

Universität Augsburg
Institut für Physik
Didaktik der Physik

Schriftliche Hausarbeit zum ersten
Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien

Ausgewählte Schlaginstrumente im Physikunterricht

Jil Hümmer

April 2013

Betreuer

Prof. Dr. Thomas Wilhelm

Vorwort

Lediglich zur Vereinfachung der Lesbarkeit und zur Erhaltung der Übersichtlichkeit wurde im vorliegenden Text ausschließlich die maskuline Form bei der Bezeichnung weiblicher und männlicher Personen verwendet. Selbstverständlich ist die Ausrichtung dieser Arbeit geschlechtsneutral.

Die Quellenangaben befinden sich in Klammern hinter dem Abschnitt, der Informationen aus der Quelle enthält. Dabei wird die Kurzform verwendet, d. h. es ist lediglich Autor, Erscheinungsjahr und die Seitenzahl angegeben. Eine ausführliche Quellenangabe findet sich am Ende dieser Arbeit in den Referenzen. Im Falle von Internetquellen findet sich die gesamte URL in der Fußnote, das Aufrufdatum in der Literaturliste.

Die Quelle von Bildern und Tabellen ist direkt bei der Bild- bzw. Tabellenbezeichnung angegeben. Falls keine Quelle angegeben ist, wurden diese selbst erstellt.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| I | Grundlagen | 5 |
| 1 | Geschichte und Einteilung | 6 |
| 2 | Becken | 7 |
| 2.1 | Grundlagen und Herstellung | 9 |
| 2.2 | Akustische Eigenschaften | 10 |
| 3 | Trommelfelle | 12 |
| 4 | Pauken und Trommeln | 14 |
| 4.1 | Pauken | 14 |
| 4.1.1 | Die Stimmungstechnik | 14 |
| 4.1.2 | Akustische Eigenschaften | 15 |
| 4.2 | Die Trommeln des Schlagzeugsets | 21 |
| 4.2.1 | Bassdrum und Fußmaschine | 23 |
| 4.2.2 | Snaredrum | 25 |
| 4.2.3 | Tomtoms | 26 |
| 5 | Sticks | 28 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| II | Versuche | 31 |
| 6 | Klanganalyse | 34 |
| 6.1 | FFT-Diagramme | 38 |
| 6.2 | Andere Darstellungsarten | 41 |
| 6.3 | Größe und Frequenz der Trommeln | 44 |
| 7 | Chladnische Klangfiguren | 47 |
| 7.1 | Auf dem Trommelfell | 48 |
| 7.2 | Auf einer Metallplatte | 53 |
| 8 | Beschleunigung des Sticks | 57 |
| 9 | Hochgeschwindigkeitsaufnahmen | 61 |
| 9.1 | Die Frequenz der Trommel | 62 |
| 9.2 | Stickbewegung | 63 |
| 10 | Fazit und Schlussgedanke | 68 |

Teil I

Grundlagen

Was hat ein Schlagzeug mit Physik zu tun? Im Physikunterricht wird sehr oft ein Themengebiet zuerst abstrakt behandelt. Erst danach werden kurze Beispiele genannt, die auf diesen Grundlagen aufbauen oder diese anwenden. In dieser Staatsexamensarbeit wird die Akustik, die Verbindung der Musik und der Physik, konkret an Schlaginstrumenten thematisiert. Anhand der Instrumente kann exemplarisch die Akustik erlernt und schließlich auch auf andere Instrumente oder Zusammenhänge übertragen werden.

Das Schlagzeug ist unter Schülern ein beliebtes Instrument, da es aus der heutigen Musik nicht mehr wegzudenken ist. Der Musik begegnet der Schüler in vielerlei Hinsicht: Schüler hören in der Regel Musik, einige singen und viele spielen Instrumente. Dadurch ist ein direkter Bezug zu den Schülern vorhanden, der die Lernbereitschaft positiv beeinflussen kann. Ebenso wirken sich das situierte Lernen und das Lernen mit allen Sinnen auf die Lernbereitschaft aus, die hier beachtet werden.

