

MUSIKALISCHE AKUSTIK

Grundlagen

Dieses Handout führt Sie in die Grundlagen der musikalischen Akustik ein und ist für den Fernunterricht konzipiert.

Sie erarbeiten diese Grundlagen im Selbststudium.

Überschneidungen und Schnittstellen mit Themen aus der Mathematik und Physik sind zu erwarten und erleichtern das Verständnis der Ausführungen in diesem Handout.

Alle im Text unterstrichenen Passagen sind direkt verlinkt. Die verlinkten Seiten und Videos sind Bestandteil der Erarbeitung dieses Skripts.

Ihre Notizen zu den Aufgaben und Verständnisfragen halten Sie im OneNote-Kursnotizbuch in der Rubrik Kursnotizen fest.

Michael Schraner | 27.1.2021



MUSIKALISCHE AKUSTIK

Grundlagen

Als Akustik wird die physikalische Wissenschaft von den Schallwellen bezeichnet. Schall ist die sich wellenartig ausbreitende räumliche und zeitliche Druckänderung eines elastischen Mediums. Die musikalische Akustik beschäftigt sich mit diesen Wellen im Frequenzbereich des menschlichen Hörens (ca. 16 - 20'000 Hz) und der Übertragung aufs Ohr bzw. der Verarbeitung im Gehirn.


>> FREQUENZ

Schall wird durch eine Schallquelle, also durch einen schwingenden Körper ausgelöst und durch ein elastisches Medium (z.B. Luft, Wasser etc.) übertragen. Die Moleküle des Schallerzeugers geben ihre Schwingungen an die Moleküle des Mediums weiter. Dabei kommt es zu Zu- und Abnahme der Molekülabstände, zu Luftdruckschwankungen (Schalldruck p , gemessen in Mikropascal), die den schon vorhandenen Luftdruck überlagern. Dieser Vorgang breitet sich wellenförmig aus.

Die Wahrnehmung von Schall unterliegt einer gewissen Gesetzmässigkeit. Dieser angepasst ist die Schallpegelskala in Dezibel (dB). Die vom menschlichen Ohr wahrgenommene Verdoppelung von Lautstärke liegt bei einem Pegelanstieg von 10dB.

> DEZIBELSKALA

>> SINUSTON

 **Mit der LärmApp (Android / iPhone) können mindestens Richtwerte von Dezibelmessungen eruiert werden. Messen Sie in verschiedenen Situationen Ihres Alltags die Dezibelwerte (Esstisch / offenes Fenster / Musikhören / Instrument spielen u.a.m.). Dokumentieren Sie Ihre Ergebnisse.**

>> OSZILLOGRAMM

Schallwellen breiten sich – ähnlich der Wasserkreise, wenn ein Stein ins Wasser geworfen wird – kugelförmig aus. Bei einer ungestörten Schallausbreitung spricht man von einem freien Schallfeld. Im täglichen Leben ist das Schallfeld aber meist durch Objekte gestört: Durch Gegenstände, Wände und auch Personen. So wird die Ausbreitung des Schalls beeinflusst.

Alle Schallwellen, ob Sprache, Musik oder Lärm, breiten sich mit der gleichen Geschwindigkeit aus. In der Luft beträgt die Schallgeschwindigkeit 344 Meter pro Sekunde, was ca. 1240 Kilometern pro Stunde entspricht. Diese Geschwindigkeit variiert in Abhängigkeit von


Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck leicht. In Wasser ist die Schallgeschwindigkeit z.B. mehr als dreimal so gross (1480 Meter pro Sekunde), in Eisen rund fünfzehnmal so gross wie in der Luft (5000 Meter pro Sekunde).

Frequenz

Die Frequenz eines Schallereignisses wird durch die Anzahl Schwingungen pro Sekunde definiert. Die Einheit Hertz (Hz) erhielt ihren Namen nach dem deutschen Physiker Heinrich Rudolf Hertz, der den experimentellen Nachweis elektromagnetischer Wellen lieferte. Die menschliche Hörgrenze nach unten liegt bei ca. 16 Hz (dies entspricht dem Subkontra-C; die Klaviertastatur geht bis zum Subkontra-A). Der Bereich unter der Hörgrenze heisst Infraskall und ist z.B. bei Motorengeräuschen, Wind, Brandung oder Erdbeben hör- bzw. spürbar. Die obere Hörgrenze liegt bei ca. 20'000 Hz, mit zunehmendem Alter stark abnehmend. Der Bereich über der Hörgrenze heisst Ultraschall. In der traditionellen Musikpflege werden Frequenzen bis ca. 10'000 Hz verwendet (Orgel). Darüber sind aber Obertöne hörbar, die v.a. die Klangfarbe von Schallereignissen beeinflussen. Sprechen bewegt sich im Bereich von ca. 300 bis 5000 Hz.

