

Historische Streiflichter zur Psychoakustik

Frühe Anfänge

Man kann davon ausgehen, dass die Stimme als laut- und gesangsbildendes Organ am Anfang stand und vorerst zur tierlautlichen Verständigung innerhalb der Horde diente; das könnte vom Tertiär vor 5 - 1 Million Jahren, bis ins Diluvium um 600000 gewesen sein. Die Stimme war immer schon da, wie Wasser, Feuer und Luft, Blitz und Donner und das Gehör war bestens ausgestattet sowohl die eigene als auch fremde Stimmen aufzunehmen.

Vielleicht fällt der Beginn des besonderen Gebrauchs der Stimme als Werkzeug in etwa dieselbe Zeit, als die Hominiden begannen erste Steinwerkzeuge herzustellen und zu verwenden; in Afrika war das vor etwa 2.5 Millionen Jahren (Letoli im afrikanischen Graben, aufrechter Gang; 750 000). Mit der substantiellen Vergrößerung des Gehirns könnte man gleichzeitig den Übergang von einer Tierlautsprache, die vorwiegend aus gelallten und geheulten Lautkomplexen bestand, zu einer menschlichen Sprache sehen, die bereits mit Ansätzen zu einer regelmäßigen Artikulation und mit Umlautgebilden (Kainz, F., 1941) ausgestattet war.

Stimmhafte Laute setzen sich aus einem harmonischen Quellenklang zusammen, dessen Obertöne durch die einstellbaren Resonanzen des Vokaltrakts unterschiedlich verstärkt werden.

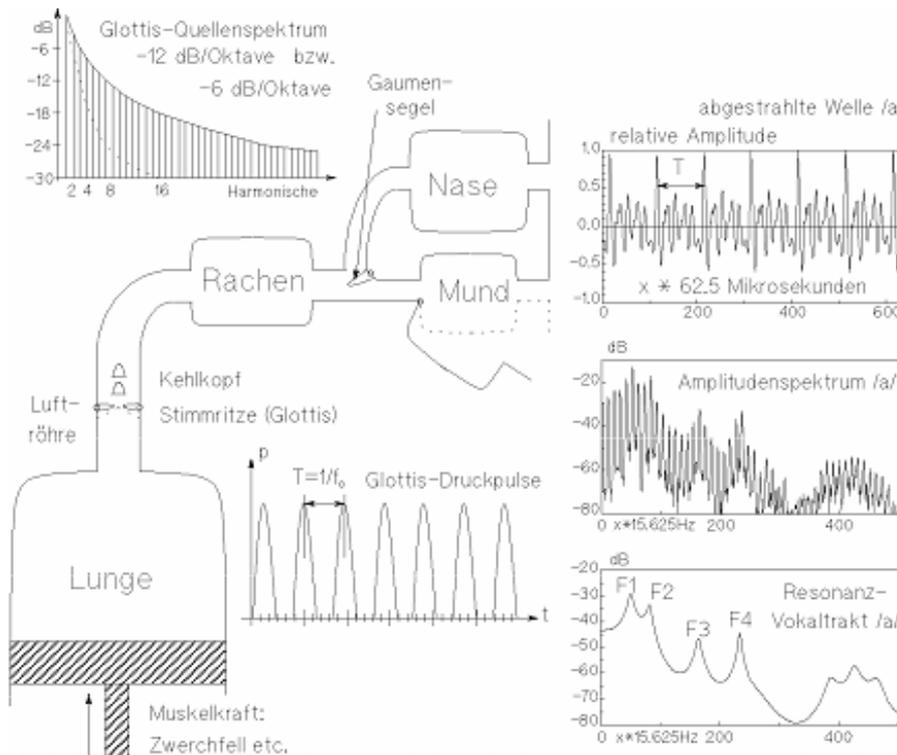


Abbildung 1: Stark vereinfachtes Funktionsmodell des menschlichen Stimmapparates. Das an der Glottis erzeugte Quellenspektrum wird durch die Bewegungen der Artikulatoren im Vokaltrakt zu den bekannten Sprachlauten umgeformt.

In dieser Entwicklungsstufe, etwa um 300.000 erfolgt die Verfeinerung der Steinwerkzeugtechnik, gleichzeitig ist auch der kontrollierte Gebrauch des Feuers anzusetzen. Der Fortschritt des Hominiden als soziales Wesen bestand ferner darin, sich mehr oder weniger beliebig von einem Ort zum anderen bewegen zu können, die Isolation zu überwinden, verbunden mit der Notwendigkeit kommunizier-

ren zu müssen, d.h. Botschaften übermitteln zu können, die auch verstanden wurden; der wesentliche Fortschritt zur Lautsprache hatte neben der artikulatorischen Prägnanz und phonetischen Konstanz darüber hinaus die Trennung des abstrakten Denkens vom vorher alles bestimmenden Instinkt zur Voraussetzung, die Grundlage für eine mehreren Individuen gemeinsame, begriffliche Sprache und verbale Kreativität, das könnte etwa in der letzten Eiszeit (Würm, um 100.000) erfolgt sein. Der Mensch war erfinderisch und verwendete Signalfeuer und -rauch, reflektierendes Sonnenlicht, Trommeln, Vogelflug usw., natürlich auch seine Stimme, um Botschaften auch über große Entfernungen übermitteln zu können (Telekommunikation); wir vermuten heute den Beginn der Schrift mit den ersten Felsmalereien vor 30.000 bis 20.000 Jahren, ebenso Zählmarken, eingekerbt in (Mammut-)Knochen, etwa zur gleichen Zeit gibt es schon einfache Musikinstrumente.

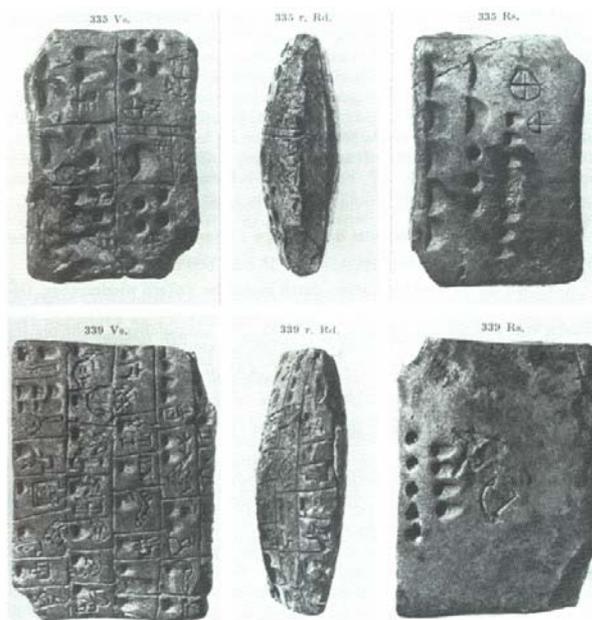
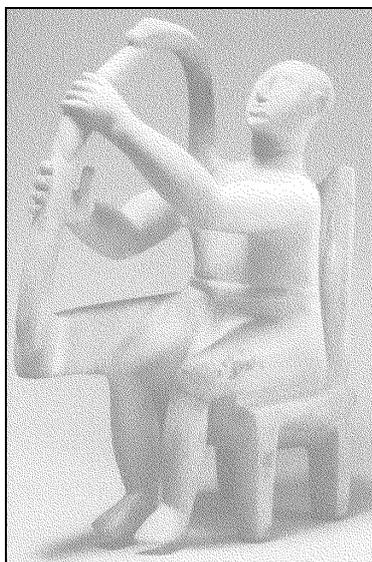


Abb. 1.9. Altsumerische Zahlzeichen.
Tafeln aus Uruk, um 2900 v.Chr. [Falkenstein, Nr. 335, 339]

Abbildung 2: links: Frühsteinzeitliche Bogenharfe (Kykladen, ca. 2000 v.Chr.).
Metropolitan Museum New York (eine Nachbildung). Rechts: altsumerische Zahlzeichen (Uruk ca.2900 v.Chr.).

Die ersten Funde von Signalpfeifen aus Rentierknochen, Grifflochflöten und Schwirrhölzern werden ja bereits in die Ältere Steinzeit datiert. In der Nach-eiszeit (10000 - 4000) finden sich Schrapper, Tonton-Trommeln, Tonglocken und Schnecken-trompeten (vgl. sitzender Bogenharfenspieler, Mamorstatuette von den Kykladen, New York, Metropolitan Museum; Karlsruhe, Badisches Landesmuseum; 2000-2500 v.Chr.). Dennoch hieße es reinen Spekulationen zu folgen, wollte man über diese und die folgende Zeit, bis zu den Anfängen der schriftlichen Überlieferung in Mesopotamien (Keilschrift) und Ägypten etwas Konkretes auch zu Sprache und Musik aussagen. Etwa im 3. Jahrtausend vor Christus ist jedenfalls der Gebrauch von Zahlen (Hieroglyphen-Ziffern der Sumerer, Elamiter und Ägypter) nachweisbar. Gleichzeitig erscheint erwiesen, dass der Mensch bereits über viele Jahrhunderte hinweg zählen konnte, ohne über einen abstrakten Zahlenbegriff zu verfügen (siehe Georges Ifrah, 1986), möglicherweise bevor er schreiben lernte.

Man kann vermuten, dass beim Aneinanderschlagen von verschieden geformten und unterschiedlich harten Steinen Differenzierungen in der Tonhöhe und Klangfarbe bewusst wahrgenommen wurden. Pythagoras wird diese Erfahrung erst erheblich später anhand des Klanges von Schmiedehämmern und mit Hilfe

des Monochords zu einfachen Zahlenverhältnissen in Beziehung bringen. Die ersten Funde von Signalpfeifen aus Rentierknochen, Grifflochflöten, und Schwirrhölzern werden dagegen bereits in die Ältere Steinzeit datiert. In der Nacheiszeit (10000 - 4000) finden sich Schrapper, Tonton-Trommeln, Tonglocken und Schnecken trompeten (vgl. sitzender Bogenharfenspieler, Mamorstatuette von den Kykladen, Badisches Landesmuseum; 2000 - 2500 v.Chr.). Alles in allem ein erstaunlich großes Inventar von klangbildenden „Werkzeugen“, das der musikalischen Gestaltung in Tonhöhe, Klangfarbe und Rhythmus breite Entwicklungsmöglichkeiten gab.

Zahlenverhältnisse und Töne

Musik und Mathematik werden in enge Beziehung zueinander gesetzt. Beide hatten stets kultische Bedeutung, die Musik im religiösen und höfischen Zeremoniell (Opferriten, Siegesfeiern, Klageriten usw.), die Mathematik als Wissenschaft wie auch die Astronomie, häufig in den Händen der Priesterschaft. Der Gebrauch von Zahlen (Hieroglyphen-Ziffern der Sumerer, Elamiter und Ägypter) ist im 3. Jahrtausend vor Christus belegt. Es erscheint darüber hinaus erwiesen, dass der Mensch bereits etliche Jahrtausende vorher zählen konnte, ohne über einen abstrakten Zahlenbegriff zu verfügen (Gericke, 1992), wahrscheinlich zählte und zeichnete der Mensch lange bevor er schreiben lernte.

