

ABOUT THINGS

Grundfrequenz und harmonische Oberschwingung: die Obertonreihe - musikalische Physik im fächerübergreifenden Unterricht - The Overtone Series - musical Physics in interdisciplinary Teaching

Authors: Jochen Wahl
Submitted: 3. September 2021
Published: 6. September 2021
Volume: 8
Issue: 4
Affiliation: Pädagogische Hochschule Freiburg, Germany
Languages: German
Keywords: Demetrios, music, interdisciplinary teaching, physics
Categories: Demetrios Project, Performing Arts, Music
DOI: 10.17160/josha.8.4.779

Abstract:

Interdisciplinary teaching creates a learning environment where students and teachers can have complex discussions. This thesis not only provides profound background information about musical physics in interdisciplinary teaching but also shows possibilities for didactic and methodological Implementation in physics lessons consciously linked to practical musical applications.

JOSHA

josha.org

**Journal of Science,
Humanities and Arts**

JOSHA is a service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content

Erste Staatsprüfung für das
Lehramt an Realschulen



Wissenschaftliche Hausarbeit mit dem Thema

Grundfrequenz und harmonische Oberschwingung: die Obertonreihe
- musikalische Physik im fächerübergreifenden Unterricht -

in den Prüfungsfächern Physik (FV) und Musik (HF).

Vergabe des Themas am 20.07.2010.

Vorgelegt von

Jochen Wahl

(Matrikelnummer: 1421262)

1. Prüferin: Prof. Dr. Silke Milkeskis-Seifert

2. Prüfer: AOR Michael Fröhlich

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die Arbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben und alle Stellen der Arbeit, welche nach Wortlaut oder Sinn aus anderen Quellen entnommen sind, kenntlich gemacht habe.

Schallstadt, 14.10.2010

Einverständniserklärung

Im Falle der Aufbewahrung meiner Arbeit im Staatsarchiv erkläre ich hiermit mein Einverständnis, dass diese Arbeit anderen Benutzern zugänglich gemacht wird.

Schallstadt, 14.10.2010

Inhaltsverzeichnis

	<i>Seite</i>
Ehrenwörtliche Erklärung _____	2
Einverständniserklärung _____	2
Inhaltsverzeichnis _____	3
Zusammenfassung und Ziel der Arbeit _____	5
I. Akustik _____	6
1. Physikalische, physiologische und psychologische Akustik _____	7
2. Schall – Schallquellen _____	9
3. Rezeption: das Gehör _____	10
II. Grundfrequenzen und harmonische Oberschwingungen _____	12
1. Ton, Klang und Geräusch _____	12
1.1 Der physikalische Ton _____	13
1.2 Der physikalische Klang – der musikalische Ton _____	14
1.3 Das physikalische Geräusch _____	14
1.4 Der musikalische Klang _____	15
2. Grundfrequenz _____	16
3. Harmonische Oberschwingung _____	18
4. Schallquellen: Beispiel Musikinstrumente _____	21
5. Musikalische Klänge und Klangfarben _____	28
5.1 Wahrnehmung von Tonhöhe und Grundtonerkennung _____	28
5.2 Klangfarbe _____	29
6. Analyse und Synthese von Klängen – Fourier _____	35
III. Didaktische und methodische Implementierung im Unterricht _____	39
1. Legitimieren, Orientieren, Fundieren _____	40
2. Modellieren, Experimentieren, Kommunizieren _____	42
3. Methodik im Physikunterricht _____	45
4. Exemplarische Ansätze für Unterrichtseinheiten _____	51

IV. Frequenzverhältnisse in der musikalischen Praxis	65
1. Obertöne	65
1.1 Die Obertonreihe	65
1.2 Obertongesang	66
2. Musikinstrumente und ihre Klänge	67
3. Das (absolute) Gehör	67
4. Stimmungen	68
4.1 Pythagoreische Stimmung	69
4.1.1 Modalität und Tonalität	69
4.2 Reine und mitteltönige Stimmung	70
4.3 Wohltemperierte und gleichstufige Stimmung	71
4.3.1 Charakteristika der Tonarten	72
4.3.2 J. S. Bach und das wohltemperierte Klavier	73
5. Von der Schallplatte über die CD zu MP3	73
V. Analyse und Fächer verbindende Ansätze	76
Hinweise zur Zitierung	82
Literaturverzeichnis	84
Anlagenverzeichnis	86
Anlagen	87

Zusammenfassung und Ziel der Arbeit

Oftmals wurde ich bereits auf meine – in den Augen vieler – ‘ungewöhnliche Fächerkombination’ angesprochen, welche neben Physik auch Musik enthält. Andererseits ist der fachübergreifende, Fächer verbindende und Fächer integrierende Unterricht in aller Munde. Dadurch entstand die Idee dieser Arbeit, nämlich erstens die Darstellung eines physikalischen Schwingungsphänomens in Verbindung mit seiner großen (meist sehr praktischen) Bedeutung für enorm viele Teilbereiche der Musik, sowie darüber hinaus das Ziel der Darstellung verschiedener Möglichkeiten, Grenzen zwischen den einzelnen Schulfächern zu durchbrechen und ein Fundament für eine enorm umfangreich gestaltbare – und je nach Wunsch nahezu beliebig weit ausweitbare – Fächer verbindende Unterrichtseinheit zu legen, welche über die bloße Verbindung von Physik und Musik weit hinaus geht und viele weitere Fächer wie Mathematik, Biologie, Technik, Geschichte, Mensch und Umwelt, ITG sowie Religionslehre vereinen kann.

Nach einer Einführung über die Akustik (Kapitel I.) und der Darstellung der fachwissenschaftlichen Grundlagen der Harmonischen Oberschwingungen (Kapitel II.) werden Möglichkeiten zur didaktischen und methodischen Implementierung im Physikunterricht dargestellt – jedoch bereits bewusst verknüpft mit praktischen musikalischen Anwendungen (Kapitel III.). Nach Darstellung und Ausführung weiterer Bereiche aus der musikalischen Praxis mit einer hohen Relevanz der Harmonischen Oberschwingungen (Kapitel IV.) werden abschließend diverse Verknüpfungsmöglichkeiten der bis dahin dargestellten Ansätze zur entweder aufbauenden, zeitnahen oder direkt verzahnten sinnvollen Implementierung des Themas in verschiedensten Schulfächern und Fächerverbänden aufgezeigt (Kapitel V.).

Die Kapitel I., II. und IV. verstehen sich als Literatuarbeit mit entsprechenden Quellenangaben. Die Kapitel III. und V. (sowie Teile des Kapitels IV.5 und durch fehlende Quellenangaben erkennbare punktuelle Kommentare des Verfassers in den Kapiteln I., II. und III.) stellen die so genannte Eigenleistung des Verfassers dar, welche teilweise auch auf selbst durchgeführten Versuchen, Experimenten und Interviews basiert.

I. Akustik

Als Akustik bezeichnet man die Lehre vom Schall. Sie behandelt die Entstehung von Schall sowie seine Ausbreitung im freien Raum und in Rohrleitungen oder in geschlossenen Hohlräumen. Die Akustik formuliert unter anderem die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen der Schall bei seiner Ausbreitung gehorcht. Andererseits behandelt die Akustik auch viele weitere Teilbereiche bei der Analyse und Beschreibung des Phänomens Schall. ¹

Schall begleitet uns in unserem täglichen Leben auf Schritt und Tritt. Beginnend mit dem morgendlichen Signal des Weckers begleitet uns der Schall sowohl über unseren täglichen Alltag als auch während der nächtlichen Ruhe. Gespräche mit anderen Menschen, das Hören von Rundfunksendungen oder auf Medien gespeicherter Musik, das Fernsehen, die Benutzung unseres PKWs oder öffentlicher Verkehrsmittel oder die Arbeit mit Geräten und Maschinen sind praxisnahe und den meisten Menschen vertraute Beispiele für die Konfrontation mit Schall. Doch Schall entsteht nicht nur durch von Menschenhand erzeugten "Schallquellen" (siehe Kapitel I.2): auch beispielsweise in der Natur kommen wir mit Schall in Berührung. Neben dem Zwitschern von Vögeln oder den akustischen Signalen anderer Tierarten hören wir beispielsweise das Rauschen des Windes in Bäumen oder das Geräusch der Brandung an der Meeresküste. ²

Eine völlige Stille kommt in unserem Alltag selten vor und wird, falls doch, eher als störend oder sogar als unangenehm empfunden. Da unser Gehirn für unser Empfinden unwichtige akustische Signale bereits herausfiltert, hat sich der Begriff Stille im Sprachgebrauch auch für Situationen mit dem Vorhandensein von ausschließlich – für unser Empfinden – nebensächlichen Geräuschen etabliert.

Auch Schall kann als störend empfunden und teilweise sogar als gesundheitsschädlich eingestuft werden. Hierbei kommt es primär nicht nur auf die Intensität, also die Lautstärke des Schalls an, sondern auf unsere bewusste

¹ Vgl. Kutruff S. 4ff.

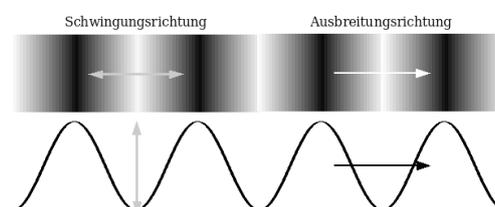
² vgl. Kutruff S. 1-4

Wahrnehmung. Während wir die meisten akustischen Signale in unserem Alltag nur unterbewusst wahrnehmen und die für uns wichtigen Schallsignale nach Wichtigkeit filtern, können besonders ungewohnte Geräusche – wie zum Beispiel das stete Tropfen eines Wasserhahns oder das gleichmäßige oder ungleichmäßige Schlagen eines Hammers auf einen Untergrund – zu Schädigungen des vegetativen Nervensystems führen, die sich in Schlafstörungen, Nervosität oder erhöhtem Blutdruck äußern können. Eine zu hohe Intensität von Schall, beispielsweise durch sehr laute Musik oder Maschinen, kann zu einer direkten Schädigung des Ohres bis hin zur völligen Taubheit führen.³

Der Schall, seine Quellen, seine Rezeption sowie die Akustik als Lehre vom Schall sollen im Folgenden aus physikalischer und physiologischer Sicht näher betrachtet werden.

1. Physikalische, physiologische und psychologische Akustik

Physikalische Akustik als Lehre vom Schall beschreibt dessen Entstehung und Ausbreitung.⁴ Schall ist eine mechanische Auslenkung der Luftmoleküle, welche zeitlich wiederkehrend angeregt werden. Diese Anregungen des Luftraums bezeichnet man als Schallwellen. Im Vakuum breitet sich Schall nicht aus.⁵ Diese longitudinalen Schallwellen breiten sich in einer – wie sonst bei Transversalwellen üblichen Darstellung – sinusförmig darstellbaren Bewegung von der Schallquelle aus und erreichen den Rezeptor.⁶



Die angeregten Wellen breiten sich periodisch aus. Die Periode bezeichnet die Zeit in Sekunden zwischen zwei spezifischen gleichen Punkten der Welle, also

³ vgl. Kuttruff S. 1-6

⁴ vgl. Kuttruff S. 4

⁵ vgl. Taylor S. 4

⁶ vgl. Eska S. 13-18

beispielsweise zwei aufeinanderfolgenden Wellentäler oder -berge. Der Kehrwert der Periode, und somit die Anzahl der Perioden pro Sekunde, bezeichnet die Frequenz in Hertz ($1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$). Die Frequenz ist (mit-) entscheidend für die so genannte Höhe und den Charakter des Tons oder Geräuschs, während die Amplitude, also der Abstand der Wellentäler und Wellenberge, die Lautstärke bestimmt.^{7,8}

Neben dem von uns wahrnehmbaren Bereich des Schalls (16Hz – 20kHz) existieren natürlich auch Schallfrequenzen, welche außerhalb des menschlichen Hörbereichs liegen, nämlich der unter unserem Hörvermögen gelegene Infraschall und der über unserer Hörgrenze liegende Ultraschall.⁹ Mit diesen Arten des Schalls werde ich mich im Rahmen dieser Arbeit aber nicht intensiver beschäftigen.

Die physiologische Akustik beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise des menschlichen Gehörs. Hier spielen der Aufbau des menschlichen Ohrs wie die Funktionsweise des Gehörs eine tragende Rolle. Über den verarbeitbaren Frequenzbereich und die Empfindlichkeit des Gehörs kann die Definition der Lautstärke erfolgen und die Analyse der Unterschiedsschwellen, d.h. wie viel Töne gleichzeitig verarbeitet und gefiltert werden können, betrieben werden, sowie die Untersuchung von akustischen Effekten wie beispielsweise der Verdeckung von Schallereignissen oder das Bestimmen der Richtung der Schallquelle, das so genannte „zweiohrige Hören“^{10, 11}

Die psychologische Akustik beschäftigt sich mit der Frage, wie der Mensch akustische Reize wahrnimmt.¹² Dies spielt besonders in den Kapiteln IV.1 bis IV.5 (*Frequenzverhältnisse in der musikalischen Praxis*) eine tragende Rolle.

Beispiel für die subjektive Wahrnehmung von akustischen Reizen aus dem Alltag ist zum Beispiel das Signal eines Krankenwagens, das unter normalen

⁷ vgl. Kuttruff S. 7ff.

⁸ vgl. Eska S. 15-21

⁹ vgl. Eska S. 14

¹⁰ vgl. Meyer S. 216

¹¹ vgl. Meyer S. 201-220

¹² vgl. Meyer S. 200

Umständen von uns als Lärm empfunden wird; für einen auf den Krankenwagen Wartenden kann es als sehr angenehm empfunden werden.¹³

Das enorme Potential für Fächer verbindenden Unterricht ist durch die oben stehenden Definitionen, Ausführungen und Verknüpfungen der physikalischen, physiologischen (z.B. Biologie) und psychologischen (z.B. Musik) Akustik bereits deutlich zu erkennen.

2. Schall – Schallquellen



© 1982 King Features Syndicate, Inc. All rights reserved.

Wie in vorstehendem Cartoon dargestellt ergibt sich eine grundlegende Frage: wann sprechen wir von Schall oder Akustik? Schall kann – auch nach Definitionen verschiedener Lexika – sowohl die Schallerzeugung mit Schallausbreitung als auch die Hör-Wahrnehmung meinen.¹⁴ Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich von erzeugtem und wahrgenommenem Schall die Rede sein.

Als Schallquelle bezeichnet man ein Medium, welches die Luftmoleküle mechanisch auslenkt (vgl. Kapitel I.1). Schallquellen können neben Lebewesen (z.B. Sprache) beispielsweise auch Maschinen oder Naturereignisse sein.¹⁵

Am Beispiel eines Flügels wird deutlich, dass eine Schallquelle aus drei Komponenten besteht: das primär schwingende System (Saiten), das gezwungen schwingende System (Luftraum zwischen Saiten und Resonanzboden) und das die Luft zum Mitschwingen anregende System

¹³ vgl. Taylor S. 8

¹⁴ vgl. Hall S. 17

¹⁵ vgl. Kuttruff S. 1-4

(Resonanzboden). Die Saite des Flügels wird durch einen Mechanismus, in diesem Fall ein Hammer, zum Schwingen gebracht. Die Frequenz ist über die Stimmung der Saite festgelegt (vgl. Kapitel IV.4). Die Luftmoleküle in der Umgebung der Saite werden nun gezwungen, im Takt der Saite mitzuschwingen. Als Quelle für hörbaren Schall reicht dies aber aufgrund der zu geringen Kopplung an die Luft nicht aus. Das mitschwingende System des Instruments ist so konzipiert, dass durch so genannte Resonanzfrequenzen (vgl. Kapitel II.5) eine Verstärkung stattfindet. Der angeregte Resonanzboden des Flügels regt die Luftmoleküle im Raum an und transportiert die Schallwellen in die Umgebung. Die Schallquelle ist hier somit letztendlich der Instrumentenkörper.¹⁶

Dieses Modell für die künstliche Schallquelle Musikinstrument lässt sich problemlos auf viele der künstlichen und die meisten der natürlichen Schallquellen übertragen.¹⁷

3. Rezeption: das Gehör

Hören kann als Verarbeitungsprozess unseres Ohres von Schallwellen bezeichnet werden – die Schallwellen lösen in unserem Ohr Signale aus, welche über Nervenfasern zum Gehirn geleitet werden.¹⁸

Das menschliche Ohr ist grundsätzlich in drei Bereiche unterteilt, das sichtbare *Außenohr* ist verbunden mit dem *Mittelohr*, in welchem das Trommelfell sitzt; vom *Innenohr* werden die Signale an das zentrale Nervensystem weitergegeben (vgl. Anlage 1).¹⁹ Das Außenohr besteht aus der Ohrmuschel und dem Gehörgang und endet am Trommelfell. Es bewirkt einen Trichtereffekt für ankommende Schallwellen in Richtung des Trommelfelles. Dieser empfindliche Teil des Ohres (das Trommelfell) wird durch die Verlängerung durch den Gehörgang ins Körperinnere verlagert und somit geschützt. Als Mittelohr bezeichnet man die geschlossene Kammer hinter dem Trommelfell.

¹⁶ vgl. Eska S. 23ff.

¹⁷ vgl. Hall S. 55f.

¹⁸ vgl. Pierce S. 87

¹⁹ vgl. Eska S. 93ff.

Das Mittelohr ist über die Eustachische Röhre mit dem Mundraum verbunden – so kann auf beiden Seiten des Trommelfelles der gleiche Luftdruck erzeugt werden und eine teilweise Reduzierung des Hörvermögens vermieden werden, welche entstehen würde, wenn das Trommelfell aufgrund unterschiedlicher Luftdrücke nicht mehr frei schwingen könnte. Die drei Gelenkknochen Hammer, Amboss und Steigbügel wirken als Hebelsystem, um die mechanischen Schwingungen des Trommelfelles auf das Innenohr umzusetzen. Das Innenohr mit der mit Flüssigkeit gefüllten Hörschnecke ist sowohl für den Gleichgewichtssinn als auch für die Übertragung der Schallimpulse auf das zentrale Nervensystem verantwortlich.²⁰

Die mit unzähligen Sinneszellen besetzte, so genannte Basilarmembran ist das eigentliche Empfangsorgan des Schalls. Die über die Gelenkknochen übertragenen Bewegungen des Trommelfells werden von der Membran des ovalen Fensters an die Hörschnecke übertragen, was eine Schallwelle anregt, welche die Basilarmembran auslenkt und worauf dann die Sinneszellen ansprechen.²¹

Die Signale werden – bevor sie das Gehirn erreichen – mehrfach gemischt und vor-verarbeitet, bevor sie schließlich in der primären Hörrinde bewusst interpretiert und verarbeitet werden.²²

²⁰ vgl. Hall S. 106-109

²¹ vgl. Meyer S. 201-203

²² vgl. Hall S. 108f.

II. Grundfrequenzen und harmonische Oberschwingungen

Im Folgenden werden verschiedene Aspekte des physikalischen Teilgebietes Akustik herausgegriffen und näher betrachtet. Dies geschieht bereits vor dem Hintergrund der Herausarbeitung von Ansätzen für einen fächerübergreifenden oder Fächer verbindenden Unterricht der Schulfächer Physik und Musik. Zunächst werden die Begriffe Ton, Klang und Geräusch betrachtet – sowohl im physikalischen als auch im musikalischen Sinne der Definition. Neben der bewusst erzeugten Grundfrequenz der Schallquelle entstehen oftmals – wie beispielsweise bei Musikinstrumenten – weitere Schwingungen mit verschiedensten Frequenzen. Dies können sowohl Ober- als auch Unterschwingungen sein, dass heißt mit niederer oder höherer Frequenz als die bewusst erzeugte Frequenz. Hier werden im Speziellen die so genannten Harmonischen Oberschwingungen näher betrachtet. Darüber hinaus spielt hier das Phänomen der Resonanz eine wichtige Rolle. In Kapitel IV. wird dann der Transfer der Grundfrequenzen und Harmonischen Oberschwingungen zur Musik und deren Bedeutung in der Musikwissenschaft und der musikalischen Praxis herbeigeführt. Des Weiteren wird die Entstehung und Wahrnehmung verschiedener musikalischer Klänge und Klangfarben dargestellt und es werden diverse Musikinstrumente als Schallquelle betrachtet. Die dargestellte Analyse von Klängen nach der Methode von Fournier soll es ermöglichen, Klänge detaillierter zu betrachten und zu bewerten. Begleitend soll die Thematik der Oberschwingungen anhand einiger Beispiele aus der Praxis und dem Alltag sozusagen für den Leser „visualisiert“ werden.

1. Ton, Klang und Geräusch

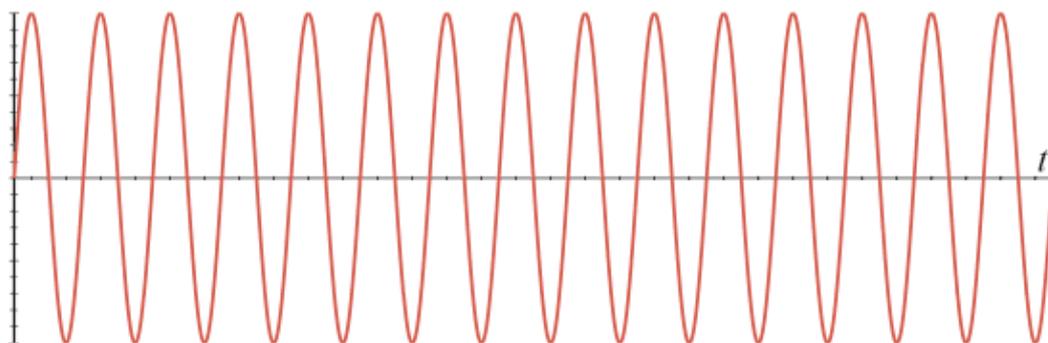
Ähnlich wie im Kapitel I. der Begriff Schall, sind auch die Begriffe Ton, Klang und Geräusch – besonders im allgemeinen Sprachgebrauch – nicht eindeutig voneinander getrennt und werden oft (fachwissenschaftlich) falsch benutzt. Doch auch fachwissenschaftlich kann der Begriff je nach Fachdisziplin unterschiedliche Bedeutungen haben. Man unterscheidet deshalb den

physikalischen Ton, den musikalischen Ton, das Geräusch, den physikalischen Klang sowie den musikalischen Klang (vgl. Anlage 2).²³

1.1 Der physikalische Ton

Der physikalische Ton oder reine Ton kommt im Alltag nicht vor und ist nur näherungsweise elektronisch zu erzeugen – eine Erzeugung mit einem Musikinstrument ist nicht möglich.²⁴ Beispiel für einen näherungsweise reinen Ton ist jener während des früher in der programmfreien Zeit gesendeten Testbilds im Fernsehen übertragene. Die musikalische Tonhöhe des physikalischen Tons ist identifizierbar, er wird allgemein aber als unangenehm empfunden. Der dem reinen Ton am nächsten kommende mit einem Musikinstrument erzeugbare Ton ist ein ohne Vibrato und konstant sowie ruhig gespielter Flötenton.

Das Oszillogramm eines reinen Tones zeigt eine Sinuskurve:



Die Frequenz des reinen Tones (zum Beispiel 440 Hz für den musikalischen Kammerton a¹) ist wissenschaftlich objektiv zu bestimmen. Das Empfinden der musikalische Tonhöhe (welche sich bekanntermaßen genau über diese Frequenz definiert) jedoch ist eine subjektive Wahrnehmung und eher aus psychologisch-akustischer Sicht zu betrachten (siehe Kapitel II.5).²⁵

²³ vgl. Kuttruff S. 201-203

²⁴ vgl. Michels S. 16-17

²⁵ vgl. Taylor S. 13f.

1.2 Der physikalische Klang – der musikalische Ton

In der Musik hat der Begriff Ton viele und teilweise sehr unterschiedliche Bedeutungen. Einerseits bezeichnet er als Symbol ein Element in einer Tonstruktur, der in einem Intervallverhältnis zu anderen Elementen steht. Der griechische Musiktheoretiker Aristoxenos von Tarent bezeichnete als Ton ein spezielles Intervall welches heute meist als Ganzton bezeichnet wird und in Zeiten vor der Dur-Moll-Tonalität war 'Ton' (oder Kirchenton) die Bezeichnung für einen Modus.²⁶

Umgangssprachlich wird der Begriff Ton auch als Synonym für die Klangqualität eines Musikinstruments oder die Brillanz eines Musikwiedergabegerätes verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff des musikalischen Tons für den so genannten natürlichen Ton verwendet.

Der natürliche (oder eben musikalische) Ton wird physikalisch als Klang bezeichnet. Es handelt sich bei einem musikalischen Ton um ein komplexes Schallkonstrukt, welches aus der Grundschwingung (also dem bewusst erzeugten Grundton) und vielen gleichzeitig mitschwingenden so genannten Obertönen mit unterschiedlichen Frequenzen besteht. Der angespielte bzw. erzeugte (und zu Beginn deutlich am lautesten klingende) Grundton bestimmt die Tonhöhenempfindung beim Hörer.^{27,28}

Man kann also festhalten: "{...} der musikalische Ton setzt sich aus mehreren physikalischen Tönen zusammen"²⁹.

1.3 Das physikalische Geräusch

Wenn das Frequenzspektrum eines Schalls aus aperiodischen Schwingungen besteht und die Teiltöne des daraus entstehenden (physikalischen) Klanges nicht harmonisch – das heißt in einem speziellen Verhältnis zueinander stehend

²⁶ vgl. Michels S 16f., 20f.,86f.,87,84ff.,175

²⁷ vgl. Kutruff S. 20ff.

²⁸ vgl. Eska S. 53ff.

²⁹ vgl. Eska, S. 53

– sind, spricht man von einem (physikalischen) Geräusch.³⁰

Im Gegensatz zu Tönen und Klängen, welche analysierbar und teilweise vorhersagbar sind (vgl. Kapitel II.6), kann man Geräusche lediglich durch Mittelwerte wie beispielsweise ihr Leistungsspektrum darstellen.³¹

Beispiele für Geräusche sind die akustische Kulisse im Straßenverkehr, das akustische Signal bei Maschinen oder das Rauschen des Windes. Beim Spielen von Musikinstrumenten erzeugt man oftmals neben den Tönen und Klängen auch Geräusche – beispielsweise beim Streichen des Bogens über die Saiten der Geige. Auch die Luftgeräusche beim Spielen eines Blasinstruments sind physikalisch betrachtet Geräusche.³²

1.4 Der musikalische Klang

Während der physikalische Klang den Grundton und seine Oberschwingungen bezeichnet, versteht man musikwissenschaftlich unter einem Klang das Zusammenspiel mehrerer (Grund-)Töne sowie weiterer Schwingungen wie beispielsweise jene von Geräuschen. Ein Klang kann einerseits das willkürliche Zusammenklingen mehrerer (musikalischer) Töne sein, andererseits das bewusste Anspielen von Intervallen oder Akkorden (Mehrklängen). Auch das Zusammenspiel zweier oder mehrerer Instrumente wird als Klang bezeichnet – auch beim Spiel von gleichen Grundtönen, da sich diese im Zusammenspiel verschiedener Instrumente durch die Unterschiede im Erklingen der Obertöne und Geräusche unterscheiden (vgl. Kapitel II.4 und II.5).^{33,34}

Ein musikalischer Klang kann also als Mischform von mehreren musikalischen Tönen sowie zusätzlichen Geräuschen, und somit als Mischform zwischen periodischen und aperiodischen Schwingungen, bezeichnet werden.³⁵

Umgangssprachlich wird der Begriff Klang auch für Aussagen über das Qualitätsmerkmal von vorgetragener Musik oder den Indikator für die Brillanz

³⁰ vgl. Michels S. 16f.

³¹ vgl. Kuttruff S. 202

³² vgl. Kuttruff S. 201f.

³³ vgl. Michels S. 16f.

³⁴ vgl. Eska S. 56f.

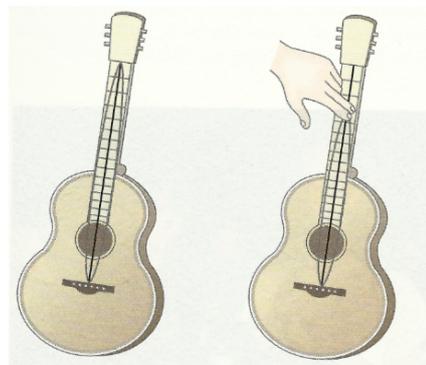
³⁵ vgl. Kuttruff S. 202

von Wiedergabegeräten verwendet. Dies könnte meiner Meinung nach darin begründet sein, dass sowohl im Italienischen als Musiksprache (tono, voce) als auch im Englischen als Weltsprache (sound) das gleiche Wort sowohl Klang als auch Klangfarbe bedeuten kann und der deutsche Begriff Klangfarbe im umgangssprachlichen Gebrauch mit dem Begriff Klang verschmolzen ist.

2. Grundfrequenz

Die Quelle jeglichen Schalls ist ein schwingender Körper. Da nahezu jeder Körper schwingen kann, kann somit fast jeder Körper eine Schallquelle sein. Bei Musikinstrumenten wird die Schallquelle – also das Musikinstrument (vgl. Kapitel I.2) – durch Schlagen, Zupfen, Streichen oder Blasen in Schwingung versetzt. Bei Saiteninstrumenten, wie beispielsweise dem Klavier, der Harfe oder Gitarre sowie bei Streichinstrumenten wie der Geige wird die Saite durch Zupfen oder Streichen in Schwingung versetzt. Bei Blasinstrumenten und Orgeln werden die Schwingungen stehender Wellen in einer Luftsäule zur Tonerzeugung verwendet. Zur Unterstützung für die Schwingungserzeugung dient ein Rohrblatt, ein Mundstück oder die vibrierende Lippe des Spielenden. Der Unterschied zwischen den Luftsäulen und der Tonerzeugung in offenen und geschlossenen Rohren bei Blasinstrumenten und Orgeln soll in folgendem Abschnitt (Kapitel II.3: Harmonische Oberschwingung) ausführlich dargestellt werden.