Sinuston

Die einfachste Schwingungsform ist der Sinuston. Schallereignisse, die durch sinusförmige Schwingungen hervorgerufen werden, bezeichnet man als reine Töne oder Sinustöne. Ein Sinuston enthält nur eine Frequenz und lässt sich in einem Oszillogramm darstellen. Sinustöne treten z. B. auf beim Gebrauch einer Stimmgabel und bei einfachen akustischen Signalen von Uhren, Handys oder auch pfeifenden Hörgeräten. Sinustöne werden also künstlich erzeugt und kommen in der Natur nicht vor.

 **Zeichnen Sie schematisch einen Sinuston im Oszillogramm und beschriften Sie die folgenden Parameter:**

Elongation, Amplitude, Periodendauer und Frequenz

Veränderungen der Amplitude und der Frequenz haben wichtige Auswirkungen auf die Hörwahrnehmung.

> SCHALLGESCHWINDIGKEIT

Interferenz und Schwebung

Einzelwellen kommen in der Praxis so gut wie nie vor. Die Überlagerung von Wellen wird Interferenz genannt. Die Überlagerung von zwei Wellen gleicher Frequenz ergibt eine Verstärkung bei gleicher Phase. Die Amplitude der resultierenden Welle entspricht der Summe der Ausgangsamplituden. Bei entgegengesetzten Phasen schwächen sich Wellen ab und löschen sich bei einer Phasenverschiebung von 180° und gleicher Amplitude sogar aus.

Wenn die Wellen von zwei Schallquellen nahezu die gleiche Frequenz haben, entstehen Schwebungen. Die Amplitude der resultierenden Welle schwankt regelmässig, was als An- und Abschwellen der Lautstärke hörbar wird. Mit Hilfe von Schwebungen können u.a. Saiteninstrumente gestimmt werden.

Ein- und Ausschwingzeiten

Wird eine Welle gedämpft, nimmt sie durch Reibung und Wärmeenergieverlust ab. Diese Welle läuft aus, die dazu benötigte Zeit heisst Ausschwingzeit. Durch erhöhte Energiezufuhr kann eine Welle erzwungen werden. Die Zeit bis zur vollen Amplitude der Welle heisst Einschwingzeit. Ein- und Ausschwingzeit bewegen sich im Bereich von Sekundenbruchteilen und sind massgeblich für Klangfarben verantwortlich.

Ton, Klang und Geräusch

Werden mehrere Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden miteinander überlagert, ergibt sich eine periodische Schwingung, deren Amplitudenverlauf von der Sinusform abweicht. Im Oszillogramm wird dies in einer komplizierte(n) Wellenform sichtbar (hier am Beispiel der Trompete). Stehen die Frequenzen der Einzelschwingungen dabei in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander, bezeichnet die Physik dieses Schallereignis als Klang, die Musik hingegen als Ton. Ein Geräusch hingegen ist ein Schallereignis mit zahlreichen Teilfrequenzen, zwischen denen kein gesetzmässiger Zusammenhang besteht. Die Schwingung ist nicht periodisch, es kann keine Tonhöhe bestimmt werden.

Weisses Rauschen findet im Alltag Anwendung, um Störgeräusche herauszufiltern und wird z.B. konkret als Einschlafhilfe genutzt.

Um den weiter oben beschriebenen Klang zu verstehen, muss an dieser Stelle die Naturtonreihe repetiert resp. genauer betrachtet werden.

Naturtonreihe und Obertonreihe

Der Aufbau eines physikalischen Klanges aus seinen Teiltönen ist naturbedingt. Über einem Grundton liegen die Obertöne mit einer spezifischen Intervall-Abfolge. Die Tonfolge ab dem 2. Teilton der Naturtonreihe heisst Oberton- oder Partialtonreihe.