Ebenfalls im 3. Jahrtausend v. Chr. entwickelten die Chinesen ein Ton-system, das den damals bekannten fünf Planeten zugeordnet war. Zahlreiche Glockenfunde weisen auf die frühe Existenz einer ausgefeilten Musiktheorie und Instrumentierung im antiken chinesischen Orchester (Shen, 1987) hin. Die Stimmung der Glocken und ihre akustischen Eigenschaften erlaubten die gleichzeitige Verwendung zweier bis zu einer großen Terz unterschiedlicher Tonhöhen, je nachdem ob die Glocken seitlich oder in der Mitte angeschlagen wurden (siehe [http://www.kfs.oeaw.ac.at/999/15_hist/Acoustical Society of America - Acoustics of Eastern and Western Bells, Old and New.htm](http://www.kfs.oeaw.ac.at/999/15_hist/Acoustical_Society_of_America_-_Acoustics_of_Eastern_and_Western_Bells,_Old_and_New.htm)).

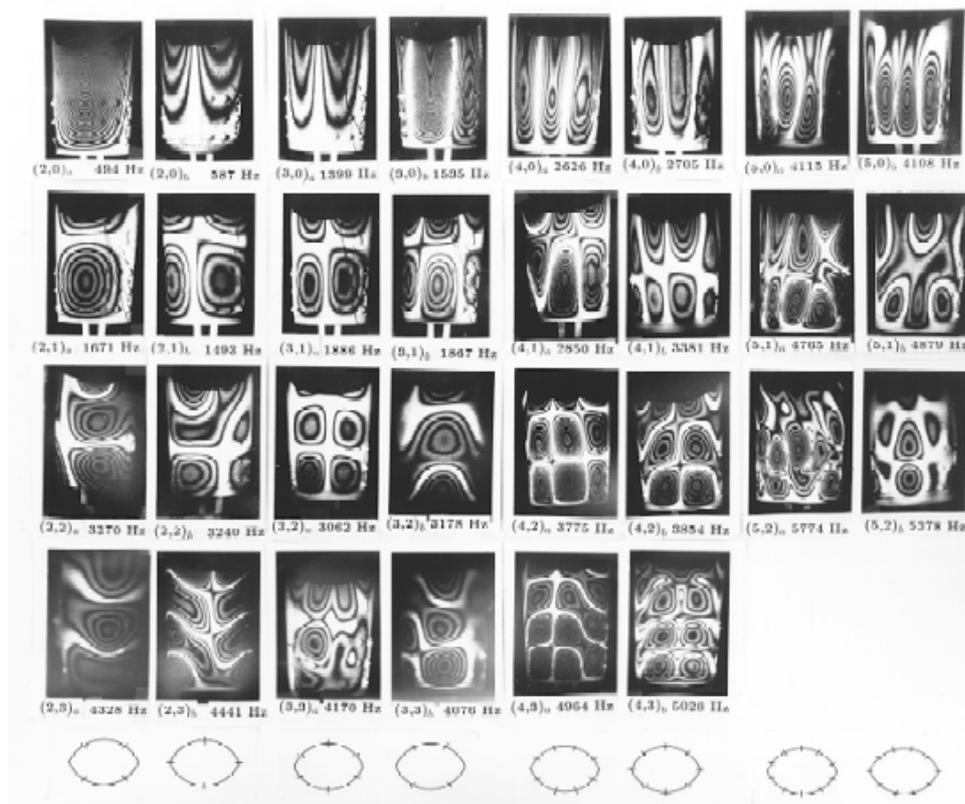


Abbildung 3: Acoustics of Eastern and Western Bells, Old and New: Thomas D. Rossing - rossing@physics.niu.edu Physics Department, Northern Illinois University DeKalb, IL 60115

Die höfischen Orchester hatten je nach Bedeutung und Rang des Herrschers eine Stärke von etwa 30 bis mehreren hundert Musikern. Neben der Musik gab es vergleichsweise profane Beschäftigungen mit Schall. Beobachtungen des Geräusches ausströmenden Dampfes, wie er beispielsweise bei Kochtöpfen entsteht, ließen die Chinesen vermuten, Schall hätte etwas mit Luft zu tun. Ringmauern um kreisförmig angelegte Tempelbauten geben Hinweise auf die Ausnutzung akustischer Abhöreffekte, die bis in die neueste Zeit mit Hilfe von Flüstergalerien und Röhrenabhörsystemen erzielt wurden. Die Geometrie in der Form von Kreisen und Ellipsen, abgeflachten Kreisen, eiförmigen Ringen usw. findet sich - auch ohne unmittelbar akustischen Bezug - in den Grundrissen megalithischer Bauwerke, wie z.B. auf den Britischen Inseln (u.a. see: [Stonehenge](#)).

Möglicherweise vor den Griechen oder zur gleichen Zeit, jedenfalls unabhängig von ihnen, beschäftigten sich die Chinesen mit Schall (Needham, 1962). Sie waren der Meinung, daß Schall mit irgendeiner Aktivität der Luft, mit Atem und Dampf zu tun hätte, Beobachtungen, die von Geräuschen herrühren könnten, die beispielsweise bei Kochtöpfen entstehen. Ringmauern um kreisförmig angelegte Tempelbauten könnten Hinweise auf praktische akustische Nebeneffekte geben, wie sie bis in die neueste Zeit in Flüstergalerien und Röhrenabhörsystemen ausgenutzt wurden.

Bereits im 3. Jahrtausend v.Chr. hat es ein Fünf(ganz)tonsystem gegeben. Die fünf Töne waren den damals bekannten fünf Planeten zugeordnet. Über 200 Funde von Bronzeglocken, datiert zwischen dem 16. und dem 11. Jhdt. v.Chr., geben Zeugnis von einer ausgeprägten Musikkultur als Bestandteil des höfischen Zeremoniells, die dem Glockenspiel großen Raum bot; die komplizierte Stimmung der Glocken basierte auf einer Bambusröhre, deren Tonhöhe auf eine Länge von 20.574 cm standardisiert war. Der letzte große archäologische Fund eines Glockenspiels in Hubei, einer Provinz Südchinas, bestand aus 65 unbeschädigten Bronzeglocken, die in das 5. Jhdt. v.Chr. datiert werden. Ihre Stimmung und akustische Eigenschaften weisen auf die gleichzeitige Verwendung zweier bis zu einer großen Terz unterschiedlicher musikalischer Tonhöhen pro Glocke hin, die diese hervorrufen können, je nachdem ob sie seitlich oder in der Mitte angeschlagen werden. Ein weiteres Argument für die frühe Existenz einer ausgefeilten Musiktheorie und Instrumentierung im antiken chinesischen Orchester (Shen, 1987).

Altertum

Im ersten Buch Moses ist vom Ergötzen am Gesang der menschlichen Stimme die Rede, möglicherweise ein Hinweis auf harmonische und melodische Intervalle. Sicher gab es Gesang und Musik bereits vor jeder schriftlichen Überlieferung, zuerst wahrscheinlich im Rahmen zeremonieller Riten. Musik war und ist nach wie vor stets im Bereich der Magie und des Götterkults zu finden. Um 2600 vor Christus sind jedenfalls in Ägypten diverse Musikinstrumente, Saiten- und Blasinstrumente nachweisbar. Im Mittleren Reich (2160-1580) finden sich bereits Harfen, Lauten, Trommeln, Becken, Oboen und Flöten, sowie verschiedene Schlaginstrumente (Curt Sachs, 1968: Die Musik der Alten Welt). Auch in Ägypten war die Musik wie die Wissenschaft, die Mathematik, die Astronomie und die Physik fest in den Händen der Priesterschaft.

Ähnlich verhält es sich mit der mesopotamischen Musik. Die Kenntnisse der Babylonier, Sumerer und Assyrer, die ja auch in der Mathematik sehr weit fortgeschritten waren (weiter als die Ägypter: Boyer, 1985), werden als die gemeinsame Basis für die Entwicklung der Akustik in Ost und West angesehen. Die altbabylonische Rechentechnik kannte bereits Potenzen und Wurzeln, die Algebra ging bis zu Gleichungen mit mehreren Unbekannten, zu Gleichungen zweiten, manchmal auch höheren Grades. Die Geometrie orientierte sich nach der Praxis und verwendete Dreieck, Viereck, Kreis und regelmäßige Polygone. Volumsberechnungen wurden für die Errichtung von Gräben, Dämmen und anderen Bauwerken benötigt (Gericke, 1992; S.16ff). Es bestanden enge Beziehungen sowohl zu Ägypten als auch zu Indien, wahrscheinlich gab es auch Verbindungen mit China. Womit die Frage ob die Griechen oder die Chinesen, Ling Lun - eine temperierte Skala, oder die Hindi zuerst die theoretischen Grundlagen zur Musik erfanden, besser neu gestellt werden sollte in: wer von beiden hat zu seiner Zeit rascher aus den verfügbaren Quellen gelernt und wie kam es zu den eigenständigen Weiterentwicklungen?

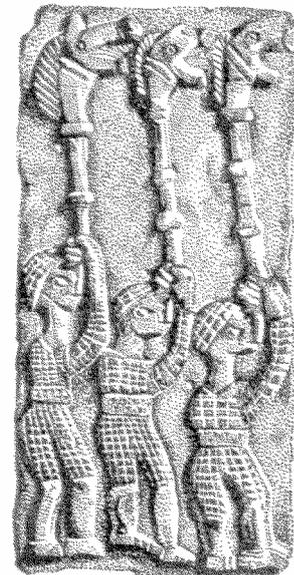
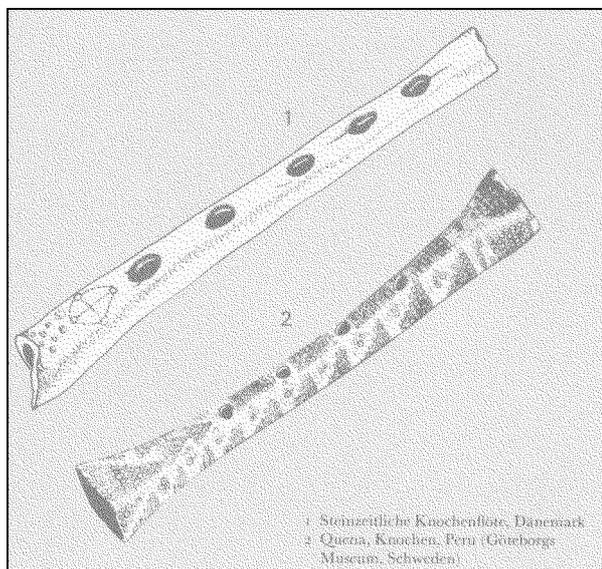


Abb. 2: Urgeschichtliche Knochenflöten, links. Assyrische Trompeten, rechts und unten. Die Schallbecher haben die charakteristische Form eines Tierkopfes mit offenem Maul. Die Länge der konischen Trompetenröhre beträgt ca. 60cm.



Selbstverständlich war bei den Griechen die Redekunst hoch entwickelt und das Interesse an der Stimme und Akustik entsprechend groß. Homers (ca. 785 v.Chr.) Stentor, der Mann, dessen Stimme so laut klang wie ein gemeinsamer Ruf von 50 Männern, benutzte wahrscheinlich ein gut dimensioniertes Sprachrohr. Auf der anderen Seite wurden Sprachstörungen, zögerndes

Sprechen (Stottern), vielfach als verlangsamer Gang der Zunge beschrieben (Je-

saias: ... und der Stammelnden Zunge wird deutlich reden). Hippokrates (460-370 v.Chr.) beobachtete den Sprechvorgang und kommt zu dem Schluß: die Zunge artikuliert durch ihre Schläge. Um festzustellen, welche Sprachäußerung die erste und ursprünglichste wäre, ließ man zwei neugeborene Kinder verwildern¹. Wenn man auch damit natürlich nicht feststellen konnte, welches Volk das älteste war, zeigten die aus heutiger Sicht schrecklichen Versuche doch das rege Interesse an einem frühen Stadium einer Phonetik. Darüber hinaus unterschied man streng zwischen einem glatten wohlgeformten Aufbau der Rede, getragen von weichen, harmonischen Klängen gegenüber dissonanten, die dagegen eine größere und unmittelbare Ausdruckswirkung besitzen konnten (Demetrius von Phaleron, ca. 350-280 v.Chr.).

