons*, eines Phonographen mit Wachszylindern.

BERLINER, EMIL (1851-1929) Deutscher Physiker und Philanthrop. Führte 1876 die Induktionsspule in der Telephonie ein. Im Jahr darauf, erfand er ein Mikrophon. 1887 patentierte er das Platten-Grammophon. Um 1925 erfand er einen Backstein zur akustischen Isolierung. In den USA gründete er das der Vorbeugung infektiöser Krankheiten, insbesondere der Tuberkulose gewidmete *"Bureau of Health Education"*.

BERNOULLI Schweizerische Mathematikerfamilie mit den folgenden Mitgliedern:

Daniel (1700-1782).
Johann (1667-1748), Vater von Daniel.
Jakob (1654-1705), Onkel von Daniel.

[79] Einzelne Quellen weisen auf die Zerstörung dieses Kopfes durch Sankt Thomas von Aquino (1227-1274) hin, der ihn als Erfindung des Teufels auffasste.

BLASERNA, PIETRO (1836-1917) Physikprofessor in Palermo und Rom und Forscher der Akustik.

BOSANQUET, ROBERT HOLFORD MACDOWALL (1841-1912) Englischer Akustiker.

BROADWOOD, JOHN (1732-1812) Englischer Möbelschreiner, der sich dem Instrumentenbau zuwandte. 1761 schloss er sich mit dem schweizerischen Harfenbauer Burkhardt Tschudi (oder Burkat Shudi) zusammen und im Jahr 1773 baute er sein erstes Klavier, eine Kopie eines Modells von Johann Zumpe. 1781 erbauten sie den ersten Flügel.

CAGNIARD DE LA TOUR, CHARLES (1777-1859) Französischer Physiker und Erfinder, welcher im Jahr 1819 die Sirene erfand. Von 1851 an war er Mitglied der *"Académie des Sciences"*.

CARPENTIER, JULES ADRIEN MARIE LOUIS (1851-1921) Französischer Ingenieur und Erfinder. Er erfand einen *"Mélographe"*, mit dem auf dem Klavier gespielte Improvisationen aufgezeichnet werden konnten. Ferner baute er den *"Mélotrope"*, mit dem die Aufzeichnungen des *Mélographes* auf dem Klavier wiedergegeben werden konnten.

CASTEL, LOUIS BERTRAND RICHARD (1688-1757) Französischer Jesuit und Mathematiker. Fasziniert von der Synästhesie, baute er ein Tasteninstrument, welches die Musik mit Farbeffekten kombinierte, das *Clavecin Oculaire*, welches in seinem Werk *"Mercure"* von 1725 und im *"Journal de Trevaux"* von 1735 beschrieben wird. Im Jahr 1746 veröffentlichte er ebenfalls das Werk *"Optique des couleurs"*.

CAUS[80], SALOMON DE (1576-1626) Französischer Ingenieur und Physiker, der in seinem Werk von 1615, *"La raison des forces mouvantes..."* die Maschine beschrieb, die man als erste Dampfmaschine bezeichnen kann. Dort beschreibt er ebenfalls eine Walzenorgel.

CAVAILLÉ-COLL Berühmte Orgelbauerfamilie, mit den folgenden Mitgliedern:

JOSEPH CAVAILLÉ in Toulouse (1705-1767).

JEAN-PIERRE CAVAILLÉ (1743-1809), Neffe und Schüler von Joseph.

DOMINIQUE HYACINTHE CAVAILLÉ I COLL (1771-1862), Sohn und Schüler von Jean-Pierre. Orgeln von Puigcerdà, Santa Maria del Mar in Barcelona, Vic.

ARISTIDE CAVAILLÉ-COLL (1811-99). Orgeln des Panthéon, Madeleine; Restaurationen der Orgeln von Saint Sulpice, Nôtre Dame, in Paris.

CHLADNI, ERNST FLORENZ FRIEDRICH (1756-1827) Deutscher Physiker und Akustiker. Er hat die nach ihm benannten Figuren entdeckt und ein paar Musikinstrumente erfunden, die sich nicht behauptet haben, wie etwa das *Clavizylinder* und das *Euphonium*.