Die erzeugten so genannten stehenden Wellen versetzen die Quelle bei ihren Resonanzfrequenzen (vgl. Kapitel II.3) in Schwingung, das bedeutet, die Eigenfrequenz der Quelle wird durch Energiezufuhr angeregt und das akustische Signal verstärkt. Die Schallwellen breiten sich in der Luft mit der gleichen Frequenz wie die der Schallquelle aus. Diese Grundfrequenz bestimmt die Tonhöhe eines reinen Tones. Je kleiner die Frequenz der Wellen ist, desto tiefer ist der erzeugte Ton. Je höher die Frequenzen der Wellen sind, desto höher ist der erzeugte Ton. Am Beispiel der Gitarre lässt sich



dies am deutlichsten sehen: wird eine angespielte Saite an einem Bund mit dem Finger abgegriffen, so ist die Wellenlänge der Saite kürzer als die einer angespielten Leersaite (also ohne Abgriff). Durch die kürzere Wellenlänge ergibt sich eine höhere Frequenz: es erklingt ein höherer Ton. Bei beispielsweise der Gitarre, der Geige oder verschiedenen Blasinstrumenten wird die Tonhöhe durch Abgreifen der Saite oder mechanische Veränderung der Luftsäule bestimmt. Bei einem Klavier oder einer Harfe haben die Saiten bereits eine bestimmte Länge und sind somit bereits auf jeweils einen Ton, das heißt eine bestimmte Grundfrequenz, „gestimmt“. ³⁶

Die Basis bzw. Grundfrequenz dieses erzeugten – und von uns primär gehörten – Tons ist die so genannte Grundschwingung oder Erste Harmonische. Sie ist bestimmt durch die niedrigste Resonanzfrequenz der Schallquelle und sie ist für unser Hörempfinden grundsätzlich der entscheidende Faktor zur Bestimmung der Tonhöhe. Die Grundschwingung lässt sich – analog einer Gitarrensaite – folgendermaßen darstellen:



Die Frequenzen bzw. die Grundfrequenzen der wohltemperierten (vgl. Kapitel IV.4) chromatischen Tonleiter von c bis b reichen von 262 Hz (c) bis 494 Hz (b). Der so genannte Kammerton a, der über die handelsüblichen Stimmgabeln erzeugt wird, hat eine Frequenz von 440 Hz (vgl. auch Anlage 3). ^{37,38}

C	262 Hz	C#/Db	277 Hz
D	294 Hz	D#/Eb	311 Hz
E	330 Hz	F	349 Hz
F#/Gb	370 Hz	G	392 Hz
G#/Ab	415 Hz	A	440 Hz
A#/Bb	466 Hz	B	494 Hz

Verschiedene Musikinstrumente erzeugen einerseits auf unterschiedliche Art den von uns wahrgenommenen Schall (vgl. Kapitel II.5), andererseits sind sie auch zur Erzeugung sehr unterschiedlicher Bandbreiten von Schallfrequenzen in der Lage. Die Grundfrequenzen – und somit die für uns empfundene musikalische Tonhöhen – welche ein Klavier erzeugen kann bzw. erzeugt, liegen zwischen rund 27 Hz beim für uns am tiefsten empfundenen Ton und bei ca.

³⁶ vgl. Giancoli S. 568-574

³⁷ vgl. von Helmholtz S. 13ff.

³⁸ vgl. Giancoli S. 586f.

4.186 Hz beim für uns am höchsten empfundenen Ton. Dieses Tonspektrum, welches musikalisch in (etwas mehr als) sieben Oktaven dargestellt werden kann, wird allgemein als der Tonumfang mit „klarer musikalischer Tonhöhe“³⁹ bezeichnet. Das bedeutet, dass mit einer Frequenz tiefer als 27 Hz und höher als 4.186 Hz erzeugter Schall von uns nicht mehr klar als Ton in der musikalischen Wahrnehmung erkannt und differenziert werden kann. Die – dem Klavier nach dem Aufbau relativ ähnliche - Harfe erreicht nahezu die gleiche Bandbreite von Frequenzen, nämlich zwischen ca. 23 bis 3.200 Hz.

Alle anderen – die Töne nicht elektronisch erzeugenden – Musikinstrumente haben deutlich geringere Bandbreiten als das Klavier (bzw. der Flügel) und die Harfe. Sie können insgesamt zwar nahezu die komplette Bandbreite des Klaviers abdecken, jedoch nur ergänzend miteinander. Die menschliche Stimme kann etwa die Hälfte des Frequenzspektrums des Klaviers darstellen, nämlich Töne mit einer Grundfrequenz zwischen etwa 70 Hz bei der Bassstimme und knapp 1.000 Hz bei der Sopranstimme.⁴⁰

In Anlage 4 sind die Frequenzspektren und die den erzeugten Grundfrequenzen zugeordneten musikalischen Tonhöhen verschiedener gängiger Orchester- und sonstiger Instrumente sowie die der menschlichen Stimme übersichtlich und vergleichbar dargestellt.

3. Harmonische Oberschwingung

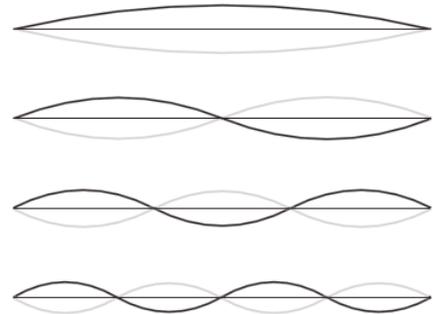
Nicht nur bei Musikinstrumenten, sondern bei jedem schwingungsfähigen Körper, tritt Resonanz auf, wenn der Körper, also das schwingungsfähige System, durch Energiezufuhr angeregt wird. Neben bekannten Beispielen von Resonanz aus dem Alltag, wie beispielsweise so genannte Resonanzkatastrophen (z.B. schwingenden Brücken), spielt sie auch bei Musikinstrumenten und der Erzeugung von Klängen eine tragende Rolle. Nach der Erzeugung der akustischen Schwingung verstärkt der Resonanzkörper des

³⁹ vgl. Pierce S. 19

⁴⁰ vgl. Pierce S. 17ff.

Instruments die Schwingung und überträgt sie auf die Luftmoleküle (vgl. Kapitel I.).^{41,42}

Mit einem Musikinstrument wird eine bestimmte gewünschte Grundschiwingung erzeugt (zur detaillierten Erklärung vgl. Kapitel II.4), welche einen für uns definierbaren musikalischen Ton produziert. Diese Grundschiwingung nennt man Erste Harmonische. Neben dieser Grundschiwingung – beispielsweise 440 Hz für den Kammerton a^1 – schwingen noch weitere, teilweise deutlich hörbare Frequenzen, die so genannten Oberschiwingungen. Hierbei handelt es sich um ein natürliches Schwingungsphänomen, welches ein universelles Verhalten der Natur ist und nicht nur bei Schall, sondern bei jeglicher Art von Schwingung auftritt. Bei den zusätzlich schwingenden (schnelleren) Frequenzen handelt es sich um ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Erklängt ein Ton mit einer Frequenz von 440 Hz, so haben seine Oberschiwingungen Frequenzen von 880 Hz (x2), 1320 Hz (x3), 1760 Hz (x4), usw.. Am Beispiel einer Gitarrensaite lässt sich das Verhältnis der Schwingungen aufzeigen. Eine leer angeschlagene Saite führt die Grundschiwingung in der die Saite gestimmten Frequenz aus. Die erste Oberschiwingung, die so genannte Zweite Harmonische, hat die doppelte Frequenz der Grundschiwingung – dies entspricht der Schwingung der exakt halbiert abgegriffenen Saite. Die zweite Oberschiwingung oder Dritte Harmonische hat die dreifache Frequenz der leeren Saite und entspricht der Frequenz der gedrittelt abgegriffenen Saite. Die dritte Oberschiwingung oder vierte Harmonische hat die vierfache Frequenz und entspricht der Frequenz der geviertelt abgegriffenen Saite. Die Intensität, also Lautstärke der Obertöne, nimmt je höher die Frequenz wird grundsätzlich immer mehr ab.^{43,44}



⁴¹ vgl. Giancoli S. 561ff.

⁴² vgl. Pierce S. 35ff.

⁴³ vgl. Giancoli S. 568-570

⁴⁴ vgl. Hall S. 139ff.

Hier ist aber herauszustellen, dass die exemplarische Gitarrensaite nicht im eben beschriebenen wörtlichen Sinne mit all diesen Frequenzen schwingt beziehungsweise alle genannten Schwingungen wie beschrieben und in der Grafik dargestellt (Schwingung der ganzen Saite, Schwingung der halbierten Saite, Schwingung der gedrittelten Saite, etc.) ausführt, sondern die Schwingungen zusätzlich auf beliebigen Stellen der Saite entstehen.

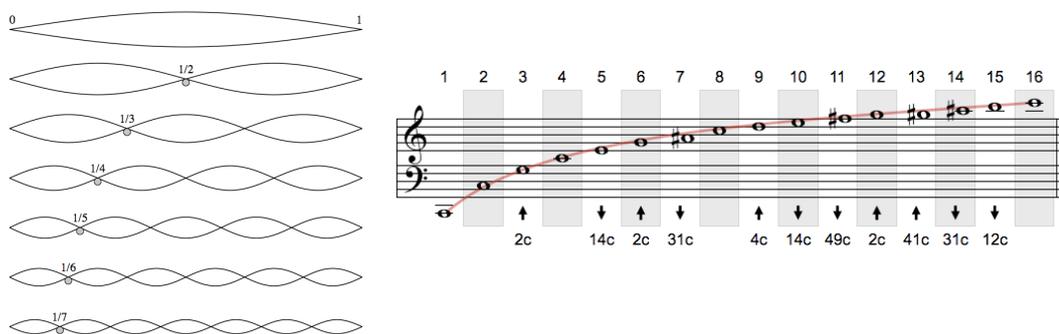
Die zusätzlich erzeugten Oberschwingungen werden durch den Resonanzkörper des Instrumentes (beim menschlichen Gesang ist der Körper als Instrument zu verstehen) verstärkt und auf die Luftmoleküle übertragen. Die Oberschwingungen werden von uns – unterbewusst und auch bewusst – wahrgenommen und tragen zur Klangfarbe (vgl. Kapitel II.5) des Instrumentes bei. Die verschiedenen Musikinstrumente unterscheiden sich teilweise sehr stark in der Erzeugung und Ausprägung der Oberschwingungen: je nach Bauweise, Funktionsweise und Resonanzfrequenzen des jeweiligen Instruments sind Oberschwingungen mehr oder weniger deutlich oder gar nicht zu hören. Während bei beispielweise einem Klavier sehr viele Oberschwingungen deutlich zu hören sind und bei manchen Blasinstrumenten sogar bewusst mit den Oberschwingungen gearbeitet wird, sind sie bei einer Holzflöte sehr schwach ausgeprägt – ein ohne Vibrato gespielter Ton einer Flöte ist – wie bereits dargestellt – eine Näherung an einen physikalisch reinen Sinuston. Die Überlagerung der Schwingungen, also der Grundschwingung oder Ersten Harmonischen mit seinen weiteren Harmonischen ergibt das Klangbild und die Klangfarbe des Instrumentes. Das Vorhandensein sowie die Ausgestaltung der Obertöne kann experimentell nachgewiesen und analysiert werden (vgl. Kapitel II.6).^{45,46,47}

Den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Frequenz kann man in diesem Zusammenhang sehr deutlich darstellen. Sowohl bei der Darstellung der Wellenknoten der Oberschwingungen mit ganzzahlig vielfachen Frequenzen als auch bei der musikalischen Notierung der daraus resultierenden Töne (teilweise genähert, ausführlich Erläuterungen in Kapitel IV.3) ist der logarithmische Zusammenhang deutlich zu erkennen:

⁴⁵ vgl. Giancoli S. 561ff.

⁴⁶ vgl. Roederer S. 15ff.

⁴⁷ vgl. Pierce S. 155-157



Es existieren auch unharmonische Oberschwingungen. Sie entsprechen nicht – wie die harmonischen Oberschwingungen – ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz und werden häufig – wie auch meistens die auftretenden Geräusche – als störend beziehungsweise musikalisch betrachtet als unharmonisch empfunden. Diese Schwingungen sowie ihr Entstehen sollen aber im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

4. Schallquellen: Beispiel Musikinstrumente

Nachdem nun schon einige Teilaspekte der Schallerzeugung von Musikinstrumenten betrachtet wurden, soll im Folgenden genauer analysiert werden, wie genau Saiten- Blas- und Percussionsinstrumente sowie die menschliche Stimme Töne und Klänge erzeugen.

Eine grundsätzliche Unterteilung erfolgt bei der Untersuchung musikalischer Schallquellen in die drei Instrumentengruppen Schlaginstrumente, Streich- bzw. Saiteninstrumente sowie Blasinstrumente. Unabhängig von dieser Klassifizierung nach den Mechanismen der Klangerzeugung ist die Energiezufuhr für alle Instrumentenklassen gleich bedeutend. Einen beispielsweise lange gehaltenen und lauten Ton zu erzeugen setzt eine dauerhafte, gleichmäßige und große Energiezufuhr voraus. Zur Erzeugung eines kurzen und leisen Tons ist dagegen eine kurze und gleichmäßige, aber geringe Energiezufuhr nötig.⁴⁸

⁴⁸ vgl. Hall S. 55-69

Bei **Schlaginstrumenten** erfolgt die Energiezufuhr durch Anschlagen eines Körpers mit einem anderen. Ein Geräusch oder ein Klang entsteht durch das Aneinanderschlagen zweier beliebiger Gegenstände. Beim Aufschlag berühren sich die beiden Körper an der Aufschlagstelle; jeder der Körper übt eine starke Kraft auf den anderen aus und verursacht dadurch eine gewisse Verformung an der Aufschlagstelle des anderen Körpers. Sobald die Kraft nicht mehr auf den Körper einwirkt und dieser elastisch ist, nimmt er wieder seine ursprüngliche Form an – das heißt die Verformung verschwindet wieder. Ein Teil der durch den Aufschlag entstandenen Deformation hat sich aber bereits auf die angrenzenden Moleküle des Körpers fortgesetzt, welche ursprünglich gar nicht von vom Schlag des auftreffenden Körpers betroffen waren, um die örtliche Spannung abzubauen.⁴⁹

Festes Material hat die Eigenschaft, eine Wellenstörung in sich selbst in alle Richtungen zu transportieren. Hierbei entstehen sowohl Transversal- als auch Longitudinalwellen. Die Oberfläche des Körpers wird zum Schwingen angeregt, also sie vibriert, was wiederum die angrenzende Luft in Schwingung versetzt und somit eine Schallwelle in der Luft erzeugt welche unser Ohr erreicht. Je größer die Oberfläche des schwingenden Körpers ist, desto lauter ist der durch Anregung erzeugte Klang. Auch die Intensität des Anschlages – und somit die Energiezufuhr – entscheidet maßgeblich über die Lautstärke des erzeugten Klanges. Die Dauer der Hörbarkeit eines erzeugten Klanges liegt hauptsächlich an der Beschaffenheit des Schlaginstrumentes. Während beispielsweise eine “frei schwebende“, also in der Hand gehaltene Stimmgabel nach der Anregung einen zwar immer leiser werdenden, aber sehr lange andauernden Klang erzeugt, ist das durch Anschlagen einer Schlagzeugtrommel erzeugte Geräusch nur sehr kurz wahrzunehmen. Bei der Schlagzeugtrommel breiten sich die durch Anregung erzeugten Wellen auch auf die weiteren Bestandteile wie beispielsweise den Holzrahmen und das Gestell aus – die zugeführte Energie ist somit sehr schnell verbraucht. Die Stimmgabel indes gibt die Schwingungen fast ausschließlich über ihre Oberfläche an die Luft weiter – die zugeführte Energie wird langsamer abgebaut. Eine an beispielsweise einen Holztisch gehaltene in

⁴⁹ vgl. Hall S. 56-57

Schwingung versetzte Stimmgabel würde analog der Schlagzeugtrommel ein sehr schnell verklingendes Geräusch erzeugen.^{50,51}

Die meisten Schlaginstrumente erzeugen (von einigen Ausnahmen abgesehen) keine Töne oder Klänge mit deutlich erkennbarer Tonhöhe, dies bedeutet konkret, dass man das erzeugte Geräusch nicht mit einem Referenzton eines anderen Instrumentes abgleichen kann. Dennoch werden die erzeugten Geräusche als musikalisch eher hoch oder eher tief empfunden. Die angeregten Körper und somit die dadurch angeregte umliegende Luft schwingen also mit entsprechender hoher oder geringer Frequenz. Diese Frequenz ist durch die Größe des Körpers bestimmt, aber auch durch die Beschaffenheit, also seine Härte, Masse und Trägheit. Der durch die Grundfrequenz des schwingenden Körpers festgelegte (Grund-)Ton steht zu den zusätzlich erzeugten Geräuschen (Geräusch/Klang des Schlagzeugstab/Schlegels, Rascheln von Bauteilen, etc.) in keinem harmonischen Verhältnis, die Frequenzen sind also keine ganzzahligen Vielfache des Grundtones: es entsteht keine deutlich erkennbare Tonhöhe.⁵²

Bei Streich- und Zupf- bzw. **Saiteninstrumenten** erfolgt die Energiezufuhr einerseits durch den Anschlag der Saite(n) durch die Hand oder ein mechanisches Bauteil wie einen Hammer oder andererseits durch das Streichen mit einem Bogen über die Saite(n). Da den Saiten beim Zupfen im Gegensatz zum Anschlagen eine andere Tonqualität abgewonnen werden kann, spricht man bei Instrumenten wie dem Klavier trotz dem Anschlagen der Saiten oder der Harfe und dem Cembalo nicht von Schlag-, sondern von Zupfinstrumenten. Sie werden grundsätzlich auch eher als Melodieinstrumente verwendet und seltener als Rhythmusinstrumente.

Da die Saiten der jeweiligen Instrumente meist sehr dünn sind, erhält man nur sehr unergiebig und klangschwache Geräusche bei der Energiezufuhr auf die Saiten. Wie schwach die dadurch resultierende Anregung der umliegenden Luftmoleküle ist wird deutlich wenn eine elektrische Gitarre im nicht verstärkten Zustand angespielt wird. Um einen lautereren Klang zu erzeugen müssen also deutlich mehr Luftmoleküle angeregt werden. Dies geschieht bei

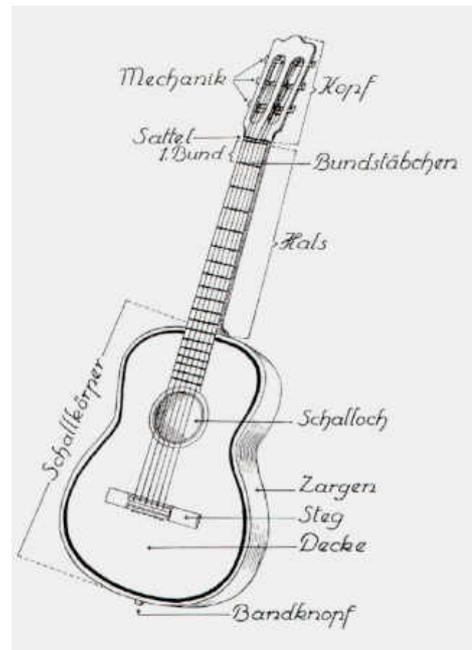
⁵⁰ vgl. Hall S. 56-60

⁵¹ vgl. Giancoli S. 567ff.

⁵² vgl. Hall S. 58-59

der Anregung einer deutlich größeren Fläche oder – wie bei elektrisch verstärkten Instrumenten – durch Abnahme und Verstärkung des akustischen Signals mittels eines elektrischen Verstärkers. Bei so genannten akustischen, also nicht elektrisch verstärkten Instrumenten übernimmt diese Funktion ein mechanischer Verstärker: das oder der sogenannte Klangbrett oder Schall- bzw. Resonanzkörper. Die angeregte Saite überträgt die Schwingung auf den Korpus des Instrumentes, jedoch mit deutlich kleinerer Amplitude. Durch die um ein Vielfaches größere Oberfläche des nun schwingenden Korpus klingt der Ton aber trotz kleinerer Amplitude um ein Vielfaches lauter als der Ton der angeregten Saite.

Die Tonhöhe der Saiten wird durch die Stimmung vor dem Spielen bestimmt. Während bei einem Klavier für jeden Ton eine gestimmte Saite vorhanden ist, welche durch Anschlag der Taste von einem Hammer angeregt wird, werden bei Instrumenten wie der Gitarre die Tonhöhen zu einem großen Teil vom Spielenden durch die während des Spielens in einem bestimmten Verhältnis geteilten und dann angeregten Saiten bestimmt. Bei Abgreifen der Saiten an einem bestimmten so genannten Bund auf dem Hals der Gitarre erklingt ein Ton, dessen Frequenz in einem bestimmten Verhältnis zur Grundfrequenz der



gestimmten Leersaite steht. Beispielsweise erklingt bei einer halbierten Saite (dies entspricht beispielsweise dem Abgreifen des 12. Bunds bei einer 4/4-Gitarre) die Oktave des Grundtones der Leersaite. Die Bünde der Gitarre sind so angelegt, dass beim Abgreifen und Anschlagen der Saite jeweils ein um einen musikalischen Halbtonschritt höherer Ton erklingt (vgl. auch Kapitel II.2).^{53,54,55}

⁵³ vgl. Hall S. 60-62

⁵⁴ vgl. Giancoli S. 568f.

⁵⁵ vgl. Dickreiter S. 78ff.

Bei Streichinstrumenten wie beispielsweise der Violine existieren diese Bünde nicht. Dies bedeutet einerseits eine höhere Flexibilität für den Spielenden, da er auch Töne außerhalb der bei uns etablierten aus 12 Halbtönen bestehenden Skala erzeugen kann, andererseits aber auch eine deutlich höhere Spielschwierigkeit, da die Positionierung der Finger beim Spielen viel genauer eingeübt werden muss.⁵⁶

Bei Streichinstrumenten kann im Gegensatz zu Zupfinstrumenten die Schwingung der Saite dauerhaft aufrecht erhalten werden. Der Bogen lenkt die Saite mehr und mehr zur Seite hin. Wenn die Bewegung des Bogens einsetzt, haftet die Saite an den klebrigen Haaren des Bogens, bis die aus der Saitenspannung stammende Widerstandskraft groß genug wird, um sie loszureißen. Sie federt dann so schnell zurück, dass der Bogen sie erst wieder am anderen Ende der Auslenkung fassen kann. Dieser Vorgang wiederholt sich dauerhaft und man erhält die gewünschte Saitenschwingung. Dies ist ein Beispiel für die dynamische Instabilität⁵⁷, eine Situation, in der wir ein perfektes Gleichgewicht haben können, in der aber jede kleinste Störung das System aus dem Gleichgewicht bringt und in einen schwingenden Zustand versetzt.^{58,59}

Auch bei Zupf- und Streichinstrumenten entstehen weitere Geräusche, beispielsweise durch das Geräusch des Bogens oder der Mechanik des Instrumentes; durch die klingende Grundfrequenz und ihre harmonischen Oberschwingungen ist aber eine deutlich erkennbare musikalische Tonhöhe vorhanden (vgl. Kapitel II.5.1 und II.5.2).

Bei **Blasinstrumenten** erfolgt die Energiezufuhr über einen kontinuierlichen Luftstrom. Dies kann einerseits über die Luftzufuhr des Spielenden selbst (aus seiner Lunge) über das Blasen in das Instrument oder in dessen Mundstück erfolgen, andererseits über ein mechanisches System wie einen Blasebalg bei beispielsweise einer Kirchenorgel (welche als komplizierte Kombination verschiedener Holzblasinstrumente bezeichnet werden kann).

⁵⁶ vgl. Hall S. 61-62

⁵⁷ vgl. Hall S. 217

⁵⁸ vgl. Dickreiter S. 52ff.

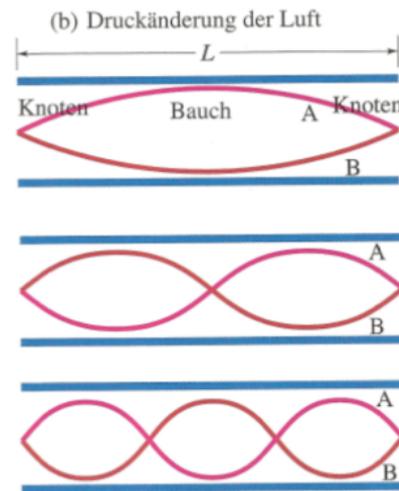
⁵⁹ vgl. Hall S. 213ff.

Auch eine Kombination aus beidem ist möglich, hier zeigt sich der Dudelsack als bekanntes Beispiel.

Man unterscheidet bei den Blasinstrumenten zwischen Holz- und Blechblasinstrumenten. Dies bezieht sich aber nicht auf die Beschaffenheit des Instrumentenkörpers, sondern auf die Tonerzeugung über das Mundstück. Bekanntestes Beispiel ist hier mit Sicherheit das Saxophon, welches trotz seines metallischen Äußeren als Holzblasinstrument klassifiziert wird, da die Töne über ein Holzblättchen (das so genannte Rohrblatt) am Mundstück erzeugt werden.⁶⁰ Bei Holzblasinstrumenten mit so genanntem Schneidetone (Flötenfamilie und Orgel) fließt ein dünner Luftstrom mit entsprechender Richtung und Geschwindigkeit beim Auftreffen auf eine scharfe und harte Kante nicht gleichmäßig um dieses Hindernis herum und weiter, sondern in rhythmischen Schwankungen abwechselnd in die eine oder die andere Richtung. Diese Störung erzeugt eine sich ausbreitende Schallwelle. Die Schallwelle mit bestimmter Tonhöhe wird in einem angrenzenden fast geschlossenen Luftreservoir mit geeigneter Größe und Form verändert und verstärkt und bekommt eine besser hörbare Tonhöhe verliehen. Während bei beispielsweise Orgelpfeifen der Ton – je nach Größe und Ausgestaltung der Pfeife – vorgegeben ist, kann man bei den Flöten durch Abgreifen der Öffnungen die effektive Länge des Rohres variieren und somit die Tonhöhe ändern. Bei den weiteren Instrumentengruppen der Holzbläserfamilie beruht die Klangerzeugung im röhrenförmigen Resonator auf dem Luftstrom durch eine enge Öffnung mit variabler Weite. Während bei den Holzblasinstrumenten das durch Druckänderungen variierbare Rohrblatt diese Öffnung mit variabler Weite darstellt wird sie bei Blechblasinstrumenten durch die Lippen des Bläusers selbst gebildet.

⁶⁰ vgl. Dickreiter S.94-96, 99f.

Die aufgebauten Schwingungen des Bläfers führen zu Turbulenzen, welche letztlich die Luftsäulenschwingungen im Inneren des Rohres hervorrufen. Wegen der von der Quelle – also beispielsweise dem Bläser – hervorgerufenen Störung schwingt die Luft im Inneren des Hohlraumes mit einer Vielzahl von Frequenzen; doch nur Frequenzen, welche mit stehenden Wellen korrespondieren, bleiben erhalten. Neben der stehenden Welle mit der niedrigsten Frequenz, hier entsteht der Grundton, korrespondiert die Schwingung auch mit den stehenden Wellen, welche um ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz höher sind, es entstehen – analog den Saiteninstrumenten – die harmonischen Obertöne. ^{61,62,63}



Die menschliche Stimme funktioniert in gewisser Weise (aber sehr vereinfacht dargestellt) ähnlich wie ein Blechblasinstrument. Die Stimmlippen vibrieren wie die Lippen beispielsweise eines Trompetenspielers, da sie aber nicht an eine so lange, dünne und hochwirksame Resonanzröhre angeschlossen sind, können sie alle möglichen Frequenzen erzeugen, praktisch wie ein Mundstück alleine. ⁶⁴

Auch beim Gesang ist es möglich, Obertöne zu erzeugen und diese sogar bewusst zu verstärken (vgl. Kapitel IV.3.1).

Grundsätzlich kann für alle Instrumentengruppen festgehalten werden, dass die Größe des Instruments mitentscheidend für die Tonhöhe ist. Je größer ein Instrument beziehungsweise dessen Körper oder je länger ein Resonanzrohr eines Instrumentes ist, desto tiefere Töne können mit diesem Instrument erzeugt werden. Analog erzeugen "kleinere" Instrumente eher höhere Töne. ⁶⁵

⁶¹ vgl. Hall S. 62-64

⁶² vgl. Giancoli S. 570ff.

⁶³ vgl. Dickreiter S. 94ff, 126ff.

⁶⁴ vgl. Hall S. 297ff.

⁶⁵ vgl. Hall S. 65-67

5. Musikalische Klänge und Klangfarben

Spielen zwei Musiker auf verschiedenen Instrumenten den gleichen Ton, also zum Beispiel das a^1 mit 440 Hz, so ist doch für nahezu jeden Hörer ein klanglicher Unterschied zwischen den beiden (gleichen) Tönen zu erkennen. Musikalisch gebildete Hörer haben meist kein Problem, das Instrument einwandfrei über dessen Klang zu erkennen, ein etwas geübter Zuhörer ist sogar in der Lage den gespielten Ton zu benennen. Warum dies so ist, soll im Folgenden genauer betrachtet werden. Analysiert wird hier die für die Charakteristik eines Instrumentes entscheidende so genannte "Klangfarbe" oder das "Timbre", welche unter anderem auch durch die Lautstärke des gespielten Instrumentes bestimmt wird, sowie das Phänomen der Wahrnehmung der Tonhöhe und die Erkennung des Grundtons.