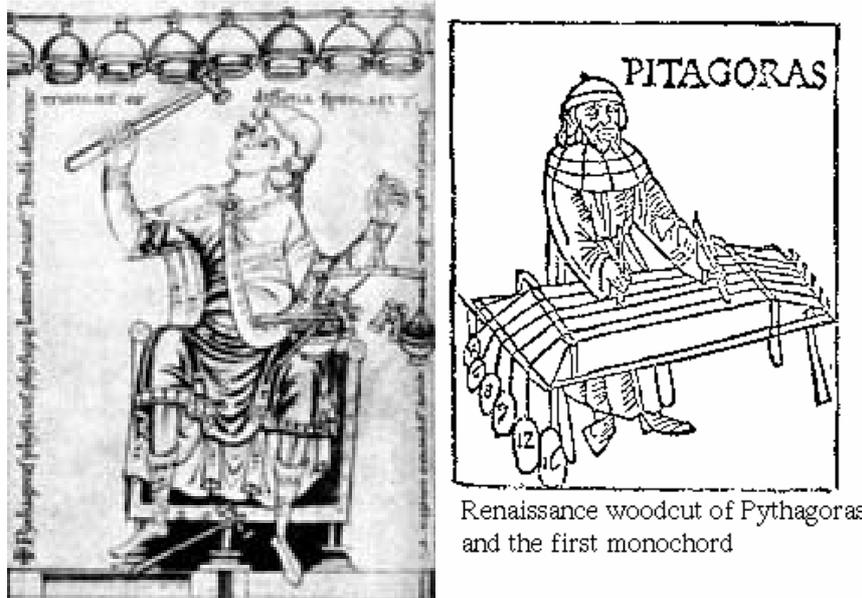


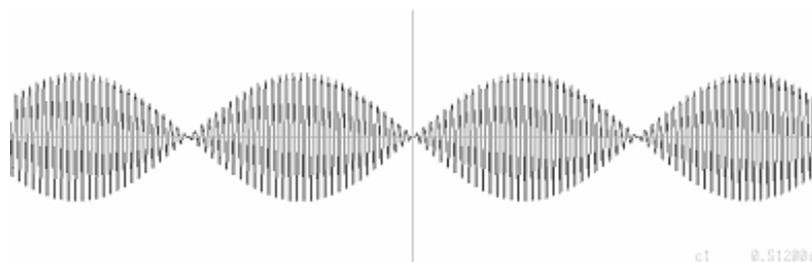
Abbildung 4. Pythagoras v. Samos: links nach Boethius; rechts in einer Darstellung am Monochord.

Die Griechen hatten jedenfalls eine Grundtheorie über den Ursprung, die Übertragung und die Aufnahme von Schall. Sie wußten, dass Schall immer durch Bewegungen von Körpern oder Teilen von Körpern (siehe Archytas <http://www.tmth.edu.gr/en/aet/1/14.html>) entsteht. Einfache Resonanzphänomene, die durch das Hineinsingen in Gefäße oder in andere Hohlräume erzeugt werden können, ferner musikalische Konsonanzen, die Oktave, die Quinte und die Quarte, Doppeloktave, Duodezime usw. dürften den Pythagoräern längst bekannt gewesen sein. Pythagoras (580[570]-496[497] v.Chr. <http://www.new-universe.com/pythagoras/mcclain.html>; <http://members.cox.net/mathmistakes/music.htm>) beobachtete einer Legende folgend (Nikomarchus, Iamblichos) zuerst am Klang verschieden großer (schwerer) und kleiner Schmiedehämmer verschiedene (musikalische) Tonhöhen. Danach bestimmte er Gewichte und stellte fest, dass bei gleicher durch Gewichte erzielter Saitenspannung, die kürzere Saite den höheren Ton abgab. Damit war die Beziehung Saitenlänge zu Tonhöhe erfaßt. Pythagoras experimentierte mit Saitenlängen in den Verhältnissen 2:1, 3:1, 4:1 aber auch 4:2, 3:2, 4:3; und durch Abziehen des 4:3 von 3:2 erhielt er mit 9:8 den Ganzton. Das System bestand also vorerst aus den Zahlen 1, 1+1=2, 1+1+2=3, 1+1+2=4 und 1+1+2+4=8 sowie 9. 9 konnte aus 3² erklärt werden und 8 weiters aus 2³, denn

¹ das erste Mal im 7. Jhdt. v.Chr., später unter Kaiser Friedrich II. im 13. Jhdt., u.a. auch unter Jakob IV., König von Schottland im 16. Jhdt.

die Pythagoräer maßen den Kuben generell eine besondere Bedeutung zu; auch Kepler (1619, Einleitung) zitiert Pythagoras in diesem Sinne: „man müsse bis zu den Kuben fortschreiten“. Die Anwendung des Konzepts der ganzen Zahlen auf die Musik war vielleicht das früheste quantitative Gesetz in der Akustik oder in der Physik überhaupt (auch wenn die von Pythagoras ausgewählten Gewichte angeblich nicht die gewünschten Tonintervalle ergeben). Die Theorie der ganzzahligen Verhältnisse entsprang ziemlich sicher den Ergebnissen einer gut 1500 Jahre vorher bis zu Quadraten, Quadrat- und Kubikwurzeln und dritten Potenzen entwickelten Hochblüte der Mathematik in Babylon. Die Idee, die Himmelskörper, Planeten und Fixsterne würden harmonische Bewegungen vollziehen, stammt aus erstaunlich genauen Beobachtungen in der Astronomie. Dass auch die meisten anderen Dinge ihrer Natur nach einfachen Zahlenverhältnissen folgen könnten, und die Zahlen die eigentlich grundlegenden Elemente darstellen würden, lag nahe. Dass die Planeten unseres Sonnensystems (einschließlich die Erde), Töne aussenden könnten (Sphärenharmonie), findet sich auch bei späteren Generationen und entspricht offenbar einem immer wiederkehrenden Zeitgeist, sich neben sorgfältigen physikalischen und mathematischen Überlegungen, gleichzeitig auch kühnen Spekulationen unbekümmert hingeben zu können.

Archytas von Tarent (430[428]-345[347]v.Chr.) führte die zahlentheoretischen Überlegungen zur Musik weiter. Bei der Aufstellung der musikalischen Skalen bemühte er sich, mit möglichst niedrigen ganzen Zahlen auszukommen, Diese Zahlen fielen alle in den Bereich von 1 bis 10, was für den Pythagoräer wichtig war (Barker, 1989; S.46ff). Ferner verweist er auf die Tatsache, dass aus $(n+1):n$ kein ganzzahliges Verhältnis erfolgen kann. Auch Archytas bekräftigt die bereits mehrmals getätigte Feststellung, dass Schall immer nur dann entsteht, wenn irgendein Gegenstand oder Teile von Körpern aneinandergeschlagen werden. Er stellt eine gewisse Verbindung zwischen Tonhöhe und Schwingungszahl her, ohne den Begriff Frequenz zu kennen. Um 300 v. Chr. gibt Euclid (330-275 v. Chr., Sectio Canonis) zunächst auch eine allgemeine akustische Einführung, sodann eine der ersten Begriffsbestimmung zu Konsonanz und Dissonanz. Euclid war an das Museion in Alexandria berufen worden und führte dort die viel beachtete Schule der Mathematik. Er stellt fest: Schälle (Klänge?) müssen aus Teilen zusammengesetzt gesehen werden, deren Zahlenverhältnisse untereinander von Bedeutung sind (konkordante und diskordante Zahlenverhältnisse). Dissonantes könne nicht gemischt werden, im Gegensatz zu Konsonantem. Konsonante Töne verschmelzen zu einem einzigen Klang wenn die korrespondierenden Zahlenverhältnisse ganzzahlige Vielfache ergeben. Diese Beobachtungen werden heute durch das psychoakustische Konzept von Dissonanz und Konsonanz als Folge des Vorhandenseins oder Fehlens von Rauigkeit voll bestätigt (Födermayr und Deutsch, in Druck).



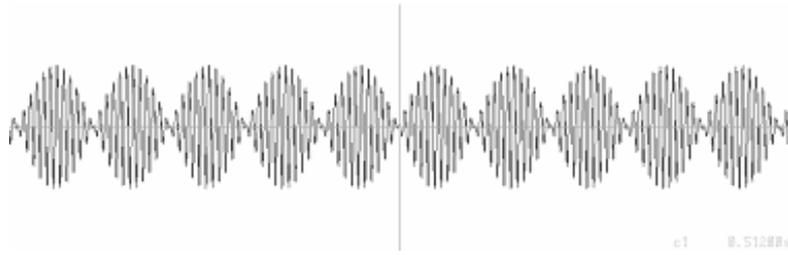


Abbildung 5: Schwebungen zweier Sinustöne mit gleicher Amplitude (Zeitachse: 0.512s). Oben: Frequenzdifferenz 7 Hz (220 Hz und 227 Hz), die beiden Töne verschmelzen zu einem einzigen an und abschwellenden Perzept. Die Tonhöhe entspricht der Mittenfrequenz. Unten: die als starke Rauigkeit empfundene Frequenzdifferenz von 20 Hz reicht noch nicht aus um zwei getrennte Tonhöhen wahrzunehmen. Rauigkeit wird, abhängig von der Musikkultur, als angenehm oder unangenehm empfunden.

Was ist Schall?

Aristoteles (384-322 v. Chr.) wußte also nicht nur, dass die Entstehung von Schall stets mit Bewegungen eines oder mehrerer Körper zusammenhängt, er wußte auch, dass die Lautstärke von der Stärke der Schläge abhängig ist (bei Schmiedehämmern und Glocken). Die Frage, ob der Klang vom Hammer oder vom Amboß abgestrahlt würde oder von beiden, ist seit Pythagoras offen und bei Aristoteles noch nicht eindeutig beantwortet. Nach Gericke besteht kein Zweifel, dass der Klang von den Schwingungen des Hammers stammte, weil der Amboß damals aus einem Holzstück bestand, das bloß mit einer dünnen Metallauflage versehen war. Wahrscheinlich bestand bereits vor Aristoteles ein gewisses Verständnis für das optische Prinzip der Reflexion, resultierend aus der Kenntnis des gleichen Einfallswinkels und Ausfallswinkels von Lichtstrahlen. Ziemlich sicher ist dieses Prinzip von Aristoteles genauso auf Schall angewendet worden; er schreibt, das Echo käme von der Wand zurück, wie ein Ball der von einer Wand zurückspringt. Dass bemerkt wurde, dass Schall, wie Licht, von glatten Flächen (Boden) besser reflektiert werde als von rauhen geht aus der Frage hervor: warum sind Häuser mit neu verputzten Wänden resonanter? (Hunt, 1992 p.33). Im Theater wurde beobachtet, dass Gesang und Musik leiser klingen, wenn Stroh auf dem Boden liegt. Das war der Fall, wenn am selben Tag auch Ringkämpfe ausgefochten wurden. Die Stimme wird verschluckt wenn Holzspäne oder Sand am Boden aufgestreut war. Die Frage der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht und Schall wird die Philosophen und Wissenschaftler bis in das 18. Jhdt. beschäftigen, bei Aristoteles scheint es so zu sein, dass richtigerweise wohl der Blitz sich schneller ausbreitet als der Donner, der Blitz jedoch die Folge des Donners wäre.