[80] Man findet auch *Caux, Cauls, Caulx,...*

CLAGGET, CHARLES (1755-1820) Englischer Violinist, Komponist und Erfinder von Musikinstrumenten. Unter anderem baute er ein auf die Stimmgabel begründetes Schlaginstrument.

CORTI, ALFONSO (1822-88) Italienischer Histologe, der 1846 das nach ihm benannte Organ entdeckte.

CRISTOFORI, BARTOLOMEO (1665-1731) Italienischer Instrumentenbauer, der um 1709 das erste Klavier erbaute, das er *"Clavicembalo col piano e forte"* benannte.

CROS, CHARLES (1842-88) Französischer Dichter und Wissenschafter, der den Phonographen vor Edison erfand und ein Vorläufer der Farbenphotographie war.

D'ALEMBERT, JEAN LE ROND (1717-83) Französischer Mathematiker und Physiker, eine der wichtigsten Figuren der *Illustration.* Unter anderem war er einer der Schöpfer der Encyclopédie, zusammen mit Diderot. 1762 veröffentlichte er sein Werk *"Éléments de musique..."*.

DEBAIN, ALEXANDRE FRANÇOIS (1809-77) Instrumentenbauer, der das *Harmonium* erfand, sowie verschiedene automatische Musikinstrumente, darunter einen Vorgänger des Pianolas.

DE FOREST, LEE (1873-1961) Amerikanischer Erfinder, der 1906 seine Triodenröhre *"Audion"* patentierte, welche das elektronische Zeitalter einläutete.

DELÉZENNE, CHARLES EDOUARD JOSEPH (1776-1866) Französischer Physiker, der die musikalischen Tonleitern untersuchte. Er schuf eine Variante der Tonleiter von Zarlino.

DENNER, JOHANN CHRISTOPH (1655-1707) Deutscher Instrumentenbauer, der um 1700 die Klarinette erfand.

DIDYMUS (um 50 v. Chr.) Griechischer Gelehrter, dem das Komma mit der Charakteristik 81/80 zugeschrieben wird.

DUDDELL, WILLIAM (1872-1917) Englischer Ingenieur, der den Effekt entdeckte, der es ihm erlaubte, den sprechenden Lichtbogen zu erfinden. Er war ebenfalls Erfinder eines Oszillographen (1900).

DUHAMEL, JEAN MARIE CONSTANT (1797-1872) Französischer Mathematiker. Er erfand 1840 ein Verfahren zur graphischen Darstellung des Schalls, bei dem ein Stilett die Schwingungen in eine Russschicht aufzeichnete. Das System von Duhamel ist ein Vorgänger des *Phonautographs* von Scott.

DULONG, PIERRE LOUIS (1785-1838) Französischer Chemiker, Physiker, Arzt und Botaniker, der die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in verschiedenen Gasen mass, um die entsprechende Formel von Laplace zu bestätigen, welche die durch Newton hergeleitete Formel verbesserte.

DU MONCEL, THÉODORE ACHILLE LOUIS (1821-84) Französischer Archäologe, Erforscher der Elektrizität und Erfinder. Es wird ihm die Erfindung des ersten aufzeichnenden Telegraphen zugeschrieben, sowie ein Aufzeichnungsapparat für musikalische Improvisationen.

DUSSAUD, FRANÇOIS (1870-1953) Schweizerischer Physiker und Erfinder. Unter den wichtigsten Erfindungen seien ein Phonograph für Taube (der Tastsinn ersetzt das Gehör) und ein Kino für Blinde (der Tastsinn ersetzt die Sicht) erwähnt.

DUVERNEY, JOSEPH GUICHARD (1648-1739) Französischer Anatom, dem wir ein Werk über das Gehör verdanken, *"Traité de l'organe de l'ouïe..."*, 1731. Die erste Ausgabe scheint aus dem Jahr 1683 zu stammen.

ELLIS, ALEXANDER JOHN (1814-1890) Englischer Mathematiker, der wichtige Forschungen auf dem Gebiet der musikalischen Tonleitern trieb. Er definierte die Einheit *Cent* und übersetzte das Werk von Helmholtz, "*Die Lehre von den Tonempfindungen...".*

ENGRAMELLE, MARIE DOMINIQUE JOSEPH (1727-81) Französischer Augustinerpater, Wissenschafter, Mechaniker und Musiker. Er verfasste das Buch "La tonotechnie...". Man schreibt ihm einen Apparat zu, mit dem auf dem Cembalo improvisierte Musikstücke aufgezeichnet werden konnten.

