

Universität für Musik und darstellende Kunst, Wien
Institut für Elektroakustik
Jürg Jecklin

Tontechnik special

3. Musikalische Akustik

Inhalt

1. Schall und Akustik
 - Vorbemerkungen
 - Schall in der Natur
 - Definitionen und Sachgebiete
2. Schwingungen und Wellen
 - 2.1 Schwingungen
 - 2.2 Wellen
3. Schallausbreitung, Schallfeld,
 - 3.1 Schallausbreitung
 - Reflexion und Absorption
 - Schallbeugung
 - Refraktion
 - Dopplereffekt
 - Interferenz
 - Auslöschung
 - 3.2 Schallfeld und Schallfeldgrößen
 - das Schallfeld
 - Schallfeldgrößen
4. Das Gehör
 - 4.1 Das Hörorgan
 - Aufbau
 - Funktion
 - 4.2 Eigenschaften des Gehörs
5. Die Schallquellen
 - 5.1 Funktionsweise von Schallquellen
 - 5.2 musikalische Schallquellen
 - Schwingungserzeugung
 - Klangformung
 - Schallabstrahlung
 - 5.3 Musikinstrumente
6. Tonalität und Tonscalen
 - 6.1 Musik und Gehör
 - 6.2 Tonscalen
7. Die Idee des Logarithmus (Ernest Ansermet)

1. Schall und Akustik

Vorbemerkungen

Im Zusammenhang mit Musik ist in erster Linie der hörbare Schall von Interesse.

Unter Hörschall versteht man Schallereignisse, die Hörereignisse hervorrufen. Praktisch handelt es sich dabei um Schwingungen der Luft, die von unserem Hörorgan wahrgenommen werden.

Da der Mensch nur in der Lufthülle der Erde lebensfähig ist, ist Hörschall etwas erdgebundenes. Im Gegensatz zum Hörschall breitet sich das sichtbare Licht im ganzen Universum aus. Man kann also von einem Universum des Lichtes, aber "nur" von einer Welt des Schalls sprechen.

Schall in der Natur

Lärm macht nervös und krank, und logischerweise hält sich niemand gern in einer lärmgefüllten Umgebung auf. Wer aber in die Stille der Natur flüchten will merkt plötzlich, dass das gar nicht so einfach ist. In unserer industrialisierten Welt ist es fast unmöglich, noch irgendwo eine ruhige, akustisch natürliche Umgebung zu finden. Es gibt den flächendeckenden Flugverkehrslärm, den Strassenverkehr auch in den einsamsten Gegenden, und schliesslich im vermeintlich ruhigen Wald den Lärm von Kettensägen und Forstfahrzeugen.

Man hat sich daran gewöhnt, dass es nahezu keine Stille mehr gibt. Und wenn es sie einmal gibt, dann handelt es sich nur um eine relative Stille. Die ganze Natur ist voll von Geräuschen, die man zwar hört, wegen ihrer Diskretheit aber oft nicht bewusst wahrnimmt.

Früher, als die Menschen noch naturverbundener leben mussten, war das anders. Früher lebte man in einer natürlichen Tonlandschaft, die sich im Verlauf des Tages und im Ablauf der Jahreszeiten ständig änderte. Die Menschen waren in ihrer akustischen Umgebung eingebettet, die für sie einen ähnlichen Stellenwert hatte wie das Wetter.

Nun gibt es in der Natur unglaublich viele, unterschiedlichste Schallvorgänge. Man könnte einiges über die von summenden Bienen, die von Heuschrecken und Grillen erzeugten Geräusche und das Röhren der Hirsche sagen. Ich möchte mich aber auf die Beschreibung von ein paar "reinen", durch die meteorologischen Gegebenheiten verursachten Geräuschen beschränken.

Ein meteorologisches Geräusch, das man auch in der heutigen Lärmzeit nicht überhören kann, ist der Donner. Ursache für dieses wohl prägnanteste Naturgeräusch sind elektrische Entladungen in der Atmosphäre. Ein Blitz bewirkt eine plötzliche massive Erwärmung der Luft entlang dem Verlauf des Blitzstrahls, auf Grund derer sich die Luft plötzlich ausdehnt wie bei einer Explosion. Dabei entsteht eine Druckwelle, die sich in der Atmosphäre ausbreitet.

Wenn sich nun der Blitz in einer geraden Linie vom Entladungspunkt zur Erde bewegte, würde man die akustischen Folgen als kurzen Knall wahrnehmen. Da der Weg eines Blitzes aber immer einen komplizierten Verlauf mit sich änderndem Abstand von einem "Zuhörer" nimmt, hat jeder Donner eine gewisse Dauer. Wenn der Blitz in einem Bereich von zum Beispiel rund 8 horizontalen Kilometern verläuft (ein üblicher Bereich), donnert es während 24 Sekunden. In Tälern kann der Donner wegen den Schallreflexionen an den Bergen noch länger dauern. Manchmal hört man auch, sofern man sich nahe beim Einschlagpunkt des Blitzes befindet, einen "musikalischen" Ton. Dies ist immer dann der Fall, wenn der Blitz sich aus einer grossen Anzahl von Einzelentladungen zusammensetzt, die sich in einer raschen, regelmässigen Folge wiederholen.

Entsprechend dem Klangcharakter bezeichnet man manches Donner-Ereignis auch als "Grollen".

Für das Entstehen dieses Donnergeräuschs gibt es folgende Erklärung:

Ein Blitzereignis ist zeitlich sehr kurz (Lichtgeschwindigkeit). Die einzelnen Druckwellen (verursacht durch den unregelmässigen Verlauf des Blitzstrahls) entstehen praktisch gleichzeitig, sie treffen aber wegen der Laufzeit des Schalls (340 m/s) nicht gleichzeitig beim Zuhörer ein. Da jeder Blitz seinen eigenen Verlauf hat, verursacht er seinen spezifischen, nicht wiederhol-

baren Grollklang. Dazu kommt noch, dass es sich bei dem, was wir als einzelnen Blitz sehen, immer um eine Gruppe von getrennten Entladungen handelt. Die Interferenz zwischen den einzelnen Druckwellen wirkt sich zusätzlich akustisch aus, oft verstärkt durch die oben erwähnten Schallreflexionen an den Bergen. Donner ist übrigens nur in einem Umkreis von etwa 20Km vom Entstehungsort hörbar, während man zum Beispiel Kanonenschüsse noch in wesentlich grösserem Abstand wahrnehmen kann. Die Druckwelle eines Kanonenschusses wird aber fast punktförmig abgestrahlt und breitet sich als Kugelwelle aus, während der Blitz "unkonzentriert" längs einer sehr langen, unregelmässigen Linie entsteht.

Ein Zuhörer kann seinen Kilometer-Abstand vom Blitz übrigens sehr leicht feststellen, wenn er die Zeit zwischen Aufleuchten und Donner misst (zum Beispiel durch Zählen im Sekunden-takt), und dann diese Zeit durch drei teilt (die Schallgeschwindigkeit beträgt rund 340 m/s, die Laufzeit des Schalls für einen Kilometer beträgt deshalb rund 3 Sekunden).

Weniger spektakulär, aber klanglich interessanter als der Donner sind die durch den Wind erzeugten Naturgeräusche.

Zum Beispiel das, was man mit Heulen des Windes bezeichnet.

Dieses Windgeräusch wird durch vom Wind verursachte Luftverwirbelungen an irgendwelchen Hindernissen (Hausecken, Dachvorsprüngen, etc.) verursacht. Irgendwelche Resonanz- oder Orgelpfeifen-Effekte sind dabei nicht im Spiel. Deshalb ändert sich die Tonhöhe des Heulgeräusches auch kontinuierlich mit der Stärke des Windes.