Das Phänomen des Mitschwingens einer Saite und die Resonanz von hohlen Gefäßen waren Aristoteles wie erwähnt bekannt. Einige seiner Äußerungen könnten dahingehend interpretiert werden, dass er beim Anhören des Klanges einer vibrierenden Saite mehr als eine einzige Tonhöhe wahrgenommen hat (Plomp 1966, S. 8). Das würde bedeuten, dass er zumindest die ersten Teiltöne des harmonischen Klanges bewußt aufgelöst gehört haben müßte (Abbildung 3). In der modernen Psychoakustik wird diese Frage eine entscheidende Rolle für die Erklärung der Funktionsweise des Gehörs und die Mehrdeutigkeit der musikalischen Tonhöhe bei Akkorden und nichtharmonischen Klängen spielen.

Abbildung 6: Kurzzeit-Amplitudenspektrum einer künstlich angestrichenen Saite ohne jeden Resonanzkörper. Der Amplitudenabfall vom 1. bis zum 10. Teilton beträgt bei dieser Saite etwa 20 dB. Der Frequenzabstand zwischen den einzelnen Teiltönen ist im unteren Frequenzbereich größer als eine Kritische Bandbreite. Die niederrangigen Harmonischen verdecken einander nicht und können daher aufgelöst als einzelne Spektraltonhöhen wahrgenommen werden. Aufnahme: Thomastik (Wien).

Akustische Magie

Schon im Altertum spielten akustische Phänomene, wie die Produktion (modern gesagt: die Synthese) von verstellter, vermeintlich künstlicher Stimme oder sonstige akustische Erscheinungen, die damals dem Volke weithin wunderbar erscheinen mußten, eine große Rolle. Sprechende Statuen, Götzenbilder, Steine, Bäume, Köpfe, Nachbildungen von singenden Vögeln, brüllenden Löwen übten bis hoch in das Mittelalter eine besondere Faszination aus und verliehen dem Besitzer solcher akustischer Wunderwerke beinahe übernatürliche Kräfte. Später waren es bereits hochentwickelte mechanische, pneumatische Musikautomaten. Heute sind es mehr oder weniger entwickelte Roboter, sprechende Computer, Musiksynthesizer und elektronische Orgeln, die nach wie vor eine gewisse Attraktivität haben. Den Priestern der antiken Kultstätten und anderen Mächtigen, die mit geheimnisvoll tönenden und lauschenden akustischen Einrichtungen ausgerüstet waren, eröffneten sich ungeahnte Möglichkeiten der Einflußnahme auf das einfache Volk. Die Götter sprachen auf Wunsch zu den Menschen und die Priester konnten dank raffiniert angelegter Abhörsysteme in den Tempelbauten alle Gespräche mithören. Beispiele dafür sind der sprechende Kopf des Orakels zu Lesbos oder die goldenen Jungfrauen im Tempel von Delphi. Meistens handelte es sich um Mundöffnungen von Götzenbildern oder Statuen, die über akustisch gut angepaßte Röhrensysteme von den Priestern am anderen Ende der Leitung angesprochen wurden oder es waren überhaupt hohle Gebilde, in denen die Priester versteckt waren. Durch unerwartete Resonanzwirkung war auch die Stimme des Priesters unkenntlich und es bestand allgemein kein Zweifel an der göttlichen Botschaft (Köster, 1976).

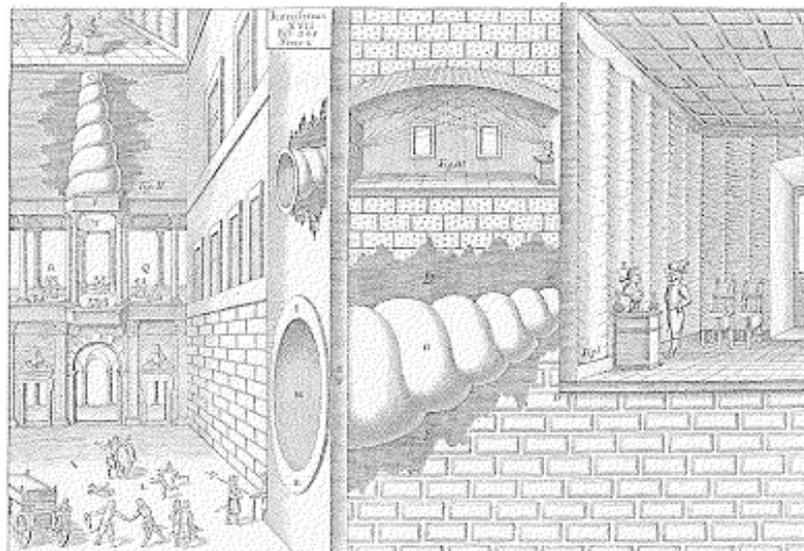


Abbildung 7: Athanasius Kirchers Darstellung von Abhörsystemen. Die schneckenförmig gewundene Gestalt des Schalltrichters hat wohl keine Verbesserung der Übertragung erbracht.

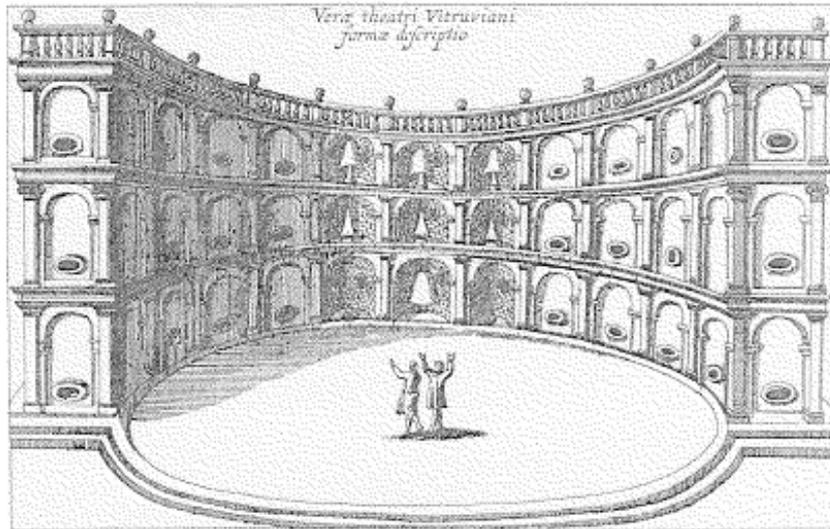


Abbildung 8: A. Kirchers Darstellung der Vitruvschen Schallgefäße ist möglicherweise fehlerhaft. Die Originalgefäße waren eher in der Form von Vasen als Glocken.

Nicht unerwartet hoch war der Stand an akustischen Erfahrungen bei den Griechen und Römern in der Architektur und Theaterakustik. Fehlende Reflexion vom Boden oder guter, erwünschter Nachhall bei glatten Wandbegrenzungen wurden bereits erwähnt. Aristoxenus von Tarent, einer der bedeutendsten Schüler des Aristoteles (wurde zum größten Teil übersetzt von: Marcus Vitruvius Pollio, 1. Jhdt. v. Chr., zehn Bücher: *De Architectura*) beobachtete Resonanzphänomene an in den Boden eingegrabenen (halb-, leeren) Vorratsgefäßen, an Brunnen und Zisternen. Seine Erklärung der Phänomene umfaßt die drei akustisch wesentlichen Komponenten: die Luft, die harten Raumbegrenzungen und das Rückwurfprinzip, wonach die hohlen Körper besser tönen als die massiven, ebenso klingen Bronzegefäße besser als Tongefäße. Bei Vitruv (p.127 ff) selbst finden sich genaue Angaben über die optimalen Abmessungen eines Theaters, über das zu verwendende Material (Stein oder Marmor), die Höhe und Anordnung der Sitzreihen usw. Beispielsweise wird die flächenweise Verwendung von Holz als Irrtum bezeichnet, weil Bretter unerwünscht mittönen könnten. Vitruv vergleicht die Ausbreitung der Stimme mit der Oberflächenwelle in Wasser, vermerkt jedoch deutlich, dass sich die Schallwelle auch in die Höhe fortpflanzt, eine Vorstellung der kugelförmigen Ausbreitung von Schall, die auf Chrysippus (ca. 280-207 v. Chr.) zurückgeht. Der Theaterbau ist so auszuführen, dass man eine Schnur von der untersten bis zur obersten Stufe spannen kann und alle Kanten der Stufen berührt werden. Die Stimme gelangt so von der Bühne ausgehend, kreisförmig, ungehindert und unreflektiert bis zu den obersten Sitzreihen. Es gibt kein störendes Echo, wodurch die Silben verdoppelt würden und keine ungewünschten Reflexionen, die eine freie Ausbreitung der Stimme behindern könnten. In der Nähe der vorderen Sitzreihen trifft die Stimme auf die Öffnungen der Schallgefäße, die als Helmholtz-Resonatoren wirksam werden. Diese auf harmonische Verhältnisse abgestimmten Schallgefäße wurden in Theatern in besonderen Schallkammern aufgestellt; ob eine spezielle Resonanz durch direktes Ansingen, -sprechen usw. bezweckt wurde oder durch den Einbau in Hohlräume in der Wand ein Zweikammer-Resonator entstand (Reichardt, 1979; p.10), der als Breitband-Absorber zur Unterdrückung störender Echos wirksam war, bleibt von Fall zu Fall offen. Die Gefäße hatten verschiedene Größe und waren im Frequenzbereich der Teiltöne der menschlichen Stimme wirksam; sie waren schon in Mesopotamien und bei den Griechen bekannt. Sie bestanden aus Bronze, in der billigeren Version aus Ton.

Auch im Mittelalter waren akustisch attraktive Effekte und für den einfachen Menschen unerklärliche akustische Erscheinungen weiter im Spiel, wenn es

darum ging beim Volk Erstaunen und Bewunderung hervorzurufen und damit (übernatürliche) Macht ausüben zu können: bekannt sind dazu die singenden Vögel des goldenen Thrones des Kaiser Theophil von Byzanz (835). Es gehörte offenbar zur Standardausrüstung eines guten Thronsessels irgend etwas Sprechendes, Singendes oder trillerndes montiert zu haben. Seriöse wissenschaftliche Arbeit leistete dagegen der Dominikaner Gerbert von Aurillac (950-1003). Er beschäftigte sich eingehend mit dem weit fortgeschrittenen Orgelbau, insbesondere mit den Registern *Vox humana*, *Vox virginea* und *Vox angelica* und soll einen Sprechenden Kopf aus Messing gebaut haben, der ihm den zweifelhaften Ruf eines von Dämonen inspirierten Magiers einbrachte (Köster, 1976). Auch Albertus Magnus (1193[1206]-1280) soll einen Sprechenden Kopf konstruiert haben. Der wohl äußerst kunstvoll und mit hohem technischen Verständnis aus Ton gefertigte Sprechende Kopf war das Ergebnis einer angeblich 30jährigen Arbeit und soll schließlich wegen seines gotteslästerlichen Charakters von niemand geringerem als Albertus Magnus' eigenem Schüler, Thomas von Aquin, höchstpersönlich zerschmettert worden sein. Im 16. Jahrhundert werden bereits hochentwickelte Automatenfiguren produziert, die heute noch funktionsfähig sind (Kowar, 1997)ⁱ.