FLOURENS, PIERRE JEAN MARIE (1794-1867) Französischer Physiologe, der wesentlich zur Lokalisierung des Gleichgewichtsorgans beitrug, auf Grund von vielen qualvollen Vivisektionsversuchen.

ERARD, SÉBASTIEN (1752-1831) Berühmter französischer Instrumentenbauer aus Strasbourg (wo laut gewissen Quellen sein Name Erhard lautete). Er baute 1789 den ersten Flügel. 1810 erfand er das doppelte Harfenpedal und 1823 erfand er eine Repetiermechanik.

EULER, LEONHARD (1707-83) Schweizer Mathematiker, der sich unter anderem für die Frage der Konsonanz und der Dissonanz interessierte. Er ersinnte auch eine mathematische Interpretation der Tonleiter und wandte als erster die Logarithmen auf die musikalischen Intervalle an.

EUSTACHI, BARTOLOMEO (1500-74) Italienischer Anatom, welcher die Ohrtrompete entdeckte.

FALLOPPIO[81], GABRIELE (1523-62) Italienischer Anatom, welcher die Struktur des Innenohrs beschrieb.

FECHNER, GUSTAV THEODOR (1801-87) Deutscher Physiologe und Psychologe, Begründer der Psycho-Physik. Er formulierte 1860 die als Weber-Fechnersches Gesetz bekannte Regel.

---

[81] Man findet auch die Schreibweisen *Fallopi* und *Falloppia.*

FLETCHER, HARVEY (1884-1981) Nordamerikanischer Physiker und Spezialist auf dem Gebiet der Akustik. In den Bell Laboratorien verrichtete er ab 1916 wichtige Forschungsarbeiten und amtierte zwischen 1933 und 1949 als Direktor der Physikalischen Forschungsabteilung. Er schrieb die beiden in der Bibliographie erwähnten Referenzwerke.

FOURIER, JEAN BAPTISTE JOSEPH (1768-1830) Französischer Mathematiker, der 1822 sein berühmtes Gesetz formulierte, wonach jede beliebige periodische Kurve als Überlagerung von Sinuskurven dargestellt werden kann.

GAFORIO, FRANCHINO (1451-1522) Italienischer Musiker und Theoretiker, dem die Ehre zuteil wird, 1480 als erster ein gedrucktes Musikbuch veröffentlicht zu haben.

GASSENDI[82], PIERRE (1592-1655) Französischer Philosoph und Astronom. Er erkannte als einer der ersten, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls von der Frequenz unabhängig ist, was allerdings Aristoteles bereits wusste.

GLAREANUS, Alias HEINRICH LORITI (1488-1563) Gelehrter Schweizer, Dichter in lateinischer Sprache und Historiker. Er veröffentlichte verschiedene Bücher über Musiktheorie.

GOLTZ, FRIEDRICH (1834-1902) Deutscher Physiologe, der wesentlich dazu beitrug, das Gleichgewichtsorgan in den Bogengängen zu lokalisieren.

GRAY, ELISHA (1855-1901) Erfinder des Telephons, gleichzeitig mit Bell, aber ganz unabhängig von ihm.

GUIDO D'AREZZO (ca. 995-1050) Italienischer Mönch und Musiktheoretiker, der das Liniensystem mit vier Linien einführte, und dem wir die lateinische Nomenklatur der sieben Töne der diatonischen Tonleiter verdanken: Ut, Re, Mi,..., Si.

HELMHOLTZ, HERMANN LUDWIG FERDINAND VON (1821-94) Deutscher Arzt, Physiker und Mathematiker. Mit seinem Buch *"Die Lehre von den Tonempfindungen..."* erschuf er, was man als das erste moderne Werk über musikalische Akustik bezeichnen darf. Helmholtz interessierte sich für so verschiedene Themen, wie die Physiologie der Sinnesorgane, die Akustik, die Optik, die Erhaltung der Energie, die Axiome der Geometrie, die Kosmogonie, die Elektrizität, das Schachspiel,... Helmholtz darf als eines der letzten Universalgenies betrachtet werden.