Oder das Singen von Telefondrähten.

Wenn ein langer, zylindrischer Körper von einem quer auftreffenden Luftstrom umspült wird, erklingt ein Ton, dessen Tonhöhe einerseits von der Windgeschwindigkeit, andererseits vom Durchmesser des Zylinders abhängt (Je grösser die Windgeschwindigkeit, und je kleiner der Durchmesser, desto höher der erklingende Ton). Ein Telefondraht ist nun ein sehr dünner, langer zylindrischer Körper. Der durch das Anblasen eines starren Telefondrahtes entstehende Ton wäre aber so schwach, dass man ihn nur in einigen Zentimetern Abstand vom Draht hören könnte. Ein Telefondraht kann aber auch schwingen wie die Saite eines Musikinstrumentes, und zwar als ganzes mit seiner Resonanzfrequenz, oder unterteilt mit einem sogenannten Oberton. Wenn nun bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit die Zylinderfrequenz einer dieser Saitenfrequenzen entspricht, beginnt der Telefondraht so stark mitzuschwingen, dass man den erklingenden Ton auch in einigen zehn Meter Abstand noch hören kann. Wegen der ausgeprägten Resonanzfrequenz behält dieser Ton seine Tonhöhe auch bei sich leicht ändernder Windgeschwindigkeit bei. Ändert sich diese aber stärker, dann springt der erste, zweite oder noch höhere Oberton an. Verstärkt werden diese Telefondraht-Töne noch dank der Tatsache, dass sich die Schwingungen auf die Telegrafentangen übertragen, die dann die Funktion einer Abstrahlfläche (entsprechend dem Resonanzboden des Klaviers) übernehmen.

Im Zusammenhang mit diesen "aeolischen" Klängen muss man auch die heute total verschwundene Aeols-Harfe erwähnen. Es handelt sich um ein Instrument, das folgendermassen aufgebaut ist:

Über einen vielleicht zwei Meter langen Resonanzkasten sind eine Anzahl von unterschiedlich dicken Saiten gespannt. Alle Saiten werden gleich gestimmt, wegen ihrer unterschiedlichen Dicke sind sie aber unterschiedlich stark gespannt. Der über die Saiten streichende Wind bringt sie zum Schwingen, wobei bei den einzelnen Saiten wegen der unterschiedlichen Spannung, unterschiedliche Obertöne angeregt werden. Das ganze ergibt dann einen akkordischen Klang, der sich kontinuierlich mit der Windstärke ändert. In der Zeit der Romantik gab es auf den Dächern vieler Schlösser derartige Aeolsharfen. Heute weiss aber niemand mehr so genau, wie sie einst geklungen haben. Angeblich äusserst überirdisch, aber so zart, dass sie vom heute üblichen Umgebungslärm mit Sicherheit völlig übertönt würden.

Auf eine ähnliche Art und Weise wie das Singen der Telefondrähte entsteht auch das sogenannte Wispern von Bäumen, wobei natürlich der Charakter der Töne stark von der "Bauart" der Aeste und Zweige abhängt. Tannen tönen ganz anders als Buchen, Pappeln oder Trauer-

weiden. Den Klang von einzelnen Bäumen kann man aber nur in sehr ruhiger Umgebung hören, da die Äeste nicht wie die Telefondrähte mitschwingen können, und damit die erwähnte Resonanzverstärkung entfällt.

In einem Wald wird die Summe der Bäume akustisch wirksam. Wegen der grossen Anzahl von unterschiedlichen Bäumen kristallisiert sich aber kein diskreter Ton oder Akkord heraus. Man muss eher von einem Murmeln des Waldes sprechen, durch den ein leichter Wind streicht. Besonders deutlich, und auch über grössere Entfernungen hinweg, ist dieses Murmeln bei bewaldeten Berghängen zu hören. Bei starken Wind nimmt dieses Geräusch den Charakter eines "Röhrens" an.

Neben dem Wind spielt beim Erzeugen von Naturgeräuschen auch noch das Wasser eine grosse Rolle. Jedermann kennt die unterschiedlichen Geräusche des Regens, der auf einen festen Untergrund, auf ein Blechdach, auf eine Wiese oder auf die Blätter eines Laubbaumes fällt.

Das Wasser der grossen Flüsse zieht lautlos vorbei., während man das Rauschen eines Bergbaches von weitem hören kann. Wenn man aus unmittelbarer Nähe in einen Bach hineinhört wird man feststellen, dass das Rauschen immer nur dort entsteht, wo das Wasser beim Fallen über Steine zu kleinen Blasen verquirlt wird.

Spektakulär sind die je nach dem beruhigenden oder beängstigenden Geräusche der kleinen und grossen Wasserfälle.

Und da gibt es eine interessante Theorie die besagt, dass man aus dem Rauschen aller Wasserfälle immer einen F-Dur Dreiklang heraushören kann. Aus diesem Grund soll in der alpenländischen Volksmusik die Tonart F-Dur dominieren und wegen dieses Wasserfall-Akkords soll das Alphorn in F gestimmt sein.

Eine wunderbare Theorie, die ich vor Jahren einmal zu verifizieren versucht habe, und zwar anhand von Tonaufnahmen von Wasserfällen. Die Spektrum-Analyse des Rauschens verschiedener Wasserfälle ergab aber keine deutliche, messtechnisch erfassbare Dominanz eines F oder eines F-Dur Dreiklanges, obwohl man wirklich das Gefühl hat, dass man diese Tonart aus jedem Wasserfall-Rauschen heraushört.

Zum Abschluss möchte ich noch die Schneegeräusche erwähnen.

Je nach Temperatur hat der Schnee eine völlig unterschiedliche Konsistenz. Bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt des Wassers hat der Schnee eine homogene, weiche "Schneeball-Qualität". Wenn jemand durch diesen Schnee läuft, schmelzen die Schneekristalle wegen des Drucks unter den Schuhen. Die Schritte sind praktisch unhörbar.

Bei sehr tiefen Temperaturen wird der Schnee hart und verharrt. Der Druck der Schuhsohlen bringt die Schneekristalle nicht mehr zum Schmelzen. Sie werden zusammengedrückt und reiben sich dabei aneinander. Die Folge ist ein Knirschgeräusch. Zwischen der Lautlosigkeit des weichen, und dem lauten Knirschen des sehr kalten Schnees ändern sich die Schrittergeräusche kontinuierlich mit abnehmender Temperatur. Mit einiger Übung kann man so sogar die Schneetemperatur akustisch feststellen.

Definitionen

Akustik

Lehre von der Entstehung, Ausbreitung, Uebertragung, Wiedergabe, Aufnahme, Messung und Wirkung von Schall.

Schall

(Mittelhochdeutsch schal=Geräusch, Gesang, Geschrei) mechanische Schwingungen und Wellen eines elastischen Mediums

Schallarten

Luftschall (und Schall in anderen Gasen)

Körperschall (Schall in Festkörpern)

Flüssigkeits-Schall (zum Beispiel Wasserschall)

Sachgebiete**Physikalische Akustik**

Teilbereich der Akustik, der sich mit den allgemeinen Grundlagen der Akustik sowie deren Verbindung zu angrenzenden Wissenschaften befasst.

Technische Akustik

Teilgebiet der Akustik, das sich sowohl mit den technischen Mitteln der Erzeugung von Schall, der Abstrahlung, Übertragung und Messung von Schall befasst als auch die Gebiete der Lärmbekämpfung und des technischen Schallschutzes zum Inhalt hat.