Vorwissenschaftliche Akustik der Musik

Der Aufbruch in die Neuzeit wird mit dem Einsatz des Experiments in den Wissenschaften und mit der Entwicklung von neuen technischen Instrumenten vorbereitet. Als (nichtakustisches) Beispiel sei bloß Peregrinus (ca. 1269) genannt, der die erste sich drehende Kompaßnadel konstruierte und in seinen Arbeiten zum Magnetismus den Durchgang des Magnetfeldes durch Glas und Wasser zeigen konnte. Diese Experimente werden bis Gilbert (1600) nicht übertroffen. Mit Galileo Galilei kommt es zu der äußerst fruchtbaren Verbindung von Erfahrung und Experiment einerseits und mit der Mathematik und Physik andererseits. In diesem Sinne hat die der modernen empirischen Wissenschaft zugrundeliegende Methodologie eine Beziehung zur Musik aller Zeiten: Hypothese, Experiment und Schlußfolgerung entsprechen in der Musik der Komposition, der Ausführung und der kontinuierlichen Bewertung (Hunt, 1992 p.46).

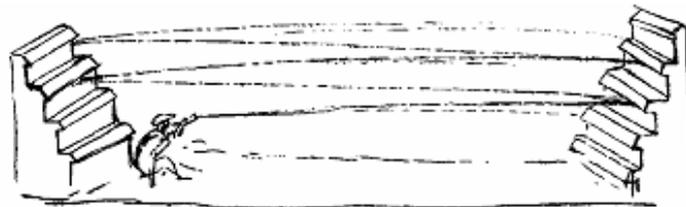


Abbildung 9: Leonardos Darstellung einer mehrfach reflektierten Schallwelle. Unter den abgebildeten Bedingungen muß wohl ein Flatterecho zu hören gewesen sein.

In der Zeit zwischen 1489 und 1510 verfaßte Leonardo da Vinci (1452-1519) seine Schriften zur Anatomie (Pangoncelli-Calcia, 1943). Seine Zeichnungen lassen keinen Zweifel aufkommen, dass er nicht nur die Atmung und die Lungen sondern natürlich auch den Kehlkopf als den Sitz (die Quelle) der Sprech- und Singstimme sezierte. Aufgrund seiner rein anatomischen Studien konnte er noch keine Angaben über die Entstehung des Stimmklanges durch Öffnen und Schließen der Stimmritze machen, sein Interesse daran ist jedoch erwiesen. An anderer Stelle beschreibt auch das Universalgenie Leonardo die Entstehung von Schall, dass es eines Schlages bedürfe, damit ein Körper klingen könne (Glocke usw.). Die Wellenausbreitung von Schall vergleicht Leonardo mit der Oberflächenwelle von Wasser und erklärt zurückgeworfene Wellen (Reflexionen) durch das Auftreffen der Welle am Ufer eines Teiches. Zur Veranschaulichung empfiehlt er leichte Holzsplitter zu beobachten, die im Wasser auf- und ab bewegt werden,

sich jedoch nicht fortbewegen obwohl die Oberflächenwelle sich transversal ausbreitet. Durch den Stimmklang werde ein Kreis in der Luft gebildet, der das gesprochene Wort mit sich führt. Das Mitschwingen einer Saite einer Laute machte er dadurch sichtbar, dass er einen Strohhalm auf die sekundär erregte Saite legte und damit die kleinen Bewegungen mitverfolgen konnte. Leonardo fragt noch, warum eine schlechte Saite einer Laute sich mehrfach (zwei-, drei- bis zu vierfach) sekundär zu Schwingungen anregen lasse. Offensichtlich erkannte er noch nicht - wie wenig später Galilei - die Frequenzverhältnisse, unter denen mitschwingen möglich ist (siehe Kepler (1619), Mersenne (1636), Kircher (1650)). Interpretiert man diese Beobachtung Leonardos positiv, so ist sie eigentlich ein weiterer Hinweis auf die Auflösung von einzelnen harmonischen Teiltönen (später bei: Sauveur, 1701). Bei einem Schlag auf ein flaches Brett beobachtete Leonardo, dass sich der darauf liegende Staub zu kleinen Bergen häuft, womit er sehr nahe an eine Vorwegnahme der beinahe 300 Jahre später von Chladni entdeckten Klangfiguren (1787) herankam.

Es ist unsicher, ob die Beziehung zwischen der physikalischen Grundlage Frequenz als Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit und dem psychologischen Korrelat Tonhöhe schon den Griechen bewußt war, diese Kenntnisse können mit Sicherheit erst ab der frühen Neuzeit nachgewiesen werden. Die aus der Antike stammenden pythagoräischen Proportionen und das Monochord waren aber bis dahin die im eigentlichen Sinn des Wortes maßgebenden Werkzeuge (Meßinstrumente) für theoretische Überlegungen und Vorstellungen zur musikalischen Stimmung und Konsonanz. Nach verschiedenen Berichten dürfte sich erst Vincenzo Galilei (*Discorso*, 1589) in seinem *Dialogo della musica antica et moderna*, einen damals vielbeachteten Beitrag zur Musik davon gelöst haben, als er die in der Musikpraxis übliche Temperierung den strengen pythagoräischen Zahlenverhältnissen gegenüberstellte. Er erkannte, dass diese eigentlich nur einen Spezialfall am Monochord darstellen. Die vollkommene Überwindung der antiken Vorstellung ist mit Sicherheit erst ab Galileo möglich, der natürlich mit den Experimenten seines Vaters vertraut war (wie auch später Kepler) weil er ihm wahrscheinlich bereits 1588 dabei geholfen hatte.

Galileo Galilei (1564-1642), spielte selbst Laute und variierte die Saitenparameter Länge, Spannung und Dicke systematisch; er unterschied zwischen verschiedenen Möglichkeiten der Herstellung der Oktave, z.B. ergab die Halbierung der Saitenlänge bei gleicher Spannung und Dicke das Verhältnis 2 : 1, dieselbe Oktave erhielt er bei gleichbleibender Dicke und Länge, jedoch bei Erhöhung des Spannungsgewichtes auf das Vierfache usw. Er fand eine geniale Methode sichtbare Oberflächenwellen in Wasser und Schallwellen in Luft durch dieselbe Schallquelle zu erzeugen, indem er ein Glas teilweise mit Wasser füllte (oder in Wasser tauchte) und den Rand anschlug, bzw. antrieb. Die Wellen in der Oktave darüber waren genau halb so lang, wie die tieferen. Zur Frage der Resonanz in Form sympathetischer Schwingungen stellte er fest, dass nicht nur jene Saiten mitschwingen, die auf die Frequenz der angeschlagenen Saite abgestimmt sind (siehe Leonardo) sondern auch solche mit der Frequenz der Oktave oder Quinte.

Galileos Bedeutung für die spätere physikalische Forschung ist bekannt: neben der Zentrifugalkraft zeigte Galileo auch zum ersten Mal, dass ungleich schwere Körper annähernd gleich rasch fallen, dass die Bahn eines Projektils einer Parabel folgt, d.h., dass ein Geschöß dann am weitesten fliegt, wenn es in einer Flugbahn mit einem Anfangswinkel von 45 Grad abgefeuert wird usw. Seine mit Hilfe des Teleskops erfolgten astronomischen Entdeckungen der vier Jupiter-Monde, der Venusphasen, die Beobachtungen des Mondes usw. brachten ihn bereits 1616 vor den Inquisitionsrichter, in demselben Jahr als das Hauptwerk des Kopernikus *De Revolutionibus Orbium Coelestium Libri VI* auf den Index Librorum Prohibitorum kam. Seine fortgesetzte Beharrung auf dem kopernikanischen System brachte den 69jährigen Galileo schließlich 1633 unter Papst Urban VIII.

zunächst ins Gefängnis, dann unter lebenslangen Hausarrest in seiner Villa in Arcetri, nahe bei Florenz.

Saitenschwingung und musikalische Tonhöhe

Nach Dostrovsky & Cannon (1987) war es Isaac Beeckman (1588-1637), der holländische Physiker und Naturphilosoph, der bereits 1614 in seinem Tagebuch die Frage der Identifizierung von Tonhöhe und Frequenz erörterte. René Descartes (1596-1650) besuchte Beeckman in Breda und war so beeindruckt von dessen Arbeiten am Monochord, dass er sich der Frage der mathematischen Umsetzung der musikalischen Intervalle und deren Streckenverhältnisse in seinem ersten Werk *Musicae compendium* ausführlich widmete. Ein weiterer Zeitgenosse war Simon Stevin (1548-1620), der zum Kreis der holländischen Intellektuellen gehörte und dessen Anwendungen der Mathematik auf das Monochord ihn zu der These veranlaßten, die Oktave wie eine Gerade uneingeschränkt teilen zu können, wodurch er folgerichtig auf das Verhältnis $\sqrt[12]{\frac{2}{1}}$ stieß. Er behauptete ferner, dass die vollkommenen Konsonanzen in derselben Teilung ausgedrückt werden können, z.B. die Quinte mit $\sqrt[12]{\frac{128}{1}}$, was gleichbedeutend ist mit $\sqrt[12]{2^7}$. Bei der Quinte und Quarte kam er damit nahe an die reine Stimmung heran. Stevin hat seine Aufzeichnungen zur Musik nicht veröffentlicht, doch haben seine Ideen bei Beeckman großes Interesse gefunden.

Kepler (1571-1630) wußte natürlich ebenfalls, dass eine nicht direkt angestrichene Saite in Schwingung geraten kann, wenn eine benachbarte Saite angeregt wird, die mit jener in einem bestimmten Verhältnis steht. In seiner *Harmonices Mundi* (1619) gibt er eine genaue Besprechung der Konsonanzen, Dissonanzen und Tongeschlechter, auch er kritisiert die reine Zahlensymbolik der Pythagoräer und entwickelt anhand der musikalischen Harmonien und unter Beiziehung der Geometrie (Kongruenz harmonischer Figuren) seine Weltharmonik. Bemerkenswert ist die Diskussion über die Teilung der Oktave „Die Teilung des Monochords für die Laute und ihre Verwerfung durch den Gehörsinn“ (Kepler, Seite 134) in der er einen Vergleich zwischen der Teilung der Saite nach Vincenzo Galilei² und nach seiner Theorie vornimmt.

	V. Galilei	Cents	cumC	J. Kepler	Cents	cumC
G.	100000	0.00	0.00	100000	0.00	0.00
Gp.	94444	98.96	98.96	93750	111.73	111.73
A.	89198	98.93	197.89	88889	92.18	203.91
b.	84242	98.96	296.85	83333	111.74	315.65
h.	79562	98.95	395.88	80000	70.66	386.31
c.	75242	96.65	492.45	75000	111.73	498.04
cp.	70967	101.27	593.72	71111	92.18	590.22
d.	67025	98.94	692.66	66667	111.72	701.94
dp.	63301	98.97	791.63	62500	111.74	813.68

² Der seinerseits sich möglicherweise auf Aristoxenos bezieht.

e.	59785	98.93	890.56	60000	70.67	884.35
f.	56463	98.97	989.53	56250	111.73	996.08
fp.	53325	98.99	1088.52	53333	92.19	1088.2
g.	50363	98.94	1187.46	50000	111.72	1199.9

Tab. 1: unterschiedliche Teilung der Oktave nach V: Galilei und J. Kepler.