HOCHBRUCKER, CHRISTIAN (*1733) Harfenvirtuose, dessen Sohn Simon um 1720 die Pedalharfe erfand.

[82] Auch *Gasendi, Gassendo,...*

HOLDER, WILLIAM (1614-96) Englischer Theoretiker, der eine Tonleiter aus 53 Tönen erfand.

HUCBALD (840-930) Französischer Mönch und Musiktheoretiker, der zwei Musikbücher schrieb, in denen sich der etymologische Ursprung des Worts *Gamma* befindet, um eine Notenfolge zu bezeichnen. Hucbald war einer der wichtigsten Vorläufer der musikalischen Notation und der polyphonischen Musik.

HUGHES, DAVID (1831-1900) Englischer Physiker und Erfinder. Erfand eines der ersten Mikrophone im Jahr 1877.

INGRASSIAS, GIOVANNI FELIPE (1510-80) Italiensicher Arzt und Anatom. Er entdeckte das dritte der Hörknöchelchen, den Steigbügel. Er schien auch vom runden und vom ovalen Fensterchen Kenntnis zu haben, und möglicherweise kannte er sogar den *Musculus tensor tympani.*

KAUFFMANN, JOHANN GOTTFRIED (1752-1818) Mechaniker und Erbauer von Musikautomaten (Flötenuhren). Sein Sohn Friedrich (1785-1862) konstruierte Automaten, welche Trompete spielten.

KEMPELEN, WOLFGANG (1734-1804) Ungarischer Mechaniker, Musikautomatenbauer, welcher eine Sprechmaschine baute. Er führte auch einen Schachspielautomaten vor, der sich als Betrug entpuppte.

KIRCHER, ATHANASIUS Deutscher Jesuitenpater, Universalgenie, der grossen Einfluss auf den jungen leibnitz ausübte. Unter vielen anderen Dingen erfand er eine Art mechanischen Computer, um musikalische Kompositionen zu schaffen, die *Arca Musarritmica* und ein akustisches Telephon. Er schrieb ein Musiktheoriebuch und ein anderes, das man als eines der allerersten Akustikbücher einstufen kann. Er erfand auch mehrere Musikautomaten, eine Schreibmaschine und die *Linterna Màgica* (Dia-Projektor).

KOENIG, RODOLPHE (1832-1901) Berühmter Akustiker. Er erfand die manometrische Kapsel, die er mit dem Drehspiegel zu einem Drehspiegeloszillographen verband.

KUNDT, AUGUST (1839-1894) Deutscher Physiker, dem wir die gleichnamige Röhre verdanken.

LAËNNEC, RENÉ THÉOPHILE HYACINTHE (1781-1826) Arzt, der 1815 das Stethoskop erfand und es zur Untersuchung seiner Patienten einsetzte.

LAPLACE, PIERRE SIMON (1749-1827) Französischer Astronom und Mathematiker, welcher eine Formel ableitete, um die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen berechnen zu können.

MAELZEL, JOHANN NEPOMUK (1772-1838) Mechaniker, Pianist und Musiklehrer in Wien, der 1816 das Metronom erfand.

MAELZEL, LEONHARD (1776-1855) Bruder von Johann Nepomuk. Mechaniker und Hersteller von Musikautomaten, Er konstruierte das *"Panharmonicon"* mit 42 "Musikern" um 1802. Es wird ihm ebenfalls die Konstruktion eines Schachspielautomaten gegen 1820 zugeschrieben.

MARPURG, FRIEDRICH WILHELM (1718-95) Deutscher Komponist und Musiktheoretiker.

MAYER, ALFRED MARSHALL (1836-97) Nordamerikanischer Physiker, der sich der Akustik widmete. Er begründete den Begriff der Tonmaskierung und veröffentlichte sein Buch "Sound" im Jahr 1878.

MAREY, ÉTIENNE JULES (1830-1904) Französischer Arzt und Physiologe welcher verschiedene Geräte zur graphischen Darstellung der physiologischen Vorgänge erfand. Er formulierte das Gesetz von Marey, welches den Blutdruck als Funktion des Pulses (Systolen pro Minute) darstellt. Er gilt als Vorläufer der Kinematographie, da er Photoserien aufnahm, mit denen der Ablauf der Bewegung der Tiere betrachtet werden konnte.