5.1 Wahrnehmung von Tonhöhe und Grundtonerkennung

Die Frequenzskala der Töne unserer Tonskala wird nicht als Reihe gleichwertiger Qualitäten gehört, sondern von dem so genannten Oktavenphänomen durchkreuzt. So wird eine gewisse Eigenheit des Tones c^1 (in reiner Stimmung: 264 Hz) auch im Ton c^2 (in reiner Stimmung: 528 Hz) erkannt, gleiches gilt bei c^2 und c^3 , d^1 und d^2 , etc.. Diese gewisse Toneigenart bleibt trotz Höhenunterschied erhalten. Dieses Oktavenphänomen gilt als naturgegeben: der selbe Ton wird physiologisch von Frauen und Männern erzeugt und erklingt trotz seiner Gleichheit im Oktavabstand; die Oktave bildet den ersten Oberton über dem Grundton mit dem Frequenzverhältnis 2:1.⁶⁶

Während es einigen Menschen möglich ist – teilweise angeboren und teilweise erlernt – einen Ton exakt bestimmen zu können, ist es uns grundsätzlich allen möglich, die so genannte relative Tonhöhe bestimmen zu können, das heißt die Tonhöhe im Vergleich zu einem Referenzton. Unser Ohr ist auf die in 12 Halbtöne unterteilte Oktave unserer Notenskala geschult und kann die immer

⁶⁶ vgl. Michels S. 16f., S.21

wiederkehrenden Frequenzverhältnisse der einzelnen Töne zueinander beim Verarbeitungsprozess in Ohr sowie zentralem Nervensystem und Gehirn für eine relative Einordnung der Töne zueinander nutzen. Obwohl ein musikalischer Ton aus mehreren überlagerten Schwingungen besteht (Grundschiwingung, Oberschwingungen, Geräusche), ist es uns darüber hinaus möglich, den Grundton zu identifizieren.

Die akustischen Signale, welche unser Ohr erreichen, lösen komplexe Schwingungen an der Membran am ovalen Fenster aus, welche sich in der Schneckenflüssigkeit ausbreiten (vgl. Kapitel 1.3). Dies ist die Stufe des Verarbeitungsprozesses von akustischen Signalen, in welcher die Aufteilung in verschiedene Frequenzkomponenten stattfindet. Auf der Basilarmembran befindet sich der Resonanzbereich einer gegebenen Frequenzkomponente an einem Ort, welcher von deren Frequenz abhängt. Das bedeutet konkret, dass je nach Ton ein bestimmter Bereich der Basilarmembran angeregt wird. Bei einem komplexen Ton, welcher aus verschiedenen Teiltönen (Grundton, Partial- bzw. Obertöne) zusammengesetzt ist, werden verschiedene Resonanzbereiche hervorgerufen. Wegen der nahezu logarithmischen Verhältnisse zwischen der Frequenz des Grundtons und den Frequenzen der Obertöne ballen sich die Resonanzbereiche immer enger zusammen: somit kann der Grundton des akustischen Signals während des Verarbeitungsprozesses erkannt werden.⁶⁷

Eine treffende Analogie zur Grundtonerkennung ist die Erkennung eines Buchstabens: man erkennt und identifiziert einen bestimmten Buchstaben seines jeweiligen Schriftsystems unabhängig von dessen Lage, Größe, Farbe oder Type.⁶⁸

5.2 Klangfarbe

Für die Lautstärke und die musikalische Tonhöhe eines Tons oder Klangs gibt es also jeweils eine ganz plausible physikalische und physiologische Erklärung. Während sich die Höhe der Amplitude einer Welle für die Lautstärke eines Tons verantwortlich zeichnet, bestimmt die Frequenz des Grundtons – in Verbindung

⁶⁷ vgl. Roederer S. 21ff., S.147ff.

⁶⁸ vgl. Roederer S. 150

mit der uns möglichen physiologischen Rezeption – eines Klanges die musikalische Tonhöhe. Aber warum nehmen wir Klänge beziehungsweise Töne mit gleicher Frequenz doch unterschiedlich wahr? Warum können wir einen Sinuston mit 220 Hz deutlich von einem gesungenen Ton mit 220 Hz unterscheiden? Schaut man sich die Teiltonspektren dieser beiden 220 Hz-Töne an (vgl. Anlage 2), so kann man vermuten, dass diese individuelle so genannte Klangfarbe eines Tons mit den Frequenzspektren zusammenhängt.

Die Klangfarbe ist etwas relativ komplex. Grundsätzlich ist die Vermutung richtig, dass sie vom Frequenzspektrum des Tons abhängt, doch auch beim Hören von Musik über ein Taschenradio, welches eine sehr unzulängliche Wiedergabe bietet und den Klang aufgrund des Abschneidens eines großen Bereichs (besonders tiefer Frequenzen) deutlich verfremdet, gelingt es nicht nur geübten Musikern beim Hören verschiedenste Instrumente und die menschliche Stimme problemlos zu unterscheiden. Denn trotz der je nach Wiedergabegerät teilweise drastischen Verkleinerungen des wiedergegebenen Frequenzspektrums bleiben Charakteristika verschiedener Instrumente und Stimmen erhalten.

Auch die Rolle der Lautstärke muss hier genauer betrachtet werden, denn jeder weiß aus eigener Erfahrung, dass der selbe gesprochene oder gesungene Ton in ganz leise und extrem laut unterschiedliche Charakteristika aufweist und sich über einen Lautstärkeregler nicht eins zu eins in den gleichen Klang überführen lässt.^{69,70}

Eine vollständige Klärung dessen, was Klangfarbe ist, konnte bisher noch nicht erfolgen; durch die Analyse und Synthese von Klängen (vgl. Kapitel II.6) konnten aber sehr viele wertvolle Hinweise generiert werden. Die teilweise recht komplizierten Strukturen, die bei der Analyse von Schallwellen, bei der Wellenform und Frequenzspektrum bestimmt werden, sichtbar werden, tragen nur teilweise zum Klangeindruck beim Hörer bei. Ihren mit entscheidenden Beitrag leisten sie dennoch zur charakteristischen Klangfarbe: nahezu jedes Instrument hat eine individuelle Ausprägung an Anzahl und Intensität der mitklingenden Obertöne. Bereits im 19. Jahrhundert wurden Klänge analysiert

⁶⁹ vgl. Pierce S.155f.

⁷⁰ vgl. Eska S. 55ff.

und untersucht. Mit ausschließlich mechanischen Hilfsmitteln (bspw. Schwingungsmessung mit Violinensaiten und Stimmgabeln, Abgleich mit gestimmten Instrumenten) wurden Partialtöne aus einem Klang herausgefiltert und ihre Höhe festgelegt. Die relativen Intensitäten der Partialtöne zueinander konnten dann berechnet werden.⁷¹ Viele Erkenntnisse der damaligen Zeit haben bis heute Bestand, einige erwiesen sich jedoch als falsch, so zum Beispiel die Vermutungen, dass die Klangfarbe eines Tons ausschließlich von den Intensitäten der Partialtöne abhänge und die relativen Phasen der Partialtöne für das Ohr bedeutungslos seien.⁷²

Die Analyse von Klängen mittels computergestützter Hilfsmittel erlaubt es herauszufinden, welche Partialtöne und Geräusche für die Klangfarbe eines Instruments mitverantwortlich sind. Das Vorgehen ist hier aber nicht, nur die einzelnen Frequenzen herauszufiltern und ihre Intensität im Bezug auf den Gesamtklang zu untersuchen. Mittels eines Computers können die bereits analysierten Einzelfrequenzen eines Klanges als Sinustöne in verschiedensten Kombinationen übereinander gelegt werden. Mit dieser Vorgehensweise kann (zumindest teilweise) erkannt werden, welche Töne und Geräusche deutlichen Einfluss auf die Klangfarbe des Instruments haben und welche nicht.⁷³

Die Phasenänderungen eines Klanges spielen für die Klangfarbe – entgegen den Vermutungen von von Helmholtz im 19. Jahrhundert – aber ebenso eine entscheidende Rolle. In Versuchen wurde gezeigt, dass bei einem Klang, der sich aus zwei (Sinus-) Partialtönen mit dem Frequenzverhältnis 2:1 – was musikalisch gesehen dem Grundton und seiner Oktave entspricht – zusammensetzt, eine Art Schwebung entsteht. Man empfindet dies hier allerdings nicht als Änderung der Schallstärke wie üblicherweise beim Effekt der Schwebung durch zwei Töne mit minimal unterschiedlicher Frequenz. In diesem Fall nimmt man eine Änderung der Klangfarbe wahr. Auch bei Tönen, die im Verhältnis 2:3 (musikalisches Intervall: Quinte) und im Verhältnis 3:4 (musikalisches Intervall: Quarte) stehen, konnte dieser Effekt noch – wenn auch

⁷¹ vgl. von Helmholtz S. 60ff., S. 84ff., S.113ff.

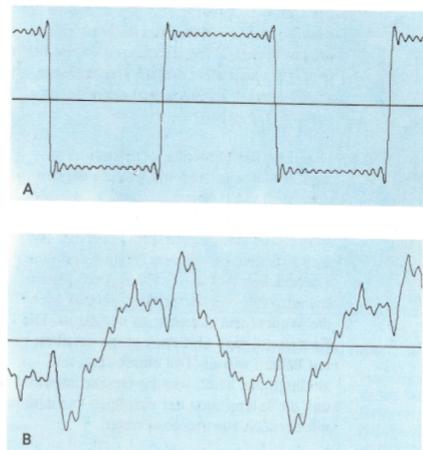
⁷² vgl. von Helmholtz S. 113ff., S.194ff.

⁷³ vgl. Pierce S. 155f.

deutlich schwächer – beobachtet werden. Besonders beim Klavier spielt die Phase eine tragende Rolle für die Klangfarbe. Bei den durch die Spannung sehr steifen Saiten eines Klaviers entsteht eine zusätzliche Kraft, welche besonders die höheren Partialtöne beeinflusst. Diese hohen Partialtöne lassen die Saite in sehr vielen kurzen Abständen schwingen. Durch die zusätzlich wirkende Kraft wachsen die Frequenzen entsprechend schneller, der fünfzehnte Oberton einer Klaviersaite kann bereits die sechzehnfache Frequenz des Grundtons haben. Die so genannte Brillanz eines guten Klaviers verschwindet, sobald die Partialtöne aus exakt harmonischen Frequenzen zusammengesetzt werden, deren Amplituden sich zeitlich genauso verändern wie im Originalklang. Diese synthetischen Klänge verlieren den für uns typischen “Klavierklang“ und wirken matt und uninteressant.⁷⁴ Diesen Effekt kann man teilweise bei preiswerten beziehungsweise qualitativ schlechten Keyboards oder Synthesizerprogrammen deutlich hören.

Der typische “Klavierklang“ entsteht also einerseits durch die angeregten und instrumententypisch verstärkten Oberschwingungen, andererseits durch die Verschiebung der Phasen der (nicht exakt harmonischen, aber den Frequenzverhältnissen der harmonischen Oberschwingungen doch nahezu exakt folgenden) höheren Partialtöne, deren Wellenform sich durch die nicht exakt harmonischen Oberschwingungen fortwährend ändert.

Man kann diesen Sachverhalt auch grafisch sehr plastisch nachvollziehen. Eine aus 12 Partialtönen bestehende Welle, bei der die Phasen der Partialtöne exakt übereinstimmen, stellt sich grafisch als angenäherte Rechteckwelle dar (Bild A). Eine völlig andere Form der Welle ergibt sich jedoch, wenn man 12 Partialtöne mit den gleichen Frequenzen und Amplituden zusammensetzt, deren Phasen willkürlich verschoben sind (Bild B). Trotz der jetzt

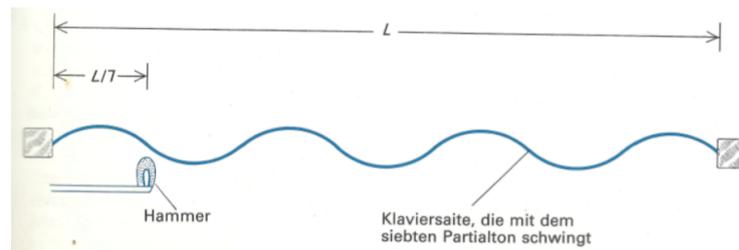


⁷⁴ vgl. Pierce S. 156f.

deutlichen Unterschiede in der Klangfarbe hört man den musikalisch exakt gleich hohen Ton.^{75,76}

Die Klangfarbe des Klaviers hängt aber auch davon ab, an welcher Stelle die Saite vom Hammer angeschlagen wird. Dies ist nämlich dafür entscheidend, welche Partialtöne tatsächlich angeregt werden. Beispielsweise ist der siebte Partialton, also der sechste Oberton über dem Grundton, im Verhältnis zum Grundton als musikalisches Intervall nicht genau zu erfassen. Seine Frequenz im Verhältnis zu der des Grundtones entspricht (mehrere Oktaven verschoben) in etwa dem Intervall einer kleinen Septe – aber sie ist etwas geringer als die Frequenz der kleinen Septe tatsächlich ist und klingt deshalb disharmonisch gegen den Gesamtklang. Somit wird dieser siebte Partialton – der im Gegensatz zu höheren ebenfalls disharmonisch empfundenen Partialtönen aber deutlich besser zu hören ist – als für den Gesamtklang störend empfunden. Bei den

meisten Klavieren schlägt der Hammer die Saite bei etwa einem Siebtel ihrer Länge



an. Der Hammer kann nur diejenigen Partialtöne wirkungsvoll anregen, die an der Anschlagsstelle mit der maximalen oder wenigstens mit einer großen Amplitude schwingen. Da der siebte Partialton an dieser Stelle der Saite aber einen Knoten hat – also eine minimale Amplitude –, wird er somit nicht beziehungsweise nur sehr schwach und nicht hörbar angeregt.^{77,78}

Im Vergleich zu einem Klavier klingt das der gleichen Instrumentenfamilie angehörende Cembalo härter und heller. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass die Saiten mit einem kleinen, spitzen Federkiel angerissen und nicht mit einem eher weichen Hammer angeschlagen werden. Hierdurch schwingen sehr viel mehr (höhere) harmonische Obertöne mit, welche dem Cembalo seinen charakteristischen Klang geben. Durch die vielen in jeweils

⁷⁵ vgl. Roederer S. 147-153

⁷⁶ vgl. Pierce S. 157

⁷⁷ vgl. Pierce S. 158-160

⁷⁸ vgl. Eska S. 55-70

einer Frequenzgruppe liegenden Obertöne empfinden wir den Klang als hart. Den gleichen Effekt erzielt man bei Erzeugung einer Rechteckwelle oder einer so genannten Sägezahnwelle, wie sie bei einer gestrichenen Violine entsteht. Hier verhindert aber der Korpus der Violine einen hart und grell klingenden Ton, da seine zahlreichen Resonanzen nur bestimmte Sinuskomponenten dieser Sägezahnwelle verstärken, während er andere unterdrückt. Grundsätzlich sind die Intensitäten der Obertöne bei jedem Instrument zu einem großen Teil mit den Resonanzfrequenzen verknüpft. Dadurch können dann eventuell auch Obertöne höherer Ordnung deutlicher ausgeprägt und besser hörbar sein als Obertöne niederer Ordnung. Als Beispiel: bei der Geige hat die 7. Harmonische eine größere Amplitude als die 5. Harmonische.

Bei einer Trompete wiederum schwankt die Intensität der Oberschwingungen sehr stark mit der Lautstärke des gespielten Grundtons. Je lauter ein Ton auf einer Trompete gespielt wird, desto mehr Energie wird prozentual gesehen an die höheren Partialtöne vergeben. Dieser – auch bei der menschlichen Stimme auftretende – Effekt lässt uns unabhängig von der Lautstärke der Wiedergabe erkennen, ob es sich um einen ursprünglich laut oder leise gespielten Ton der Trompete handelt. Die Klangfarbe ändert sich hier also mit der Lautstärke mit welcher das Instrument gespielt wird – analog der lautstärkebedingten Änderung der Klangfarbe unserer menschlichen Stimme. Jedes Instrument hat einen charakteristischen Klang und somit eine bestimmte Klangfarbe, wobei sich manche Instrumente in dieser ähneln, während andere deutliche Unterschiede in der Klangfarbe aufweisen (vgl. Anlage 6).

Diese Klangfarbe ist zu einem bedeutenden Teil von den Frequenzspektren und von Anzahl und Ausprägung der vorhandenen Partialtöne – und somit von den spezifischen Resonanzfrequenzen des Instruments – und der Höhe der dem Instrument zugeführten Energie sowie der Phasenverschiebung der Klänge bestimmt.^{79,80,81,82}

⁷⁹ vgl. Pierce S. 155-167

⁸⁰ vgl. Michels S. 16f., S. 21

⁸¹ vgl. Eska S. 55-70

⁸² vgl. Hall S. 124ff.

6. Analyse und Synthese von Klängen – Fourier

Es wurde bereits mehrfach auf die Analyse von Klängen sowie deren Zusammensetzung mit Hilfsmitteln wie beispielsweise Computern hingewiesen, wie auch auf das Vorhandensein verschiedener speziell benannter Wellenformen. Im Folgenden soll diese Thematik genauer betrachtet werden.

Die nach dem französischen Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) benannte Fourier-Transformation ist eine Integraltransformation, die einer gegebenen Funktion eine andere Funktion, die so genannte Fourier-Transformierte, zuweist. Die Fourier-Transformation umfasst verschiedene ähnliche Transformationen, die Funktionen in Frequenzkomponenten oder Elementarschwingungen zerlegen. Besonders die Berechnung zeitlicher Signale beispielsweise in der Akustik oder Elektrizitätslehre ist eines der Hauptanwendungsgebiete der Fourier-Transformation. Doch auch in weiteren Bereichen der Physik, wie zum Beispiel der Schwingungslehre, sowie der Mathematik oder der disziplinübergreifenden Systemtheorie wie auch in weiteren Wissenschaften werden die Fourier-Transformation und ihre Varianten angewendet.

Anwendungsbereiche in der Akustik sind die Fourier-Analyse, bei der akustische Signale in eine Summe von Sinusfunktionen und Kosinusfunktionen zerlegt werden, sowie die Fourier-Synthese, bei der Signale aus addierten Sinusfunktionen und Kosinusfunktionen erzeugt werden.^{83,84}

Die zentrale Bedeutung der harmonischen Schwingung beruht darauf, dass sich praktisch jeder Schwingungsvorgang in harmonische (also Sinus-) Schwingungen zerlegen lässt. Dies gilt nicht nur für periodische Schwingungen, sondern für beliebige Signale wie beispielsweise Einzelimpulse aber auch für gedämpfte Schwingungen. Eine beliebige periodische Funktion $f(t)$ wird dann über untenstehende Funktionsformel der **Fourier-Analyse** und ihre Zerlegung mit einem Additionstheorem in die Summe der Sinusfunktionen und

⁸³ vgl. Kuttruff S. 22ff.

⁸⁴ vgl. Giancoli S. 540f.

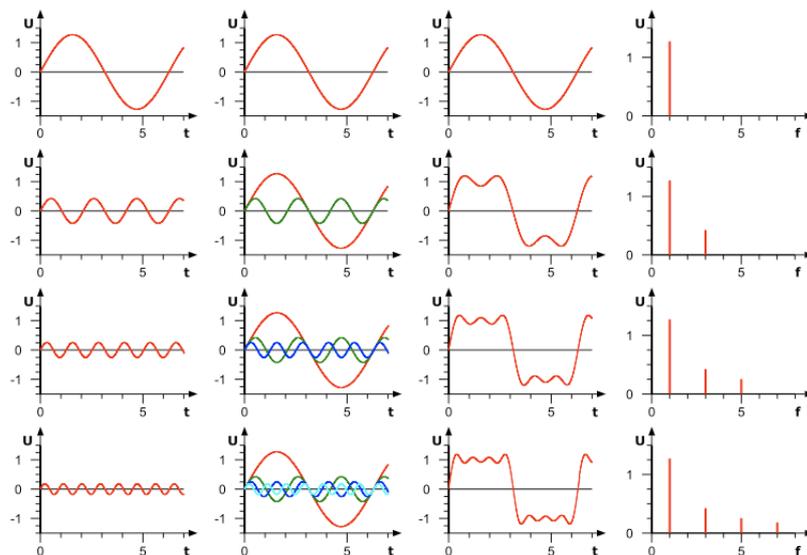
Kosinusfunktionen, in eine so genannte Fourier-Reihe, zerlegt. Der Koeffizient y_n beschreibt die Amplituden, der Koeffizient φ_n beschreibt die Phasen.

$$f(t) = \frac{y_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} y_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad \rightarrow \quad f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\omega t)$$

Entsprechend existieren für unperiodische Schwingungen und stationäre Geräusche jeweils Formeln zur Zerlegung des Signals in eine Fourier-Reihe. Die einfachste Art der Fourier-Analyse gestaltet sich bei Vorhandensein der Daten des Signals in Zahlenwerten. Ist weder dies gegeben, noch die zu untersuchende Zeitfunktion in Form eines mathematischen Ausdrucks, muss der Spektralgehalt des Signals experimentell ermittelt werden.⁸⁵

Bei der **Fourier-Synthese** werden Schwingungen addiert und der Einfluss dieser Addition auf das Gesamtsignal betrachtet. Sie ist ein Beispiel für die Möglichkeit der bereits näher beschriebenen Untersuchung, welche Oberschwingungen und Geräusche Einfluss auf die Klangfarbe eines Musikinstrumentes haben (vgl. Kapitel II.5.2).

Im Folgenden (sowie zusätzlich deutlich übersichtlicher in Anlage 7) wird als Beispiel einer Fourier-Synthese das jeweils hinzugefügte Signal in der ersten Spalte dargestellt:

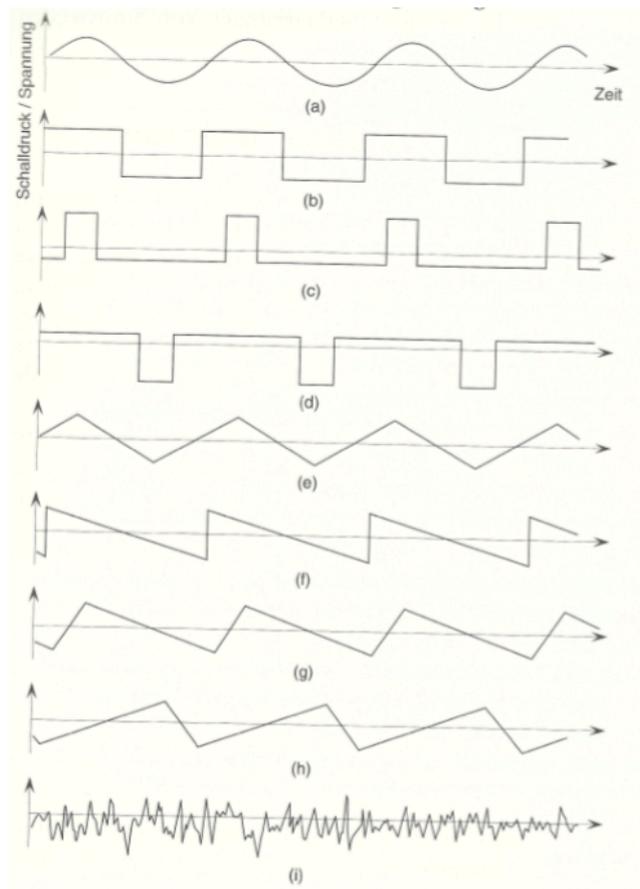


⁸⁵ vgl. Kuttruff S. 22-28

In der zweiten Spalte sind alle bisher zugefügten Signale getrennt zu betrachten. Die Addition sowie die durch diese entstandene Welle ist in der dritten Spalte dargestellt. In der vierten Spalte sind die auf die Grundschwingung normierten Amplitudenspektren der entstandenen Wellen dargestellt. Die in diesem Beispiel dargestellte Addition der Grundschwingung und drei weiteren Oberschwingungen ergeben eine so genannte Rechteckwelle. Der wahrgenommene Ton wird, wie bereits im Rahmen des Phänomens der Grundtonerkennung in Kapitel II.5.1 ausgeführt, von der tiefsten Frequenz – nämlich der Frequenz der ersten Welle – bestimmt.

Es existieren neben dieser dargestellten Rechteckwelle aber noch sehr viele weitere und teilweise auch sehr verschieden ausgeprägte Wellenformen. Mit einem Oszillator sind die nachfolgenden Wellenformen präzise erzeugbar. Die bekannteste Wellenform ist mit

Sicherheit die Sinuswelle (a). Sie entsteht am Oszillator, wenn die Elektronen in einem einfachen Schaltkreis in einer einfachen harmonischen Schwingung hin und her fließen. Die einfache Sinuswelle erzeugt einen physikalischen Ton (vgl. Kapitel II.1.1). Die Rechteckwelle (b) wurde bereits bei der Untersuchung der Klangfarbe (vgl. Kapitel II.5.2) dargestellt. Hier beschrieb sie die Welle die bei der synthetischen Herstellung eines Klavierklangs bestehend aus Grundton und



harmonischen Obertönen mit exakt gleichen Phasen entsteht. Sie wird im Oszillator durch einfaches Umschalten eines Schalters erzeugt, mit dem die positiven und negativen Anschlüsse an die Stromquelle vertauscht werden, in

Verbindung mit einer entsprechend schnellen Wiederholung der Umschaltung. Bei der Impulswelle (c, d) ist die Erzeugung identisch wie bei der Rechteckwelle, hier entscheidet die Impulsdauer, welchen Bruchteil der Schwingungsperiode die Spannung auf einem der beiden möglichen Werte steht. Bei der Dreieckwelle (e) und der Sägezahnwelle (f, g, h) steigt die Spannung eine Zeitlang gleichmäßig an, um dann plötzlich in eine gleichmäßige Abnahme umzuschlagen. Während sich Zunahme und Abnahme bei der Dreieckwelle vom Betrag gleichen, unterscheiden sie sich bei der Sägezahnwelle betragsbezogen mehr oder weniger deutlich. Die Sägezahnwelle wird beispielsweise beim Streichen des Bogens über die Saiten einer Violine erzeugt (vgl. Kapitel II.5.2). Beim im Oszillator erzeugten so genannten Zufallsrauschen (i) wiederholt sich im Gegensatz zu den bisher dargestellten Wellen niemals die gleiche Wellenform. Es wird nur deshalb als gleichmäßig bezeichnet, weil es von uns als gleichmäßiges Rauschen empfunden wird. Vergleichbar ist das Zufallsrauschen beispielsweise mit Naturgeräuschen von Wind und Wasser oder mit einer alltäglichen (vom Gehirn als nebensächlich eingestuft und nicht bewusst verarbeiteten) Geräuschkulisse. Auch die anderen zuvor dargestellten Wellenformen können teilweise in der Natur entstehen oder mechanisch – wie bei beispielsweise der Geige – erzeugt werden sowie durch Überlagerung verschiedener nicht elektronisch erzeugter Wellen entstehen, jedoch nicht mit der in der vorstehenden Grafik dargestellten Präzision einer im Oszillator erzeugten Welle. ^{86,87,88,89,90,91}

⁸⁶ vgl. Kuttruff S. 8-32

⁸⁷ vgl. Giancoli S. 525-546, S. 561-579

⁸⁸ vgl. Hall S. 146ff.

⁸⁹ vgl. Eska S.58f., S.68

⁹⁰ vgl. Pierce S. 36ff.

⁹¹ vgl. Taylor S. 71ff.

III. Didaktische und methodische Implementierung im Unterricht

Nachdem nun die Akustik als wissenschaftliche Teildisziplin der Physik sowie der Schall und die Rezeption akustischer Signale in Kapitel I. dargestellt wurden sowie die Thematik der Grundfrequenzen und ihrer harmonischen Oberschwingungen in Verbindung mit deren Einflüssen auch auf die musikalischen Praxis fachwissenschaftlich analysiert wurden, soll im Folgenden eine mögliche didaktische und methodische Implementierung dieser Inhalte in den Physikunterricht dargestellt werden.

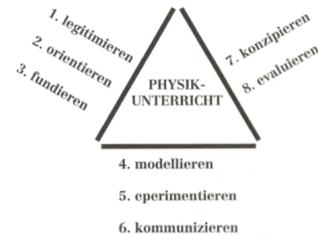
Hauptsächlich liegt der Focus hierbei auf der didaktischen und methodischen Implementierung der Inhalte aus Kapitel II. Grundkenntnisse der Schüler in der Schwingungslehre werden hierfür somit teilweise vorausgesetzt, so beispielsweise die Kenntnis über die verschiedenen Wellenarten – transversal und longitudinal – sowie deren diversifizierten Darstellungsmöglichkeiten. Darüber hinaus sind die Schüler bereits mit den Begriffen Wellenlänge, Amplitude, Periode, Phase und Frequenz vertraut und kennen die physikalischen und mathematischen Zusammenhänge. Auch das Anwenden – genauer das Lesen, Deuten und auch das Erstellen – von Diagrammen wird als den Schülern bereits möglich vorausgesetzt.