Physiologische Akustik

Teilgebiet, das sich mit der Physiologie und der Anatomie des menschlichen Hör- und Stimmorgans befasst

Psychologische Akustik

Teilgebiet, das sich mit allen Wirkungen von Schallvorgängen im psychischen Bereich befasst, das heisst, mit Wirkungen von Schall auf menschliches Verhalten und Erleben

Medizinische Akustik

Sammelbegriff für ein Teilgebiet, das sich zum einen mit der wissenschaftlichen Auswertung von im menschlichen Körper auftretenden Schallvorgängen befasst (Herzschall und Lungenschall), als auch Schallsignale zu diagnostischen (Audiometrie und Ultraschall-diagnose) und therapeutischen (Ultraschalltherapie) Zwecken heranzieht

Musikalische Akustik

Teilgebiet, das alle mit der Musik im Zusammenhang stehenden Fragen umfasst.

2. Schwingungen und Wellen

2.1 Schwingungen

2.1.1 Begriffe

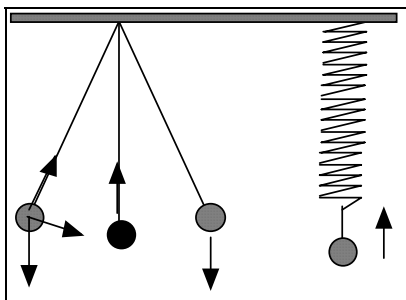
2.1.2

Schwingung

Zeitlich abwechselnde Zu- und Abnahme einer oder mehrerer Grössen in einem physikalischen System, die dann auftritt, wenn bei Störung eines Gleichgewichtszustandes Rückstellkräfte wirksam werden, die diesen Gleichgewichtszustand wiederherzustellen suchen.

Beispiele für schwingende Systeme:

Pendel, Feder mit Gewicht



Schwingungszahl (Frequenz)

Anzahl Schwingungen pro Sekunde

Formelzeichen f

Einheit 1/s, Hertz (Hz)

Schwingungsdauer (Periodendauer)

kürzester Zeitabschnitt, nach welchem sich eine Schwingung wiederholt

Formelzeichen T , Einheit s

$$T = 1/f$$

es handelt sich um den Reziprokwert der Frequenz.

Freie Schwingung (auch Eigenschwingung)

Schwingung mit der Eigenfrequenz (auch Resonanzfrequenz) eines schwingfähigen Systems.

Eigenfrequenz, Resonanzfrequenz

Frequenz, mit der ein System (Pendel, Saite) Schwingungen ausführt, wenn es durch eine einmalige Erregung aus dem Ruhezustand in Schwingung versetzt und dann sich selbst überlassen wird.

Formelzeichen f_0

Pendel:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g/l}$$

(g Schwerebeschleunigung,

l Länge des Pendels)

Federpendel

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{D/m}$$

(D Richtgrösse, Federkonstante,

m schwingende Masse)

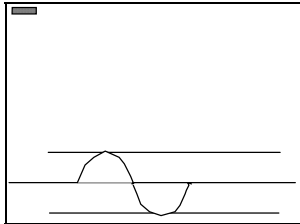
erzwungene Schwingung

Schwingung, deren Frequenz durch äussere Einwirkung auf ein Schwingsystem bestimmt wird.
 Beispiel: Lautsprecher

harmonische Schwingung (Sinusschwingung)

einfachste Form einer Schwingungsbewegung

Man kann die Bewegung eines pendelartig schwingenden Massenpunktes (Pendel, Feder mit Gewicht) auf einem senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung vorbeilaufenden Papier aufzeichnen, und erhält dann eine sogenannte Sinuskurve.



periodische Schwingung

Schwingung, die sich periodisch wiederholt (zum Beispiel Sinusschwingung)

gedämpfte Schwingung

Freie Schwingung in einem verlustbehafteten System nach Abschalten der Energiezufuhr.
 Einfacher: abklingende Schwingung

2.2 Welle

Definition:

lässt sich eine räumlich und zeitliche Zustandsänderung eines Kontinuums als einsinnige örtliche Verlagerung eines bestimmten Zustandes mit der Zeit erkennen oder beschreiben, so heisst diese Zustandsänderung eine Welle

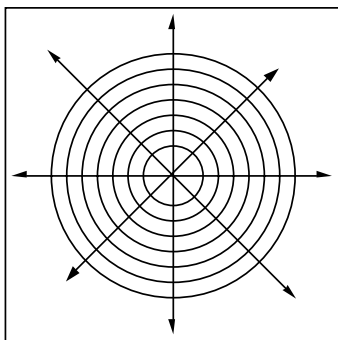
Beispiel für Welle: Wasserwelle

ebene Welle

Form einer Welle, die durch ebene Wellenfronten gekennzeichnet ist.

Kugelwelle

eine sich gleichmässig nach allen Raumrichtungen in Form konzentrischer Wellenfronten ausbreitende Schallwelle.



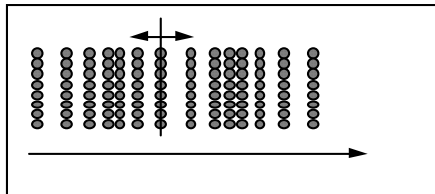
fortschreitende Welle

Welle mit einsinniger Ausbreitungsrichtung.

Longitudinalwelle (Längswelle)

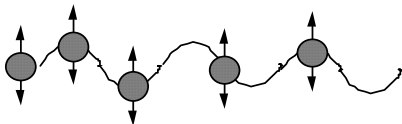
Welle, bei der die Schwingungsrichtung der oszillierenden Mediumteilchen mit der Ausbreitungsrichtung der Welle übereinstimmt.

Longitudinalwelle



Transversalwelle

Welle, bei der die Schwingungsrichtung der oszillierenden Mediumteilchen senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung der Welle steht.



stehende Welle

eine (häufig durch Reflexion entstehende) Interferenz zweier fortschreitender Wellen gleicher Wellenlänge mit entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung und gleicher Schwingungsrichtung der Mediumteilchen.

Wellenfront

Fläche, auf der sich die Einsatzphase einer plötzlich beginnenden Welle nach einer bestimmten Zeit befindet.

Wellenlänge

Abstand zweier aufeinander folgender und im gleichen Bewegungszustand schwingender Teilchen eines Uebertragungsmediums.

Die Länge, die der räumlichen Periode einer Welle entspricht.

Ausbreitungsgeschwindigkeit c

Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in einem Uebertragungsmedium.

In der Luft beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit 343 m/s.

Wellengleichung

Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit sind mit folgender Gleichung verknüpft:

$$\lambda = c/f \quad \text{Wellenlänge}$$

3. Schall und Schallfeld

3.1 Schallabstrahlung und Schallausbreitung

1. Schallabstrahlung

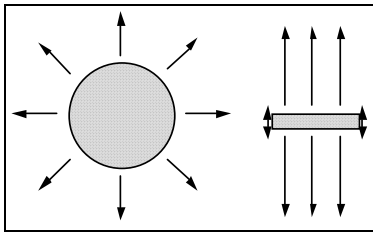
Die Uebertragung eines Schwingungsvorganges auf die nähere und fernere Umgebung.

2. Schallquelle (Schallsender)

Vorrichtung zur Erzeugung und Abstrahlung von Schall

Ideale Schallquelle: atmende Kugel und Kolbenstrahler

Praktische Schallquellen (zum Beispiel Musikinstrumente) haben meist eine frequenzabhängige Richtcharakteristik.