MERCATOR, NICOLAS ALIAS KAUFFMANN (1620-87) Deutscher Astronom und Mathematiker, der eine Unterteilung der Oktave in 53 Töne ersinnte. Seine Arbeiten im Bereich der konvergenten Reihen sind geachtet. Er ist berühmt für die Reihe:

$$\log(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + - \cdots$$

Unter anderem veröffentlichte er das Buch *"Logarithmotechnia"*, im Jahr 1668. N. Mercator darf nicht mit Gerhard Mercator (Kremer), dem Mathematiker und Geographen verwechselt werden.

MERSENNE, MARIN (1588-1648) Französischer Mathematiker und Philosoph, der einen grossen Teil seiner Forschungsarbeit der Akustik widmete. Er gehörte zu den ersten, die die Tonhöhe mit der Frequenz der Schwingungen verband. 1636 schrieb er sein berühmtes Werk *"Harmonie Universelle"*.

MONTAL, CLAUDE (1800-1865) Französischer Erfinder und Musiker. Trotz einer fast vollständigen Erblindung ab seinem sechsten Lebensjahr, studierte er Mathematik und Musik. Um 1830 gründete er eine Klavierfabrik.

MUSTEL, CHARLES VICTOR (1815-90) Französischer Instrumentenbauer. Er erfand unter anderem das *"Typophone"* und die *"Celesta"*.

OERSTEDT, JOHANN CHRISTIAN (1777-1851) Dänischer Physiker und Chemiker, welcher 1819 den Elektromagnetismus entdeckte. Seine Erforschung scheint von der Tatsache ausgegangen zu sein, dass der Blitz eine Eisen magnetisieren kann.

OHM, GEORG SIMON (1787-1854) Deutscher Physiker, der als Schlosser zu arbeiten anfing und seine wissenschaftlichen Kenntnisse auf autodidaktische Art erwarb. Er formulierte das berühmte Ohmsche Gesetz der Elektrizität und das weniger bekannte Gesetz der Akustik.

OLYMPOS Griechischer Musiker, dessen Existenz umstritten ist. Er soll im VII Jh. v. Chr. die Flöte erfunden haben.

PATHÉ, ÉMIL (1860-1937) UND CHARLES (1863-1957) Die Gebrüder Pathé waren zwei französische Ingenieure, welche rund um die Phonographie eine grosse Industrie aufbauten. Sie waren auch die ersten französischen Fabrikanten von Filmmaterial für die Filmindustrie.

POULSEN, VALDEMAR (1869-1942) Dänischer Ingenieur, Erfinder des *"Telegraphone"*, eine Urform des magnetischen Tonbandgeräts, im Jahr 1898.

QUINCKE, GEORG HERMANN (1834-1924) Deutscher Physiker, der wichtige Arbeiten über die Interferenz und die Refraktion des Lichts schrieb. Er erfand ein magnetisches Manometer (1885) und ein akustisches Thermometer (1897). Er erfand das Umwegrohr im Jahr 1866.

RAMEAU, JEAN PHILIPPE (1683-1764) Französischer Komponist und Musiktheoretiker. 1722 publizierte er sein Buch *"Traité d'harmonie"*.

RAMOS (auch Ramis) DE PAREJA, BARTOLOMÉ (*1440); er scheint 1521 noch gelebt zu haben. Spanischer Komponist und Musiktheoretiker, der schon vor 1480 ein Musikbuch in spanischer Sprache hatte drucken lassen. Im dritten Band seines wichtigsten Werks, "De musica tractatus..." erwähnt er das Komma und schlägt seine 'Beseitigung' durch die Temperatur vor.

REIS, J. PHILIPP (1834-74) Deutscher Physiker, der das erste elektrische Telephon erfand, welches nur die Tonhöhen vermitteln konnte, ohne Lautstärke oder Klangfarbe. Darum wurde dieses Telephon aus dem Jahre 1861, das sich für die Wiedergabe der Sprache nicht eignete, als *musikalisches Telephon* bezeichnet.