Ziel ist es, didaktische und methodische Ansätze für dieses enorm viel Potenzial für einen Fächer verbindenden Unterricht (Physik, Musik, Informatik, Biologie, Mathematik) bietende Thema der Harmonischen Oberschwingungen aufzuzeigen und diese Ansätze bereits mit verschiedenen methodischen Möglichkeiten zu kombinieren. In diesen für den Physikunterricht gedachten Ansätzen für mögliche Unterrichtseinheiten wird aber auch der Musik bereits ein besonderer Stellenwert zuteil, da beispielsweise Musikinstrumente in den Versuchsanordnungen oder der Bereich der musikalischen Akustik als Alltagserfahrung eine bedeutende Rolle spielen.

Eine ausführliche Analyse des gesamten – neben Physik und Musik auch viele weitere – Fächer verbindenden Potentials erfolgt dann in Kapitel V. dieser Arbeit.

1. Legitimieren, Orientieren, Fundieren

Eine gute Planung und didaktisch analysiert geplante Umsetzung von Physikunterricht lässt sich anhand von 8 Teilschritten darstellen. Nach dem Legitimieren (1) erfolgt die Orientierung (2) und die Fundierung (3) des Physikunterrichts. Dem Modellieren (4) und Experimentieren (5) folgt das Kommunizieren (6) im Physikunterricht. Schließlich wird Physikunterricht konzipiert (7) und evaluiert (8).⁹²



Allgemeinbildung zielt in der Tradition europäischer Aufklärung im Sinne kritisch-konstruktiver Didaktik auf die Entwicklung der allgemeinen Kompetenzziele Fähigkeit zur Selbstbestimmung, Fähigkeit zur Mitbestimmung und Fähigkeit zur Solidarität. Klafki fordert für die Auswahl von Inhalten eine Orientierung an den Kernproblemen unserer Gegenwart und vermeintlichen Zukunft und somit eine Konzentration auf so genannte epochaltypische Schlüsselprobleme. Diese sind beispielsweise dann gegeben, wenn sie gesamtgesellschaftliche Wirkungen haben und einen Einfluss auf jeden Einzelnen. Physik als Wissenschaft von der Natur hat einen aufklärenden und beschreibenden Charakter für vielfältige Sachverhalte der Welt. Sie ist eine systematisierte, historisch sich wandelnde Sammlung von Erfahrungen mit Produkt- und Prozesscharakter sowie eine Anwendungswissenschaft von besonderen Wechselwirkungen mit der Technik. Darüber hinaus trägt die Physik zu einer naturwissenschaftlichen Grundbildung bei. Durch die enge Verzahnung der Physik mit vielen anderen Wissenschaften sind Grenzüberschreitungen ausgesprochen erwünscht.⁹³

Im konkreten Beispiel der Schwingungslehre beziehungsweise der Akustik ergibt sich die Legitimation (1) aus dem 6. Schlüsselproblem nach Klafki (‘die Fragen im Zusammenhang mit den Gefahren und Möglichkeiten der neuen technischen Steuerungs-, Informations- und Kommunikationsmedien für die

⁹² vgl. Mikelskis S. 10, S. 5-8

⁹³ vgl. Mikelskis S. 11-15

Arbeitswelt und den Freizeitbereich⁹⁴). Das Thema Akustik lässt sich auf vielfältige Art und Weise in den Physikunterricht oder den Unterricht eines anderen Schulfaches einführen, beispielsweise über das aktuelle, immer diskutierte Thema der Hörschädigung durch lauten Musikkonsum (Biologie, Medizin), über das Bauen und Installieren von Audioboxen (Technik) oder über die Instrumentenkunde (Musik). Hierbei werden Alltagserfahrungen der Schüler sowie bereits vorhandene – und teilweise fachwissenschaftlich falsche – Vorstellungen abgerufen und auf diesen aufbauend der Unterricht geplant.

Grundsätzlich spielen die Schülervorstellungen für die Orientierung (2) des Physikunterrichts eine bedeutende Rolle. Wenn Schüler untereinander oder mit ihrem Lehrer diskutieren, ein Experiment beobachten oder eine Aufgabe lösen, benutzen sie die Begriffe und Vorstellungen, über die sie bereits verfügen. Diese in der Alltagswelt gewachsenen und dort bewährten Schülervorstellungen kontrastieren in vielen Fällen mit den zu lernenden physikalischen Vorstellungen. Dies gilt für nahezu alle Teilbereiche der Physik. Hierin liegt die Ursache für viele ernstzunehmende Missverständnisse im Unterrichtsgespräch und Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler. Bei der Planung von Physikunterricht ist es deshalb unerlässlich, dass der Lehrer die Vorstellungen seiner Schüler möglichst genau kennt, um die Schwierigkeiten im Unterricht wahrnehmen und angemessen darauf reagieren zu können.⁹⁴

Des Weiteren spielen die Vorerfahrungen der Schüler eine entscheidende Rolle. Besonders in der Physik ist durch gesellschaftliche Geschlechterstereotypen eine Tendenz zu der intensiveren Beschäftigung mit Naturwissenschaften eher bei Männern ein großes Problem. Das – unter anderem dadurch mitgeprägtes – Selbstvertrauen in die eigenen physikalischen Kenntnisse ist deshalb bei Jungen sehr viel deutlicher ausgeprägt als bei Mädchen.⁹⁵

Durch die Verknüpfung der physikalischen Inhalte mit musikalischer Praxis bei der Einführung der Thematik der Harmonischen Oberschwingungen kann es gelingen, diese – meist grundsätzlich gegebene – Situation aufzubrechen und Mädchen und Jungen auf gleicher Augenhöhe in die Thematik einzuführen. Den Schülervorstellungen zu Begrifflichkeiten wie Akustik, Schall oder

⁹⁴ vgl. Mikelskis S. 52ff.

⁹⁵ vgl. Mikelskis S. 77

Schwingungen kann offensiv begegnet werden; das bedeutet, über teilweise fachwissenschaftlich falsche Vorstellungen der Schüler (wie beispielsweise die Schallausbreitung über das Medium Luft, was für viele Schüler als etwas nicht Stoffliches aufgefasst und deshalb nicht als Medium wahrgenommen wird) kann der Ansatz zur fachwissenschaftlich korrekten Herleitung der Thematik sein. Im Falle der Schallausbreitung könnte dies über das Thema Resonanz erfolgen, entweder experimentell (beispielsweise über das in Schwingung Versetzen eines Weinglases) oder über den musikalischen Bereich der Instrumentenkunde (beispielsweise über die Funktionsweise von Instrumenten mit jedem Schüler bekannten und von ihnen nachvollziehbar anerkannten Resonanzkörpern).

Über diese mögliche Kontextorientierung (wie eben beschrieben über den Schülern bekannte Musikinstrumente), den Alltagsbezug (beispielsweise Naturgeräusche, Straßenlärm, grundsätzliches Thema Musik), sowie einer Elementarisierung der Inhalte wird der Physikunterricht und seine Inhalte schließlich fundiert (3).⁹⁶

2. Modellieren, Experimentieren, Kommunizieren

Bei einem Modell handelt es sich um einen Gegenstand oder ein theoretisches Konstrukt, welches für einen entsprechenden Zweck erschaffen beziehungsweise verwendet wird und zwischen dessen Eigenschaften und den Eigenschaften des präsentierten Objekts Analogien bestehen. Bekanntestes Beispiel ist hier mit Sicherheit das Teilchenmodell. In der Physik gründen sich viele Gesetze auf Bedingungen, welche in der Praxis häufig nicht relevant sind: beispielsweise mechanische Bewegungen im luftleeren Raum. Hier bietet der Computer Möglichkeiten, Modellbildungen zu unterstützen und komplexe Vorgänge zu simulieren. Dies kann einerseits durch Animation – das heißt ohne mögliche Interaktion und Beeinflussung der Parameter – und andererseits durch Simulation – mit möglicher Interaktion und Beeinflussung der Parameter – geschehen. Grundvoraussetzungen für ein erfolgreiches Modellieren (4), welche an die Schüler gestellt werden, sind die Kenntnis der Verfahren der

⁹⁶ vgl. Mikelskis S. 86ff.

Modellbildung und Simulation als möglicher Weg zur Erkenntnisgewinnung, das selbständig mögliche Vornehmen einfacher Modellierungen und die Möglichkeit, Ergebnisse von Simulationen im Kontext realer Prozesse evaluieren zu können.⁹⁷

Eine mögliche Modellierung im Bereich der Akustik ist die (mechanische) Simulation eines Saiteninstrumentes mit einem an einem hohlen Holzkistchen befestigten, von Hand gespannten und gezupften Gummiband, mit welchem die Schüler Zusammenhänge der wahrgenommenen Tonhöhe mit der Länge und der Spannkraft des Gummibands erkennen und gegebenenfalls bereits deuten können. Computergestützte Modellierungen in der Akustik werden in Kapitel III.4 noch ausführlich betrachtet.

Dem Experimentieren (5) kommt im Physikunterricht eine tragende Rolle zu. Es stellt eine besondere Form des "Dialogs mit der Natur zur Erkenntnisgewinnung"⁹⁸ dar. Es ist im Physikunterricht – im Gegensatz zur physikalischen Forschung – ein probates Mittel zum Heranführen an bereits gesicherte Erkenntnisse. Das Experiment übernimmt pädagogische Funktionen, wie beispielsweise das Fördern von kausalem und funktionalem Denken, psychologische Funktionen, wie das Wecken von Interesse und das Entwickeln von Einstellungen sowie Denk- und Lösungsstrategien, erkenntnistheoretische wie auch fachliche Funktionen. Man unterscheidet zwischen dem vom Lehrenden geplanten und durchgeführten so genannten Demonstrationsexperiment, bei dem letztlich nur die Auswertung mit den Schülern zusammen erfolgen kann. Da die Schüler hier aber effektiv nur ein Ergebnis präsentiert bekommen, ist eine qualitative Auseinandersetzung mit dem Ergebnis in Bezug auf die das Ergebnis herbeiführenden Faktoren des Experiments meist nur sehr schwer möglich. Beim Schülerexperiment erfolgt die Planung, Durchführung und Auswertung in Abhängigkeit der Altersstufe mehr oder weniger durch die Schüler selbst. Dies hat oftmals eine qualitativ deutlich hochwertigere Auseinandersetzung mit dem Ergebnis und seiner Begründung zur Folge.⁹⁹

⁹⁷ vgl. Mikelskis S. 120ff., S. 139-141

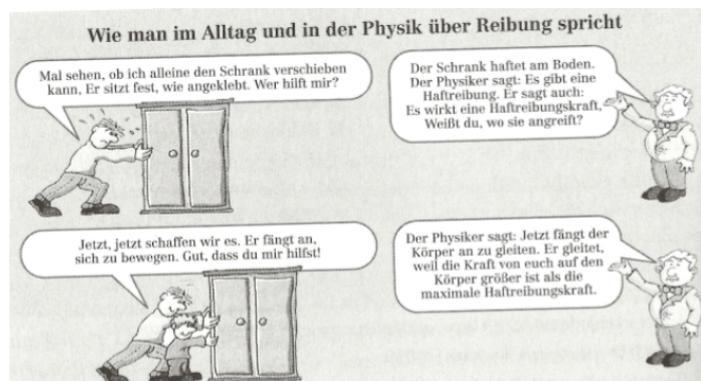
⁹⁸ vgl. Mikelskis S. 149

⁹⁹ vgl. Mikelskis S. 149-167

Mögliche Experimente zur Akustik beziehungsweise zu Harmonischen Oberschwingungen werden in Kapitel III.4 noch ausführlich dargestellt.

Letztlich ist auch ein großes Augenmerk auf die Kommunikation (6) im Physikunterricht zu legen. Wie bereits beschrieben, werden Begrifflichkeiten bereits aus dem Alltag mit Bedeutungen belegt, die der fachwissenschaftlichen Terminologie widersprechen. Hier müssen die Ebenen Fachsprache, Alltagssprache und Unterrichtssprache unterschieden werden. Die Kommunikation, sowohl verbal im Unterricht als auch beispielsweise bei Arbeitstexten, muss so gesteuert werden, dass Schülern die gewünschte Bedeutung von Begrifflichkeiten auch wirklich vermittelt wird. Hier müssen den Schülern die Unterschiede der subjektiv behafteten Bedeutungen von Begrifflichkeiten ihrerseits und den fachwissenschaftlichen Bedeutungen andererseits vermittelt werden und es muss eine qualitative Auseinandersetzung über die Kommunikation stattfinden. Darüber hinaus muss den Schülern die Wichtigkeit der Anwendung fachwissenschaftlich korrekter

Begriffe dargestellt werden. Wird Sprache und Kommunikation als Handwerkszeug des Physikers richtig eingesetzt, kann es das bewusste Physiklernen unterstützen.¹⁰⁰



Konkret muss im Fall des Themas dieser Arbeit – wie bereits in den Kapiteln I.2 und II.1 ausgeführt – darauf geachtet werden, wie beispielsweise die Begriffe Schall, Akustik, Ton, Klang und Geräusch verwendet werden und mit welcher Bedeutung sie im Vorhinein bereits bei den Schülern belegt sind. Darüber hinaus müssen die für die in Kapitel III.4 dargestellten Versuchsanordnungen relevanten Begriffe (wie beispielsweise "Peak" bei der Frequenzanalyse) im Vorhinein besprochen und mit der fachwissenschaftlich richtigen Bedeutung belegt werden.

¹⁰⁰ vgl. Mikelskis S. 183-196

3. Methodik im Physikunterricht

Die **Modellmethode** ist wie bereits beschrieben eine Möglichkeit, komplexe Sachverhalte mit den Schülern leistungsniveaugerecht zu erarbeiten. Der Stellenwert der Modellmethode wird auch über die Bildungspläne und Schulbücher herausgestellt. Jedoch ist zu beachten, dass bei einem unreflektierten Umgang mit Modellen oftmals eine Verstärkung von Verständnisproblemen erzielt werden kann. Probleme beim Modellieren entstehen häufig durch Fehlvorstellungen der Schüler sowie der häufig auftretenden Vermengung von Modell- und Realitätsebene. Die dadurch entstehenden Hybridmodelle, die eine Vermengung von unreflektierten Eigenschaften aus der Lebenswelt der Schüler mit den zu modellierenden Bereichen darstellen, treten dadurch sehr häufig auf. Der Modellbegriff ist aber auch durch unterschiedliche erkenntnistheoretische Sichtweisen verschieden definiert: während beispielsweise im kritischen Realismus ein Modell nur gewisse Strukturen der Realität beschreibt und somit einen Teil der realen physikalischen Welt darstellt, ist ein Modell im naiven Realismus eine verkleinerte oder vergrößerte Abbildung der direkt wahrnehmbaren Gegenstände der Wirklichkeit.¹⁰¹

Wie die Modellmethode dient die **experimentelle Methode** zur physikalischen Erkenntnisgewinnung und ist eine lern- und inhaltsorientierte Methode. Neben den in vorstehendem Kapitel bereits beschriebenen Schüler- und Demonstrationsexperimenten gibt es die Form des so genannten offenen problemorientierten Experimentierens. Hier müssen Schüler nicht bloße Arbeitsaufträge abarbeiten, die sie möglicherweise inhaltlich gar nicht erfassen. Beim offenen Experimentieren entwickeln Schüler zu "erklärungsbedürftigen" naturwissenschaftlichen oder Alltags-Phänomenen Fragestellungen, unter denen weitestgehend selbständig Experimente geplant, durchgeführt und ausgewertet werden.¹⁰²

¹⁰¹ vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 15-28

¹⁰² vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 29-39

Im konkreten Fall des Themas dieser Arbeit bietet sich offenes Experimentieren weniger an als Schüler- und Demonstrationsexperimente, da es hier um die Hinführung zu einem konkreten physikalischen Sachverhalt geht. Möglich wäre indes eine Art Mischform aus offenem Experimentieren und Schülerexperiment. Werden die Fragestellungen mehr oder weniger konkret bereits vom Lehrenden gestellt, kann bei guter Moderation und Führung des Lehrenden über offenes Experimentieren – jedoch mit vom Lehrenden zur Verfügung gestellten Hilfsmitteln – möglicherweise das gewünschte Lernziel erreicht werden.

Das **Unterrichtsprinzip** kann exemplarisch, genetisch oder sokratisch gewählt werden. Das *exemplarische Unterrichtsprinzip* weist Parallelen zur psychologischen Kategorie des Transfers im Sinne der Anwendung des exemplarisch Gelernten auf neue Phänomene auf. Es geht bei diesem Prinzip des Unterrichts um die Herausarbeitung des Allgemeinen aus dem Besonderen. Dieses Allgemeine wiederum verweist auf das Elementare. Das Hauptproblem des exemplarischen Unterrichtsprinzips ist die Auswahl ebendieses Exemplarischen. Um eine Spiegelung des Ganzen am Einzelnen bei den Schülern zu bewirken, muss das Exemplarische nach gewissen Prinzipien (Aufschlussgrad, Vielschichtigkeit, Transferpotential, Ersichtlichkeit des Vorhandenseins fachtypischer Denk- und Arbeitsweisen) sorgfältig ausgewählt werden. Das *genetische Unterrichtsprinzip* legt den Fokus nicht auf die Mitteilung von Ergebnissen physikalischen Denkens und Forschens, sondern auf den Prozess der Entstehung und Erarbeitung. Beim *sokratischen Gespräch* ist das Ziel, die eigenen Gedanken an denen anderer zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren oder zu modifizieren, also in Gemeinschaft zu denken und zu Aussagen zu kommen, denen alle zustimmen können.¹⁰³

Auf die Umsetzung des Themas dieser Arbeit bezogen kann das sokratische Gespräch bei der Erarbeitung eines Sachverhaltes in einer Schülergruppe – gegebenenfalls durch den Lehrenden moderiert – eingesetzt werden. Auch kann das genetische Unterrichtsprinzip teilweise angewendet werden, so zum Beispiel bei der Frage nach der Ursache der verschiedenen Klangfarben

¹⁰³ vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 44-50

unterschiedlicher Musikinstrumente. Das hauptsächlich angewandte Unterrichtsprinzip ist aber mit Sicherheit das exemplarische, da – besonders bei der Frequenzanalyse – oftmals vom Exemplarischen (also beispielsweise dem Objekt des Experiments) auf das Allgemeine geschlossen werden muss – unter anderem auch deshalb weil eine Analyse der Frequenzspektren aller in der europäischen Musikkultur etablierten Instrumente kaum möglich wäre. Hier würden dann beispielsweise zwei Saiten-, zwei Holzblas-, zwei Blechblasinstrumente, etc. ausgewählt werden.

Der **historisch orientierte Physikunterricht** basiert auf der Tatsache, dass Wissen nicht voraussetzungslos ist, sondern auf etwas bereits Bestehendem beruht. Im naturwissenschaftlichen Unterricht soll nicht nur begrifflich-konzeptionelles und methodisches Wissen vermittelt werden, sondern auch Wissen über die Naturwissenschaften – auch der Physikunterricht orientiert sich laut den Bildungsstandards zunehmend am Konzept der naturwissenschaftlichen Grundbildung. Der historisch orientierte Physikunterricht muss angemessen und ausreichend reflektiert werden, da er einige irritierende Fragen aufwerfen kann, so zum Beispiel nach der Selbstevidenz von Wissen (welche Schlüsse ziehen unterschiedliche Wissenschaftler aus gleichen Daten?), der Vorläufigkeit des Wissens (wenn sich Wissen im Laufe der Zeit verändert, geht es dann auch verloren oder weiß man einfach immer mehr?) und den Zielen und Zwecken der Forschung (was waren Ziele und Zwecke der Forschung im Hinblick auf die jeweilige historische Situation?).¹⁰⁴

Der historisch orientierte Physikunterricht bietet sich für das konkrete Thema der Harmonischen Oberschwingungen nur bedingt als methodische Form an. Die in Kapitel II.5.2 beschriebenen Theorien von Herrmann von Helmholtz zu Klangfarben von Musikinstrumenten und deren Entstehung aus dem 19. Jahrhundert, von denen einige bis heute Bestand haben, andere jedoch nach heutigem Wissen als falsch erachtet werden, wären eine potentielle Ansatzmöglichkeit für einen historisch orientierten Unterricht.

¹⁰⁴ vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 57-69

Beim **entdeckenden und forschenden Lernen** steht die sehr vielversprechende Methode des selbständigen Forschens und Entdeckens im Vordergrund. Hierbei sollen eine gesteigerte Motivation und daraus resultierend eine besser Lernleistung erreicht werden. Auch das Erlernen weiterer Fähigkeiten, wie die selbständige Erschließung von Problembereichen und das kritische Diskutieren von Ergebnissen, werden über diese Methode vermittelt. Neben reinem Fachwissen werden Kompetenzen der Erkenntnisgewinnung, der Kommunikation und der Bewertung sowie Kenntnisse über die Physik als Wissenschaft erworben. Dem gegenüber stehen jedoch Schwierigkeiten, wie die meist erforderlichen Grundkenntnisse in einem Bereich – welche in vielen Fällen aber erst noch erworben werden sollen – sowie die Tatsache, dass sich Lernende neuartigen Anforderungen meist auf mehreren Ebenen ausgesetzt sehen. Forschendes Lernen setzt im Gegensatz zu darbietenden Unterricht auf die selbständige Erarbeitung von Wissen durch die Lernenden. Die Methode der Erkenntnisgewinnung ist dem Ansammeln von Wissen gleichgestellt. Grob gliedern lässt sich das entdeckende und forschende Lernen in fünf Arbeitsabschnitte: die Problemgewinnung, die Überlegungen zur Problemlösung, die Durchführung eines Lösungsvorschlags, die Abstraktion der gewonnen Erkenntnisse sowie die Wissenssicherung. Bedeutung gewinnt die Methode des entdeckenden und forschendes Lernen auch durch die Bildungspläne, das forschende Lernen bettet den Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung in einen sinnvollen Zusammenhang mit den anderen Kompetenzbereichen Fachwissen, Kommunikation und Bewertung.¹⁰⁵ Eine methodische Erarbeitung des konkreten Themas über forschendes Lernen kann beispielsweise über das aktuelle Thema Lärmbelästigung/Hörschädigung bei Jugendlichen erfolgen. Nach einer Einführung in das Thema über Videos und Textinformationen – welche das Vorwissen der Schüler fundieren – können Problemstellungen von den Schülern zum Thema Schall und ‘Schallüberflutung’ erarbeitet werden. Hier bietet sich die Möglichkeit, dass das Thema Interferenz

¹⁰⁵ vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 70-78

von den Schülern entdeckend und forschend erarbeitet wird, möglicherweise über ein konkretes Alltagsbeispiel wie den so genannten Antischall, den heutzutage bereits viele Schüler von handelsüblichen Kopfhörern mit aktiver Geräuschunterdrückung kennen ohne ihn jedoch bisher als physikalisches Thema aus der Wellenlehre wahrgenommen zu haben.

Der **problemorientierte Unterricht** basiert auf der Lösung physikalischer Probleme und der Frage nach dem Herangehen an diese Problemlösung. Unser Bild von der Wirklichkeit weist unverbundene Stellen, also Lücken, auf. Außerdem widersprechen sich unsere Aussagen über die Wirklichkeit. Darüber hinaus ist unsere Sicht der Wirklichkeit unnötig kompliziert. Diese Probleme mit Lücken, Probleme mit Widerspruch und Probleme mit unnötiger Kompliziertheit stellen den Ansatz für den problemorientierten Unterricht dar. Das Überwinden einer dieser Lücken, die Beseitigung eines Widerspruchs oder die Vereinfachung der Kompliziertheit ist damit gleichbedeutend mit der Lösung des Problems. Hierbei muss es sich nicht zwangsläufig um ein reales oder lebensnahes Problem handeln, vielmehr handelt es sich beim problemorientierten Unterricht um ein lernpsychologisch und didaktisch begründetes Konzept, bei dem Schüler zum organisierten Lernen an fachlichen Inhalten im Rahmen des Unterrichts angeregt werden sollen. Der problemorientierte Unterricht fördert aktiv das Lernen, da Lernende dazu veranlasst und dabei unterstützt werden, sich mit der Lösung authentischer Probleme zu erfassen, da bestehendes Wissen als Basis für den Erwerb neuen Wissens aktiviert wird, neues Wissen aktiv angewandt und den Lernenden demonstriert wird, was das zu erwerbende Wissen ist, worin die zu entwickelnde Kompetenz besteht und wie man beides erwerben kann.¹⁰⁶ Auch auf das konkrete Thema diese Arbeit bezogen stellt der problembezogene Unterricht eine Methode mit enormem Potential für die Gestaltung des Unterrichts dar. Die Tatsache, dass ein Ton mit exakt übereinstimmender Frequenz auf zwei verschiedenen Musikinstrumenten gespielt anders klingt, stellt beispielsweise für mit dem fachwissenschaftlichen Hintergrund (noch) nicht vertrauten Personen einen eindeutigen Widerspruch dar; dass ein einzelner musikalischer Ton, beispielsweise per Musikinstrument oder Stimme

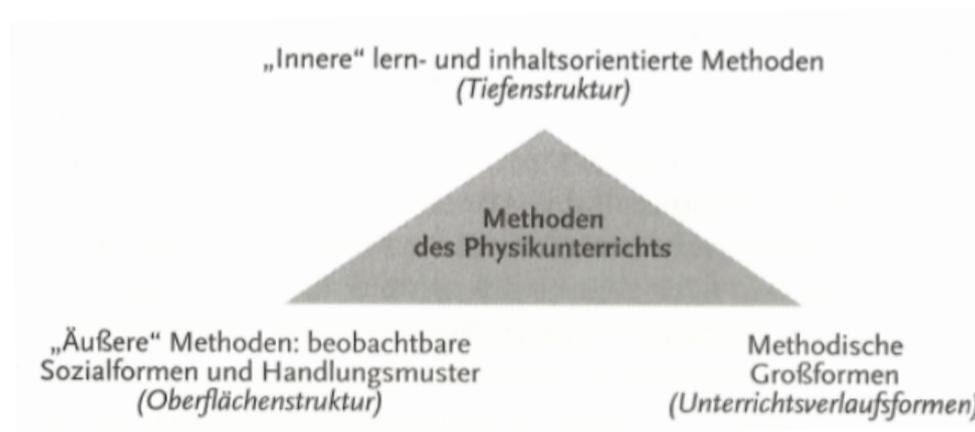
¹⁰⁶ vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 82ff.

erzeugt, in Wirklichkeit eine Überlagerung von sehr vielen verschiedenen Tönen ist, stellt für die Meisten eine deutliche Lücke im Wirklichkeitsbild dar.

Die **Sozialform** im Verlauf des Unterrichts kann bei Bedarf vom *darbietenden Unterricht* zu einem *Unterrichtsgespräch*, einer Form von *schülerzentrierten Unterricht* (über Partnerarbeit, Gruppenarbeit, Stationenlernen), *Textarbeit* oder *Spielformen* variiert werden.¹⁰⁷

Hier bietet das Thema Akustik sowie im konkreten Fall das Thema Harmonische Oberschwingungen eine breite Vielfalt von Ansätzen für mögliche anwendbare methodische Sozialformen.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass das Thema Harmonische Oberschwingungen sowie dessen Herleitung über die Einführung in die Wellenlehre und die Akustik eine Vielzahl von methodischen Möglichkeiten bietet, ohne diese gezwungenermaßen, als umgangssprachlich "mit Gewalt" anwenden zu müssen. Sowohl bei den so genannten inneren lern- und inhaltsorientierten Methoden wie der Modellmethode, den dargestellten Unterrichtsprinzipien oder dem forschenden Lernen, als auch bei den so genannten äußeren Methoden wie der Sozialform bietet sich ein Vielzahl von Ansatzmöglichkeiten, die Schüler mit dem Thema und seinen Inhalten vertraut zu machen.



108

¹⁰⁷ vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 95ff.

¹⁰⁸ vgl. Mikelskis-Seifert/Rabe S. 14

4. Exemplarische Ansätze für Unterrichtseinheiten

Die im Folgenden dargestellten Ansätze sind bewusst nicht als ein ganzheitlicher Unterrichtsentwurf für eine Unterrichtsstunde oder –einheit konzipiert, sondern als mögliche Umsetzungsvarianten relevanter Sachverhalte des Themas Harmonische Oberschwingungen sowie Teilen der Akustik als Themenbasis über Experimente und Modelle mit verschiedenen Ansätzen der anwendbaren Methodiken.

Ziel ist es, ein breites Angebot an didaktischen Möglichkeiten und Methoden zu entwickeln, um das Thema Harmonische Oberschwingungen im Physik- und fächerübergreifenden Unterricht mit den Schülern und für die Schüler zu erarbeiten. Es soll nicht als exakt durchgeplanter Ablauf einer Unterrichtseinheit über Akustik oder ein Gesamtkonzept für eine Unterrichtseinheit über Harmonische Oberschwingungen verstanden werden.

Der Bezug zum Schulfach Musik und die Fächer verbindende Idee der Aufarbeitung des Themas fließen hierbei bereits stark in die Konzeption mit ein. Die dargestellten Ansätze sind jedoch ausdrücklich für den Physikunterricht ausgelegt – Ansätze für Fächer verbindende Unterrichtseinheiten im Schulfach Musik oder weiteren anderen Fächern werden ausführlich in Kapitel V. dargestellt.

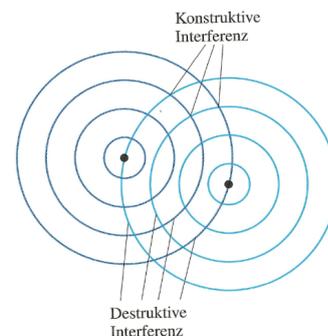
Die jeweilig oben stehende Bezeichnung der einzelnen Ansätze weist auf den jeweiligen Teilbereich des Themas Akustik oder den jeweiligen Teilbereich des Unterthemas Harmonische Oberschwingungen hin. Die einzelnen Ansätze sind vom Verfasser dieser Arbeit nach einem für ihn vorstellbaren möglichen Verlauf einer Unterrichtseinheit zum Thema Harmonische Oberschwingungen konzipiert und chronologisch geordnet worden, erheben aber keinen Anspruch auf eine festgelegte Reihenfolge wie im Folgenden dargestellt.