3. Schallausbreitung

Ausbreitung des Schalls in einem Uebertragungsmedium (Gas, Flüssigkeit, Festkörper)

unbeeinflusste Schallausbreitung

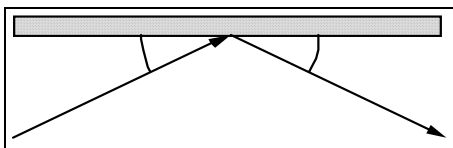
Bei kugelförmiger Ausbreitung nimmt die Leistung mit dem Quadrat der Entfernung ab.

In einem Zylinderwellenfeld nimmt die Leistung linear mit der Entfernung ab.

Schallreflexion, Rückwurf von Schall

Schallwellen werden an den Grenzflächen von Uebertragungsmedien mit unterschiedlicher Schallimpedanz (einfacher: unterschiedlicher Dichte) reflektiert.

Beispiele: Luft und Wasser, Luft und Wand.



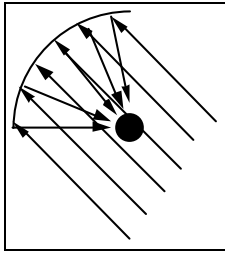
Reflexionsgesetz

Auftreffender Winkel = abgehender Winkel

(an ebener Grenzfläche)

Schallfocussierung

Schallkonzentrierung und Brennpunktbildung durch Reflexion an konkav gewölbter Fläche



Schallabsorbtion

Umwandlung von Schall- in Wärmeenergie beim Auftreffen auf Grenzflächen oder Entweichen durch Oeffnungen ins Freie oder in Nachbarräume

Schallbeugung (Diffraktion)

die nichtgeradlinige Ausbreitung von Schall

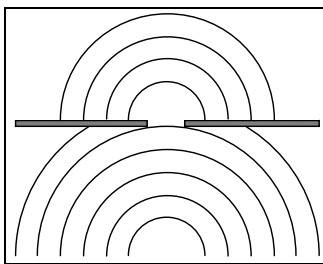
Ursachen:

Beugung an den Kanten von Hindernissen

Beugung durch allmähliche Dichte-Uebergänge in Uebertragungsmedien (akustische Fata Morgana)

Beugung durch Luftbewegungen (Wind).

Sonderfall einer Oeffnung



Schallbrechung (Refraktion)

Trifft eine Schallwelle schräg auf eine Grenzfläche auf, wird ein Teil der Schallenergie reflektiert, der Rest dringt in das aufzunehmende Medium ein und breitet sich dort weiter aus. Dabei erfährt der Schall an der Grenzfläche eine Richtungsänderung

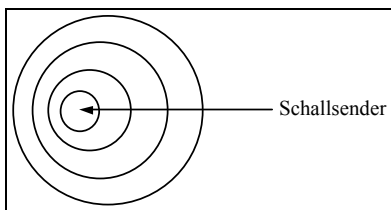
Dopplereffekt

Aenderung der Frequenz, wenn sich die Schallquelle und der Empfänger relativ zueinander bewegen.

Interferenz (Ueberlagerung von Wellen)

Erscheinung, die dann auftritt, wenn zwei oder mehrere Wellen an derselben Stelle aufeinander treffen.

Extremfall: Auslöschung



3.2 Schallfeld und Schallfeldgrößen

3.2.1 Schallfeld (auch "akustisches Feld")

Luftgefülltes Raumgebiet, in dem sich die Schallwellen ausbreiten.

freies Schallfeld

die Schallausbreitung geschieht kugelförmig

Schallfeldgesetz

$$p \sim 1/r \quad I \sim 1/r^2$$

ebenes Schallfeld

die Ausbreitung der Schallwellen erfolgt in senkrecht zur Fortpflanzung stehenden Wellenfronten

Schallfeldgesetz

$$p \sim 1/r \quad I \sim 1/r$$

statistisches Schallfeld (diffuses Schallfeld)

Schallfeld, bei dem der Schalleinfall an jedem Punkt aus allen Raumrichtungen gleich stark ist.

3.2.2 Schallfeldgrößen

Schallschnelle

Wechselgeschwindigkeit, mit der die Teilchen des Uebertragungsmediums um ihre Ruhelage hin- und herschwingen

Schallgeschwindigkeit c

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenausbreitung

Material		c, m/s
Luft -	10°	325.6
	0°	331.8
	10°	337.8
	20°	343.8
	800°	658
Helium	0°	971
Wasser	10°	1481
Eisen		5850
Aluminium		6400

Schalldruck

Wechseldruck, der dem statischen Luftdruck überlagert ist.

Schallausschlag

maximale Amplitude (Auslenkung) der schwingenden Teilchen des Uebertragungsmediums

Flüstergewölbe

Flüstergalerie für Pestkranke

la Chaise Dieu, Overgne, France

Kuppel St. Peter, Rom

St. Pauls Cathedral, London

4. Das Gehör

Hören:

sensorische Erfassung von Schallvorgängen hinsichtlich intensitätsmässiger und zeitlicher Zusammensetzung.

Gehör:

Gesamtheit aller Funktionsteile, welche zur Entstehung der als Hören bezeichneten Empfindung beitragen.

4.1 Das Hörorgan, Aufbau und Funktion

Das Hörorgan setzt sich aus Aussenohr, Mittelohr und Innenohr zusammen

4.1.1 Aussenohr

Aufgabe: möglichst viel Schallenergie aus allen Raumrichtungen aufzufangen und über den Gehörgang dem Trommelfell zuzuleiten.

Bestandteile:

Ohrmuschel, Gehörgang und Trommelfell

Ohrmuschel

Die Ohrmuschel nimmt die Schallwellen auf und leitet sie weiter in den äusseren Gehörgang.

Gehörgang

Der äussere Gehörgang ist ein konvex gekrümmter, mit Haut ausgekleideter Tunnel durch den Schädelknochen. Er leitet die Schallwellen zum Trommelfell, das durch die Schallwellen zu erzwungenen Schwingungen angeregt wird.

Trommelfell

Schnittstelle zwischen akustischer Innen- und Aussenwelt.

Es handelt sich um eine konisch geformte Hautmembran, die den Gehörgang gegen das Mittelohr abschliesst.

4.1.2 Mittelohr

Luftgefüllter Hohlraum im Schädelknochen (Paukenhöhle).

Aufgabe: Luftschall in Flüssigkeitsschall zu transformieren (das Aussenohr befindet sich Bereich von Luftschall, während das Innenohr mit Lympflüssigkeit gefüllt ist).

Das Mittelohr ist durch das Trommelfell gegen die "Aussenwelt" abgeschlossen und steht über die Membran des *ovalen Fensters* mit dem Innenohr in Verbindung.

Das Mittelohr ist via *Eustachische Röhre* mit dem Nasen-Rachenraum verbunden

Die mechanische Verbindung zwischen dem Trommelfell und dem ovalen Fenster bildet die *Gehörknöchelkette*, bestehend aus *Hammer*, *Amboss* und *Steigbügel*.

Die Schwingungen des Trommelfells werden durch die Gehörknöchelkette auf das ovale Fenster übertragen. Dabei findet eine Transformation statt:

Der Druck auf das ovale Fenster wird um den Faktor 22 erhöht (Hebelwirkung der Knöchelchen und unterschiedlich grosse Flächen von Trommelfell und ovalem Fenster). Diese Druckanpassung ist wegen der unterschiedlichen Impedanzen von akustischer Aussenwelt (Luft) und Innenohr (Flüssigkeit) notwendig.