REISSNER, E. (1824-78) Deutscher Anatom, welcher die gleichnamige Membrane entdeckte.

RUHMER, ERNST WALTER (1878-1913) Deutscher Physiker und Erfinder. Unter seinen Erfindungen seien das *"Photographophon"* erwähnt, das einen Vorgänger des Lichttonfilms darstellt und vor allem das drahtlose Telephon, das den Reflex einer manometrischen Flamme vom Sender zum Empfänger sandte. Ruhmer verbesserte auch die Photoelektrische Selenzelle.

RUTHERFORD, WILLIAM (1839-99) Englischer Physiologe, welcher die sogenannte Telephontheorie des Gehörs entwickelte.

SALINAS, FRANCISCO DE (1513-1590) Spanischer Musiker und Theoretiker, grosser Organist, von 10 Jahren an erblindet.

SAUVEUR, JOSEPH (1653-1716) Französischer Mathematiker und Gründer der modernen Akustik. Trotz seiner Taubheit konnte er bedeutende Forschungsarbeiten im Bereich der musikalischen Akustik verwirklichen.

SAVART, FÉLIX (1791-1841) Französischer Arzt und Physiker, der sich vor allem der Akustik widmete. Zu seinen Ehren wurde das Mikrointervall, welches er zur Messung der Intervalle verwandte als *"Savart"* bezeichnet. Savart wurde der Nachfolger Ampères in dessen Physiklehrstuhl.

SCHAEFFER, PIERRE (1910) Französischer Ingenieur und Musiker, einer der Gründer der "Musique Concrète".

SCOTT DE MARTINVILLE, LÉON ÉDOUARD JOSEPH (1817-79) Französischer Typograph und Wissenschafter, der 1857 den Phonautographen erfand, mit dessen Hilfe der Schall graphisch dargestellt werden konnte, ähnlich wie beim Phonographen von Edison, aber ohne den Schall wieder reproduzieren zu können. Er patentierte seine Erfindung im Jahr 1859.

SHORE, JOHN (1662-1752) Englischer Trompeter und Lautenspieler. Er soll 1771 die Stimmgabel erfunden haben.

SMITH, ROBERT (1689-1768) Englischer Physiker und Astronom, welcher ein beachtenswertes Werk über Akustik veröffentlichte, in welchem einige der Hauptthemen des berühmten Buchs von Helmholtz vorausgenommen werden. Sein Buch, "Harmonics..." erschien 1749.

SORGE, GEORG ANDREAS (1703-1778) Deutscher Organist und Theoretiker, welcher 1745 die Differenztöne entdeckte. Unter seinen Werken befinden sich zwei Zyklen von je 24 Präludien. Er hinterliess mehrere Schriften über die musikalische Temperatur.

STOKOWSKI, LEOPOLD (1882-1977) Amerikanischer Dirigent polnischer Herkunft, der entscheidend zur Entwicklung der modernen Langspielplatte mit 33 1/3 Umdrehungen pro Minute beitrug. Er arbeitete mit Walt Disney zusammen an einer dessen interessantesten Produktionen, dem Film "Fantasia" aus dem Jahre 1940.

STROH, AUGUSTUS Erfinder der Violine ohne Resonanzboden, mit der in der ersten Epoche der Phonographie Platten und Zylinder aufgenommen werden konnten.

TAINTER, CHARLES SUMNER (1854-1940) Erfinder der phonographischen Wachszylinder, zusammen mit A.G. Bell und Chichester A. Bell.

TAYLOR, BROOK (1685-1731) Englischer Mathematiker, der eine Formel entwickelte, mit deren Hilfe die Frequenz (Frequenz f der Querschwingungen, in Hz) einer Saite anhand ihrer Länge (L, in Metern), ihrer Spannung (T, in Newton) und der Masse eines Meters Saite (M, in kg) berechnet werden kann.

$$f = \frac{1}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Taylor ist vor allem durch seine Formel berühmt geworden, die es erlaubt, eine algebraische Funktion als unendliche Reihe auszudrücken.

TORRES QUEVEDO, LEONARDO (1852-1936) Spanischer Ingenieur, Mathematiker und Erfinder, Pionier der Kybernetik. Er baute verschiedene elektromechanische Computer, eine Schwebebahn über den Niagara-Fällen, einen Schachspielautomaten und die erste Fernbedienung.