Kepler geht hier auf die Unhörbarkeit geringfügiger Frequenzunterschiede ein und spricht von einer Schärfung der Sinne durch den Verstand, dem er aufgrund der Kenntnis der mathematischen Verhältnisse die höhere Urteilskraft zuordnet. Die Frage, ob bei nahezu einfachen Proportionen und exakten einfachen Proportionen mit „unhörbaren“ Unterschieden, jeweils die exakten als die einzig „richtigen“ anzusehen sind, wird die Psychoakustik noch Jahrhunderte später beschäftigen. Die nach Kepler „zurecht zuhörenden“ Frequenzabweichungen liegen zum Teil beträchtlich über der psychoakustischen Unterschiedsschwelle für Tonhöhen im Ausmaß von 3‰. Ein großer Anteil an den immer wiederkehrenden Diskussionen des "Zurechthörens" liegt in der Tatsache, dass in der Praxis quasi-stationäre Intonationen beobachtet werden, die mitunter numerisch erhebliche Abweichungen von den Idealwerten zeigen, im Mittelwert über die Zeit betrachtet, dennoch relativ gut stimmen. 100% glatte, exakt abgestimmte Klänge ohne diese instrumententypisch bedingten Variationen klingen künstlich, unnatürlich und unmusikalisch.

In Analogie zur angenommenen Isochronizität der Pendelschwingung sahen Beeckman und Galileo auch die Schwingung der Saite isochron. In seiner Harmonie Universelle schreibt Marin Mersenne (1636/1637) dazu wenigstens implizit, nachdem alle Hin- und Herschwingungen der Saite fortgesetzt immer denselben Ton geben, müssen die größeren Auslenkungen schneller geschehen als die kleineren. Ursprünglich dürften die Saiteninstrumente wegen ihrer sichtbaren Teilung bei reinen Intervallen und wegen ihrer unmittelbaren Beziehung zur Sphärenharmonie vordergründig eine bevorzugte Rolle gespielt haben. Die Blasinstrumente gewannen jedoch mit der vox humana, der Nachahmung der menschlichen Stimme, ebenso an Bedeutung. Mit Mersenne in seiner aktivsten Zeit (1627-1638), in der er auch die wichtigsten Schriften zur Musik schrieb (Köhler, 1987), wird der Übergang von der Kinderzeit der experimentellen Akustik zur Wissenschaft angesetzt: seine Gesetze zur Saitenschwingung, zur Gestalt der Blasinstrumente, zur Anordnung der Griffblätter sowie die Berechnung der Tonhöhen gelangen ihm im mittleren Frequenzbereich ganz gut.

Aus der heutigen Sicht von verblüffender Einfachheit, aber dennoch aufschlußreich waren die Experimente Robert Hookes (1635-1703), der Zahnräder und Kartonkarten zur Herstellung verschiedener Tonhöhen verwendete. Hookes Apparat wurde von Stancari (1706) kopiert und er zeigte, dass die Frequenz von der Anzahl der Zähne und der Umdrehungsgeschwindigkeit abgeleitet werden kann. Savart wird noch 1830 einen Hookeschen Apparat zur Bestimmung der oberen und unteren Hörgrenze (Savartsches Rad: 24000 Hz und 8 Hz) verwenden.

Um 1650 mißlang das von Athanasius Kircher und Otto von Guericke durchgeführtes Experiment zur Frage: kann Schall ohne das Medium Luft übertragen werden? Eine Glocke wurde in Vakuum angeschlagen und war wegen schlechter Körperschallisolation der Apparatur dennoch hörbar. Man nahm daher fälschlich an, dass Schall sich auch ohne Medium ausbreiten könne. Erst Robert Boyle (1660) konnte den Fehler aufdecken, wiederholte den Versuch unter erfolgreicher Vermeidung der Körperschallbrücke und kam zu dem richtigen Ergebnis, dass die Luft sehr wohl zur Übertragung des Schalls notwendig ist.

Schwebungen und Interferenzen

Josef Sauveur (1653-1716) führte als erster das Wort Akustik ein. Er beschäftigte sich u.a. mit Schwebungen von Orgelpfeifen-Klängen, die um einen Halbton ($15/16$) verschieden waren. Er erreichte damit Grundtöne von 90 und 96 Hz und dementsprechend eine Schwebungsfrequenz von 6 Hz. Um ca. 1704 (1701) führte er die Begriffe Grundton und harmonische Teiltöne ein, die von da an in der musikalischen Akustik gebräuchlich sind. Etwa gleichzeitig zu Sauveur in Frankreich beschäftigte sich in England J. Wallis (1653) mit der schwingenden Saite und bezeichnete jene Stellen, an denen niemals eine Bewegung stattfindet, mit Knoten, jene dazwischen, an denen heftige Bewegungen (Auslenkungen) auftreten, mit Bäuchen, Bezeichnungen die sich ebenfalls bis heute unverändert erhalten haben. Übrigens, die bis heute beinahe unverändert in Gebrauch stehende Stimmgabel wurde von John Shore um das Jahr 1711 erfunden. Shore war ein Trompeter im Dienste Georg I. von England.

Brook Taylor (1685-1731), dessen um 1713 entwickelten Reihen wohl bestens bekannt sind, traf die Annahme über die Kurvenform der bewegten Saite so, dass jeder Punkt die geradlinige Position zur selben Zeit erreicht. Er erklärte damit die Experimente von Mersenne und Sauveur. Weitere mathematische Behandlungen der Saitenbewegung finden sich bei Daniel Bernoulli (1700-1782), M. d'Alembert (1717-1783) und Leonhard Euler (1707-1783). Eulers Einführung der partiellen Ableitungen eröffnete die moderne Behandlung des Problems der Bewegung. Schließlich löste Lagrange (1736-1813) die Frage der schwingenden Saite vollkommen und elegant. Er setzte die Saite aus einer finiten Anzahl von identischen Massenteilen in gleichem Abstand zusammen, womit sich die Anzahl der unabhängigen Frequenzen aus der Anzahl der Massenteile ergab. Euler beschäftigte sich auch eingehend mit rein musikalischen Fragen. Die Analyse von Akkorden, Akkordserien und Konsonanzreihen bildete für ihn die Möglichkeit, einen höheren Ordnungsgrad zu erreichen (z.B. Exponent einer Akkordserie = das kleinste gemeinsame Vielfache).

Um 1787 streute Ernst Florens F. Chladni Sand bzw. Papierschnitzel auf vibrierende (Glas-) Platten und konnte damit zeigen, dass bestimmte Teile der Platten während der Anregung, etwa durch einen Bogen, in Ruhelage blieben, andere mit großer Amplitude in Schwingung versetzt wurden (Chladnische Klangfiguren). Diese bewegungslosen Teile nannte man Knotenlinien; die Verteilung von Knotenlinien und Bäuchen beschreibt die Art und Weise, in der ein Körper schwingen kann. Jeder sogenannte Eigenmodus ist verbunden mit einer bestimmten Schwingungsfrequenz, die ihrerseits die Tonhöhe bestimmt. Chladni experimentierte auch mit Stäben und Saiten. Wir verdanken Chladni wertvolle Beiträge zur Konsonanz und Dissonanz, ferner die Erkenntnis, dass eine Stimmgabel nichts anderes ist als ein gekrümmter Stab und die Glocke eine besonders geformte Platte. Chladni starb 1827. Wheatstone setzte 1833 diese Überlegungen fort und entwickelte eine Theorie, nach der die Existenz der Knotenlinien auf die Superposition von Transversalschwingungen in den Platten zurückzuführen sind.

Chladnis Hauptwerk die „Akustik“ (1802) wurde nicht nur von den Zeitgenossen sehr beachtet. Die Möglichkeit, Schallwellen in festen Körpern sichtbar zu machen, regte wesentliche Beobachtungen zum Verständnis der Schallabstrahlung von Musikinstrumenten an, es entstand eine angeregte Diskussion über Luft- und Körperschall und dessen Wahrnehmung. Seine Bemerkungen zur Konsonanz und Dissonanz, die er - eigentlich unter Vorwegnahme des Konzepts der Rauigkeit - auf berechenbare Frequenzverhältnisse zurückführte, wurden gelegentlich kritisiert, da man damals den Unterschied zwischen Konsonanz und Dissonanz vielmehr und beinahe ausschließlich dem individuellen Gefühl zuschrieb.

Differenz- und Kombinationstöne

Die Beobachtung, dass bei zwei Tönen (Klängen), die in einem einfachen Frequenzverhältnis zueinander stehen, ein dritter, tieferer hörbar werden kann, der dem kleinsten gemeinsamen ganzzahligen Teiler der Einzeltöne entspricht (z.B. Kombinationstöne), erfolgte offensichtlich an verschiedenen Orten unabhängig.

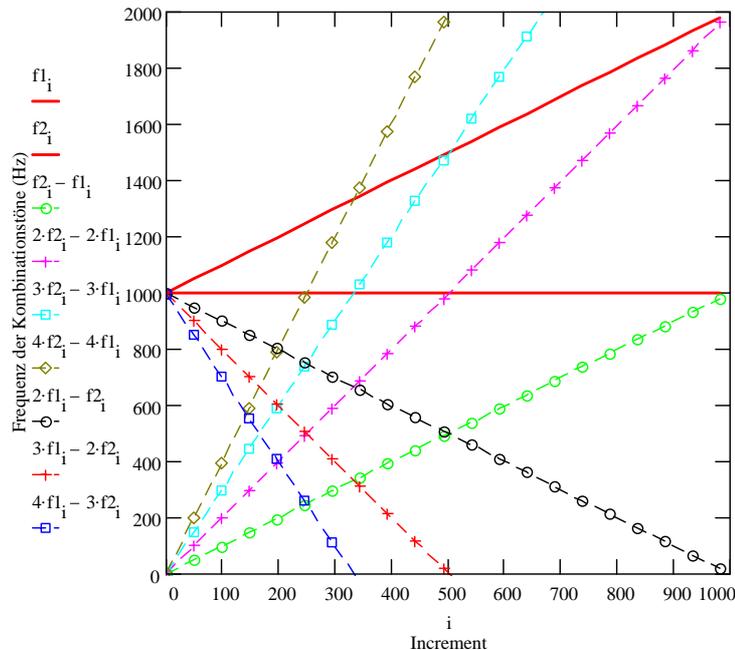


Abbildung 10: Verlauf der Kombinationstöne bei einer feststehenden Primärtonfrequenz von 1000 Hz (f_1) und einer von 1000 Hz auf 2000 Hz kontinuierlich aufsteigenden zweiten Primärtonfrequenz (f_2). Subjektive Kombinationstöne, die bei relativ hohen Schalldrücken durch Nichtlinearitäten im Ohr entstehen sind nicht im gesamten dargestellten Bereich hörbar.

Chladni publizierte 1805 eine Korrektur zur Erstentdeckung der Differenztöne: auch er hatte ursprünglich in seiner Akustik wie gewöhnlich Tartini (1754) als den Entdecker der Differenztöne genannt, bzw. Romieu, der bereits 1753 der Akademie der Wissenschaften in Montpellier einen entsprechenden Bericht gab; in demselben Jahr wurde diese Beobachtung auch von Serre veröffentlicht. Nach Mitteilungen des Musikdirektors Türk aus Halle hatte jedoch Georg Andreas Sorge bereits im Jahre 1744 entsprechende Anweisungen zur Stimmung von Orgelwerken und Klavieren gegeben, worin Differenztöne beschrieben werden. Nachdem Sorge bereits im Jahre 1744 die Differenztöne bei Quinten und Terzen als bekannt voraussetzt und nicht sich selbst als deren Entdecker nennt, nimmt Chladni an, dass die allererste Beobachtung wohl in Deutschland schon früher erfolgt sein muss.