Erkennen Sie die Gesetzmässigkeiten innerhalb der Naturtonreihe? Welche Töne kommen mehrfach vor? Wie verändern sich die Tonabstände grundsätzlich vom 1. bis zum 16. Teilton? Gleichen Sie Ihre Beobachtungen hier ab.



Zur Veranschaulichung wird die Naturtonreihe i.d.R. vom (grossen) C aus und lediglich vom 1. bis zum 16. Teilton notiert. Transponieren Sie die Naturtonreihe um einen Ganzton nach unten und starten Sie mit B, (Kontra-Be) und notieren Sie die Teiltöne 1 bis 16 musikalisch-orthographisch korrekt. Die Intervalle zwischen den einzelnen Teiltönen bleiben dabei immer dieselben.

Achtung: Die Naturtonreihe geht natürlich nicht nur bis zum 16. Teilton, sondern (theoretisch unendlich) weiter. Die Tonabstände werden ab dem 16. Teilton kleiner als die kleine Sekunde (Halbtonschritt), welche in unserem Tonsystem die kleine Einheit darstellt.

Die Entstehung der Obertöne kann anschaulich an einer schwingenden Saite beschrieben werden: Wird eine Saite halbiert, schwingt sie doppelt so schnell und der resultierende Ton klingt eine Oktave höher. Wird die Saite gedrittelt, schwingt sie mit Faktor $3/2$ und klingt um eine Quinte höher als der vorhergehende Ton etc.

Aus den Saitenteilungsverhältnissen lassen sich die Frequenzverhältnisse ableiten: Diese verhalten sich umgekehrt proportional zu den Saitenteilungsverhältnissen. Da die Hertz-Skala nicht linear ist, ist jeder Teilton ausgehend vom grossen C mit (gerundet) 64 Hz um jeweils 64 Hz höher als der vorhergehende.

Die Ihnen bekannten Intervalle von der Prime bis zur Oktav können in der Naturtonreihe bis zum 16. Teilton abgelesen werden – und somit auch deren Frequenzverhältnisse. Allerdings existieren von diversen Intervallen mehrere Varianten die jeweils alle im physikalischen Sinne rein sind.

Im Vergleich zum gleichstufig temperierten Stimmungssystem, das uns z.B. vom Klavier vertraut ist und bei dem alle Halbtonschritte physikalisch identisch sind, sind Abweichungen von Tönen der Naturtonreihe (teilweise deutlich, teilweise mit etwas Übung) hörbar.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird an dieser Stelle die Cent-Skala beigezogen: Cent (abgekürzt C) ist ein für unsere anschauliche Vorstel-

[INTERFERENZ <<](#)

[NATUR- UND OBERTONREIHE <](#)

[SCHWEBUNG <<](#)

[FREQUENZ- VERHÄLTNISSE <](#)

[KLANG <<](#)
[GERÄUSCH <<](#)

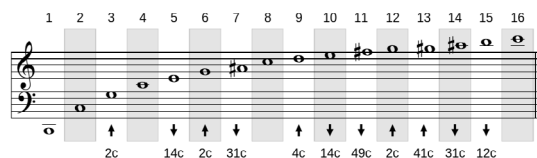
[WEISSES RAUSCHEN <<](#)

[GLEICHSTUFIG TEMPERIERTE STIMMUNG <](#)

>> KLANGFARBE
DURCH OBERTÖNE

lung von der Addition und Teilung der Intervalle nachgebildetes Distanzmass für Intervalle. Bei der Gleichteilung der Oktave mit dem Schwingungsverhältnis 2/1 in 12 gleich grosse Tonschritte erhält jeder der so entstehenden Halbtöne die Masszahl 100 C (von lat. *centum*, Hundert). Es sind die Halbtöne der gleichstufig temperierten Stimmung, auf dem Klavier der Schritt von Taste zu Taste.

Die Abweichungen bei der Terz (Teiltöne 3 und 10) sind für das geübte Ohr hörbar, bei der Quinte jedoch kaum (Teiltöne 3, 6 und 12). Die Abweichungen beim 7., 11., 13. und 14. Teilton sind jedoch enorm:



> HÖRBARE
ABWEICHUNGEN IN CENT

Der 11. Teilton wird auch «Alphorn-Fa» genannt.