4.1.3 Innenohr

Es handelt sich um ein schneckenförmig mit 3 1/2 Windungen aufgewickeltes, mit Lympflüssigkeit gefülltes Schläuchlein, das im Schädelknochen (im sogenannten "Felsenbein") eingebettet ist. Deshalb auch die Bezeichnung *Schnecke* oder *Cochlea*.

Zusammen mit der Schnecke sind auch noch die drei *Bogengänge* des *Gleichgewichtsorgans* im Schädelknochen eingebettet. Hör- und Gleichgewichtsorgan bilden eine Einheit.

Schnecke

Die Schnecke besteht aus drei parallelen Kanälen (auch Skalen genannt), die von der Basis bis zur Spitze laufen.

Die drei Kanäle tragen die Bezeichnungen *Scala vestibuli*, *Scala media* und *Scala tympani*.

Sie sind durch 3 Membranen getrennt:

die *Reissner-Membran* trennt *Scala vestibuli* und *Scala media*, die *Basilar-Membran* trennt *Scala media* und *Scala tympani*.

Die *Scala tympani* und die *Scala Vestibuli* sind an der Schneckenspitze miteinander verbunden (Bezeichnung der Oeffnung: *Helicotrema*). Gegenüber dem Mittelohr ist die *Scala vestibuli* mit dem *ovalen Fenster*, die *Scala tympani* mit dem *runden Fenster* abgeschlossen.

Cortische Organ

Auf der *Basilar-Membran* befindet sich das *Cortische Organ* mit den Haarzellen.

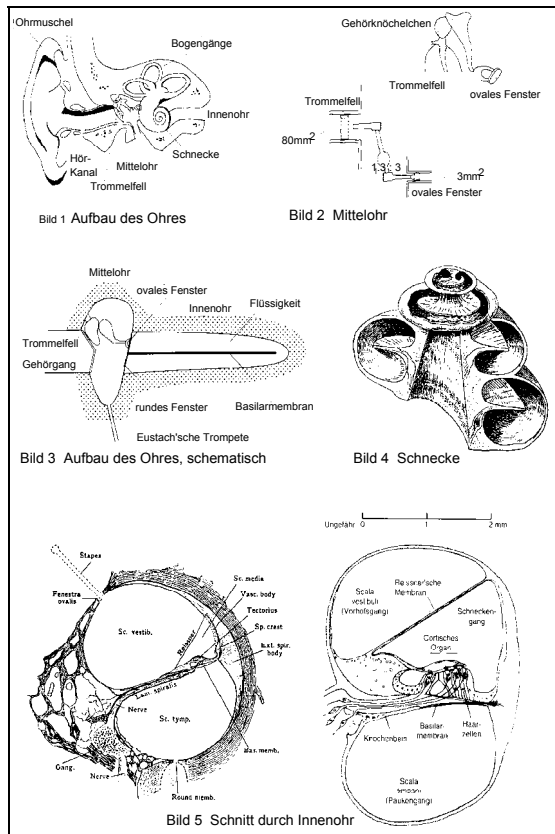
Das *Cortische Organ* arbeitet frequenzdiskriminierend und dient der Umsetzung Frequenz-Ort auf der *Basilar-Membran*.

Beispiel für diese Frequenz-Orts-Transformation im Innenohr:

Drei verschiedene Töne führen zu Wanderwellen mit Maxima an verschiedenen Orten.

Wichtig und Merkwert

- Das Gehör bildet die Schnittstelle zwischen akustischer Aussenwelt und seelischer Innenwelt. Schallwellen werden so transformiert, dass sie psychisch und seelisch wirksam werden können.
- Innenohr und Gleichgewichtsorgan bilden eine Einheit. Der Hör- und der Gleichgewichtssinn funktionieren nach dem gleichen Grundprinzip.
- Im Innenohr findet eine Frequenz - Orts - Umsetzung statt. Jeder Frequenz entspricht ein Ort auf der *Basilarmembran* .
- Es können nicht unendlich viele Tonhöhen, sondern nur eine begrenzte Anzahl unterschieden werden. Das gleiche gilt für die Lautstärken.
- Im Bezug auf die wahrnehmbaren Lautstärken gibt es eine untere und eine obere Grenze.
 - untere Grenze: Hörschwelle
 - obere Grenze: Schmerzgrenze



4.2 Eigenschaften des Gehörs Begriffe, Einheiten

Schalldruck

Der das Schallfeld bestimmende, sich zeitlich und örtlich verändernde Wechseldruck, der dem Ruhedruck (Luftdruck) überlagert ist.

Bel und Dezibel

Das Bel ist keine physikalische Einheit, sondern ein Kennwort

Es handelt sich um den dekadischen Logarithmus des Quotienten eines Messwertes zu einer festgelegten Bezugsgrösse, also um den Logarithmus einer Verhältniszahl.

In der Praxis gebräuchlich ist das *Dezibel* (dB).

$$1 \text{ dB} = 1/10 \text{ Bel}$$

Hörschwelle (Reizschwelle)

Der bei einer gegebenen Frequenz geringste Schalldruck, den ein Schallvorgang aufweisen muss, um eine Schallempfindung auszulösen.

Hörfläche, Hörbereich

Der Frequenz- und Pegelbereich zwischen der Hörschwelle und der Schmerzschwelle.

Kurven gleicher Lautstärke und Lautstärkepegel

Die Kurven geben die Abhängigkeit des Schalldrucks von der Frequenz an, die die jeweiligen

gleiche Lautstärkewahrnehmung hervorruft.

Die Kurven geben den *Lautstärkepegel* in phon an, und zwar entsprechend der jeweiligen dB-Zahl bei 1000 Hz.

Verdeckung und Mithörschwelle

Wahrnehmung des laueren und Nicht-mehr-Wahrnehmung des leiseren von zwei Schallereignissen. Das leisere Schallereignis wird vom laueren verdeckt.

Oder anders gesagt:

Die Hörschwelle für das leisere Schallereignis wird angehoben (Mithörschwelle)

Richtungshören

Räumliche Lokalisation auf Grund der interauralen Signalverarbeitung von Zeit und Intensitätsdifferenzen zwischen den beiden Ohren.

Tonhöhe, Einheit Hz

physikalische Frequenzeinheit (entsprechend 1/s oder Anzahl Schwingungen pro Sekunde). Entsprechend dem "Empfindungsverlauf" wird die Tonhöhen-Scala logarithmisch dargestellt.

Tonheit-Massystem, Einheit Mel

Das Mel wurde 1937 als Einheit der Tonheit eingeführt. Ausgangspunkt ist eine Frequenz von 131 Hz entsprechend 131 Mel.

Bis 500 Hz entspricht die Hz-Skala der Mel-Skala, dann wird der Zusammenhang nichtlinear. 16 000 Hz entspricht 2400 mel.

Die Mel-Skala spiegelt das Tonhöhen-Empfinden besser als die logarithmische Frequenzdarstellung.

Intervall-Massystem, Einheit Cent

logarithmische Masseinheit für das Cent-System

Die Oktav wird in 1200 Kleinstintervalle eingeteilt, jeder Halbton folglich in 100 Cent.

1 cent = $1200\sqrt[12]{2} = 1.0005777895065$

Lautstärke

Darstellung der Schallstärke in einer logarithmischen dB-Scala.

Ausgangspunkt: Hörschwelle

Lautstärkepegel

Empfindungsgerechtere Lautstärkescala, die zusätzlich den schallstärkeabhängigen Frequenzgang des Gehörs berücksichtigt.

Einheit: phon

Das phon ist keine physikalische Einheit, sondern ein Kennwort.