Die Schüler erwerben hier Basiswissen, das ihnen hilft, Beobachtungen ihrer Umwelt richtig zu deuten. Zudem können Schüler, die an der Verbesserung der Akustik ihrer Instrumente interessiert sind, in den hier vorgeschlagenen Unterrichtseinheiten, sowie im ersten Teil der Arbeit nützliche Hinweise finden. Diese Arbeit richtet sich besonders an Lehramtsanwärter sowie Lehrer der Physik, die ein Interesse an Musik und an Versuchen mit Musikinstrumenten mitbringen.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden nun akustische Aspekte der Schlaginstrumente Becken, Pauken und Trommeln, darunter insbesondere der Bassdrum, der Snare und der Tomtoms behandelt. Dabei wird zuerst Grundlegendes geklärt, wie die Besonderheiten, Materialien und Einsatzmöglichkeiten des jeweiligen Instruments. Danach wird auch auf die klanglichen Eigenschaften und Einflussfaktoren eingegangen. Zudem wird auch die akustische Wirkung der Trommelfelle und der Sticks beschrieben.

Nachfolgend sind im zweiten Teil Versuche in Form von Unterrichtseinheiten beschrieben, die sich mit der Akustik dieser Instrumente befassen. In dem Kapitel Klanganalyse wird beschrieben, wie mittels geeigneter Software, z. B. mit Sounds, die Klänge der Instrumente unter verschiedensten Bedingungen aufgezeichnet und untersucht werden können und welche Erkenntnisse daraus gewonnen werden können. Anschließend wird auf die Entstehung Chladnischer Klangfiguren eingegangen, die die Schwingungsknotenlinien der stehenden Wellen sichtbar machen. Dabei wird sowohl ein Trommelfell, als auch eine

Metallplatte als Modell für ein Becken verwendet. Der Versuch über die Messung der Stickbeschleunigung mit einem Sensor zeigt Möglichkeiten und Grenzen bei der Auswertung der komplexen Bewegung des Sticks auf. In der Unterrichtseinheit über die Videoanalyse ist dargestellt wie mit *measure dynamics* und Highspeedaufnahmen die Stickbewegung analysiert und ausgewertet werden kann. Am Ende eines jeweiligen Versuches sind in einer Bemerkung noch Vor- und Nachteile und weitere Anregungen zu den Versuchen sowie abschließend noch Ideen zur Realisierung einer Unterrichtseinheit formuliert.

1 Die Geschichte und Einteilung der Schlaginstrumente

Seit jeher wurden Laute erzeugt, indem verschiedene Objekte aneinander geschlagen wurden. Die ältesten Instrumente sind die Schlaginstrumente, zu denen Trommeln, Pauken und Becken gehören. Die Trommeln, die mit Beginn der Menschheit entstanden und die man schon als solche bezeichnen kann, waren vermutlich Holzklötze, deren Weiterentwicklung, die hohlen Baumstämme, mehr Klang lieferten. Die ersten Trommeln mit Membran, bestehend aus einer Tierhaut und einem hohlen Baumstamm, sind mindestens 5000 Jahre alt und wurden wahrscheinlich mit den Händen angespielt. Später kamen auch noch Becken und Schalen hinzu (Fletcher und Rossing, 1991, S. 583). Trommeln und Pauken existieren in den verschiedensten Formen und Materialien und erzeugen unterschiedliche Klänge auf verschiedene Weisen. In Westeuropa hielten sie im frühen Mittelalter Einzug. So erschienen bereits im 12. Jahrhundert die ersten zweifelligen Rahmentrommeln und im 14. Jahrhundert Trommeln, die an der Unterseite Schnarrsaiten aufwiesen. Diese waren die Vorläufer der Snare (Keune, 1975, S. 10).