➤ Überlagerung von Wellen

Die Interferenz, also die Überlagerung von Wellen nach dem Superpositionsprinzip, entspricht der Addition der Amplituden der Wellen während ihrer Durchdringung. Sie tritt bei jeglichen Arten von Wellen auf. Dieses Phänomen ist unterbewusst vielen Menschen vertraut (beispielsweise von einem Aufenthalt am Meer); bewusst wird diese Addition (auch negativer Beträge) der Wellenamplituden aber meist nicht wahrgenommen. Dieses Phänomen lässt sich aber auf eine für die Schüler sehr plastische Art und Weise darstellen und nachvollziehen. Man lässt zwei Steine oder vergleichbare Gegenstände mit einem gewissen räumlichen Abstand zeitgleich in ein sehr großes Behältnis mit Wasser oder beispielsweise einen See oder Weiher fallen. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (mit maximal möglicher Bilderzahl pro Sekunde) wird dieser Vorgang und die Bewegung der – durch den Aufprall der Steine auf die Wasseroberfläche und ihr Eintauchen ins Wasser entstandenen – Wellen gefilmt. Bei Abspielen der Aufnahme mit einem Abspielgerät in sehr drastisch reduzierter Geschwindigkeit wird das Phänomen der Überlagerung der Wellen sehr plastisch dargestellt deutlich.



Hier kann mit den Schülern erarbeitet werden, was bei Aufeinandertreffen von beispielsweise zwei Wellenbergen, zwei Wellentälern oder jeweils einen Wellental mit einem Wellenberg passiert. Je nach der vom Lehrenden gewünschter Vertiefung der fachwissenschaftlichen Inhalte können die Begriffe der konstruktiven und destruktiven Interferenz beziehungsweise deren Bedeutung mit den Schülern erarbeitet werden.



Dieses Experiment bietet sich beispielsweise zur Durchführung als Mischform eines Schüler- und Demonstrationsexperimentes an. Einerseits wird der Versuch vom Lehrer beaufsichtigt und (anleitend) auch durchgeführt, andererseits sind zumindest einige Schüler direkt einwirkend am Versuch beteiligt. Durch mehrfaches Wiederholen der Versuchsanordnung können somit auch alle Schüler unmittelbar am Experiment beteiligt werden. Es handelt sich hierbei neben einer experimentellen Methode auch um eine Modellmethode, da ein Transfer von dem Modell Wasserwellen auf die Gesamtheit der physikalischen Wellen (exemplarisches Unterrichtsprinzip) stattfinden muss. Durch eine starke Miteinbeziehung der Schüler findet hier teilweise ein entdeckendes und forschendes Lernen statt.

➤ Ton als Welle

Ein einfacher und zeitlich kurzer (mit jedoch einiger Vorbereitungszeit versehener) Demonstrationsversuch zum Nachweis der Wellennatur von Schall benötigt eine Stimmgabel, eine mit Kastelfarbe bestrichene Glasplatte sowie ein Darstellungsmedium wie einen Tageslichtprojektor. Wird die nicht angeschlagene Stimmgabel mit einem Zinken über die Farbe gestrichen, entsteht ein – mehr oder weniger gerader – Strich. Wird jedoch die angeschlagene Stimmgabel mit einem Zinken über die Farbe gestrichen ist

deutlich ein
analog dem
Ton



“abklingendes“ Wellenmuster (also mit abnehmenden Amplituden) zu erkennen. Dieser Versuch benötigt neben der Vorbereitung der Glasplatte ein gewisses Maß an Übung und Fingerspitzengefühl und eignet sich deshalb nur bedingt als Schülerexperiment. Entscheidend für die Effektivität und den Lernerfolg bei diesem Versuch sind aber letztlich nicht nur die Durchführung und das Ergebnis, sondern zu einem sehr großen Teil die Art und Weise, wie dieser Versuch in den Unterrichtsverlauf eingebettet wird.

Wird der Versuch beispielsweise als Ergänzung des Lehrenden zu einer theoretischen Erklärung der Wellennatur von Schall verwendet (mögliches Zitat des Lehrenden: „nun habe ich euch die Wellennatur des Schalls erklärt und zeige euch noch, wie das dann aussieht“), kann er zur von vielen Schülern nur beiläufig wahrgenommenen Ablenkung verkommen. Wird das Ergebnis des Versuchs aber angemessen reflektiert, oder wird im noch günstigeren Fall bereits vor der Versuchsdurchführung ausführlich über mögliche Ergebnisse und Begründungen diskutiert, kann dieser eigentlich sehr einfache und zeitlich kurze Versuch einen komplexen und für viele Schüler schwer nachvollziehbaren Sachverhalt sehr plastisch erklären, bereits im Vorhinein Barrieren abbauen und eventuelle Lernschwierigkeiten verhindern.

➤ Musikinstrument als Schallquelle I

Das Thema der Resonanz sowie ein einfaches Modell zur Funktionsweise eines Musikinstrumentes können durch den Einsatz relativ banaler Haushaltsgegenstände mit den Schülern erarbeitet und hergeleitet werden. Wird ein Gummiband (beispielsweise ein aufgeschnittenes Gummiband eines Einmachglases) an einem Türgriff, Tisch, Schrank oder sonstigen Gegenstand befestigt, mit einer Hand gespannt und mit der anderen Hand angezupft, ist – sehr leise aber wahrnehmbar – ein Ton zu hören. Deutlich hörbar wird der Ton, wenn das Gummiband nicht an einem Gegenstand befestigt, sondern mit den Zähnen festgehalten und mit einer Hand gespannt wird. Durch Änderung der Spannkraft mit der das Gummiband haltenden Hand kann die Tonhöhe beim Anzupfen des Bandes variiert werden. Gleiches gilt für die – bei vergleichbarer Spannkraft – Änderung der Länge des Gummibandes, durch verkürzten oder verlängerten Abgriff mit der Hand. Auch die Verwendung von Gummibändern mit unterschiedlicher Stärke führt bei vergleichbarer Spannkraft zu unterschiedlich hoch empfundenen Tönen.



Hier kann sowohl die Bedeutsamkeit der Beschaffenheit und Spannkraft der Saiten eines Streich- oder Zupfinstrumentes für die Frequenz (des gewünschten zu erzeugenden Tons) erarbeitet werden, wie auch der Zusammenhang der Länge einer – vergleichbar beschaffenen und gespannten – Saite auf die empfundene Tonhöhe. Durch, beispielsweise von musikalisch versierteren Schülern mit einem Musikinstrument erzeugte, Vergleichstöne können von den Schülern gegebenenfalls bereits – und das, ohne die Frequenzen überhaupt gemessen oder mathematisch bestimmt zu haben – erste Erkenntnisse über Verhältnisse von Frequenzen erkannt und formuliert werden; so zum Beispiel das Verhältnis einer Oktave (Ton¹ zu Ton², also z.B. c' zu c'') bei halbiertes Saitenlänge.

Wird das Gummiband an einem aus sehr dünnem Holz oder Sperrholz gefertigten Holzkistchen (wie beispielsweise einem Zigarren- oder Weinflaschenkistchen) befestigt, erklingt ein im Gegensatz zur Befestigung am Türgriff deutlich lauterer Ton. Die Änderungen der Tonhöhen durch Spannkraft,



Saitenlänge und Saitenbeschaffenheit (in diesem Fall ist die Saite das Gummiband) gestalten sich analog der vorigen Ausführungen, jedoch sind die erzeugten Töne deutlich “verstärkt“. Dass die Holzkiste durch das angezupfte Gummiband in Schwingung versetzt wird, lässt sich auf sehr einfache Art und Weise nachvollziehen, bei stark auftretender Resonanz möglicherweise sogar rein visuell anhand der Kiste selbst. Durch einen auf der Holzkiste angebrachten kleinen Schnipsel Papier wird das Schwingen der Kiste auch bei schwächerer Resonanz deutlich: dieser bewegt sich durch die Schwingung der Kiste bedingt auf deren Oberfläche.

Somit erschließen die Schüler das Phänomen der Resonanz, welches hier sehr deutlich auftritt, jedoch bei diesem vereinfachten Modellexperiment selbstverständlich nicht so intensiv wie bei ausgereiften und speziell im Hinblick auf Resonanz konzipierten Musikinstrumenten. An diesem Punkt bietet sich auch ein großes Potential für eine Vernetzungsmöglichkeit mit dem Fach Musik, beispielsweise zur Instrumentenkunde, insbesondere zum Aufbau und der Funktionsweise von Saiteninstrumenten.

Der didaktische und methodische Schwerpunkt liegt hier einerseits auf dem

Experimentieren, es wird aber andererseits durch Modellierung auch ein Wissens- beziehungsweise Erkenntnistransfer zur Realitätsebene hergestellt. Während die Schüler in der Sozialform der Gruppenarbeit entdeckend und forschend lernen und analog dem sokratischen Gespräch zu einem präsentierten Ergebnis gelangen, ist das Ziel in der Gesamtgruppe, das exemplarische Ergebnis auf das Allgemeine zu transferieren.

➤ Musikinstrument als Schallquelle II

Das Phänomen der Resonanz kann von den Schülern auch auf einem anderen Weg exemplarisch erarbeitet und nachvollzogen werden. Hierzu wird eine beliebige Gitarrensaite (zum Beispiel die Saite Nr. 6 (E)) auf zwei Schraubstöcke gespannt. Die Spannung der Saite wird auf eine mittels eines Stimmgeräts abgeglichene Tonhöhe (Frequenz in Hz) festgelegt. Die gleiche Saite jeweils einer (unverstärkten!) elektrischen Gitarre



und einer akustischen Konzert- oder Western- Gitarre wird auf die gleiche Frequenz beziehungsweise Tonhöhe gestimmt. Obwohl die bei Anzupfen der Saiten erklingenden Töne alle die gleiche Frequenz und somit gleiche musikalische Tonhöhe haben, ist ein deutlicher Unterschied sowohl in der Lautstärke als auch im Klang zu vernehmen. Obwohl im besten Fall drei mal die gleiche Saite benutzt wird, ergeben sich – in diesem Fall neben den unterschiedlichen Resonanzen unter anderem auch durch die Lautstärke bedingt (vgl. Kapitel II.5) – hier unterschiedliche Klänge. Ziel ist es, die Schüler möglichst selbständig an die Ursache dessen aufgrund der vorhandenen unterschiedlichen Resonanzkörper von gespannter Saite, Saite der elektrischen und Saite der akustischen Gitarre (keiner/ca. 5cm dickes massives Holz/ca. 12 cm dicker mit Holz umschlossener Hohlraum) zu führen.



Der Unterricht läuft hier exemplarisch, wobei die Schüler je nach Vorgaben des Lehrenden mehr oder weniger selbständig in Gruppen- oder Partnerarbeit operieren und sich der Thematik durch entdeckendes und forschendes Lernen annähern. Die Ergebnisse der einzelnen Gruppen müssen – im besten Fall im

Verlauf eines sokratischen Gesprächs – in der Gesamtgruppe angemessen reflektiert und diskutiert werden, um eine einheitliche (und fachwissenschaftlich richtige) Aussage über die Funktions- und Wirkweise eines Resonanzkörpers zu treffen. Die Kommunikation sowohl des anleitenden Lehrenden mit den Schülern als auch die der Schüler in der Gruppe untereinander spielt hier – wie auch im vorigen Ansatz und grundsätzlich bei Arbeiten in einer Gruppe – eine entscheidende Rolle, um das Fundamentieren falscher Ansätze oder das Forschen in eine themenfremde oder für das Thema irrelevante Richtung zu vermeiden.

➤ Schwebung

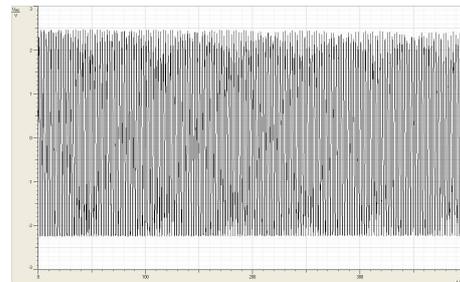
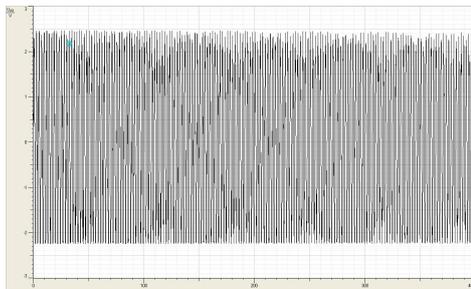
Zur Wiederaufnahme der ➤ Überlagerung von Wellen aus dem ersten dargestellten Ansatz und dem Transfer auf das für das Thema Akustik konkrete Phänomen der Überlagerung von Schallwellen bietet es sich an, mit den Schülern die Schwebung zu untersuchen. Mit einem Universalmikrofon werden jeweils die Schallwellen von zwei Stimmgabeln mit marginal unterschiedlichen Frequenzen (beispielsweise durch eine kleine



befestigte Schraube erzeugbar) von beispielsweise 440 Hz und 430 Hz gemessen ("aufgenommen") und mit einer Frequenzanalysesoftware – wie in konkretem Beispiel die Software CASSY-lab – erfasst. Die dargestellten Schwingungen der Stimmgabeln sehen nahezu identisch aus, bei der genaueren Analyse

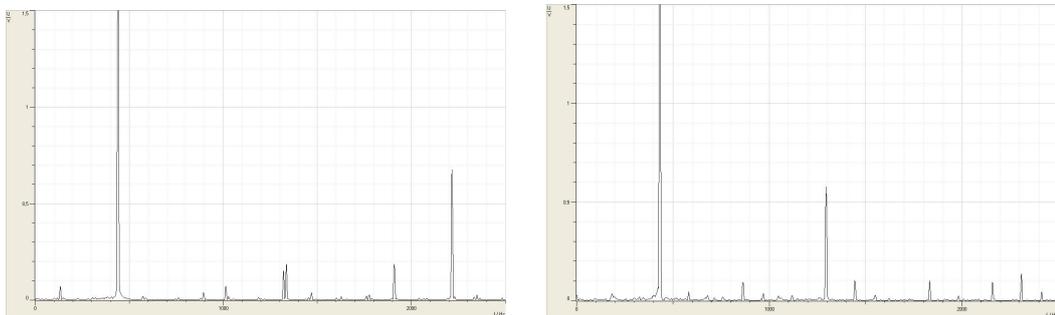


bemerkt man lediglich den Unterschied in der Anzahl der Schwingungen (440 pro Sekunde bei Stimmgabel 1 und 430 pro Sekunde bei Stimmgabel 2):



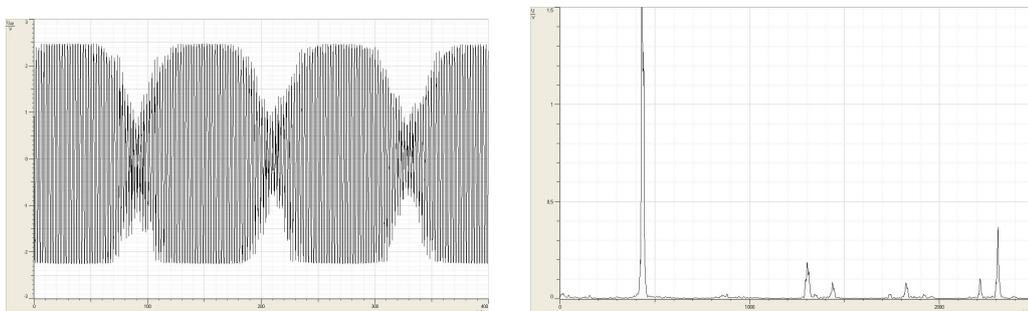
Die Y-Achse stellt die vom Mikrofon empfangene akustische Intensität (in U/V) dar, die X-Achse den zeitlichen Verlauf in ms.

Bei der genaueren Betrachtung der gemessenen Frequenzen erkennt man bereits einen klanglichen (jedoch nur von sehr geübten Hörern zu identifizierenden) Unterschied der Stimmgabeln, da eine unterschiedliche Ausprägung der mitschwingenden Obertöne vorliegt. Während bei der ersten Stimmgabel der fünfte Harmonische (also die vierte Oberschwingung) die höchste Intensität nach der Grundschwingung (von 440) Hz aufweist, weist bei der zweiten Stimmgabel der dritte Harmonische (also die zweite Oberschwingung) die deutlich höchste Intensität nach der Grundschwingung (von 430 Hz) auf:



Die Y-Achse stellt die vom Mikrophon empfangene akustische Intensität (in U/V) dar, die X-Achse das Frequenzspektrum in Hz.

Nun werden die beiden Stimmgabeln gleichzeitig in Schwingung versetzt und die Schallwellen mit dem in gleichem Abstand zu beiden Stimmgabeln stehenden Universalmikrophon erfasst. Bei der Analyse der Schwingungen stellt man fest, dass sich durch die Überlagerung der beiden Schallwellen (mit gleicher Amplitude) eine sich ständig wiederholende Lautstärkenverschiebung zwischen maximaler Amplitude und Null ergibt



Auch bei der Frequenzanalyse ist eine Überlagerung der Wellen und somit eine Änderung der Intensitäten der Oberschwingungen zu beobachten.

Das Phänomen der Schwebung hat auf den ersten Blick nur wenig mit dem Thema der Harmonischen Oberschwingungen zu tun. Neben dem praktischen Nutzen des Effekts der Schwebung, beispielsweise beim Stimmen von Gitarre nach Gehör, bietet sich hier darüber hinaus die Möglichkeit, im Hinblick auf die Frequenzanalyse zur Untersuchung der Gründe für unterschiedliche Klangfarben bei Musikinstrumenten, bereits Ursache und Wirkung der Schwebung mit den Schülern zu erarbeiten und dieses als 'Vorwissen' zu fundieren: die bereits in Kapitel II.5.2 am Beispiel des Klaviers dargestellte so genannte Schwebung der Klangfarbe (aufgrund der Phasenverschiebung) kann nun darauf aufbauend deutlich leichter mit den Schülern erarbeitet werden, als ohne vorhandene Kenntnisse über die Bedeutung des Begriffs Schwebung sowie seine Ursache und Wirkung.

Hier handelt es sich jedoch um zwei verschiedene und meiner Meinung nach auch relativ deutlich zu trennende Ansätze: einerseits bietet der vorstehend dargestellte Versuch die Möglichkeit, das Phänomen Schwebung zu untersuchen und die Inhalte mit den Schüler zu erarbeiten, andererseits kann der exakt gleiche Versuch (auch wiederholt zu einem späteren Zeitpunkt) wie dargestellt jedoch auch – nun aber mit einer etwas differenzierten Ergebnisausrichtung – zur Untersuchung der Klangfarbenschwebung bei der Klangfarbenanalyse von Musikinstrumenten verwendet werden.

Als Sozialform bietet sich zur Durchführung der Versuchsanordnung die Gruppen- oder bei ausreichend vorhandenem Material bestenfalls die Partnerarbeit an. Die Aufgaben müssen meines Erachtens zur Durchführung als Schülerexperiment bei diesem Versuch aber sehr deutlich formuliert werden – ein klarer methodischer Schwerpunkt liegt also auf dem Experimentieren und der Kommunikation.

Aufgrund fehlender Materialien kann der Versuch – mit einer angemessenen Vorbesprechung und anschließender Reflexion versehen – aber mit Sicherheit auch problemlos als Demonstrationsexperiment durchgeführt werden.

➤ Klangfarben

Zur Untersuchung (eines) der (Haupt-) Gründe für die unterschiedlichen Klangfarben von Musikinstrumenten kann eine Frequenzanalyse der Instrumente im Unterricht durchgeführt werden. Unter Zuhilfenahme eines Stimmgeräts wird auf verschiedenen Musikinstrumenten

jeweils der gleiche Ton – beispielsweise a^1 mit 440 Hz – erzeugt. Die Auswahl der Musikinstrumente sollte bestenfalls ein Instrument jeweils einer



Instrumentengattungen enthalten und so erfolgen, dass in der Auswahl Instrumente mit für die Schüler (welche teilweise keine große musikalische Vorbildung haben) klar wahrnehmbarem unterschiedlichem Klang vorhanden sind. Im dargestellten Beispiel sind dies neben der Stimmgabel die Flöte, die Gitarre, die Geige, das Klavier, das Cembalo sowie die Snare Drum eines Schlagzeuges. Mit einem Universalmikrofon werden nun die Schwingungen

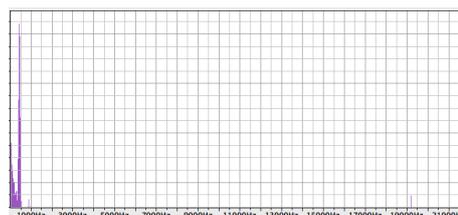


gemessen und über ein Frequenzanalyseprogramm (wie beispielsweise CASSY-lab, WaveLab oder Audacity) im Computer erfasst. Bei der Analyse der gesamten Frequenzspektren der – auf jeweils 440 Hz “gestimmten“ – Töne der unterschiedlichen Musikinstrumente können nun erheblich Unterschiede betrachtet

werden: bei der **Stimmgabel** weist das Frequenzspektrum einen deutlich ausgeprägten Peak bei 440 Hz aus.

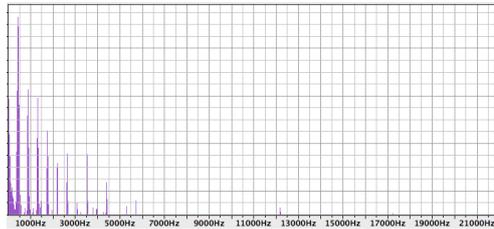
Eventuelle weitere (Ober-) Schwingungen sind nur marginal zu erkennen, grundsätzlich aber vernachlässigbar. Die

etwas deutlicher ausgeprägten Peaks in

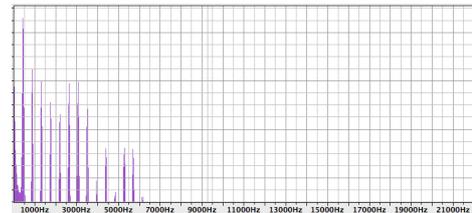


Frequenzbereichen unter 440 Hz sind hauptsächlich auf vom Mikrophon zusätzlich erfasste Geräusche (wie beispielsweise die Lüftung des Computers, Luft- und Nebengeräusche im Raum, oder Hintergrundgeräusche von Außerhalb) zurückzuführen, welche je nach Ort und Umgebung der Versuchsdurchführung mehr oder weniger deutlich vorhanden sind, aber für die Analyse keine Rolle spielen. Dies muss (mit) den Schülern entweder in Vorhinein oder versuchsbegleitend angemessen kommuniziert und diskutiert werden.

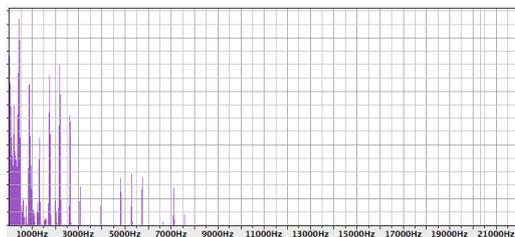
Bei der Frequenzanalyse des von der **Flöte** gespielten Tons ergibt sich bereits ein deutlich anderes Bild. Während auch hier die Grundschiwingung von 440 Hz den am deutlichsten ausgeprägten Peak bildet, sind hier des Weiteren noch einige deutlich ausgeprägte Oberschwingungen zu erkennen. Die Intensität der jeweiligen Oberschwingungen ist im Vergleich zu der Grundschiwingung jedoch relativ gering. Ein ganz ohne Vibrato gespielter Flötenton (vgl. Kapitel II.3) ist der einem Sinuston am nächsten kommende mit einem Musikinstrument erzeugbare Ton.



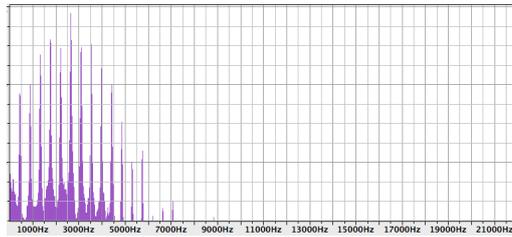
Bei der Analyse des mit der **Geige** erzeugten musikalischen Tons mit der Grundfrequenz von 440 Hz ist bereits ein deutlich stärkeres Vorkommen von Obertönen mit deutlich höherer Intensität zu beobachten. Während die immerhin 12. Harmonische Oberschwingung noch beinahe eine Intensität von rund einem Drittel der Intensität der Grundschiwingung erreicht,



ist dies bei der 1., 2., 5. und 6. Oberschwingung sogar mehr als die Hälfte. Die aus Sicht der Bauart ähnlich konzipierte **Gitarre** weist ebenso ein breites Spektrum an Oberschwingungen auf. Unter anderem aufgrund der unterschiedlichen stark ausgeprägten Resonanzfrequenzen des Korpus weist das Spektrum im Hinblick auf die Oberschwingungen aber deutliche Unterschiede auf. Während hier die 1., 3. und 4. Oberschwingung sehr stark ausgeprägt sind (mehr als die Hälfte der Intensität der Grundschiwingung), haben die 2. und besonders die 6. Oberschwingung im Vergleich zur Geige eine



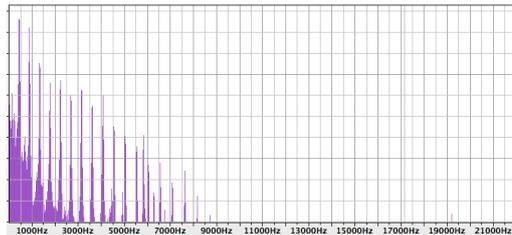
verschwindend geringe Intensität. Darüber hinaus besitzen die Oberschwingungen bis zur insgesamt 16. eine relativ große Intensität. Spielt man den gleichen Ton auf der gleichen Gitarre noch einmal, jedoch gekoppelt an ein beliebiges Effektgerät (umgangssprachlich oft: "Verzerrer"), ergibt sich eine – durch das Effektgerät bewusst erzeugte – drastische Verschiebung der Intensitäten der Oberschwingungen:



Hier ist zu beobachten, dass die ersten zehn Oberschwingungen sogar eine deutlich höhere Intensität als die Grundschwingung selbst aufweisen.

Diese wird dennoch bei der Rezeption aufgrund der Aufteilung der eingehenden Schallwellen in verschiedene Frequenzbündel in unserem Ohr (vgl. Kapitel II.5.1 "Grundtonerkennung") als Grundton wahrgenommen. Das – besonders in der Live-Rockmusik oft vorkommende – Erzeugen von imitierten Klängen anderer Instrumente mit der Gitarre nutzt diese Eigenschaft: das Effektgerät sorgt für eine Intensitätsverschiebung der Obertöne, welche dann dem Frequenzspektrum des zu Imitieren gewünschten Instrumentes ähneln.

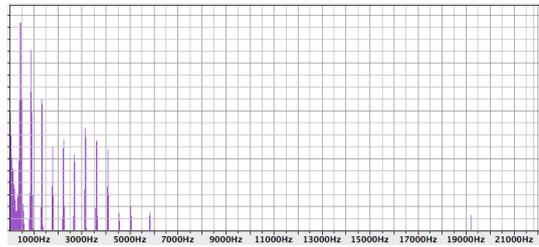
Das Frequenzspektrum des **Klaviers** weist ein sehr gleichmäßiges Vorhandensein von Harmonischen Obertönen auf. Diese sind (mess- und



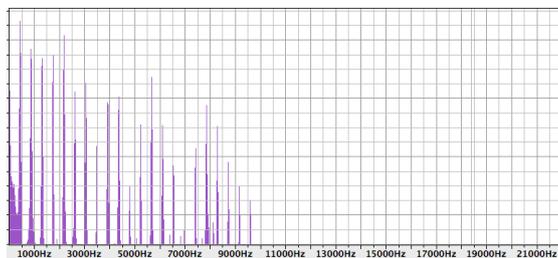
auswertbar) bis zum 18. Harmonischen Oberton auch mit relativ hohen Intensitäten sehr deutlich ausgeprägt. Hier ist ein deutlicher Unterschied der Resonanzfrequenzen des Klaviers im

Vergleich zu beispielsweise den Saiteninstrumenten Gitarre und Geige zu erkennen. Darüber hinaus spielen die nach Anspielen einer Saite durch Resonanz teilweise mitangeregten weiteren Saiten des Klaviers eine entscheidende Rolle für die Intensitäten der Oberschwingungen und somit das Klangbild des Instruments. Neben der (in Kapitel II.5.2 ausgeführten) Klangfarbenschwebung durch die Phasenverschiebung ist am Beispiel des Klaviers auch noch ein weiterer interessanter Effekt zu beobachten: die Intensität eines angespielten Tons nimmt grundsätzlich mit der Zeit gleichmäßig ab, jedoch verändert der Ton beim so genannten Verklingen – für die meisten deutlich hörbar – relativ konstant seinen Klang.