Der *Lautstärkepegel* eines Schalls beträgt

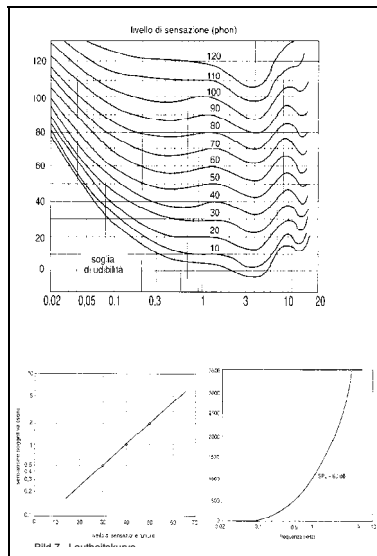
n phon, wenn er als gleich laut empfunden wird wie ein 1000 Hz-Ton von n dB.

Lautheit

Die exakte Grösse der subjektiven Lautstärkebeurteilung. Die Lautheit gibt an, wie laut ein Hörereignis empfunden wird.

Einheit: sone

Die sone-Scala basiert auf der Scala des Lautstärkepegels, weicht von dieser aber erheblich ab.



4.3 Gehöreigenschaften und Musik

Relatives Gehör

Fähigkeit, ein Intervall richtig zu bezeichnen und gesanglich zu transponieren oder frei wiederzugeben. Das Intervall kann nacheinander (Melodie) oder gleichzeitig (Akkord) erfasst werden. Es handelt sich um etwas, das man mit *Intervall-* und *Harmonie-Sinn* bezeichnen könnte.

Absolutes Gehör

Der unmittelbare Sinn und das darauf beruhende Dauergedächtnis für die Eigenart der Töne und Tonarten. Das sichere Erkennen des Einzeltones oder Akkordes ohne Anhaltspunkt (Vergleichston).

Das absolute Gehör ist erbbedingt und tritt nur selten auf. Es handelt sich nicht um eine musikalische Qualität.

Es gibt folgende Absolut-Hörertypen:

Linearer Typ

Orientierung an der Helligkeit (Signalhöhe).
Möglichkeit der Verwechslung von Halb- und Ganztönen.

Polarer oder zyklischer Typ

Orientierung am zyklisch wiederkehrenden Toncharakter eines Signals.
Möglichkeit der Verwechslung von Oktaven, Quinten und Quartan.

Farbenhörer

Seltenster Typ des Absoluthörers. Er orientiert sich an Farbassoziationen, die sich wiederkehrend einstellen.

Ton

Reiner oder einfacher Ton, Sinuston, Ton mit nur einer Frequenz.
Im alltäglichen akustischen Umfeld kommen reine Töne nicht vor, sondern nur Frequenzgemische (Geräusche und Klänge).
In der Alltagssprache wird das Wort Ton fälschlicherweise im Sinne von *Klang* verwendet (zum Beispiel *Geigenton* statt *Geigenklang*)

Klang

Schallsignal, das sich aus harmonisch verteilten Teilfrequenzen zusammensetzt.
Ein Klang enthält neben einer Grundschiwingung mehrere Teilschwingungen, deren Frequenzen sich harmonisch zur Grundschiwingung verhalten (ganzzahlige Vielfache der Grundschiwingung).

Man kann Klänge folgendermassen charakterisieren:

Klanghöhe

Die Klanghöhe wird primär von der Frequenz der Grundschiwingung bestimmt.

Klangstärke

Entspricht der Lautstärke oder Lautheit des Klages.

Klangfarbe

Die Klangfarbe wird bestimmt durch die Anzahl und relative Stärke (bezogen auf die Grundschiwingung) der Teilfrequenzen.

Klänge sind die wichtigsten Signalformen in der traditionellen Kunstmusik.

Teilfrequenzen, die harmonisch zu einer Grundfrequenz liegen, entstehen bei schwingenden Saiten oder Luftsäulen.

Geräusch

Frequenzgemisch aus vielen Teilfrequenzen, zwischen denen kein gesetzmässiger Zusammenhang besteht.

Es handelt sich um die in der Praxis am häufigsten auftretenden Schallsignale.

4.4 Konsonanz als Basis der Musik

Konsonanz

Von lat. *consonare* = zusammenklingen

Konsonanz ist die *Erlebnistatsache*, dass die Töne eines Klages in einer besonderen Beziehung zueinander stehen.

Seit dem Altertum werden Oktaven, Quinten und Quarten als konsonant angesehen. Die Terz würde nur zögernd in die Reihe der konsonanten Intervalle aufgenommen.

Die konsonanten Intervalle entsprechen den Intervallen zwischen den ersten 6 Teiltönen eines harmonischen Klages.

Frequenzverhältnisse der Intervalle

Reihenfolge mit abnehmender Konsonanz

Intervall	Frequenzverhältnis
Unisono	1:1
Oktav	1:2
Quinte	2:3
Quarte	3:4
grosse Terz	4:5
kleine Terz	5:6

Gesetz:

je grösser die zweite Zahl beim Frequenzverhältnis, desto kleiner die Konsonanz.

Dissonanz

Von lat. *dissonus* = misstönend
Missklang, Gegenteil von Konsonanz

Konsonanz als Basis der Klangerzeugung

Die konventionelle Musik verlangt nach Klängen, die sich aus zusammenklingenden Teiltönen zusammensetzen. Die Klangquelle, ein schwingender Körper, muss also so beschaffen sein, dass nur Teiltöne entstehen können, deren Frequenzen in einem gradzahligen Verhältnis zueinander stehen. Das ist bei einer Saite der Fall, die nur in gradzahligen Unterteilungen schwingen kann. Oder bei einer langen, dünnen Luftsäule (Orgelpfeifen, Blasinstrumente).

Konsonanz als Basis der Tonscalen

Da Teiltöne mit einem gradzahligen Frequenzverhältnis so konsonant sind, dass sie sich zu einem Klang vermischen, eignen sie sich auch zum Aufbau einer Tonskala. Dazu müssen sie allerdings durch Frequenzteilung in die gleiche Oktav heruntergesetzt werden. Bei diesem Verfahren hat man aber nur eingeschränkte Möglichkeiten. Praktisch realisierbar ist nur eine 5-Ton-Skala.

4.5 Weitere musikalisch relevante Faktoren

4.5.1 Verdeckungseffekts

Der Verdeckungseffekt muss beim Instrumentieren berücksichtigt werden. Bei falscher oder ungunter Instrumentierung wird in der Partitur stehendes unter Umständen verdeckt, und damit nicht hörbar.

Die Verdeckung geschieht dabei immer von unten nach oben, nie aber umgekehrt:

Bratschen werden von den Celli verdeckt,
Ein Piccolo setzt sich gegen das ganze
Orchester durch.

4.5.2 Lautstärke

Da der Lautstärkeindruck frequenzabhängig ist, wirkt sich eine zu grosse oder zu kleine Lautstärke klangentstellend aus.

zu kleine Lautstärke:

matter und tiefenarmer Klang

zu grosse Lautstärke:

tiefen- und höhenlastiger Klang

Dies wirkt sich immer dann aus, wenn Ensembles in zu grossen oder zu kleinen Räumen spielen

(Streichquartett in einem grossen Konzertsaal, Orchester in einem Kammermusiksaal.)

5. Musik-Schallquellen

Schallquelle:

Vorrichtung zur Erzeugung und Abstrahlung von Schall.