Während die Pauken ihre Verwendung zuerst bei offiziellen Anlässen fanden, hielten diese im 17. Jahrhundert Einzug in das Orchester. Berlioz erkannte, dass auch die Art des benutzten Schlägels einen großen Einfluss auf den Klang des Schlaginstruments hat, weshalb er diese für seine Stücke vorgab (siehe hierzu auch Kapitel 5). Erstmals 1960 erschienen in England die Kunststofffelle, die nach anfänglicher Skepsis auch heute noch den Tierfellen vorgezogen werden, da es an qualitativ hochwertigen Tierfellen mangelte und die Kunststofffelle den atmosphärischen Veränderungen besser standhalten (Holland, 1983, S. 21ff., 24, 30).

Pauken, die bereits in der Steinzeit Verwendung fanden, kamen spätestens im 13. Jahrhundert aus orientalischen Ländern nach Europa. Während sie zuerst im Heeresdienst eingesetzt wurden, nahm deren Bedeutung auch in der Kultur zu. Anfangs waren die Felle

der Pauken durch umständliche Verschnürungen angebracht, welche zuerst von Spannreifen und später von Spannschrauben abgelöst wurden. Im Jahr 1872 wurde die Pedalmaschinenpauke entwickelt, die es nun ermöglichte, die Pauke sogar während des Spiels in die benötigte Stimmung zu bringen (Keune, 1977, S. 9ff.). Eingesetzt werden Pauken hauptsächlich im Orchester.

Mit der Entwicklung neuer Musikrichtungen wurden Trommeln und Becken gemeinsam aufgestellt, um nur von einer Person bedient werden zu können und unter dem Begriff des Schlagzeugs (s. Abb. 1) zusammengefasst. Dies hat den großen Vorteil, dass eine Person die Rhythmus Elemente aufeinander abstimmen und gezielter Akzente setzen kann, aber auch den Nachteil, dass die Verantwortung größer wird.¹

Die Bezeichnung der Schlagzeuge bzw. -instrumente ist zum Teil widersprüchlich. Zu den Schlaginstrumenten gehören allgemein nicht nur die klassischen wie Pauken, Trommeln, und Becken; Im Orchester wiederum werden die Instrumente, die keiner anderen Gruppe zugeordnet werden können, zu den Schlaginstrumenten dazugerechnet. In der Unterhaltungsmusik hingegen beinhaltet das Schlagzeug eine relativ vorgegebene Kombination an Schlaginstrumenten. Dazu gehören die Bassdrum mit Fußmaschine, die Snare, die Hi-Hat, weitere Trommeln, Becken und eventuell weiteres Zubehör wie z. B. Kuhglocke, Bongos, Schellenkranz und Blocks. Ein weiteres erschwerendes Einteilungskriterium ist die Tatsache, dass einige Instrumente bekanntlich nach der Tätigkeit, andere nach einem Bestandteil oder nach einem klangerzeugenden Material benannt wurden. Eine zuverlässige Einteilung kann wie folgt vorgenommen werden: teilt man Instrumente nach dem physikalischen Aspekt der Tonerzeugung ein, so kann man Schlaginstrumente in Idiophone (Selbstklinger) und Membranophone (Fellklinger) unterteilen. Erstere beinhalten beispielsweise Becken, Kuhglocke und Blocks, zu den Membranophonen zählen die Trommeln. Der Ton wird bei Schlaginstrumenten im Allgemeinen durch Anschlagen erzeugt (Jakob, 1979, S. 9f. sowie Rieländer, 1982, S. 338).

2 Becken

Becken (s. Abb. 2) sind annähernd flache, runde, in der Mitte mäßig bis stark gewölbte Metallplatten mit einem Loch in der Mitte zur Befestigung, die durch Sticks, Mallets (Sticks mit einem beispielsweise filzüberzogenen Kopf) oder ein zweites Becken zum Schwingen gebracht werden. Die Wölbung in der Mitte wird Glocke genannt, weil das Anschlagen an

¹http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_1.html

dieser Stelle einen glockenartigen Klang hervorruft. Eingesetzt werden sie meist für durch das Musikstück durchgehende Klangmuster (Hi-Hat und Ridebecken) oder für Akzente (Crashbecken und Splashbecken). Sie gehören zu den Idiophonen. Die Becken haben wie auch die Trommeln eine weitreichende Geschichte. In vielerlei Hinsicht, wie ihrem Herstellungsverfahren, Form, Material, Größe, Dicke und Gewicht, unterscheiden sich die Becken untereinander und werden nach ihren daher verschiedenartigen Klangmerkmalen und ihrem Verwendungszweck eingesetzt (Fletcher und Rossing, 1991, S. 649).