Dass die Intensitäten der einzelnen Schwingungen des gesamten Spektrums nicht alle gleichmäßig abnehmen, lässt sich mit dem Abgriff des Frequenzspektrums zu einem geringfügig versetzten Zeitpunkt (konkret 0,5 Sekunden) deutlich erkennen: die Intensität der 3., 4., 5., 10. und 11. Oberschwingung hat im Vergleich zu den anderen deutlich schneller abgenommen. Dieser (grundsätzliche) Effekt lässt sich zu allen weiteren Zeitpunkten während des Erklings des Tons mit jeweils unterschiedlicher Ausgestaltung der Intensitätsverschiebung beobachten.

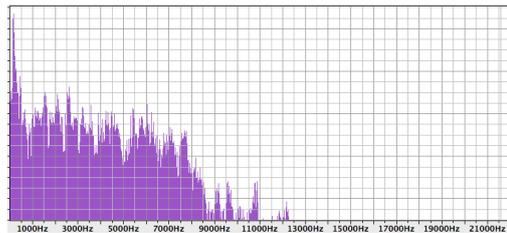


Das **Cembalo** weist eine vergleichbare Ausprägung von messbaren Oberschwingungen auf wie das Klavier. Jedoch ist hier sogar bis zur 21. Oberschwingung eine deutliche Intensität zu messen. Darüber hinaus ist die beim Klavier zu beobachtende, mit dem numerischen Anstieg der Oberschwingungen einhergehende sinkende Intensität derer des Cembalos



nicht vergleichbar. Die 5., 13. und 18. Oberschwingung weisen jeweils eine viel deutlichere Intensität auf als die vorhergehenden. Des Weiteren sind auch die numerisch höheren Obertöne deutlich stärker ausgeprägt als beim Klavier. Dieses sogenannte obertonreiche Frequenzspektrum des Cembalos ist einer der Hauptgründe für seinen charakteristischen hellen Klang.

Im Gegensatz zu den vorstehend dargestellten Instrumenten weist das Frequenzspektrum der **Snare Drum** („kleine Trommel“, „Marschtrommel“) keine Anordnung von Harmonischen Oberschwingungen zu einer Grundschwingung auf. In Verbindung mit den teilweise aperiodischen Schwingungen entsteht hier kein Klang mit einer wahrnehmbaren Tonhöhe (vgl. Kapitel II.5.1) sondern ein – physikalisches – Geräusch (vgl. Kapitel II.1.3).



Die gemessenen und erfassten Frequenzspektren aller sieben dargestellten Musikinstrumente beim Spielen des Tons a^1 mit 440 Hz sind in Anlage 8 noch einmal übersichtlich und deutlich größer dargestellt.

Die Erfassung der Töne erfolgte unter jeweils bestmöglichen akustischen Voraussetzungen mit einem qualitativ hochwertigen Bühnenmikrofon. Die Analyse und Verarbeitung erfolgte mit den Softwareprogrammen WaveLab und Audacity. Bei der Auswahl der Instrumente wurde auf die Qualität der Instrumente großen Wert gelegt – es handelt sich ausschließlich um hochwertige Musikinstrumente aus dem Musikfachhandel. Das Vorhandensein bereits auditiv wahrgenommener Qualitätsunterschiede bei Musikinstrumenten wurde unter anderem durch die Analyse der Frequenzen bestätigt – hierauf sollte auch bei der Auswahl der Instrumente für die Umsetzung in der Schule besonders geachtet werden.

Wie bereits ausgeführt, spielt die Kommunikation bei dieser Unterrichtseinheit eine bedeutende Rolle. Den Schülern müssen Grundlagen der Software sowie fachgerechter Aufbau und Durchführung der Messungen inhaltlich angemessen vermittelt werden. Das gewählte Unterrichtsprinzip ist hier exemplarisch, da über eine Auswahl von Musikinstrumenten eine generelle Aussage über den Einfluss der Harmonischen Oberschwingungen auf die Klangfarbe aller Musikinstrumente getroffen werden soll. Grundsätzlich wird den Schülern hier ermöglicht, entdeckend und forschend zu lernen, es handelt sich bei der Methode aber eher um einen problemorientierten Unterricht: Lücken werden durch mehr oder weniger selbständige Arbeit geschlossen, Probleme werden gelöst und Komplexes wird vereinfacht. Eine als klassisches Demonstrationsexperiment angelegte Durchführung fördert durch eine lange Durchführungszeit mit Sicherheit eher das Potential für Unaufmerksamkeit und ist damit keine Alternative. Entscheidend für die Qualität der Arbeit der Schüler (bestenfalls in Kleingruppen oder Partnerarbeit) ist aber mit Sicherheit die Führung und Moderation durch den Lehrenden. Die Einweisung und betreuende Begleitung durch den Lehrenden sollte so intensiv als nötig, aber so gering als möglich ausfallen, um das entdeckende und forschende Lernen und den Erkenntnisgewinnungsprozess bei den Schülern nicht zu hemmen.

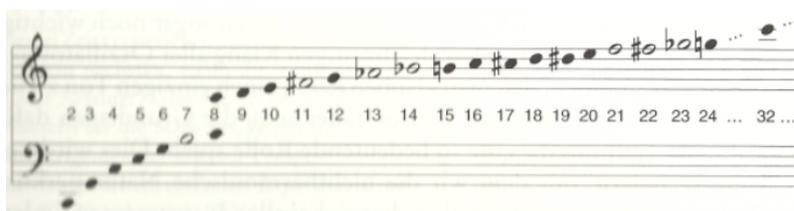
IV. Frequenzverhältnisse in der musikalischen Praxis

Der Hauptteil der Arbeit umfasste das akustische Phänomen der Harmonischen Oberschwingungen – sowohl seine fachwissenschaftlichen physikalischen Grundlagen, als auch einige didaktische und methodische Ansätze zur Umsetzung der Thematik im Unterricht. Hier wurde bereits eine Verknüpfung zum Fach Musik angelegt, besonders im Bezug auf die Klangfarben von Musikinstrumenten. Im Folgenden soll nun die Bedeutung der Harmonischen Oberschwingungen sowie der Frequenzverhältnisse von Tönen in einigen weiteren Bereichen der Musik dargestellt werden, um Ansatzmöglichkeiten für die Implementierung des Themas Akustik, spezieller der Harmonischen Oberschwingungen sowie Frequenzverhältnissen von Tönen im Musikunterricht zu bieten. Hierbei werden exemplarisch einige Möglichkeiten umrissen und in relativ kurzer Form dargestellt – ohne diese jedoch fachwissenschaftlich zu sehr zu vertiefen.

1. Die Obertöne

1.1 Die Obertonreihe

Die Partialton-, Teilton oder harmonische Reihe wird meistens synonym mit dem Begriff Obertonreihe bezeichnet, obwohl der Begriff Oberton sowohl für Harmonische als auch für Nicht-Harmonische (die Frequenzen der Obertöne sind hier keine ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz) Oberschwingungen steht. Diese harmonische Teiltonreihe (mit den Frequenzverhältnissen von 1:2:3:4:5...) lässt sich musikalisch notiert – konkret bezogen auf den nicht abgebildeten Grundton Kontra-C – folgendermaßen darstellen:



Hierbei handelt es sich jedoch nur um eine – physikalisch betrachtet – näherungsweise Notation der harmonischen Obertöne, da die Teiltöne mit der

sieben- (die so genannte Naturseptime), elf-, dreizehn-, und vierzehnfachen Frequenz sowie die Töne ab der siebzehnfachen Frequenz aufwärts nicht exakt Tönen aus unserer tonalen Skala entsprechen. Diese Abweichung um einige Cents (vgl. Kapitel IV.4 "Stimmung") wird meist durch den Zusatz eines Pfeils in die Richtung der Abweichung über oder unter dem Notenkopf dargestellt. Eine bedeutende Rolle in der Musik spielen die Obertöne unter anderem bei den Aliquotregistern der Orgel und dem Spielen von (oder zur Stimmung beispielsweise der Gitarre genutzten) Flageolettönen. Große Bedeutung hat die Obertonreihe auch beim so genannten Überblasen bei Holz- und Blechblasinstrumenten: hier werden (bei Blechblasinstrumenten sogar bis deutlich über den 20. Harmonischen Oberton möglich) durch eine spezielle Blastechnik bewusst Obertöne angeregt, durch diesen Effekt entsteht eine besondere Dynamik im Ausdruck. Viele Komponisten benutzten im Rahmen der Komposition eines Werkes diesen beschriebenen Effekt (Wagner) oder den – durch Entnahme der Dämpfung der dem angespielten Grundton entsprechenden Obertöne erzielten – Effekt (vgl. Beschreibung des Klaviers in Kapitel III ➤ Klangfarben) auf dem Klavier, die Obertöne durch Mitschwingen von Saiten gleicher Frequenz bewusst zu verstärken (Bartók).^{109,110,111,112}

1.2 Obertongesang

Auch mit der menschlichen Stimme können durch eine bestimmte erlernbare Technik einzelne Obertöne verstärkt werden. Es entsteht beim Hörer der Eindruck eines zweistimmigen Gesangs eines Darbietenden. Der renommierte Jazzmusiker Christian Bollmann ist einer der bedeutendsten beziehungsweise bekanntesten Vertreter des Obertongesang, welcher in vielen Kulturen und Kreisen gepflegt wird, aber bis heute keinen Weg in den so genannten Mainstream gefunden hat.

¹⁰⁹ vgl. Hall S. 139f.

¹¹⁰ vgl. Taylor S. 79, S.179

¹¹¹ vgl. Michels S. 56ff., S.88ff.

¹¹² vgl. von Helmholtz S. 40ff., S. 254ff.

2. Musikinstrumente und ihre Klänge

Im Rahmen der Instrumentenkunde und der Behandlung der unterschiedlichen klanglichen Wirkungsweise von Instrumenten ist die Behandlung der Ausprägung von (harmonischen und unharmonischen) Obertönen unerlässlich (vgl. ausführliche Darstellung in Kapitel II.5). Während Trommeln (mit oder ohne wahrnehmbarer Tonhöhe) neben teilweise auch harmonischen hauptsächlich unharmonische Oberschwingungen ausprägen und bei einer ohne Vibrato gespielten Flöte kaum wahrnehmbare Oberschwingungen im gesamten Frequenzspektrum enthalten sind, spielt die unterschiedliche Intensität der harmonischen Oberschwingungen bei den meisten Instrumenten eine entscheidende Rolle für die wahrgenommene Klangfarbe beim Spielen (vgl. Kapitel II.5.2). Während Saiteninstrumente (Streich-, Zupf- und Tasteninstrumente) eine besonders breite Ausprägung von harmonischen Teiltönen besitzen, spielt bei anderen Instrumenten die Anordnung der Intensitäten eine entscheidende Rolle, wie beispielsweise bei der fast ausschließlich die numerisch ungeraden Obertöne ausprägenden Klarinette oder dem Fagott, bei welchem (ähnlich dem Effekt bei der transformierten Gitarre in Kapitel III.) manche Obertöne deutlich größere Intensitäten besitzen als die Grundschwingung selbst.^{113,114}

3. Das (absolute) Gehör

Während die meisten Menschen Tonhöhen nur relativ (beispielsweise zu einem zuvor gespielten Vergleichston oder nach dem subjektiven Empfinden für hohe und tiefe Töne) hören, ist es manchen Menschen entweder angeboren oder durch Antrainieren möglich, die Tonhöhe eines gehörten Tones ziemlich genau in die tonale Skala einzuordnen und namentlich zu bestimmen. Das Ohr ist hierbei (meistens bereits aus frühkindlicher Zeit) auf bestimmte Vergleichstöne, Melodien oder Harmonien trainiert, und es kann durch die Bündelung der Frequenzen in verschiedene Bereiche im Ohr (vgl. Kapitel I.3) anhand der die Tonhöhe bestimmenden Grundschwingung (vgl. Kapitel II.5.1) deren Frequenz

¹¹³ vgl. Kuttruff S. 206ff.

¹¹⁴ vgl. Dickreiter S. 52ff., S.78ff., S. 94ff., S. 126ff., S. 148ff., S. 160ff.

in Relation zu diesen Vergleichsfrequenzen setzen. Hierdurch kann bei der Verarbeitung des akustischen Signals bereits eine bis auf wenige Cents (vgl. Kapitel IV.4) genaue Bestimmung der Frequenz erfolgen, welche unterbewusst bereits automatisch an eine Notenbezeichnung unserer tonalen Skala gekoppelt ist. Da dies bereits während des Verarbeitungsprozesses geschieht, ist der gehörte Ton nach Abschluss dieses Prozesses dann im Gehirn bereits mit der zugeordneten Notenbezeichnung verknüpft. ^{115,116,117}

4. Stimmungen

Manchen Schülern – und mit großer Wahrscheinlichkeit eventuellen Klavierspielenden – ist möglicherweise der Begriff des 'wohltemperierten' Klaviers bezüglich des Werks von Johann Sebastian Bach geläufig. Dieser – sich auf eine Möglichkeit der Stimmung eines Tasteninstrumentes beziehende Begriff – hat mit den Frequenzverhältnissen von Tönen zueinander zu tun.

Neben der (wohl-)temperierten Stimmung, existieren des Weiteren die pythagoreische Stimmung, die reine Stimmung, die mitteltönige sowie die gleichstufige Stimmung. Diese Stimmungssysteme unterscheiden sich in der Anordnung der Frequenzen der z.B. von den einzelnen Tasten belegten Töne. Hier existieren teilweise drastische Unterschiede im Klang, welche auf die teilweise großen Unterschiede der Frequenz je nach Stimmsystem im Vergleich zu nominell gleichen Tönen eines anderen Stimmsystems zurückgehen. Es fand im Laufe der Jahrhunderte ein Wandel in der Anwendung der Stimmsysteme statt, der einerseits flexibleres Vorgehen für den Spielenden ermöglicht, andererseits aber zu einer Art Verwässerung der Tonartcharakteristiken und einer drastischen Anpassung der menschlichen Hörempfindung von beispielsweise konsonant und dissonant oder klar und dumpf geführt hat. ^{118,119}

¹¹⁵ vgl. Hall S. 119ff.

¹¹⁶ vgl. Kuttruff S. 231ff.

¹¹⁷ vgl. Eska S. 53ff.

¹¹⁸ vgl. Kirnberger S. 179ff. (dritte Abteilung)

¹¹⁹ vgl. Ziegenrucker S. 10f.

4.1 Pythagoreische Stimmung

Bei der pythagoreischen oder quintenreinen Stimmung werden die Töne und ihre Abstände zueinander über Quinten bestimmt. Die aufeinanderfolgenden Quinten haben einen exakten Abstand von 702 Cent(€). Unsere 12 Halbtöne umfassende Oktave – mit einem Stimmungssystem-übergreifenden Frequenzverhältnis von 2:1 – wird nach Herrmann von Helmholtz im 19. Jahrhundert in 1200 € unterteilt. Im Gegensatz zu den Quinten und Quartan ergeben sich bei dieser Stimmung beispielsweise bei der Terz große Unreinheiten. Da diese aber wie die Sekunde, Sexte und Septime im Mittelalter als dissonant empfunden wurden und faktisch keine Anwendung fanden, konnte dies vernachlässigt werden. Da die Quinten auf 702–€ statt 700–€ gestimmt wurden, ergab sich nach elf reinen Quinten das Problem des so genannten pythagoreischen Kommas (welches etwa einem Achtelton entspricht), um das sich eigentlich enharmonisch verwechselbare Töne nun plötzlich unterschieden, welches in der 12., so genannten Wolfsquinte ausgeglichen werden musste. Lag die Wolfsquinte bis zum Spätmittelalter noch zwischen Gis und Es, gab es mit den Änderungen der Hörgewohnheiten in der Renaissance eine Verschiebung auf die Quinte zwischen H und Fis um nun auch rein klingende Terzen spielen zu können (vgl. auch Anlage 9).^{120,121,122}

4.1.1 Modalität und Tonalität

Zu den veränderten Hörempfindungen trug unter anderem die Entwicklung von der modalen zur tonalen Musik bei. Während von der Antike bis ins Spätmittelalter modale Musik, welche auf Tonskalen mit unterschiedlich angeordneten Ganz- und Halbtonschritten (den Modi, oft fälschlicherweise Kirchen“tonart“) basiert, vorherrschend für die – meist kirchlich geprägte und hauptsächlich einstimmige – Musik war, so entwickelte sich bis zu den Zeiten der Wiener Klassik im 18. Jahrhundert langsam ein Übergang zu der heute allgemein verwendeten Dur-Moll-Tonalität. Unter anderem die vierstimmigen

¹²⁰ vgl. Hall S.420ff.

¹²¹ vgl. von Helmholtz S. 179ff.

¹²² vgl. Riemann S.111ff.

Choralsätze aus Zeiten der Renaissance trugen einen erheblichen Teil zu dieser Entwicklung bei. Unter anderem die damit einhergehende Entwicklung der Mehrstimmigkeit hatte ein Bedürfnis nach Auflösung von Dissonanzen zur Folge. Neben der Quinte und der Oktave entwickelte sich nun die große Terz aber im Gegensatz zur Vergangenheit als konsonantes Intervall, jedoch rein gestimmt mit dem Frequenzverhältnis von 5:4 (also 80:64 statt pythagoreisch durch die Stimmung nach Quinten mit einem Frequenzverhältnis von 81:64).¹²³,¹²⁴

4.2 Reine und mitteltönige Stimmung

Die eben beschriebene Entwicklung führte zur reinen Stimmung (vgl. Anlage 3), bei der neben den Quinten auch die großen Terzen – zu einem großen Teil – mit den Frequenzverhältnissen 3:2 (Quint) und 5:4 (Terz) rein gestimmt wurden. Hierdurch ergeben sich neben den erhaltenen sechs perfekt gestimmten Dreiklängen nur aber einige analog der pythagoreischen Stimmung extrem dissonant klingende Terzen sowie Quinten. Die daraus entstandene mitteltönige Stimmung wurde speziell für Tasteninstrumente entwickelt, da diese nicht – wie andere Instrumente oder die Stimme – in der Lage waren, auf Tonhöhenänderungen bei Harmoniewechsel flexibel zu reagieren. Die mitteltönige Stimmung stellte im Prinzip eine absolut reine Stimmung für Tasteninstrumente dar, dies jedoch aber nur für einige (durch die Stimmung festgelegte) Tonarten (vgl. auch Anlage 9).^{125,126}

Hier findet sich meines Erachtens eine sehr interessante Möglichkeit, die enorme Bedeutung der Frequenzverhältnisse eines Stimmsystems für die Interpretation von Stücken aus der Zeit des Stimmsystems sowie Zeiten anderer Stimmsysteme zu erarbeiten. Wird mit den Schülern auf beispielsweise einem pythagoreisch gestimmten Instrument (oder per Software moduliert) ein den Schülern sehr vertrautes Stück musiziert, können Einfluss und Bedeutung der Stimmung und der zugrunde liegenden Frequenzverhältnisse über die Musik

¹²³ vgl. Riemann S. 7ff., S.17ff., S.51ff.

¹²⁴ vgl. Hall S. 415ff.

¹²⁵ vgl. Hall S. 415ff.

¹²⁶ vgl. Michels S. 16ff., S.89

erarbeitet (sowohl melodisch als auch harmonisch) und dann mit fachwissenschaftlichem physikalischem Hintergrund verknüpft werden.

4.3 Wohltemperierte und gleichstufige Stimmung

Von Werckmeister, Kirnberger und anderen Musiktheoretikern wurden diverse temperierte Stimmungen entwickelt (und unter dem Sammelbegriff 'wohltemperiert' zusammengefasst, vgl. Anlage 3), welche das Ziel hatten, möglichst viele gleiche Intervalle auf den gleichen Abstand zu stimmen (z.B. 11 von 12 Quinten, 8 von 12 großen Terzen, 9 von 12 kleinen Terzen) und die Wolfsquinte zu beseitigen sowie den Quintenzirkel zu schließen, also das enharmonische Verwechseln und das Transponieren zu ermöglichen. Einige Intervalle werden hierzu absichtlich verstimmt, also 'temperiert'. Faktisch handelt es sich hierbei also nicht um Stimmung, sondern um eine Temperierung, da eine Stimmung auf einem Schemata mit reinen Intervallen aufbaut. Die Abweichung sind grundsätzlich so gering, dass sie vom Ohr zwar deutlich erkannt, aber toleriert werden. Größte Errungenschaft der Temperierungen (oder temperierten Stimmungen) war es, dass nun alle 24 Tonarten (12 Dur-Tonarten und 12 Moll-Tonarten) aus unserem 12 Halbtöne umfassenden System mit einer Stimmung gespielt werden konnten. Bei der heutzutage hauptsächlich verwendeten gleichstufigen Stimmung handelt es sich auch um eine Temperierung beziehungsweise temperierte Stimmung. Die 12 Halbtöne (mit insgesamt 1200-€) werden in gleichen Schritten von jeweils 100-€ gestimmt, was zur Folge hat, dass – außer der Oktave – kein Intervall mehr rein ist, also eine natürliche Intervallproportion aufweist. Der Vorteil gegenüber den bisherigen wohltemperierten Stimmungen ist, dass nun alle jeweiligen Intervallverhältnisse (Sekunden, Terzen, Quartan,...) komplett identisch sind. Durch das komplette Fehlen von reinen Intervallen ging nun aber die jeweilige Tonart-Charakteristik (vgl. Kapitel IV.4.3.1) verloren, da nun alle gespielten Tonarten (zwar in der Höhe versetzt, aber) gleich klingen.^{127, 128, 129}

¹²⁷ vgl. Hall S. 421ff.

¹²⁸ vgl. Michels S. 16f., S. 36ff., S.90f.

¹²⁹ vgl. Kirnberger S. 179-188

4.3.1 Charakteristika der Tonarten

Auch wenn es viele Kritiker der Tonart-Charakteristika gibt, so ist es doch allgemein anerkannt, von individuellen Charakteristika der verschiedenen Tonarten, hauptsächlich zu Zeiten des reinen (und teilweise des mitteltönigen) Stimmsystems, zu sprechen. Viele renommierte Komponisten des Barocks und der Wiener Klassik bis hin zur Romantik benutzten (auf rein gestimmten Instrumenten) für den Ausdruck gewisser Stimmungen wie beispielsweise Glück, Wut oder Trauer meist die gleichen spezifischen Tonarten. Dieser Unterschied in der Wahrnehmung von unterschiedlichen Tonarten liegt, neben unserer Konditionierung auf die Basis des Quintenzirkels (C-Dur) und der, je nach gesetzten Vorzeichen, kleineren oder größeren Abweichung zu dieser, hauptsächlich an den in vorigem Kapitel dargestellten unterschiedlichen Frequenzverhältnissen der Intervalle. Außer bei der – heute hauptsächlich angewendeten – gleichstufigen Stimmung, bei der alle Intervallproportionen identisch sind, gab es in jedem Stimmungssystem mehr oder weniger große Frequenzunterschiede eines Intervalls in verschiedenen Tonarten.^{130,131,132} Diese Frequenzunterschiede führten dann verständlicherweise zu einer anderen Anordnung der Intensitäten der Obertöne des Intervalltons (auf den Grundton bezogen) der Tonart, unter anderem durch geringere oder verstärkte Resonanz (über andere Saiten oder den Korpus) der angeregten Oberschwingungen. Dadurch findet hier beim Wechsel in eine andere Tonart durch die Verschiebung der Intensitäten der Obertöne auch eine geringfügig wahrnehmbare Änderung der Klangfarbe statt, welche vom Hörer – analog den unterschiedlichen Klangfarben bei unterschiedlichen Musikinstrumenten – als Klangfarbe der jeweiligen Tonart, welche dieser einen charakteristischen, von den anderen Tonarten leicht differenzierten Klang verleiht, wahrgenommen wird (vgl. Kapitel II.5.2 und III., hier speziell ➤ Klangfarben). Dieser Effekt ist verglichen mit den unterschiedlichen Klangfarben von Instrumenten bei den unterschiedlichen Klangfarben der Tonarten aber deutlich geringer.

¹³⁰ vgl. Anlage 10: <http://www.faz.net/s/Rub117C535CDF414415BB243B181B8B60AE/Doc~E3B83E1D10AE04B23ADB5B9332CCE0D72~ATpl~Ecommon~Spezial~Afor~Eprint.html> (Stand 27.09.2010)

¹³¹ vgl. Michels S.21, S.86ff.

¹³² vgl. Riemann S. 470ff., S.111ff.

4.3.2 Johann Sebastian Bach und das wohltemperierte Klavier

Das wohl bekannteste Werk, welches auf die speziellen Tonartcharaktere ausgelegt ist, ist das 'wohltemperierte Klavier' von Johann Sebastian Bach aus dem Jahr 1722. Für Bach bot sich zum ersten Mal die Möglichkeit, Kompositionen über das gesamte Spektrum des Quintenzirkels zu fertigen, welche ohne neuerliche Stimmung des Instruments gespielt werden konnten. Obwohl die Tonartcharaktere im Gegensatz zur reinen Stimmung bereits bei der wohltemperierten Stimmung deutlich unschärfer geworden waren, so waren sie doch immer noch erkenntlich hörbar, worauf Bach seine Kompositionen für das Werk durch alle 24 Dur und Moll-Tonarten aufbaute. In der heute gebräuchlichen gleichstufigen Stimmung ist dies leider nicht mehr zu hören, ein Präludium oder eine Fuge aus dem 'Wohltemperierten Klavier' könnte auf einem gleichstufig gestimmten Klavier oder Flügel also beliebig in eine andere Tonart transponiert werden und würde den Höreindruck (von der veränderten Höhe des Stückes durch die Transposition abgesehen) nicht ändern. Aus diesem Grund wird das 'wohltemperierte Klavier' auch heutzutage häufig auf temperierten Clavichorden oder Cembali gespielt.^{133,134}

5. Von der Schallplatte über die CD zu MP3

Eine weitere interessante Möglichkeit, die Bedeutsamkeit der Frequenzen und Frequenzverhältnisse im Musikunterricht zu implementieren, ergibt sich über die Veränderung der Wiedergabemedien. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts hatte sich die Schallplatte (LP) zuerst aus Schellack und ab Mitte des 20. Jahrhunderts aus Polyvinylchlorid (PVC) – umgangssprachlich kurz als Vinyl bezeichnet – gefertigt, als das hauptsächliche Wiedergabemedium für Musik etabliert. Auf eine Standardschallplatte können (auf Vorder- und Rückseite) etwa 60 Minuten geprägt und somit gespeichert werden. Für optimalen Klang

¹³³ vgl. Heinmann S. 1ff.

¹³⁴ vgl. <http://www2.nau.edu/tas3/wtc/wtc.html> (englisch) (Stand 27.09.2010)

und Wiedergabe werden die Schallplatten mit einer Samplingrate von 600 bis 800 kHz abgetastet. Auch weitere Faktoren, wie die Qualität des Schliffs der Tonabnahmenadel oder die bestmöglich machbare Unterdrückung des Rillengeräusch beim Abspielen der Schallplatte, sowie die Qualität der Geräte beim Einspielen und die Intensität der Nachbearbeitung im Tonstudio vor der Prägung spielen eine wichtige Rolle für die Qualität der Wiedergabe. Die Compact Disc (CD) speichert die akustischen Signale im Gegensatz zur analogen Speicherung der LP digital. Hier kommt es bei Digitalisierung von analog gespeicherter Musik einerseits zu negativen Einflüssen auf die Qualität der Aufnahme durch so genannte Quantisierungsfehler (welche bei Digitalisierung analoger Aufzeichnungen mathematisch begründet sind), andererseits treten positive Effekte in der Wiedergabequalität auf, unter anderem durch das Fehlen von Nebengeräuschen wie dem Lauf der Nadel in der Rillenspur oder durch feine Staubpartikel auf der LP bedingt. Die Signale der CD werden mit einer Samplingrate von 44,1 kHz abgetastet, die gespeicherte Datenmenge bei einer Laufzeit von 60 Minuten entspricht etwa 600 bis 700 Megabyte (MB). Im Vergleich dazu entspricht die Datenmenge einer mit 800 kHz abgetasteten LP rund 12.000 MB (12 Gigabyte), ist also rund 15 bis 20 mal so hoch. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass bei der Aufnahme der CD einerseits fehlende Nebengeräusche, andererseits sehr hohe und sehr tiefe Frequenzen (welche vom Menschen grundsätzlich nicht wahrgenommen werden können) entfernt wurden. Während der (von vielen subjektiv empfundene) bessere, wärmere und echtere Klangeindruck der LP im Gegensatz zur CD grundsätzlich eher in dem als charmant empfundenen Gesamtklang (Musik sowie Nebengeräusche) begründet liegt, ist im Vergleich zu komprimierten Audio-Formaten wie zum Beispiel MP3 ein deutlicher Qualitätsunterschied zu hören. Ein 60minütiges Album im MP3-Format entspricht – je nach Kompressionsgrad – einer Datenmenge von 80 bis 180 MB, hierbei werden neben den hohen und tiefen Frequenzen (analog der CD, hier jedoch drastisch verstärkt: das gesamte Frequenzspektrum ist deutlich geringer als bei der CD) auch Frequenzen gefiltert, welche sich nur marginal von den Frequenzen anderer Töne unterscheiden. Diese sind vom menschlichen Ohr grundsätzlich nicht als verschiedene Töne zu unterscheiden, jedoch gehen hierdurch Schwebungseffekte (vgl. Kapitel III. ➤ Schwebung) innerhalb des Gesamtklangs

verloren. Darüber hinaus werden die Frequenzen innerhalb des Musikstückes sozusagen 'ausgedünnt', was zu der Wahrnehmung eines weniger vollen Klangs führt.^{135, 136, 137, 138}

Ich habe mit insgesamt 16 Personen verschiedener Altersgruppen einen darauf bezogenen Versuch durchgeführt (siehe Fragebogen in Anlage 11) : ich spielte jeder Versuchsperson (teilweise mehrfach) das Stück 'Stairway to heaven' der britischen Rockband 'Led Zeppelin' jeweils mit gleicher Lautstärke (als hohe Zimmerlautstärke einzuordnen) vor: einerseits auf einem hochwertigen Plattenspieler die Erstprägung der Schallplatte aus dem Jahr 1971 und andererseits eine 7,5 MB große MP3-Version des etwa 8 Minuten dauernden Stückes. Die Wiedergabe erfolgte sowohl über den gleichen Verstärker als auch die gleichen Boxen. Die Versuchspersonen hatten keine Sicht auf das jeweils benutzte Abspielgerät. Während eine Versuchsperson die MP3-Version als 'normal' bezeichnete und der Schallplatten-Version attestierte 'es stimme doch irgendwas nicht', ergab sich grundsätzlich ein eindeutig anderes Meinungsbild. Möglicherweise ist die Aussage der 17jährigen Versuchsperson darauf zurückzuführen, dass bisher keinerlei musikalische Hörerfahrungen mit LPs gemacht wurden und der Klang von Musik im MP3-Format bereits als 'normal' konditioniert ist. Bei allen anderen Versuchspersonen (zwischen 14 – was eben getroffener Aussage widersprechen könnte – und 57 Jahren) wurde jedoch der Schallplatten-Version eine deutlich höhere Klangqualität zugesprochen. Bei den ruhigen Passagen, die vom Beginn des Stückes an dessen Hauptteil ausmachen, wurden der Schallplatten- im Gegensatz zur MP3-Version Prädikate wie 'voller', 'weicher', 'klarer', 'brillanter', 'runder' und 'angenehmer' verliehen. Die gleiche Passage in der MP3-Version wurde unter anderem als 'mechanischer', 'scheppernd' und 'unecht' bezeichnet. Bei den schnelleren und stärker instrumentierten Passagen gegen Ende des Stückes wurde die Schallplatten-Version unter anderem als 'intensiver', 'mitreißender' und 'dramatischer' bezeichnet, die der MP3-Version beispielsweise als 'dünner', 'blechern' und 'hohl'.