Sekundäre Schallquelle:

Schallentstehung durch nicht starr befestigte, schwingfähige Teile, die durch primäre Schwingungen oder Strömungen ihrerseits zu Schwingungen angeregt werden und somit Schall abstrahlen

5.1 Einteilung der Musikinstrumente

5.1.1 Grundsätzliche Einteilung

1. Mechanische M.
2. Elektromechanische M.
3. Elektrische und elektronische M.

5.1.2 Einteilung entsprechend der Funktionsweise

1. Aerophone
2. Chordophone
3. Idiophone
4. Membranophone

5.1.3 Einteilung auf Grund der klanglichen

Besonderheiten

1. Klangerzeuger
2. Geräuscherzeuger

5.1.4 Einteilung auf Grund der "akustischen Perspektiven"

1. Dynamikumfang
2. Einschwingvorgang
3. Frequenzumfang
4. Klangspektrum
5. Richtcharakteristik

5.2 Beschreibung der Instrumentenart

5.2.1 Aerophone

Die Luftsäule in einem Hohlraumresonator wird durch Anblasen in Schwingungen versetzt. Dafür gibt es folgende Möglichkeiten:

- a) Die Schallerzeugung erfolgt durch Wirbelablösung an einer Schneide (Flöteninstrumente).
- b) Der Luftstrom wird durch schwingende Zungen oder Rohrblätter periodisch unterbrochen (Rohrblattinstrumente).
- c) Die Schwingungserzeugung geschieht direkt über die Lippenschwingungen des Bläusers (Blechblasinstrumente)

5.2.2 Chordophone

Gespannte Saiten werden durch unterschiedliche Mechanismen (Anschlagen, Anzupfen, Anstrei-

chen) zu Schwingungen angeregt. Der Schall wird immer durch einen angekoppelten Resonator (Resonanzboden des Klaviers, Korpus der Streichinstrumente) abgestrahlt.

5.2.3 Idiophone

Der gesamte Instrumentenkörper wird zu Schwingungen angeregt, und zwar durch Schlagen, Schütteln, Reiben, etc.

Möglichkeiten:

a) schwingende Platten,
zum Beispiel Gong, Becken und Glocken.

Die Teilschwingungen verhalten sich zur Grundschwingung *unharmonisch*. Es handelt sich um Geräuschinstrumente.

b) schwingende Stäbe

Beispiele sind Vibraphon, Xylophon, Triangel oder auch Stimmgabeln.

c) anders geformte Körper,
zum Beispiel Holzblock und Kastagnetten.

5.2.4 Membranophone

Als Schwingungssystem dienen am Rand eingespannte Membranen, die durch Schlagen zum Schwingen angeregt werden.

Als Resonatoren sind Kessel (Pauken) oder röhrenförmige Gebilde (Trommelinstrumente) gebräuchlich.

5.3 Akustische Perspektive

1. Dynamikumfang

Das Verhältnis von maximal möglichem zu minimalem Schalldruckpegel oder Lautstärke.

Beispiele für grosse Dynamik: Klavier

Beispiel für kleine Dynamik: Cembalo

2. Einschwingvorgang

Es handelt sich um die zeitabhängige Amplitudenzunahme der Grund- und Teilschwingungen zwischen dem Moment der Anregung (zum Beispiel Anzupfen) und dem Stationärzustand eines Klanges.

3. Frequenzumfang

Das Frequenzband zwischen niedrigster und höchster Grundfrequenz.

Beispiel für grossen Umfang: Orgel

Beispiel für kleinen Umfang: Piccoloflöte

4. Klangspektrum

Stärke und Verteilung der Teilfrequenzen eines Klanges.

Obertonreicher glänzender Klang:

Trompete im *ff*

Obertonarmer, matter Klang:

Querflöte im *pp*

5. Richtcharakteristik

Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung

Beispiel für diffuse Schallabstrahlung:

Streichinstrumente, Klavier, Orgel, Harfe

Beispiel für gerichtete Schallabstrahlung:
Blechblasinstrumente

5.4 Generelle klangliche Eigenheiten

1. Klangerzeuger

Musikinstrumente mit Schwingungserzeugern, die lang und dünn sind (schwingenden Saiten und Luftsäulen).

Die Frequenzen der Teilschwingungen sind immer ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung. Je nach Art der Schwingungserzeugung sind alle, oder nur die ungradzahligen Teilschwingungen möglich.

Chordophone erzeugen immer alle Teilschwingungen

Aerophone erzeugen je nach Aufbau alle, oder nur die ungradzahligen Teilschwingungen (gedackte Orgelpfeifen, Klarinette)

2. Geräuscherzeuger

Instrumente die nicht mit etwas langem dünnen (Saiten, Luftsäulen) als Schwingungserzeuger arbeiten.

Der Klang ist geräuschhaft.

Beispiele: Membranophone und manche Idiophone.

5.5 Weitere Unterscheidungsmöglichkeit

1. Musikinstrumente, bei denen das Schwingungssystem einer bestimmten Frequenz zugeordnet ist.

Beispiele: Klavier, Orgel

2. Musikinstrumente, bei denen das Schwingungssystem für die Erzeugung von mehreren Frequenzen geeignet ist.

Dies kann durch Verändern der Länge einer Saite oder Luftsäule geschehen, aber auch durch "Ueberblasen"

Beispiele: alle Streich- und Blasinstrumente

Eigenschwingung	Schwingungsform	Wellenlänge der Eigenschwingung	Eigenfrequenz
Grundschiwingung		λ_0	f_0
1. Oberschiwingung		$\lambda_1 = \frac{1}{2} \lambda_0$	$2f_0$
2. Oberschiwingung		$\lambda_2 = \frac{1}{3} \lambda_0$	$3f_0$
3. Oberschiwingung		$\lambda_3 = \frac{1}{4} \lambda_0$	$4f_0$
4. Oberschiwingung		$\lambda_4 = \frac{1}{5} \lambda_0$	$5f_0$
⋮	⋮	⋮	⋮
k. Oberschiwingung		$\lambda_k = \frac{1}{k+1} \lambda_0$	$(k+1)f_0$

6. Tonalität und Tonscalen

6.1 Obertöne und Quintenstapel

,Bei den konventionellen Musikinstrumenten dient entweder eine schwingende Saite oder einer pulsierende Luftsäule der Schwingungs- und Klangerzeugung.

Saiten und Luftsäulen schwingen einerseits als ganzes, andererseits aber auch mehrfach unterteilt. Neben einer Grundschwingung entstehen so immer auch Oberschwingungen mit der doppelten, dreifachen, vierfachen, etc. Frequenz der Grundschwingung. Diese werden als sogenannte Obertöne von unserem Gehör nicht einzeln wahrgenommen. Sie verschmelzen mit dem Grundton zu einem Klang. Dies ist der Fall, weil alle diese Töne in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehen, und die Intensität der Obertöne geringer ist als die des Grundtones.

Die Intervalle der Obertonreihe sind konsonant. Sie eignen sich deshalb zum Aufbau von Tonscalen.

6.1.1 Konsonanz und Frequenzverhältnisse

Intervall	Frequenz-Verhältnis	grösste Zahl
Unisono	1:1	1
Oktave	2:1	2
Quinte	3:2	3
Quarte	4:3	4
grosse Terz	5:4	5
grosse Sexte	5:3	5
kleine Terz	6:5	6
kleine Sexte	8:5	8
Sekunde	9:8	9

Es gilt:

Je grösser die Zahl in der dritten Spalte der Tabelle, desto kleiner die Konsonanz des Intervalls.