Abbildung 1: Schlagzeug mit Bassdrum (1), Snare (2), zwei Hängetoms (3), einer Standtom (4), einem Ride- (5), einem Crashbecken (6) und einer Hi-Hat (7) (<http://kingkalli.de/schlagzeug-und-percussion/>)

Metalle werden schon sehr lange für die Herstellung von Instrumenten genutzt. Zuerst wurden lediglich die Metalle verwendet, die auch in der Natur vorkamen, da es noch keine Legierungen gab, und aus Erzen gewonnen werden konnten, später wurden Legierungen aufgrund ihrer besseren Materialeigenschaften eingesetzt. Die Voraussetzung für die Nutzung der Metalle bei Instrumenten ist die gute Formbarkeit des Metalls, damit auch relativ aufwendige Formen kreiert werden können; Trotzdem ist auch eine gewisse Materialhärte notwendig, um der Beanspruchung beim Spielen des Instruments standzuhalten. Außerdem sollte es nicht korrodieren und optisch ansprechend sein. Durch das Hinzumischen kleiner Mengen anderer Metalle zu reinen, aber teilweise zu weichen Metallen, konnten härtere Legierungen hergestellt werden (Fletcher und Rossing, 1991, S. 728). Meist wird Bronze (80% Kupfer, 20% Zinn) verwendet, jedoch gibt es auch Becken mit von Bron-

ze leicht abweichenden Anteilen der Bestandteile, Becken aus formbarer Bronze (hier ist der Zinnanteil kleiner als 9 %), Messing, Nickelsilber oder anderen Legierungen. In einer Beckenserie finden sich meist verschiedene Arten von Becken, die je nach Klang einen anderen Namen besitzen. Es gibt u.a. Crash-, Ride-, Splash-, Hi-Hat-, und Chinabecken. In Abhängigkeit der Beckenart variiert der Bereich der Beckengröße. Beispielsweise haben die kleinsten, dies sind die Splashbecken, einen Durchmesser zwischen sechs und elf Zoll,² Ridebecken, die zu den großen Becken gehören, zwischen 18 und 24 Zoll.³



Abbildung 2: Becken (Müller, 2011, S. 14)

Die beiden Hi-Hat-Becken werden mit dem Hi-Hat-Maschinenpedal bedient. Dieses Pedal steuert die Auf- und Abbewegung des oberen Beckens. Wenn man auf das Pedal tritt, wird das obere auf das untere Becken gedrückt, beim Loslassen bewegt sich das obere Becken wieder in die Grundstellung, in der es durch eine Feder gehalten wird. Die Spannung der Feder lässt sich so variieren, dass sowohl leichte als auch schwere Becken (abhängig von Größe und Material) befestigt werden können. Die Halterung der Hi-Hat steht normalerweise auf drei Standbeinen.⁴

2.1 Grundlagen und Herstellung

Jedes Becken ist ein Einzelstück, da es aufgrund der mechanischen Bearbeitung einen individuellen Klang hat, die Unterschiede zwischen Becken, die auf die gleiche Art und Weise hergestellt werden, sind allerdings marginal. Die Herstellung qualitativ hochwertiger Becken ist seit langer Zeit unverändert, um die Spezifität zu wahren; Maschinen werden

²1 Zoll entspricht 2,54 cm.