Lesen Sie die Erläuterungen und hören Sie die Beispiele unter «reine Stimmung» an. Hören Sie sich ausserdem die Beispiele der reinen Stimmung und der gleichstufig temperierten Stimmung mehrmals hintereinander an. Versuchen Sie, möglichst konkret und prägnant zu beschreiben, wie und wo sich die Unterschiede der uns vertrauten gleichstufig temperierten Stimmung (mit physikalisch identischen Halbtonschritten) und der reinen Stimmung (mit Intervallschritten gemäss den Frequenzverhältnissen aus der Naturtonreihe) auf Tonleitern und Akkorde auswirken.

Die Unmöglichkeit einer «vollkommenen Stimmung» liegt in der Natur selber: Sobald man bei einem Instrument Töne z.B. an Tasten koppelt, muss man Kompromisse eingehen und Intervalle anpassen und somit «verfälschen». Ein Stimmungssystem mit reinen Intervallen – rein im Sinne der Frequenzverhältnisse aus der Naturtonreihe – ist mit dem auf Akkorden basierenden durmolltonalen System und dem Wunsch, alle 15 Tonarten verwenden zu können, nicht kompatibel. (Folgethema «Stimmungen»)

Teilton- resp. Obertonspektrum

Nebst dem Oszillogramm, wo Schallereignisse als Kurven zeitlich dargestellt werden und dadurch einerseits die (resultierende) Tonhöhe (x-Achse) und die Lautstärke (y-Achse) abgelesen werden kann, bildet das Teiltonspektrum die einzelnen Bestandteile eines Klangs ab (hier Trompete und Querflöte im direkten Vergleich): Auf der x-Achse sind die einzelnen Teiltöne (Frequenz-Ordinate) abzulesen, auf der y-Achse deren Ausprägung, also die Lautstärke des einzelnen Teiltönen (z.B. als Schalldruck in Pascal). Aus Teiltonspektralen können Rückschlüsse über die Klangfarbe eines Schallereignisses gezogen werden. Das

unharmonische Teilkontinuum von Geräuschen findet auch hier ein nachvollziehbares Abbild.

Klangfarbe

Für das Ohr ist normalerweise nur der (musikalische) Ton, also der physikalische Klang als Ganzes hörbar, die einzelnen Teiltöne vermag es nicht herauszuhören. Die Obertonreihe bestimmt weitgehend den Klang eines Schallereignisses durch ihre Ausprägungen der einzelnen Obertöne (Formanten).

Beachten Sie hier am unteren Rand auch die «weiteren Formanten» von Violine, Klavier und Oboe mit dem direkten Vergleich von Oszillogramm und Teiltonspektrum.

Neben Ein- und Ausschwingvorgang, die ebenfalls an der Klangfarbe beteiligt sind, beeinflussen Material, Bauweise und Anspielart eines Instrumentes die Obertonreihe stark. Die Intensität (Lautstärke) der Obertöne ist dabei meist kleiner als die des Grundtones. Mit zunehmender Frequenz (Tonhöhe) der Obertöne nimmt auch deren Intensität ab.

Merke: Ein in der Musik als umgangssprachlich bezeichneter «Ton» ist physikalisch meist ein «Klang» (also eine Grundfrequenz mit ihren Obertönen) oder ein Klanggemisch (z.B. ein Akkord). Als «reiner Ton» wird lediglich ein Sinuston bezeichnet. Beachten Sie hier nochmals exemplarisch die Unterschiede zwischen Klang, Geräusch und (neu) Mischklang.

Machen Sie mit dem Spektralanalysator von n-Track ([Android](#) / [iPhone](#)) einige Screenshots von Teiltonspektralen, die Sie auf Ihrem Instrument spielen. Singen Sie auf derselben Tonhöhe verschiedenen Vokale und vergleichen Sie deren Teiltonspektrale miteinander. Dokumentieren Sie Ihre Ergebnisse. Schauen Sie ausserdem dieses [Video](#) zur Klangfarbe einzelner Vokale.

> UNMÖGLICHKEIT EINER
VOLLKOMMENEN
STIMMUNG

> OSZILLOGRAMM

> TEILTONSPEKTRUM