¹³⁵ vgl. Pierce S. 143ff.

¹³⁶ vgl. Kutruff S. 420ff.

¹³⁷ vgl. Meyer S. 284ff.

¹³⁸ vgl. Hall S. 349ff.

V. Analyse und Fächer verbindende Ansätze

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, das physikalische Thema Schall bzw. die Akustik als Lehre vom Schall, speziell bezogen auf den Bereich der Harmonischen Oberschwingungen, bewusst mit dem Fach Musik zu verknüpfen und als musikalische Physik (wie im Titel der Arbeit) im NWA- bzw. Physikunterricht sowie auch als physikalische Musik im Musikunterricht zu implementieren. Nach der physikalisch und physiologisch fachwissenschaftlichen Darstellung in Kapitel I. und II. und neben der Auswahl praxisrelevanter musikalischer Bereiche, welche von den Harmonischen Oberschwingungen nachhaltig beeinflusst werden, wurde die Vielfalt an Möglichkeiten für Ansätze eines Fächer verbindenden Unterrichts sowie konkrete Ansatzmöglichkeiten für potentielle Unterrichtseinheiten in Kapitel III. bereits dargestellt. Hier ließe sich aber mit Sicherheit eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten aufzeigen, um das Thema Schall – auch speziell auf das Thema Harmonische Oberschwingungen bezogen – physikalisch und musikalisch sinnvoll im Unterricht zu verbinden.

Darüber hinaus bietet sich bei konkret gewähltem Thema aber eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten für einen Fächer verbindenden, fachübergreifenden und Fächer integrierenden Unterricht.

Die im Bildungsplan ausgewiesenen Ziele für Kompetenzen und Inhalte im Fach **Physik**, hier beispielsweise konkret der “praktische und theoretische Umgang mit dem Phänomen Schall und seiner Ausbreitung“, weisen bereits – eine in meinen Augen fast zwingende – Verknüpfungen zur **Biologie** auf, konkret die im Bildungsplan ausgewiesenen Kompetenz- und Inhaltsziele “Nachvollzug der Leistungen der menschlichen Sinnesorgane“ sowie “Funktionsweise des menschlichen Nervensystems“. Die zu Beginn der Arbeit beschriebenen Inhalte zur physikalischen (Kapitel I.1, I.2 und II.) und physiologischen (Kapitel I.1 und I.3) Akustik bieten hier ein enormes Potential für eine zeitnahe Verzahnung der (physikalischen und physiologischen) Akustik im Physik- und Biologie-, beziehungsweise im NWA-Unterricht, oder möglicherweise sogar für eine im

Voraus geplante zeitgleiche Behandlung des Themas im Fächer verbindenden Unterricht.

Die psychologische Akustik (Kapitel I.1) kann darüber hinaus im Fach **Mensch und Umwelt** als Beispiel für "Einflüsse der Umwelt (Lärm, Stress, Medien) auf die eigenen Gesundheit" in Verbindung mit dem Thema Schall beziehungsweise Akustik implementiert werden.

Verknüpfungen zum Fach **Musik** wurden bereits in einer Vielzahl dargestellt, doch bieten sich hier – begründet durch den Bildungsplan – konkrete Kompetenz- und Inhaltsziele zur Implementierung des Themas der Harmonischen Oberschwingungen als Fächer verbindend angelegte Unterrichtseinheit. Neben der "Verständigung über Musikinstrumente" ist die "Differenzierung von Instrumentalbesetzungen" ein praktikabler Ansatz zur Behandlung des physikalischen Phänomens unterschiedlich wahrgenommener Klangfarben bei Musikinstrumenten (Kapitel II.5). Beim "Musik hören" und der "handlungsorientierten Auseinandersetzung mit Werken aus verschiedenen Epochen" ist eine – wiederum auf dem physikalischen Thema Harmonische Oberschwingungen basierende (vgl. Kapitel IV.4) – Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Stimmsystemen von Musikinstrumenten seit der Antike bis in die Gegenwart möglich. Die Auseinandersetzung mit verschiedenen "Wiedergabemedien" und die "differenzierte Stellungnahme zu unterschiedlichen Hörbeispielen" lässt eine Erarbeitung des Themas Frequenzspektren und Klang (Kapitel IV.5) als Beispiel für die physikalische Bedeutung der Frequenzspektren für die musikalische Rezeption zu. Im Bereich der "Medien (Computer, Studio)" soll "der Computer bei anspruchsvollen" bis hin zu "komplexen musikalischen Aufgaben eingesetzt werden". Hier finden sich bei der musikalischen Erarbeitung des physikalischen Themas der Oberschwingungen (Kapitel III.) über Musik- beziehungsweise Studiosoftware bereits deutliche Verknüpfungen zur **informationstechnischen Grundbildung**, wo der Bildungsplan als Kompetenzziel das "Musik mit dem Computer gestalten" ausweist. Auch die "Rolle der elektronischen Medien in der Gesellschaft" im Fach ITG lässt sich hier vor dem Hintergrund der Wiedergabemedien aus der musikalischen Praxis (Kapitel IV.5) mit entsprechend physikalischem Hintergrund erarbeiten (Kapitel IV.5).

Der Bezug zum Schulfach **Mathematik** ist bezogen auf die physikalische und musikalische Akustik sehr vielschichtig: einerseits der "funktionale Zusammenhang" zwischen der Grundschwingung und ihren Harmonischen Oberschwingungen, eine "proportionale Zuordnung" der numerischen Harmonischen Oberschwingung und ihrer jeweiligen Frequenz zur Grundfrequenz (Kapitel II.2 und II.3). Andererseits die Leitidee des "Modellierens", bei welcher die Realität mit einem – in diesem Fall mathematischen – Modell verknüpft wird. Dies trifft bei den in Kapitel III. dargestellten Experimenten selbstverständlich ebenso auf das physikalische wie auf das musikalische Modellieren zu. Am Beispiel des Cent-Systems bei den unterschiedlichen Stimmsystemen von Musikinstrumenten (Kapitel IV.4) aber wird von der physikalischen und musikalischen Realität der Frequenzzusammenhänge ein mathematisches Modell (→ eine aus 12 Halbtönen bestehende Oktave, welche das Frequenzverhältnis 2:1 aufweist, wird in 12 mal 100, also 1.200 Cents eingeteilt) erstellt, anhand dessen die Frequenzen der zu stimmenden (musikalischen) Töne und deren Verhältnisse zueinander berechnet und festgelegt werden. Hier spielt auch das "Argumentieren und Begründen durch Mathematik" eine wesentliche Rolle, da vom Exemplarischen anhand einzelner Beispiele Schlüsse auf das Allgemeine gezogen werden. Des Weiteren spielt das im Bildungsplan unter der Leitidee "Daten" dargestellte "Erfassen von Ordnung und Struktur von Grafiken und Tabellen" eine tragende Rolle bei der Untersuchung der Frequenzspektren zur Klangfarbenanalyse bei Musikinstrumenten (Kapitel II.5 und III.). Darüber hinaus können bei der Frequenzanalyse "Funktionen als Mittel zur Beschreibung von Zusammenhängen" verstehen gelernt und genutzt werden.

Grundsätzlich ist die Verknüpfung von Mathematik mit der Physik in vielen Bereichen ja bereits 'von Natur aus', also grundsätzlich gegeben. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass viele physikalische Phänomene mathematisch dargestellt beziehungsweise abstrahiert werden (können). Die vorstehend dargestellten Beispiele sollen als Ansatzpunkte verstanden werden, eine bewusste zeitnahe Verzahnung von mathematischen Kompetenzen mit physikalischen und/oder musikalischen anzustreben.

Im Schulfach **Technik** setzt der Bildungsplan unter anderem das Ziel, dass die Schüler "konkrete Problemstellungen selbständig planen, entwickeln, herstellen und optimieren" sowie "technische Zeichnungen lesen und normorientierte technische Zeichnungen als Planungsmittel erstellen und einsetzen" können. Hier ergibt sich – relativ themenunabhängig – bereits eine direkte Verknüpfung zum experimentellen Arbeiten im Fach Physik. Konkret auf das Thema Akustik bezogen liegt hier besonders für die Konstruktion 'einfacher' Musikinstrumente (Kapitel III.) eine offensichtliche Möglichkeit zur Verbindung des Physik- und Musikunterrichts mit der Technik. Auch die "Bedeutungs- und Bewertungsperspektive", das bedeutet die kritische Auseinandersetzung mit den zu verwendenden Materialien, birgt bei konkretem Thema enorm viel Potential für einen Fächer verbindenden Unterricht der Technik mit besonders Physik, Musik und Mathematik.

Im Falle des Schulfaches **Geschichte** bietet sich großes Potential für Fächer verbindenden Unterricht besonders über den im Bildungsplan dargestellten Themenbereich 2: "Lebens- und Wirtschaftsformen in der Vergangenheit". Die Entwicklung der westeuropäischen Kultur in Gesellschaft, Kunst, Architektur und Literatur von der Antike über das Mittelalter (Romanik und Gotik), die Renaissance, den Barock und die Romantik bis in die Gegenwart lässt sich sehr gut mit der (damit einhergehenden) Entwicklung der Musik verknüpfen. Während der Antike, dem Mittelalter (Gregorianik, Notre-Dame-Epoche und Ars Nova), der Renaissance, dem Barock, der Wiener Klassik und der Romantik und oft speziell während der (meist fließenden) Übergänge zwischen den Epochen gab es auch sehr viele – oftmals den Veränderungen der Gesellschaft angepasste oder durch diese (mit-) begründete – Veränderungen in der Musik, ihrer Intention und Rezeption. Während beispielsweise im frühen Mittelalter (Gregorianik) Musik nahezu ausschließlich liturgischer Natur war, entwickelte sich im Hochmittelalter (Notre-Dame-Epoche) beispielsweise der Minnesang und im Spätmittelalter (Ars nova) die Mehrstimmigkeit, während sich beispielsweise in der Renaissance die Instrumentalmusik mehr und mehr durchsetzte. Damit einher ging auch eine Anpassung der (zuerst ausschließlich für kirchliche, später dann auch für weltliche Zwecke benutzten)

Musikinstrumente und der benutzten Stimmsysteme (Kapitel IV.4): über die pythagoreische (Musik der Antike, Gregorianik und Notre-Dame-Epoche) und die reine Stimmung (Ars nova, Renaissance) setzte sich ab dem 17. Jahrhundert (Barock, Wiener Klassik) dann die wohltemperierte Stimmung durch, welche ab Beginn des 19. Jahrhunderts (Romantik) von der bis heute hauptsächlich angewandten gleichstufigen Stimmung abgelöst wurde (Kapitel IV.4).

Die gesellschaftlichen Entwicklungen bildeten sich zu einem große Teil auch in der Musik ab, beispielsweise in der Entwicklung der Musik von ihrer rein liturgischen Verwendung im Frühmittelalter bis hin zu einem Unterhaltungsfaktor für jedermann in der Gegenwart. Dies lässt – neben der Verknüpfung von Geschichte und Musik/Physik (konkret auf das Thema Frequenzen/Stimmungen bezogen) – natürlich auch den Brückenschlag zur **katholischen und evangelischen Religionslehre** zu. Einerseits hatte die Entwicklung der katholischen Kirche bis zum Spätmittelalter einen bedeutenden (teilweise sogar den einzigen) Einfluss auf Art, Gestaltung und Verwendung von Musik. Andererseits läutete die Etablierung der Terz als konsonantes Intervall in der Renaissance im Zuge der immer mehr an Bedeutung gewinnenden Mehrstimmigkeit, unter anderem auch durch die vierstimmigen protestantischen Choralsätze geprägt, eine bedeutende Umstellung der musikalischen Frequenzverhältnisse und des vorherrschenden Stimmsystems – in eben genanntem Beispiel konkret die Umstellung vom pythagoreischen auf das reine und mitteltönige Stimmsystem – ein (Kapitel IV.4).

Es ließen sich mit Sicherheit noch viele weitere Ansätze für die Verknüpfung des Themas Harmonische Oberschwingungen mit anderen Schulfächern, sowie ihren Kompetenzziele und Inhalten, finden und ausführen. Keinesfalls aber soll ein Fächer verbindender Unterricht nur der potentiellen Verbindungsmöglichkeiten wegen durchgeführt werden. Ziel soll es sein, anhand der dargestellten Ansatzmöglichkeiten eine Basis zu legen für eine sinnvolle und sinnstiftende Verknüpfung unterschiedlicher Schulfächer am Beispiel eines konkreten Themas, welches neben der Physik und Musik auch in sehr vielen weiteren, Fächer überschreitenden Bereichen Bedeutung erfährt – sei es direkt oder teilweise auch indirekt.

Diese Bereiche sind – wie dargestellt – nicht ausschließlich inhaltlicher Natur potentielle Verknüpfungsmöglichkeiten verschiedener Fächer, sondern teilweise auf die Erarbeitung des Themas konkret im Physik- und/oder Musikunterricht, jedoch mit Hilfsmitteln, Werkzeugen und inhaltlichen oder modellhaften Hilfestellungen aus anderen Schulfächern, bezogen.

Das Ziel, deutlich mehr Fächer verbindenden Unterricht zu planen und durchzuführen, ist spätestens seit Installierung der Fächerverbünde wie NWA oder EWG auch von offizieller Seite deutlich konkretisiert worden. Auch die Formulierungen des Bildungsplans fordern zu einer intensivierten praktischen Integrierung von fachübergreifenden Inhalten auf. Am Beispiel der Akustik, welche im Schulalltag meist physikalisch und musikalisch isoliert im Fachunterricht behandelt wird, speziell am Beispiel der physikalischen Frequenzverhältnisse und der Harmonischen Oberschwingungen, sowohl physikalisch als auch in der musikalischen Praxis betrachtet, wurde im Rahmen der Arbeit das enorm große vorhandene Potential für eine Fächer verbindenden Unterricht aufgezeigt. Hier kann eine Lehrkraft – je nach selbst unterrichteten Fächern in einer Schulklasse – bereits selbständig eine weitläufig angelegte Verknüpfung der Fächer vornehmen – in Absprache mit weiteren Fachlehrern bietet sich die Möglichkeit, anhand eines konkreten Themas enorm viele Kompetenz- und Inhaltsziele verschiedenster Schulfächer zu erreichen und dabei die jeweiligen Inhalte mit ihren fachübergreifenden Bereichen plastischer zu machen und mit Leben zu füllen.

Das Konzept dieser wissenschaftlichen Hausarbeit wird in Vorabsprache mit meinem Mentor in meinem kommenden Blockpraktikum im Frühjahr 2011 bereits in Teilen in der Fächer verbindenden Praxis in der Schule umgesetzt werden. Die genauen Unterrichtsentwürfe werden dann zeitnah auf die vorhandenen zeitlichen und materiellen Kapazitäten sowie das Vorwissen der Schüler und die Größe der Gruppe abgestimmt, geplant und entwickelt. Mein persönliches Ziel ist es aber, das Konzept später – beispielsweise im Rahmen meines Vorbereitungsdienstes – in Absprache mit anderen Kollegen aus den Fachbereichen Biologie, Technik, Informatik und Geschichte – sowie eventuell Mensch und Umwelt und katholische sowie evangelische Religionslehre – praktisch umzusetzen um die Themenbereiche der einzelnen Schulfächer als Fächer vereinende Unterrichtseinheit zu konzipieren und durchzuführen.

Hinweise zur Zitierung

...zitieren.¹

Bezug des letzten Absatzes auf die angegebene Quelle

...zitieren.¹

Bezug des letzten Satzes auf die angegebene Quelle

...zitieren¹.

Bezug des letzten Wortes auf die angegebene Quelle

...zitieren“¹.

Bezug des wörtlichen Zitates auf die angegebene Quelle

APPENDIX

Literaturverzeichnis

Dickreiter, Michael: Musikinstrumente: moderne Instrumente, historische Instrumente, Klangakustik (1987);
Bärenreiter, Kassel (4. Auflage, 1994)

Eska, Georg: Schall & Klang (1997);
Birkhäuser Verlag, Berlin (1. Auflage)

Giancoli, Douglas C.: Physik (2000);
Pearson Studium, München (3. Auflage, 2006)

Hall, Donald: Musikalische Akustik (1991);
Schott Musik International, Mainz (1. übersetzte Auflage, 1997)

Heinmann, Ernst-Günter: Johann Sebastian Bach: das wohltemperierte Klavier (Urtext) (1997); G. Henle Verlag, München (1. Auflage)

Heukäufer, Norbert (Hrsg.): Musik Methodik (2007);
Cornelsen Verlag, Berlin (1. Auflage)

Jank, Werner (Hrsg.): Musik Didaktik (2005);
Cornelsen Verlag, Berlin (1. Auflage)

Kirnberger, Johann Phillip: Die Kunst des reinen Satzes in der Musik (1779);
Georg Olms Verlagsbuchhandlung, Hildesheim
(Nachdruck der Originalausgabe Berlin und Königsberg 1779, 1968)

Kutruff, Heinrich: Akustik (2004);
S. Hirzel Verlag, Stuttgart (1. Auflage)

Meyer, Erwin (Hrsg.): Physikalische und technische Akustik (1967);
Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig (3. Auflage, 1979)

Michels, Ulrich (Hrsg.): dtv-Atlas Musik Band 1 (1977);
Deutscher Taschenbuch Verlag, München (21. Auflage, 2005)

- Michels, Ulrich** (Hrsg.): dtv-Atlas Musik Band 2 (1985);
Deutscher Taschenbuch Verlag, München (14. Auflage, 2005)
- Mikelskis, Helmut F.** (Hrsg.): Physik –Didaktik (2006)
Cornelsen Verlag, Berlin (5. Auflage, 2010)
- Mikelskis-Seifert, Silke / Rabe, Thord** (Hrsg): Physik Methodik (2007)
Cornelsen Verlag , Berlin (4. Auflage, 2010)
- Pierce, John R.:** Klang / Musik mit den Ohren der Physik (1983);
Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg (1. Übersetzte Auflage, 1985)
- Riemann, Hugo:** Geschichte der Musiktheorie (1898);
Georg Olms Verlagsbuchhandlung, Hildesheim
(Nachdruck der 2. Auflage Berlin 1921, 1961)
- Roederer, Juan G.:** Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik (1973);
Springer-Verlag, Berlin (1. übersetzte Auflage, 1977)
- Taylor, Charles:** Der Ton macht die Physik (1992);
Friedrich Vieweg & Son Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden
(1. übersetzte Auflage, 1994)
- von Helmholtz, Hermann:** Die Lehre von den Tonempfindungen (1862);
Georg Olms Verlagsbuchhandlung, Hildesheim
(Nachdruck der 7. Auflage Braunschweig 1913, 1968)
- Ziegenrucker, Wieland:** ABC Musik / Allgemeine Musiklehre (1977);
Breitkopf & Härtel, Wiesbaden (5. Auflage, 2007)
- Bildungsplan** Realschule 2004 (Baden-Württemberg)

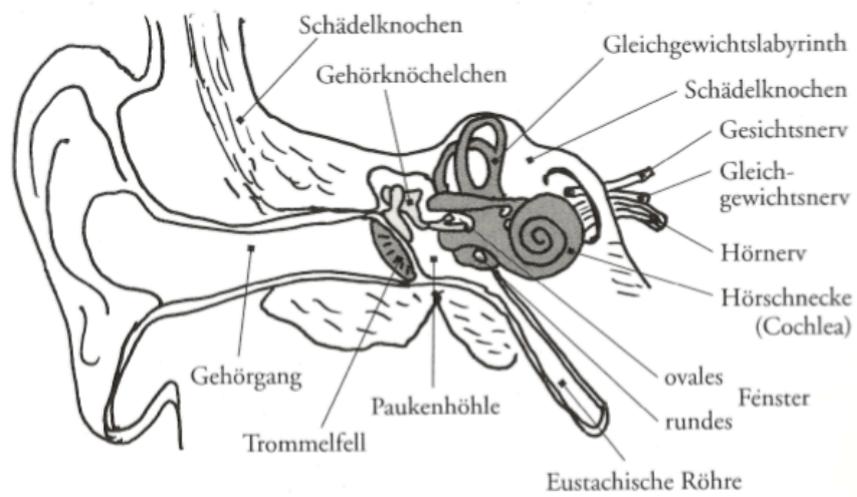
Anlagenverzeichnis

	<i>Seite</i>
Anlage 1: Anatomie des Ohres _____ (Eska S. 94)	87
Anlage 2: Oszillogramme reiner und natürlicher Töne _____ (Michels S. 16)	88
Anlage 3: Töne und ihre Grundfrequenzen _____ (Michels, S. 16)	89
Anlage 4: Frequenzspektren _____ (Pierce, S. 19)	90
Anlage 5: Stehende Wellen bei Blasinstrumenten _____ (Giancoli S. 571)	91
Anlage 6: 3-dimensionales Klangfarbenraster diverser Instrumente (Pierce, S. 162) _____	92
Anlage 7: Fourier-Synthese: Überlagerte Schwingungen _____ und Amplitudenspektren	93
Anlage 8: Frequenzspektren verschiedener Instrumente mit Grundschiwingung von 440 Hz _____	94
Anlage 9: Stimmungssysteme _____ (Hall S. 422-427)	99
Anlage 10: http://www.faz.net/s/Rub117C535CDF414415BB243B181B8B60AE/Doc~E3B83E1D10AE04B23ADB5B9332CCE0D72~ATpl~Ecommon~Spezial~Afor~Eprint.html (Stand 27.09.2010) _____	101
Anlage 11: Fragebogen zum Klang diverser Wiedergabegeräte _____	105

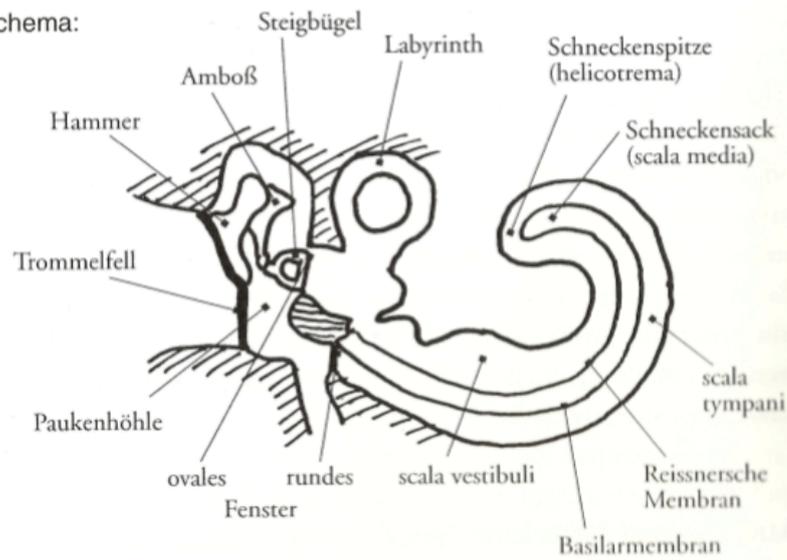
Anlage 1

Außenohr Mittelohr Innenohr Zentralnervensystem

a) Anatomie:

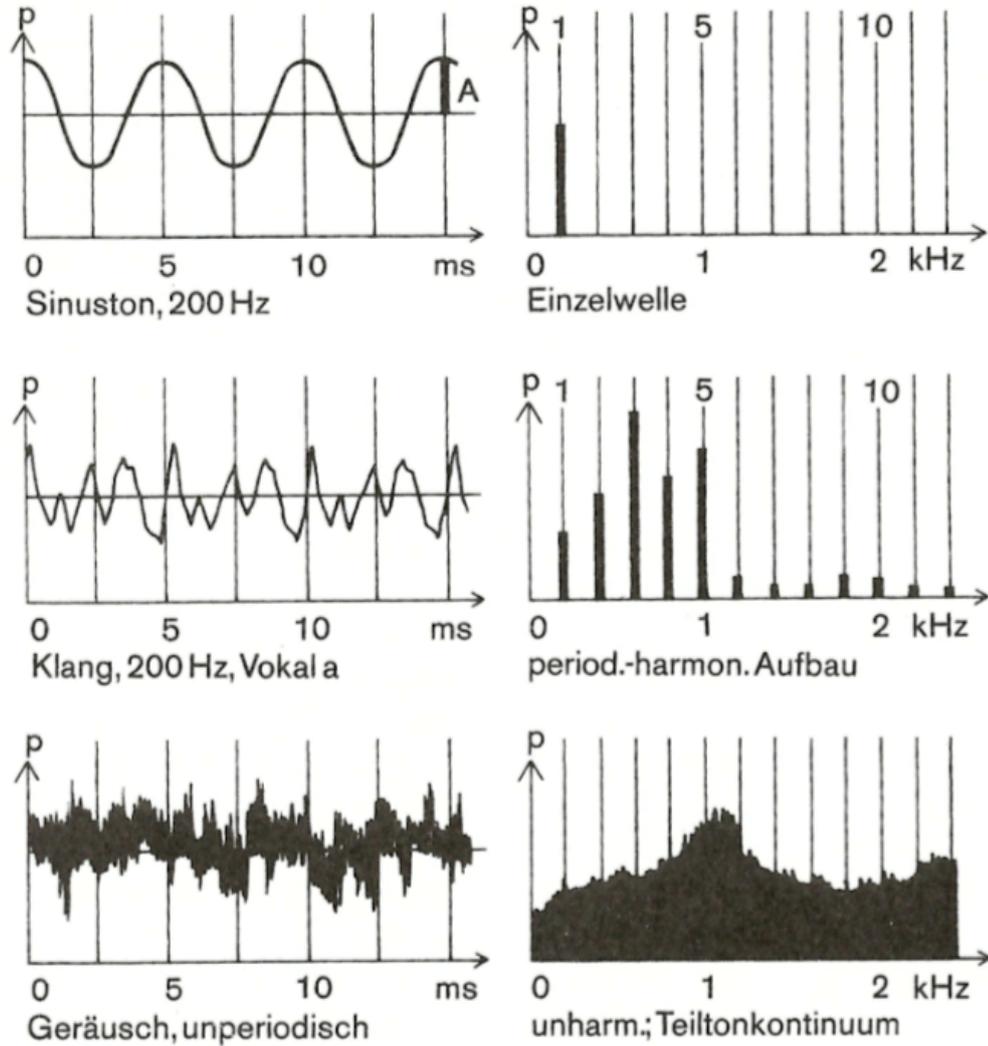


b) Schema:



Außenohr Mittelohr Innenohr Zentralnervensystem

Anlage 2



A Oszillogramme (r.) und Teiltenspektren (l.)