Analyse von zusammengesetzten Schwingungen

Das Interesse der Physiker und Mathematiker richtet sich in dieser Zeit mehr und mehr auf die Analyse und Messung der Bestimmungsgrößen von Schwingungen. Jean Baptiste Fourier entwickelte 1822 für den Bereich der Wärmelehre das nach ihm benannte Fourier Theorem, wonach jede komplexe periodische Schwingung aus sinusoidalen Komponenten zusammengesetzt gesehen werden kann. Die Anwendung des Fourier Theorems auf akustische Signale und ihre

Wahrnehmung blieb jedoch 1841 Georg Simon Ohm im sogenannten Ohmschen Akustischen Gesetz vorbehalten. Heute ist die Fourier Transformation infolge der Entwicklung der Digitaltechnik *die* beherrschende Methode der Frequenzanalyse geworden. Um 1807 beschreibt Thomas Young (1773-1829) das sogenannte Kymographion, einen graphischen Apparat, mit dessen Hilfe die Periode (Frequenz) einer Schwingung bestimmt werden konnte. Der Apparat bestand aus einer rotierenden Trommel mit rußgeschwätzter Oberfläche, auf der die Schwingungen eines vibrierenden Körpers mit Hilfe eines Schreibstiftes aufgezeichnet wurden. Youngs Apparat wurde durch ein Gewicht angetrieben, benötigte keinerlei Zahnradgetriebe und verfügte daher über gute Gleichlaufschwankungen. Scott (1857/58) entwickelte diese Aufzeichnungsmethode für Schallschwingungen in der Luft weiter, indem er ein Horn anbrachte, das an seinem engeren Ende mit einem Diaphragma versehen war. Das Diaphragma nimmt die Schwingungen der Luft auf, bewegt über ein Hebelsystem einen Schreibstichel, der die Schwingungen synchron auf der rußgeschwätzten Trommel aufzeichnet. Das neue Gerät wurde Phonoautograph genannt. Von da an spielen Diaphragmen bei der Aufzeichnung und Registrierung von Schallwellen eine große Rolle. Der Edisonsche Phonograph (1877) war die logische Weiterentwicklung des Phonoautographen. Die in Wachs geschriebene Spur konnte akustisch wiedergegeben werden, womit erstmals durch Abhören bewiesen wurde, dass das Aufgezeichnete auch tatsächlich mit Sprache und Musik übereinstimmte. Bis Edison gab es reichlich Spekulationen darüber, was Diaphragmen eigentlich aufzeichnen könnten.

Eine völlig andere Methode der Sichtbarmachung von Schallwellen wurde von R. Koenig eingeführt. Er konstruierte das so genannte Flammenmanometer. Ohne Einwirkung von Schallwellen erzeugt der rotierende Spiegel ein Abbild der ruhig brennenden, nicht zitternden Flamme in der Form eines gleichmäßigen Lichtstreifens. Unter Schalleinwirkung flackert die Flamme in Abhängigkeit des Ober- und Unterdruckes der Wellenform des Schalls und es folgt eine Reihe von einander getrennter Flammenbilder; bei periodischen Signalen kann aus dem Abstand der Bilder in Abhängigkeit von der Umdrehungsgeschwindigkeit die Dauer der Periode bzw. die Frequenz gemessen werden.

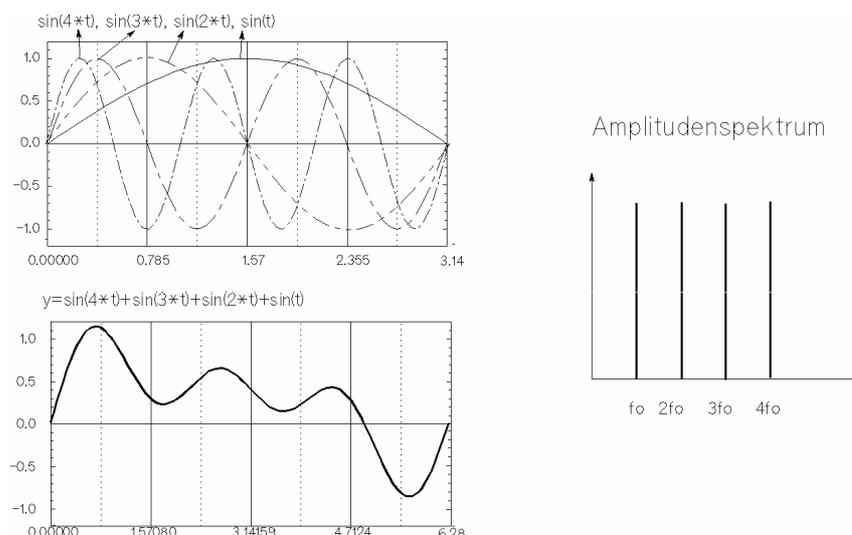


Abbildung 11: Fourier-Zerlegung einer komplexen Wellenform (oben) und zugehöriges Amplitudenspektrum (rechts).

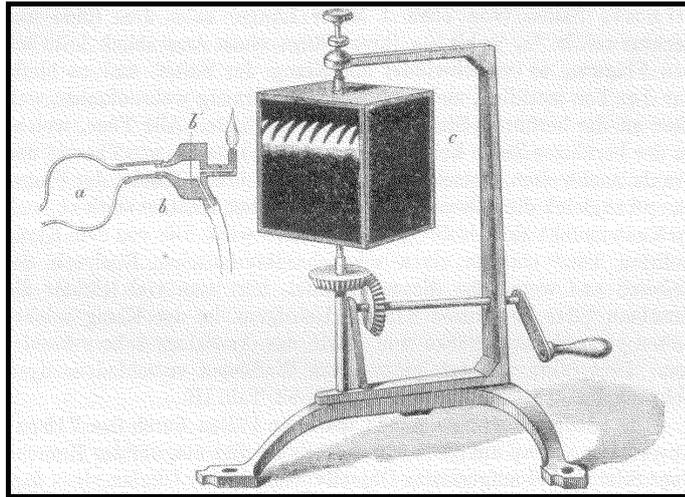


Abbildung 12: Flammenmanometer zur Sichtbarmachung von Schallwellen. Die über den Resonator /a/ verstärkten Schallwellen bewegen die Membran /b/, die ihrerseits die zugeführte Gasmenge beeinflusst wodurch die Flamme größer und kleiner wird. Der Drehspiegel wirft das Flammenbild an die Wand.

Psychophysiologische Hörtheorien als Grundlage für die Musik

Koenig war auch der Hersteller der Helmholtzschen Glas- und Messingresonatoren. Resonatoren können natürlich nur jene Klangkomponenten verstärken, die auch physikalisch vorhanden sind. Das paßte gut mit dem Ohmschen Akustischen Gesetz zusammen, welches besagte, dass eine Tonhöhe nur dann gehört werden kann, wenn sie als Frequenzkomponente im Klang aufscheint. Helmholtz seinerseits brachte mit der ebenfalls auf Resonanz im Innenohr aufbauenden ortsbezogenen Hörtheorie dazu die physiologische Basis ein.

Die Beschreibung der akustischen Meßvorgänge und -apparaturen und die referierten Resultate zeigen, wie sehr das physikalische Signal und die musikalische Wahrnehmung in dieser Zeit noch allzu eng gekoppelt angesehen wurden und die Ergebnisse von den Meßmethoden abhängig waren. Helmholtz wird später selbst auf die Wichtigkeit der Unterscheidung von physikalischem Reiz und subjektiver Empfindung in seiner „Lehre von den Tonempfindungen“ mit dem Untertitel „Als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“ hinweisen. August Seebeck (1841) erregte erhebliches Aufsehen, als er mit Hilfe einer von Helmholtz völlig unterschiedlichen Forschungsmethode, nämlich mittels einer Lochsirene, Luftdruckpulse erzeugte, deren Amplitudenspektrum keinen Grundton enthielt, der auch folglich mittels Resonatoren nicht verstärkt werden konnte. Beim Vergleich von harmonischen Klängen mit und ohne Grundton stellte Seebeck fest, dass beide dieselbe Tonhöhe haben, d.h., dass zur Wahrnehmung der Grundtonhöhe der Grundton physikalisch nicht vorhanden sein müsse. Dieses später in die Literatur unter der Bezeichnung „missing fundamental“ eingegangene Phänomen widersprach eindeutig dem Ohmschen Akustischen Gesetz und der Helmholtzschen Hörtheorie. Angesichts der hohen Reputation beider Forscherpersönlichkeiten wurden die Seebeckschen Ergebnisse stark in Zweifel gezogen. Seebeck argumentierte dagegen, dass doch die Entscheidung über die Frage, was zu einem Ton (Klang) gehöre, eben nur über das Ohr entschieden werden könne. Er konnte sich dennoch kaum durchsetzen. Heute wissen wir, dass die Klangwahrnehmung dynamischen Gestaltungsgesetzen folgt und „Residualklänge“ häufig vorgefunden werden können (Beispiel: Sprachsignale über Telefonleitungen). Die Helmholtzsche Hörtheorie war in der Folge nur durch das - wie sich später herausstellen sollte - falsche Argument haltbar, dass der (fehlende) Grundton infolge von Nichtlinearitäten im Ohr, als Differenz- oder Kombinationston aus den Ober-

tönen physikalisch erzeugt werden könnte. Hermann (1895 S. 197) stellt diese Problematik im Rahmen der Berichte über seine Versuche deutlich dar.

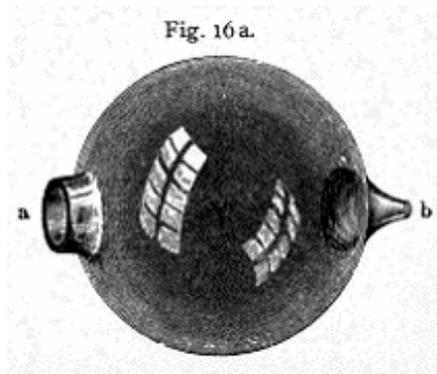


Abbildung 13: Helmholtz-Resonator: der Schall tritt über die größere Öffnung ein. Die resonierende(n) Frequenz(en) werden bei /b/ abgehört.

Diese mit Ohm, Seebeck und Helmholtz in der Mitte des 19. Jahrhunderts beginnenden, auf höchstem, wissenschaftlichem Niveau getragenen Auseinandersetzungen um ein umfassende Theorie des Hörens bilden nach wie vor Stoff für die moderne Psychoakustik. Das hohe Engagement der Beteiligten ist schon daran zu erkennen, dass mit aller Schärfe argumentiert wurde und gelegentlich die Grenzen der zu Gebote stehenden Höflichkeit überschritten waren.