6.1.2 Die Quinte als Ausgangs-Intervall für die Bildung einer Tonscala

Der zweite Oberton mit der dreifachen Frequenz des Grundtones liegt um eine Duodezime höher als der Grundton. Setzt man ihn eine Oktave tiefer, dann erhält man das Intervall einer Quinte mit dem Frequenzverhältnis 3 : 2 (halbierte dreifache Frequenz des Grundtones). Dieses Intervall eignet sich zur Bildung von Tonscalen.

6.1.3 Der Quintenstapel

Werden Quinten aufeinander gestapelt, durchlaufen sie den sogenannten Quintenzirkel.

Nach 12 Quinten ist man bei der siebten Oktav des Ausgangstones angelangt. Werden nun alle durch die Quintenstapelung entstandenen Töne durch entsprechende gradzahlige Frequenzteilung in den Bereich einer einzigen Oktav heruntergesetzt, ergibt sich eine aus 12 Tönen bestehende Scala.

Durch die Auswahl einzelner Töne aus diesem Quintenzirkel sind folgende musikalisch brauchbare Tonleitern entstanden:

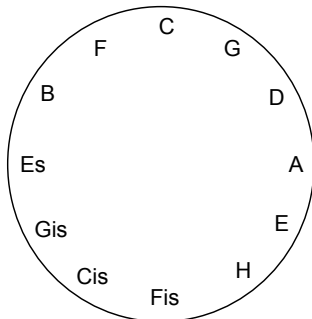
die alte griechische Scala C - F - G

die pentatonische Skala C - D - F - G - A

(chinesisch, alt-schottisch, Asien, Afrika)

die Siebentonscala

(Syntho-lydisch) C - D - E - Fis - G - A - H



6.1.4 Universelle 12-Ton-Scala

Die 12 Tönen des Quintenstapels bilden auch den Ausgangspunkt für eine universelle 12-Ton-Scala.

Problem: Mit 12 gestapelten Quinten gelangt man nicht genau zur 7. Oktav. Die 12. Quinte liegt ein wenig höher als die 7. Oktav.

Dies lässt sich rechnerisch zeigen:

Nach 12 Quinten erreicht man eine Frequenz, die um den Faktor $(3/2)^{12}$ höher liegt als die Ausgangsfrequenz.

Nach 7 Oktaven erreicht man eine Frequenz, die um den Faktor 2^7 höher liegt als die Ausgangsfrequenz.

6.1.5 Das pythagoräische Komma

12 Quinten entsprechen einem Zahlenwert von $(3/2)^{12} = 129.7463$

7 Oktaven entsprechen einem Zahlenwert von $2^7 = 128$

Die Zahlendifferenz von 1,7463 wird pythagoräisches Komma genannt.

Dieses Komma ist die Ursache für die bekannten Probleme mit den Tonscalen und der Stimmung der Musikinstrumente.

6.2 Mögliche Tonscalen und Stimmungen

6.2.1 Reine Stimmung

Alle Intervalle sind im Bezug auf C und die direkt benachbarten Töne so rein wie möglich.

Note	C	D	E	F	G	A	H	C
Verhältnis zu C	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
zu vorangehendem Ton		9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15

Merkmal dieser Stimmung:

es gibt zwei unterschiedliche Gantöne mit dem Frequenzverhältnissen 9/8 und 10/9. Die

Scala ist nicht universell, sondern nur in jeweils einer Tonart brauchbar.

6.2.2 die temperierte Stimmung

Die Oktav wird rein gestimmt.

Das pythagoräische Komma wird gleichmässig auf alle 12 Quinten des Quintenzirkels (und damit auf alle Halbtonintervalle der 12-Ton-Scala) verteilt:

Die Quinten werden zu klein, und damit unrein und nicht voll-zusammenklingend gestimmt. Es tritt eine *Schwebung* auf.

Die Verteilung des Kommas auf die 12 Halbtöne kann nun entweder so geschehen, dass die Stimmung *gleichschwebend* oder *proportional-schwebend* ausgeführt wird.

Die temperierte Stimmung ist universell. Ohne sie wäre die Entwicklung der Musik seit Bach anders verlaufen.

6.2.3 Die mitteltönige Stimmung

Die ersten vier Schritte des Quintenzirkels führen zum E, zur Terz (C-G-D-A-E).

Bei der mitteltönigen Stimmung werden nun die Quinten C-G, G-D, D-A und A-E so gestimmt, dass das Intervall C-E rein ist.

In diesem Fall wird das Intervall Gis - Es deutlich unrein. Man nennt es die Wolf-Quinte (*quinte-de-loup*).

Die Tonscala ist nicht universell verwendbar.

6.3 Tabelle der Frequenzverhältnisse bei reiner, mitteltöniger und temperierter Stimmung

Note	reine Stimmung		Harmonie im Bezug auf:					mitteltönig	temperiert (gleichschwebend)
	C-Scala		C	G	D	F	A		
C	1.000		1.000	1.031	0.985	1.00	1.042	1.000	1.000
Cis	-		-	-	-	-	-	1.045	
Des	-		-	-	-	-	-	1.070	1.059
Cx	-		-	-	-	-	-	1.092	
D	1.125		1.125	1.125	1.125	-	1.146	1.118	
Ebb	-		-	-	-	-	-	1.145	1.122
Dis	-		-	-	-	-	-	1.168	
Es	-		-	-	-	1-167	-	1.196	1.189
E	1.250		1.250	-	1.266	-	1-250	1.250	
Fb	-		-	-	-	-	-	1.280	1.260
Eis	-		-	-	-	-	-	1.306	
F	1.333		1.375	1.312	-	1.333	-	1.337	1.335
Fis	-		-	-	1.406	-	-	1.398	
Gb	-		-	-	-	-	-	1.431	1.414
Fx	-		-	-	-	-	-	1.460	
G	1.500		1.500	1.500	-	1.500	1.458	1.495	
Abb	-		-	-	-	-	-	1.531	1.498
Gis	-		-	-	-	-	-	1.563	
As	-		-	-	-	-	-	1.600	1.587
Gx	-		-	-	-	-	-	1.633	
A	1.667		-	1.687	1.687	1.667	1.667	1.672	
Hbb	-		-	-	-	-	-	1.712	1.682
Ais	-		-	-	-	-	-	1.747	
B	-		1.757	-	-	1.833	-	1.789	1.782
H	1.875		-	1.875	-	-	1.875	1.869	
Ces	-		-	-	-	-	-	1.914	1.888
His	-		-	-	-	-	-	1.953	
c'	2.000		2.000	2.062	1.969	2.000	2.083	2.000	2.000

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

6.4 Möglichkeiten für erweiterte Tonsysteme

6.4.1 Viertelton-Scala

Machnchmal verwendet wird auch das Viertelton-Systeme. Für diese Scala gibt es aber keine "natürliche" Rechtfertigung. Es handelt sich um eine abstrakte Konstruktion (es wurden einfach die Halbtöne der temperierten Scala halbiert), die keinen Bezug zur empfundenen Tonalität hat.

6.4.2 Erweiterte Scala auf der Basis des Quintenstapels

Folgende Scalen-Konstruktionen sind möglich:

- die heute übliche 12/Ton-Scala, konstruiert aus 12 gestapelten Quinten, entsprechend 7 Oktaven mit einer Abweichung (pythagoräisches Komma) von $1/4$ Halbton
- eine 41/Ton-Scala, konstruiert aus 41 Quinten, entsprechend 24 Oktaven und einem Komma von $1/5$ Halbton
- eine 53/Ton-Scala aufgebaut aus 53 Quinten, entsprechend 31 Oktaven und eine Komma von $1/23$ Halbton
- eine 306/Ton-Scala konstruiert aus 306 Quinten, entsprechend 179 Oktaven und einem Komma von $1/60$ Halbton.