³http://www.thomann.de/de/onlineexpert_52_2.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_52_4.html

⁴http://www.thomann.de/de/onlineexpert_98_2.html

nur verwendet, wenn es unumgänglich ist. Denn es zeigte sich, dass bei hauptsächlich maschineller Fertigung der charakteristische Klang abhanden kommt. Zuerst entsteht ein Rohling aus einer bestimmten Metallegierung. Hierfür werden die Metalle geschmolzen und in ein Gefäß gegossen. Das Pressen der Rohlinge erfolgt nach dem Schmelzen der Legierung. Zur Formung der Glocke in der Beckenmitte wird das Becken an dieser Stelle erhitzt, damit das Metall formbar wird. Anschließend wird das Loch in der Mitte erzeugt. Je nach gewünschtem Klang wird das Becken nochmals im Hochtemperaturofen erhitzt, da die Wärme das Material beeinflusst. Das Hämmern der Becken, das viel Sachkenntnis und Übung voraussetzt, ist der dritte Produktionsschritt; Teilweise wird dieser Schritt bei der Produktion hochwertiger Becken ausschließlich manuell bewerkstelligt. Falls dies nicht der Fall ist, findet eine maschinelle Vorfertigung statt, die der Überwachung eines Instrumentenherstellers obliegt und bei der er immer die Möglichkeit hat Parameter, wie z. B. Kraft und Geschwindigkeit des automatischen Hammers, zu verändern, woran sich die manuelle Feinarbeit mit Hammer und Amboss anschließt. Der Letzte Schritt, das Abdrehen der Becken von innen nach außen mit einem Schleifstein, wodurch das Gewicht der Becken optimiert wird, ist ein sehr exaktes, jedoch auch schwieriges Verfahren, das viel Feingefühl erfordert. Abweichungen von mehr als 0,005 mm treten bei der Dicke der Becken nach diesem Schritt nicht auf. Eine anschließende Kontrolle der Planheit wird mit einem Mikrometer durchgeführt. Nach dem Begradigen der Ränder und Aufbringen der Modellnamen und des Herstellerlogos wird eine Schutzschicht auf die Becken aufgetragen, die die Oxidation verhindert und die Haltbarkeit verlängert. Zur Überprüfung der Qualität wird der Klang des Beckens am Ende mit dem Prototyp verglichen, bei Unterschieden wird das Becken eingeschmolzen. Um eine hohe Qualität zu gewährleisten unterliegt das gesamte Herstellungsverfahren verschiedenen Kontrollen.⁵

2.2 Akustische Eigenschaften

Die Hi-Hat besteht aus einem Beckenpaar an einer Halterung. Diese ist mit einem Fußpedal ausgestattet. Sie bildet das Grundgerüst der meisten Schlagzeugbeats durch die sog. Patterns oder Klangmuster, da sie relativ leise ist und somit der Takt und das Tempo vorgegeben wird. Dazu wird sie mit dem Stick angeschlagen oder aber mittels des Fußpedals mit dem Fuß durch Anheben geöffnet und Drauftreten geschlossen. Akzente kann man mit der Hi-Hat setzen, indem die Fuß- und Handtechnik kombiniert wird, in diesem Fall

⁵http://www.thomann.de/de/onlineexpert_52_3.html
<http://www.dirilcymbals.de/index.php?page=tradition>

spricht man von einer Hi-Hat-Öffnung. Durch das Ridebecken kann wie durch die Hi-Hat der Takt vorgegeben werden, denn es wird nicht am Rand angeschlagen, sondern mit der Spitze auf die Fläche angespielt. Es besteht die Möglichkeit das Becken an der Glocke anzuschlagen, was einen glockenartigen Klang erzeugt, oder in Randnähe, wodurch das Becken lange nachklingt. Das Splashbecken ist die kleinste Beckenart. Angeschlagen wird es mit dem Stick. Der Klang ist hoch und klingt kurz aus. Chinabecken haben einen hohen Klang und können sowohl normal angeschlagen werden als auch mit zwei Mallets zu einem gongartigen Klang angeregt werden. Zur Akzentuierung wird meistens das Crashbecken verwendet, sie haben eine mittlere Abklingdauer⁶. Zum detaillierten Klangbild der Becken findet sich in Kapitel 6 eine Analyse und Beschreibung.