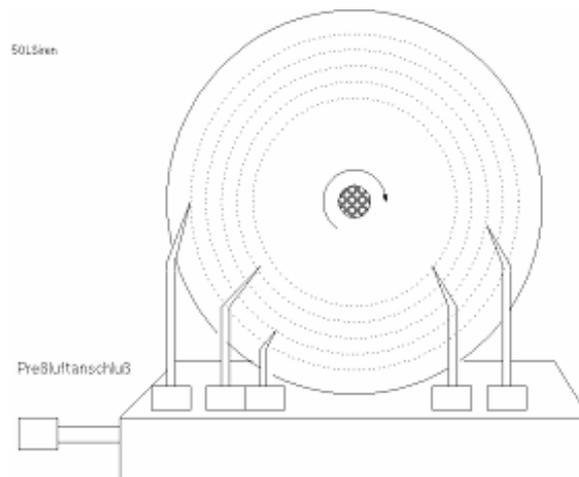


Abbildung 14: Modell einer Lochsirene wie sie von Seebeck zur Herstellung von Residualklängen verwendet wurde. Bei entsprechender Wahl der Lochabstände können praktisch Klänge mit beliebigen Amplitudenspektren hergestellt werden.

Eine ähnlich stimulierende Konfrontation ergab sich in den 30er und 40er Jahren dieses Jahrhunderts zwischen dem prominentesten Vertreter einer Ortstheorie des Hörens, Georg von Békésy und *dem* Verfechter einer Zeittheorie, J. F. Schouten. Békésy erhielt für seine Wanderwellentheorie des Hörens, die die Helmholtzsche Resonanztheorie endgültig widerlegte, den Nobelpreis. Schouten konnte darauf verweisen, dass es in der Form der Residualtonhöhe und verwandter Effekte nach wie vor Hörphänomene gibt, die nur zeittheoretisch erklärt werden können. In unserer Zeit wird daraufhin pragmatisch vorgegangen, das experimentum crucis zwischen Orts- und Zeittheorie blieb bisher aus, was uns nicht hindern sollte der Musik, wie das von Musikwissenschaftlern stets getan wurde (Graf, 1969), auch in der Psychoakustik mit Nachdruck die besondere Rolle des am meisten bevorzugten akustischen Signals zuzuweisen.

Literaturverzeichnis:

Appunn, G. (1868): Über die Helmholtz'sche Lehre von den Tonempfindungen als Grundlage für die Theorie der Musik, nebst Beschreibung einiger, zum Teil ganz neuer Apparate, welche zur Erläuterung und zum Beweis dieser Theorie geeignet sind. Bericht der Wetterauischen Gesellschaft für die gesamte Naturkunde zu Hanau über den Zeitabschnitt vom 14. Oktober 1863 bis 31. Dezember 1867, 73-90.

Barker Andrew (1989): Greek Musical Writings: II. Harmonic and Acoustic Theory. Cambridge Readings in the Literature of Music.

Bartoli (1680): Del suono, de'tremori armonici e dell'udito. Zit. nach Pancinelli - Carcia (1941).

Békésy Georg (1960): Experiments in Hearing. Mc.Graw-Hill New York.

Beeckman, Isaac (1614): Journal I, S.244 (Zit. nach Dostrovsky und Cannon).

Boring, E.G. (1942): History of sensation and perception in experimental psychology. New York: Appleton - Century Crofts.

Boyer, Carl, B. (1985): A History of Mathematics. Princeton, University Press, New Jersey.

Carterette Edward C. (1978): Historical Notes in Hearing. In: Handbook of Perception, Volume IV, Hearing. E.C. Carterette and M.P. Friedman, Eds., Academic Press Inc., New York; p.3-40.

Chladni Ernst Florens Friedrich (1802): Die Akustik. Leipzig.

Dostrovsky Siglalia & John Cannon (1987): Entstehung der musikalischen Akustik (1600-1750). In: Geschichte der Musiktheorie, Band 6, Hören, Messen und Rechnen in der frühen Neuzeit; Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt.

Euler, Leonhard (1739): Tentamen Novae Theoriae Musicae. Petropoli. Nach der französischen Übersetzung ins Deutsche übertragen von Josef Pfundner, Wien 1975.

Gericke, Hellmuth (1992): Mathematik in Antike und Orient. Fourier Verlag; Wiesbaden.

Graf, Walter (1969): Die musikalische Klangforschung. Wege zur Erfassung der musikalischen Bedeutung der Klangfarbe. In: Schriftenreihe Musik und Gesellschaft, Hsg. Kurt Blaukopf; Heft 6.

Födermayr Franz und Werner A. Deutsch (im Druck): Zur Forschungsstrategie der Vergleichend-systematischen Musikwissenschaft. In: Musicologica Austriaca.

Helmholtz, Hermann von L.F. (1863): Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Vieweg & Sohn, Braunschweig; 6. Aufl. 1913.

Hensen, V. (1880): Physiologie des Gehörs. In: Handbuch der Sinnesphysiologie II. Hsg. Hermann, L.; Verlag von F.C.W.Vogel, Leipzig; S.79.

Hermann, L. (1895): Weitere Untersuchungen über das Wesen der Vocale. Archiv für die gesamte Physiologie Bd. 61.

Hunt, Frederick Vinton (1992): *Origins in Acoustics*. Acoustical Society of America; New York.

Ibrah, Georges (1986): *Universalgeschichte der Zahlen*; Campus Verlag, Frankfurt/New York.

Kainz, Friedrich (1941): *Psychologie der Sprache*. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart. Bd.I.S.286.

Kepler Johannes (1619): *Harmonices Mundi*. In: Johannes Kepler, *Weltharmonie*, übersetzt von Max Caspar, R. Oldenburg, München, Wien (1982).

Koenig R. Zit. nach Hensen (1880).

Köhler Wolfgang (1987): *Die Blasinstrumente aus der <Harmonie Universelle> des Marin Mersenne*. Edition Moeck Nr.4038, Moeck Verlag Celle.

Köster, Jens Peter (1976): *Abriß historischer Ansätze der Sprachsynthese*. In: *Speech Analysis and Synthesis*, Volume 4, Wiktor Jassem Ed.; Polish Academy of Sciences; p.41-104.

Kowar Helmut (1997): siehe Text Bild und Ton

<http://www.kfs.oeaw.ac.at/dli/mech/dlidem1.htm>

Leonardo da Vinci (um 1500): *Les mss de L. da V.* Hrsg. Ravaisson - Mollien (1881 - 1898); Ms A, fol. 22 v. Zit. nach Panconcelli - Calzia.

Lindsay Robert, Bruce (1945): *Historical Introduction*. In: *The Theory of Sound*.

Lindsay, Robert, Bruce Ed. (1973): *Acoustics: historical and philosophical development*. Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson and Ross.

Mersenne Marin (1588-1648): *Traité de l'harmonie universelle* (1627). *Preludes de l'harmonie universelle* (1634). *Questions harmoniques* (1636). *Harmonicorum libri* (1636). *Harmonie universelle* (1636/37). *Harmonicorum instrumentorium libri IV* (1636). *Harmonicorum libri XII* (1648). Paris. Zit. nach Wolfgang Köhler (1986).

Miller D. C. (1935): *Anecdotal History of the Science of Sound*. New York; zit. nach Lindsay (1945).

Needham J. (1962): *Science and Civilization in China. Physics and physical Technology*; Vol. 4, Part I: Physics. Cambridge: Cambridge University Press.

Nicomachus aus Gerasa, Neupythagoräer (2. Jhdt. n.Chr.): *Harmonicum enchiridion* 6, in: *Musici Scriptorum Graeci*, ed. Jan, S.245-248; gleichlautend bei Iamblichos, *Vita Pythagorica* 115-121; deutsche Übersetzung nach M. von Albrecht, *Iamblichos: Pythagoras, griechisch und deutsch*, Zürich und Stuttgart 1963, S. 121 ff (Zit. nach Dostrovsky und Cannon).

Ohm, Georg, Simon (1839): *Bemerkungen über Combinationstöne und Stöße*. *Annalen der Physik und Chemie*, 47, pp. 463-466.

Ohm, Georg, Simon (1843): *Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen*. *Annalen der Physik und Chemie*, 59, pp. 513-565.

Panconcelli - Calzia (1941): *Geschichtszahlen der Phonetik*. Hansischer Gildenverlag, Hamburg.

Panconcelli - Calzia (1943): Leonardo als Phonetiker. Hansischer Gildenverlag, Hamburg.

Plomp Reinier (1966). Experiments on Tone Perception. Institute for Perception RVO-TNO.

Plomp Reinier (1976). Aspects of Tone Sensation. Academic Series in Cognition and Perception. London.

Rayleigh, John William Strutt, Baron (1894): The Theory of Sound. Vol. I, II, 2nd. Ed., Dover Publications, New York (1945).

Sabine Wallace Clement (1868-1919/1992): Theatre Acoustics. In: Collected Papers on Acoustics. Peninsula Publishing, Los Altos, CA USA.

Sachs, Curt (1968): Die Musik der Alten Welt, Berlin.

Sauveur Josef (1700-1701): Principes d'acoustique et de musique. In: Berichte de l'Academie Royale des Sciences, Systeme General des Intervalles des Sons, Paris (1701), p.297-364 ff.

Sauveur Josef (1702): Application des Sons Harmoniques ... la composition des jeux d'orgue. In: Berichte de l'Academie Royale des Sciences, Paris.

Sauveur Josef (1704): Systeme general des intervalles des sons et son application ... tous les systemes et ... tous les instruments de musique. In: Berichte de l'Academie Royale des Sciences, Paris (1701), p. 297-364.

Schouten, J.F (1970): The Residue Revisited. In: Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing. Plomp & Smoorenburg Eds. A.W. Sijthoff, Leiden.

Scripture, E.W. (1906): Researches in Experimental Phonetics. The Study of Speech Curves. Carnegie Institution of Washington; Washington D.C.

Seebeck, A. (1841): Beobachtungen über einige Bedingungen zur Entstehung von Tönen. Annalen der Physik und Chemie, 53; 417-436.

Seebeck, A. (1843): Über die Sirene. Annalen der Physik und Chemie, 60; 449-481.

Seebeck, A. (1844a): Über die Definition des Tones. Annalen der Physik und Chemie, 63; 353-368.

Seebeck, A. (1844b): Über die Erzeugung von Tönen durch getrennte Eindrücke, mit Beziehung auf die Definition des Tones. Annalen der Physik und Chemie, 63; 368-380.

Sorge, Georg Andres (1744): Anweisungen zur Stimmung sowohl der Orgelwerke, als auch anderer Instrumente, sonderlich des Klaviers. Hamburg. Zit. nach Graf (1969).

Sorge, Georg Andreas (1745): Vorgemach der musikalischen Composition. Verlag des Autoris, Lobenstein p. 14.

Speiser David (1988): Die Grundlegung der Mechanik in Huygens Horologium Oscillatorium und in Newtons Principia. In: Die Anfänge der Mechanik; K. Hutter Hsg.; Springer-Verlag, Berlin; S.21-46.

Stevin, Simon (um 1585): Works V, S.442-447 (Zit. nach Dostrovsky und Cannon).

Stumpf, C. (1926): Die Sprachlaute. Berlin: J. Springer.

Tartini (1754): Trattato die Musica. Traité de l'Harmonie.

Terhard, E. & Seewann, M. (1983): Auditive und objektive Bestimmung der Schlagtonhöhe von historischen Kirchenglocken.

Vitruvius Pollio, Marcus (1.Jhdt.v.Chr.): übersetzt ca. 1865: Über die Architektur. Fünftes Buch (Theater). Langenscheidtsche Bibliothek; Berlin - Schöneberg; 110. Band; S.127 ff.

Whewell William (1874): History of the Inductive Sciences. Vol. II. 3rd. Ed.; zit. nach Lindsay (1945).