TRAUTWEIN, FRIEDRICH ADOLF (1888-1956) Erfinder des *"Trautoniums"*, eines elektroakustischen Instruments.

TYNDALL, JOHN (1820-93) Englischer Physiker, ein hervorragender Verbreiter der Wissenschaft. Er erfand zahlreiche Geräte, die sich dazu eigneten, die physikalischen Erscheinungen öffentlich vorzuführen. Seine wichtigsten Werke haben die Elektrizität, das Licht, die Wärme und den Schall zum Inhalt. Er war auch ein Pionier des Alpinismus.

UNGER, JOHANN FRIEDRICH VON (1716-81) Deutscher Mathematiker und Physiker. Er befasste sich mit dem Bau einer Maschine, um die am Klavier gespielten Improvisationen aufzuzeichnen.

VALSALVA, ANTONIO MARIA (1666-1723) Italienischer Anatom, dem wir wichtige Arbeiten auf dem Gebiete des Gehörorgans verdanken, unter anderem "De aure humana tractatus...", aus dem Jahre 1740.

VAUCANSON, JACQUES DE (1709-82) Französischer Mechaniker, der eine grosse Anzahl mechanischer Musikautomaten baute. Er machte auch bahnbrechende industrielle Erfindungen. In diesem Sinn ist er ein Vorgänger von Jacquard, da er ein System entwickelte, um Strickmaschinen mit gelochten Karten zu steuern. Im Jahr 1794 wurde seine Sammlung von eigenen und fremden Erfindungen zur Grundlage des *"Conservatoire des Arts et Métiers"*[83] in Paris.

VESALIUS, ANDREAS[84] (1514-64) Belgischer Anatom, der in seinem Anatomiebuch von 1543 *"De humanis corpore fabrica..."* zum ersten Mal zwei der drei Gehörknöchelchen beschreibt, den Hammer und den Amboss.

WEBER, ERNST HEINRICH (1795-1878) Deutscher Physiologe, der 1834 die als Webersches Gesetz bekannte Regel veröffentlichte. Diese Regel ist der Vorgänger des Weber-Fechnerschen Gesetzes.

WELTE Familie von Musikautomaten- und Pianolakonstrukteuren:
MICHAEL (1807-80).
BERTHOLD (1843-1918), Michaels Sohn.
EDWIN (1876-1958), Bertholds Sohn.

YOUNG, THOMAS (1773-1829) Ausserordentlich vielfältiger englischer Arzt und Physiker. Mit 14 Jahren soll er bereits folgende Sprachen beherrscht

[83] Das Pendel von Foucault, das Motiv des berühmten Romans von Umberto Eco, befindet sich in diesem Museum.
[84] Auch Vesali, Vésale, Andries van Wesel.

haben: Arabisch, Französisch, Griechisch, Hebräisch, Italienisch, Lateinisch und Persisch. Seine Theorie über die Farbensicht ist berühmt und wurde später durch Helmholtz bestätigt. Er versuchte sich auch an den ägyptischen Hieroglyphen.

ZARLINO, GIOSEFFO (1517-90) Italienischer Musiktheoretiker und Komponist, der in Venedig als Organist amtierte und heute vor allem durch seine Tonleiter bekannt ist. Er schlug die gleichmässige Temperatur für Tasteninstrumente vor. Er begründete die Theorie des Dur-Akkords in der *"divisione armonica"* und entsprechend den Moll-Akkord in der *"divisione aritmetica"*.

ALPHABETISCHES VERZEICHNIS

DANKSAGUNGEN

Den folgenden Personen sei für Ihre Mitarbeit herzlich gedankt:

Jorquera Pianos, Barcelona, für die Beratung über die Technik des Klavierstimmens.

Dr. Yo Tomita, der mir erlaubte einige der Symbole seines Schriftsatzes *Bach* in diesen Text einzubetten (y.tomita@qub.ac.uk).

Mª Pilar Battle Figueras, die mich auf einen wichtigen Fehler aufmerksam machte.

William R. Brohinsky, der mich über historische Musiknotation informierte (raybro@portone.com).