Anlage 3a

Notenname	temper. Stimmung	physikal. Stimmung
c ⁵	4186,03 Hz	~ 2 ¹²
c ⁴	2093,02 Hz	~ 2 ¹¹
c ³	1046,51 Hz	~ 2 ¹⁰
c ²	523,25 Hz	~ 2 ⁹
c ¹	261,63 Hz	~ 2 ⁸
c	130,81 Hz	~ 2 ⁷
C	65,41 Hz	~ 2 ⁶
C ₁	32,70 Hz	~ 2 ⁵
C ₂	16,35 Hz	~ 2 ⁴
C ₃	8,15 Hz	~ 2 ³

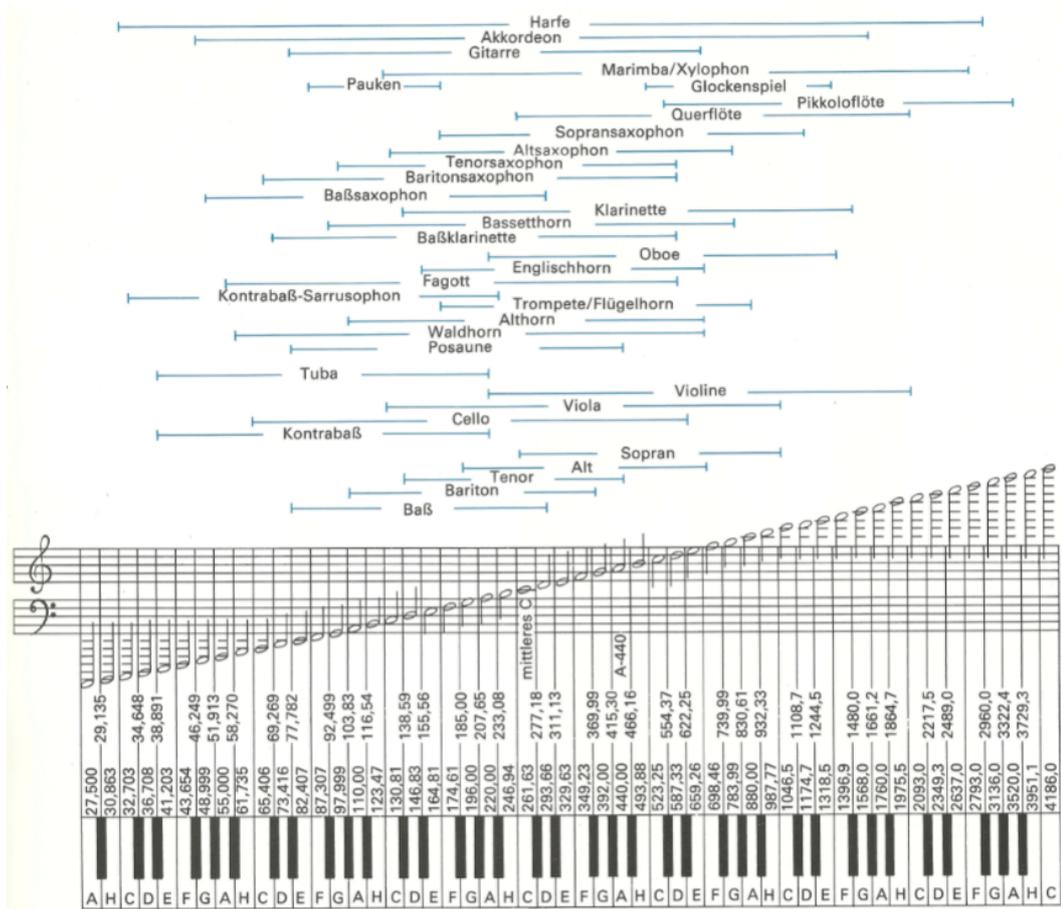
Anlage 3b

	Cent	reine Stimmung	Verhältnis zu c ¹	temperierte Stimmung
c ²	1200	528 Hz	2:1	523,25 Hz
h ¹	1100	495 Hz	15:8	493,88 Hz
b ¹	1000	475 Hz	9:5	466,16 Hz
a ¹	900	440 Hz	5:3	440,00 Hz
as ¹	800	422 Hz	8:5	415,31 Hz
g ¹	700	396 Hz	3:2	392,00 Hz
fis ¹	600	387 Hz	25:18	369,99 Hz
f ¹	500	352 Hz	4:3	349,23 Hz
e ¹	400	330 Hz	5:4	329,63 Hz
es ¹	300	317 Hz	6:5	311,13 Hz
d ¹	200	297 Hz	9:8	293,67 Hz
cis ¹	100	275 Hz	25:24	277,18 Hz
c ¹	0	264 Hz	1:1	261,63 Hz

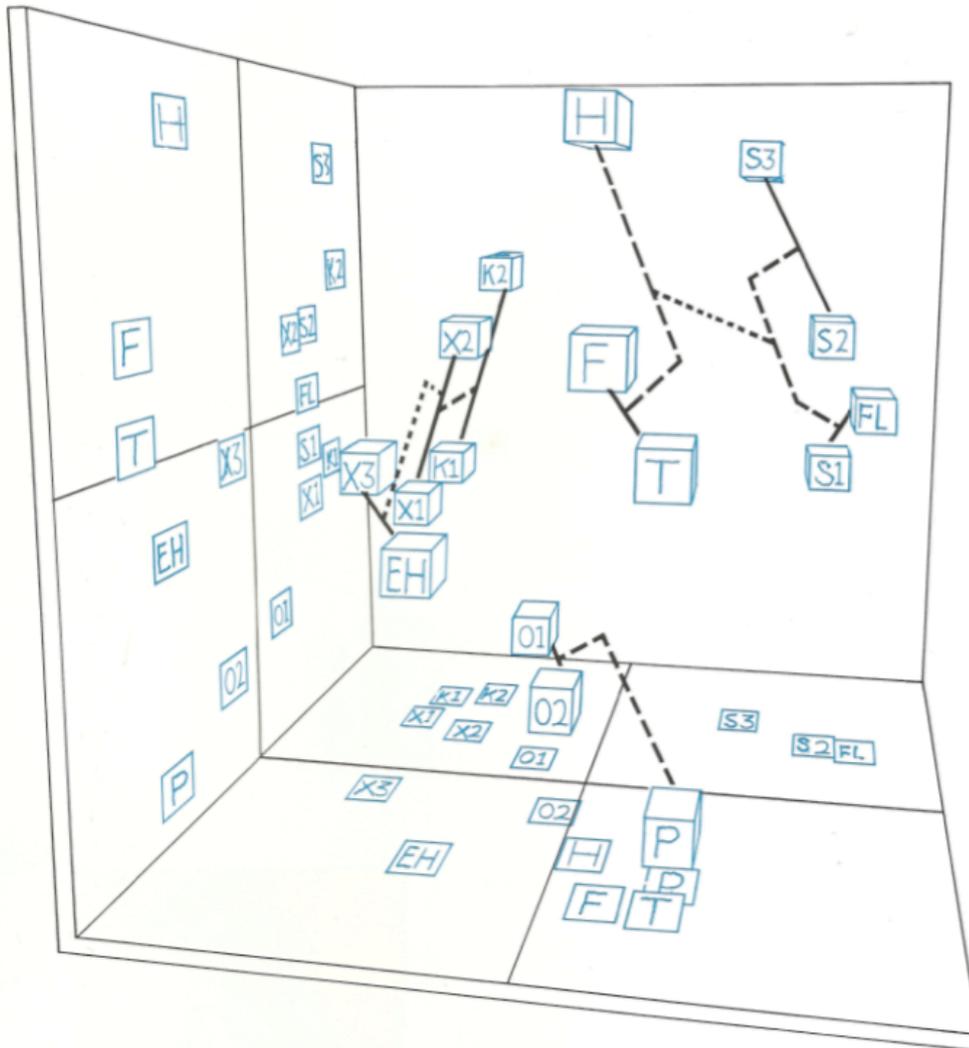
 chromatische Tonleiter

 Kammerton

Anlage 4

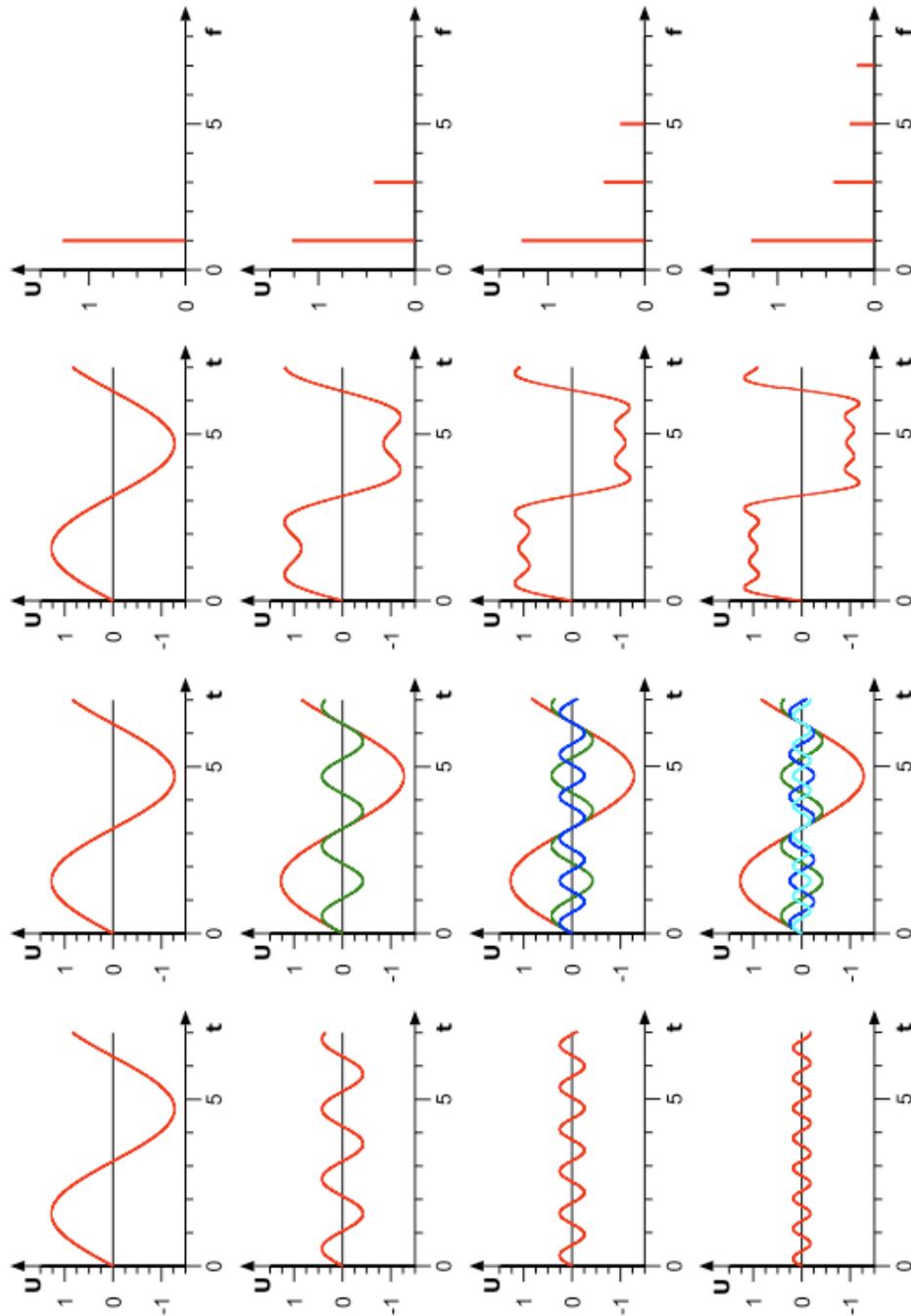


Anlage 6



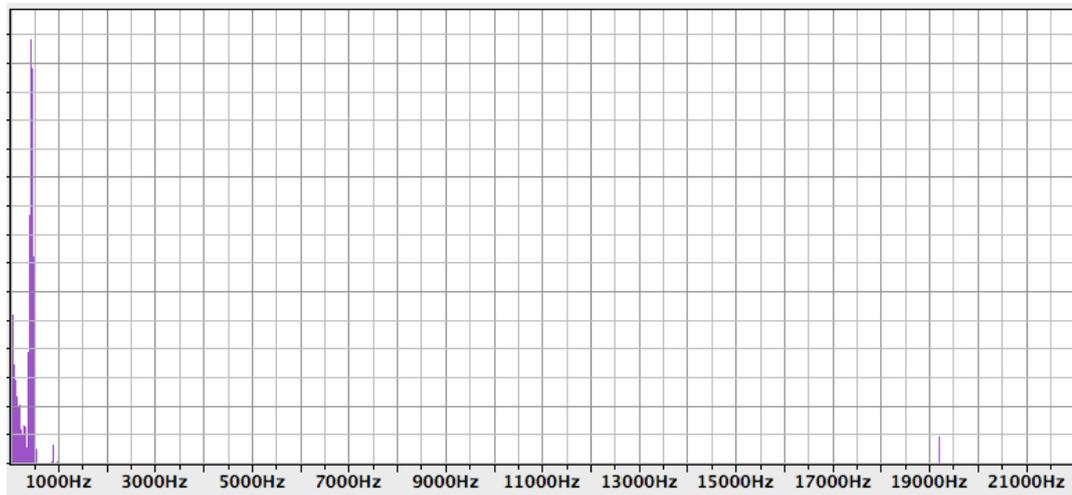
Aus diesem dreidimensionalen Diagramm kann man entnehmen, wie ähnlich oder unähnlich Instrumentaltöne sind. Es wurde mit dem Computer aus Ähnlichkeitswerten berechnet, die zuvor wie folgt bestimmt worden waren: Für verschiedene Tonpaare hatten Musiker anhand einer Zahlenskala von 1 bis 30 Ähnlichkeiten oder Abweichungen im Klang quantitativ bewertet. Instrumente mit ähnlichem Klang liegen dicht beieinander; je größer die Unterschiede werden, desto weiter rücken auch die Positionen im Diagramm auseinander. Einige Instrumente sind in Gruppen (Cluster) zusammengefasst und durch gestrichelte oder gepunktete Linien verbunden. Die Quadrate auf den Wänden sind Projektionen der Würfel, die die verschiedenen Positionen der Instrumente im dreidimensionalen Raum hervorheben. Die Abkürzungen bedeuten: O1, O2: Oboen; K1, K2: Klarinetten; X1, X2, X3: Saxophon; EH: Englischhorn; H: Horn; S1, S2, S3: Streicher (Cello); T: Trompete; P: Posaune; FL: Flöte; F: Fagott.

Anlage 7

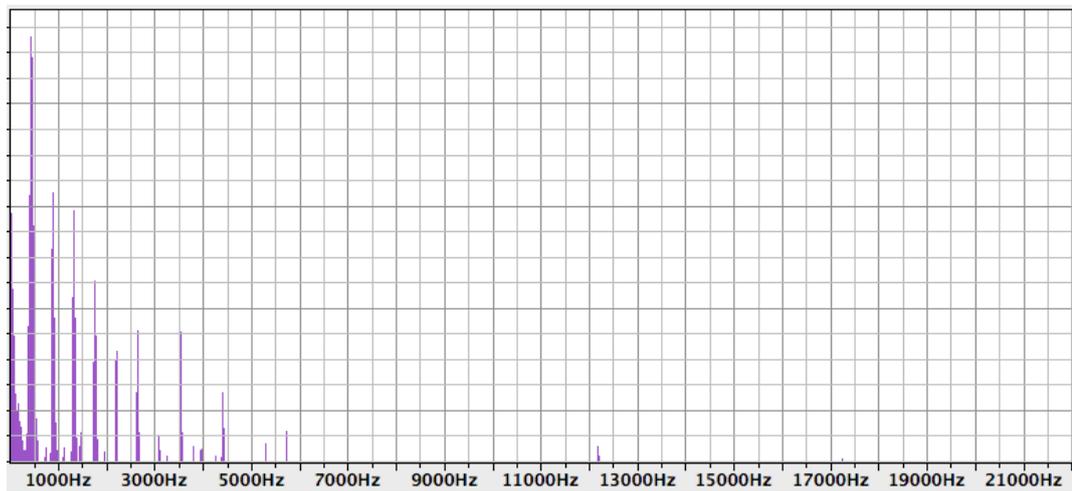


Anlage 8

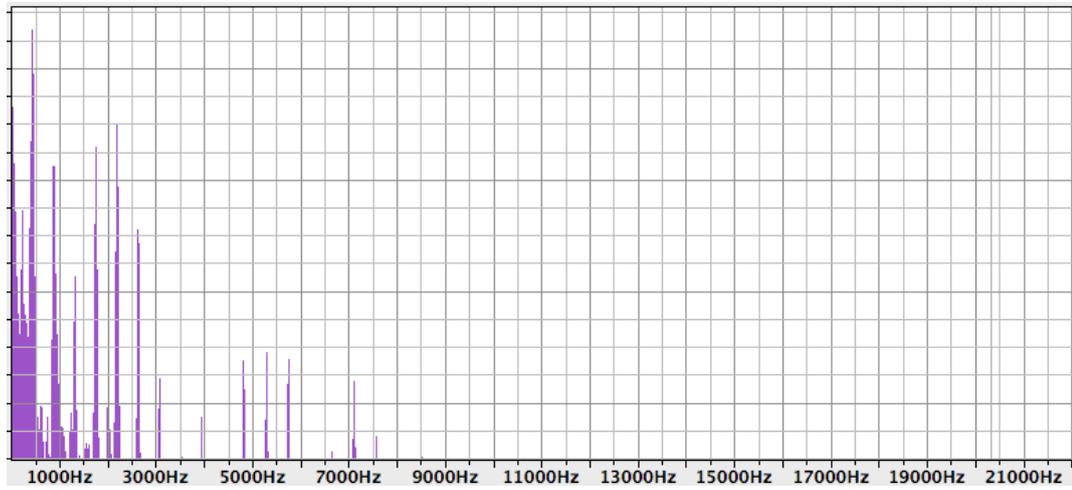
Stimmgabel



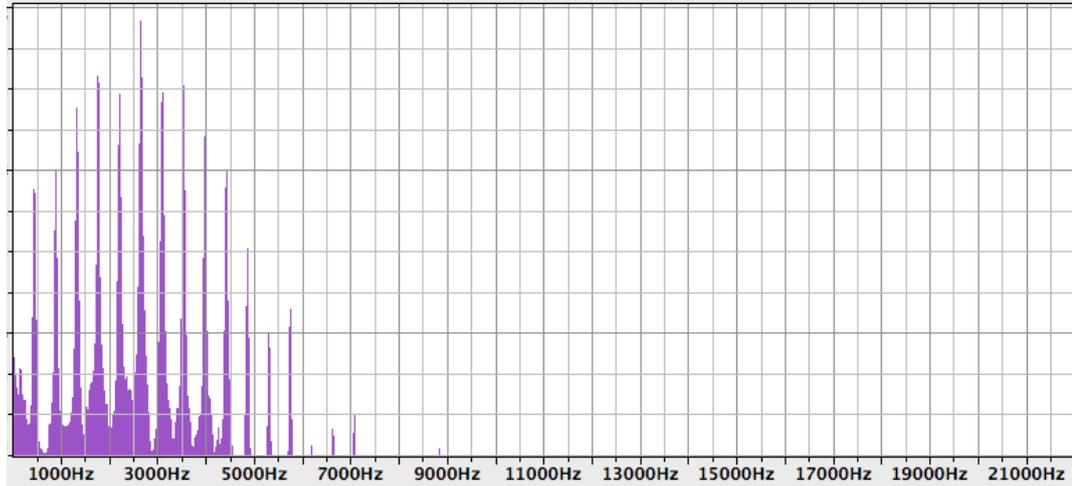
Flöte



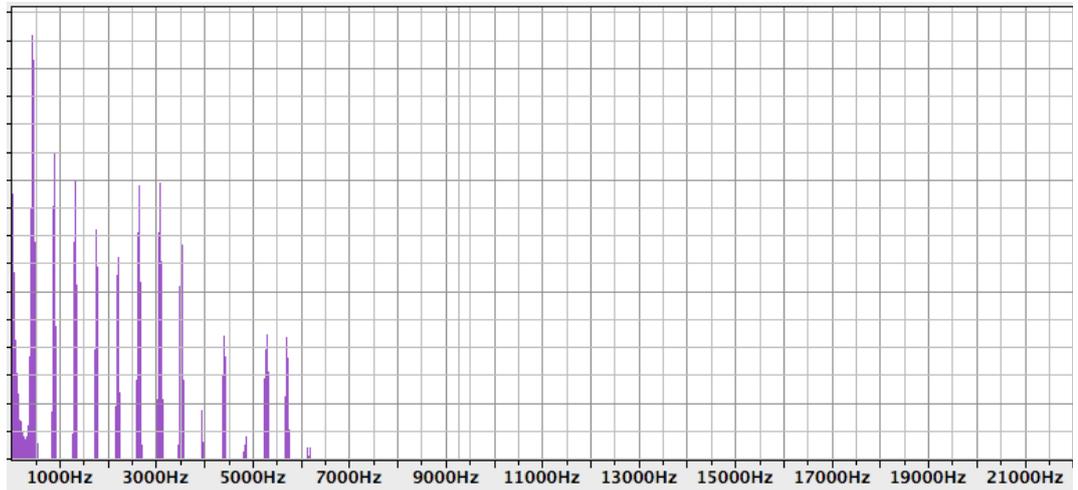
Gitarre



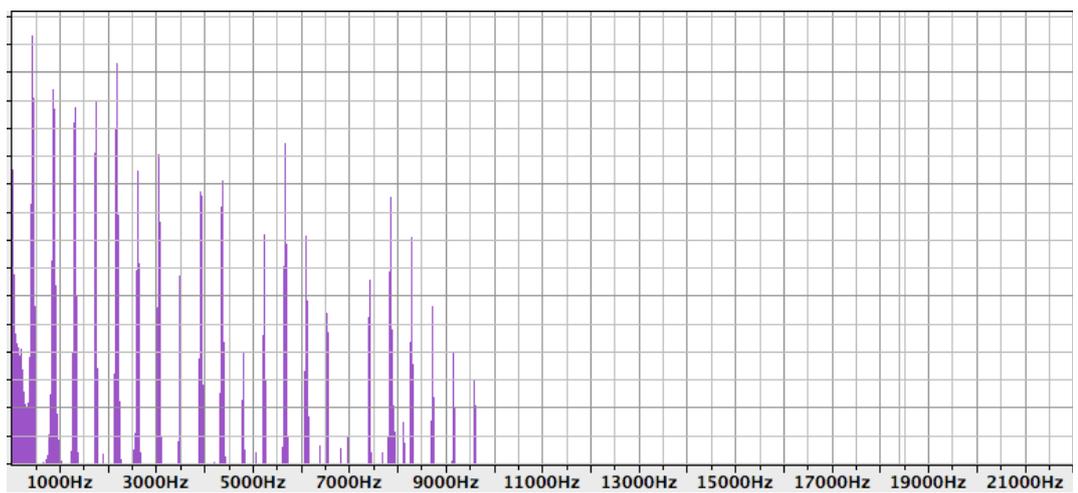
Gitarre verzerrt



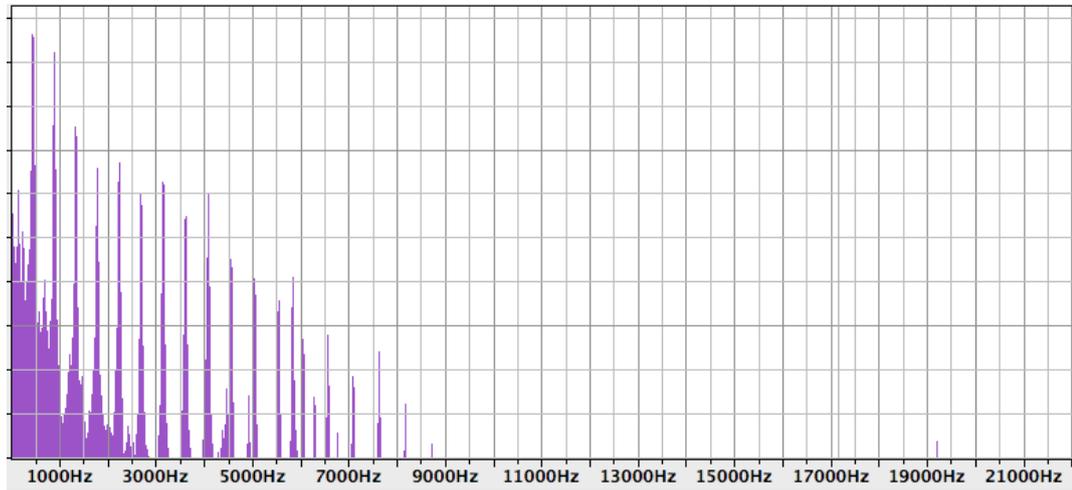
Geige



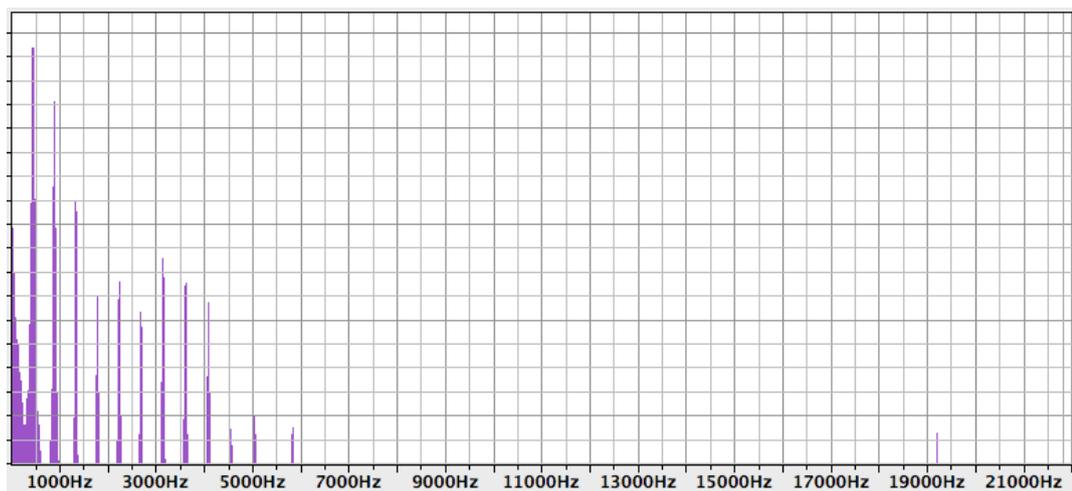
Cembalo



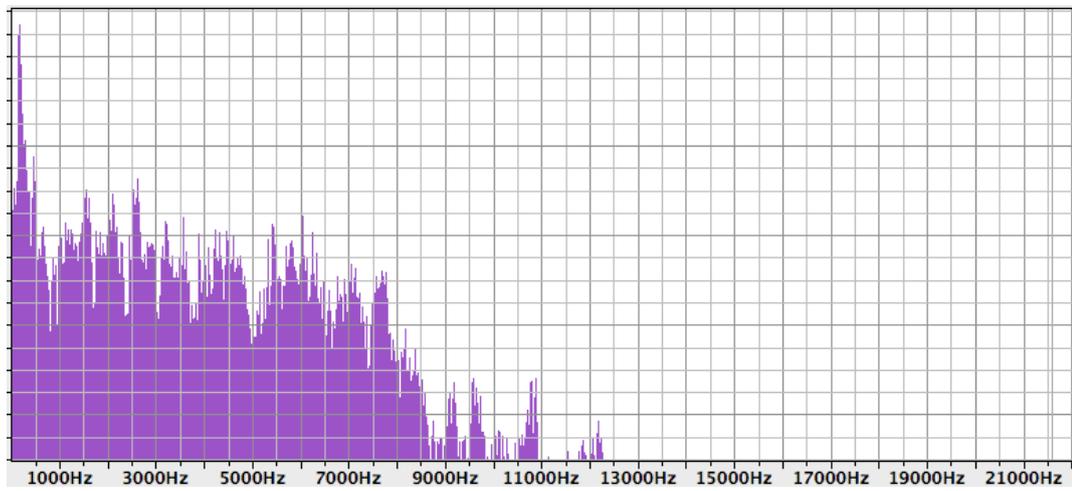
Klavier (Zeitpunkt 1)



Klavier (Zeitpunkt 2)

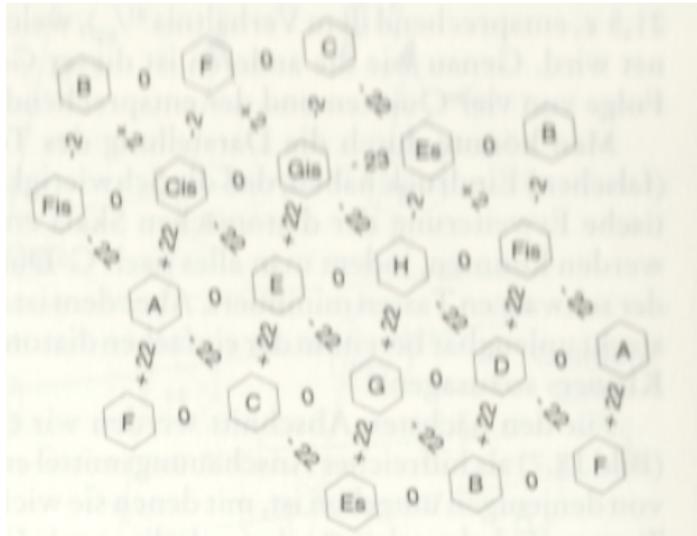


Snare Drum



Anlage 9

Pythagoreische Stimmung:



Reine Stimmung:



Anlage 10

Anlage 11

Fragen zu Durchgang 1

1. Höre Dir aufmerksam folgenden zwei Aufnahmen des Songs "Stairway to heaven" an.	
>Aufnahme1<	>Aufnahme2<
2. Notiere stichwortartig was Dir bei den Aufnahmen, im Gegensatz zur jeweils anderen Aufnahme, aufgefallen ist. Versuche dies in Adjektiven auszudrücken. (Es gibt kein Richtig oder Falsch, notiere bitte alles was Dir aufgefallen ist.)	

Fragen zu Durchgang 2

3. Höre Dir ein weiteres Mal beide Aufnahmen des Songs "Stairway to heaven" an.
4. Notiere Merkmale die Dir zum Gesamtklangeindruck der Aufnahmen auffallen. Vergleiche hierbei die beiden Aufnahmen auch soweit als möglich miteinander. Versuche auch jeweils die ruhigen (0-5.50) und dynamischen (5.50-8.02) Passagen des Songs bezogen auf den Klang in den beiden Aufnahmen zu vergleichen.

> Aufnahme 1 <
> Aufnahme 2 <