Schwingungsknoten sind die Stellen, die in Ruhe sind, d. h. bei einer schwingenden Saite sind diese Punkte, bei einem Becken oder einer Membran Linien. Davon gibt es zwei Arten: Knotendurchmesser und Knotenkreise. Diese werden zur Kennzeichnung der Moden durch die Anzahlen der Durchmesser m und der Knotenkreise n als Zahlenpaar mn angegeben (Rossing, 1992, S. 128 sowie Fletcher und Rossing, 1991, S. 650). Die ersten sechs Schwingungsmoden niedriger Frequenz der Becken ähneln denen der flachen Metallplatten. Bei den ersten fünf Moden erscheinen zwei bis sechs radiale Knotenlinien, bei den höherfrequenten Moden treten häufig Überlagerungen verschiedener Moden auf, wenn die zugehörigen Frequenzen nahe beieinanderliegen. Die Vibrationsmoden können durch holografische Interferometrie sichtbar gemacht werden. Abbildung 3 zeigt die verschiedenen Schwingungsmoden. Eine veränderte Form des Chladnischen Gesetzes liefert eine Formel zur Berechnung der Frequenzen der Becken:

$$f = c(m + 2n)^p$$

Wobei m Knotendurchmesser und n Knotenkreise bei der zugehörigen Frequenz vorliegen; c und p sind Koeffizienten, die vom jeweiligen Becken abhängig sind. Diese Formel wurde experimentell ermittelt. Becken werden zwar meist mit Sticks angeschlagen, aber auch Mallets oder ein zweites Becken, wie bei der Hi-Hat, werden hierfür verwendet. Der Klang ist sowohl von der Art der Anregung als auch von der Anschlagstelle abhängig. Die Ausbreitung der Wellen kann mit Hilfe von gepulster Videoholographie beobachtet werden. Interferenzen erscheinen wegen der Reflektion der Wellen am Beckenrand (Fletcher und Rossing, 1991, S. 650ff).

⁶Die Abklingdauer τ ist die Zeit, in der die Amplitude auf $\frac{1}{e}$ ihres Ausgangswertes gesunken ist (Rieländer, 1982, S. 15).

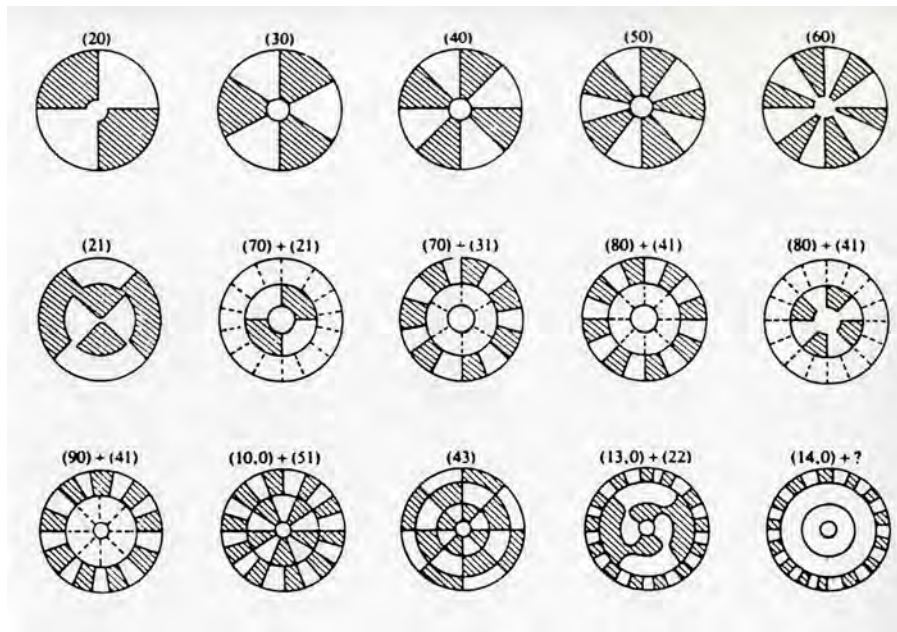


Abbildung 3: Schwingungsmoden mn eines Beckens; die ersten sechs sind identisch zu denen einer flachen Platte, danach sind die Moden abgebildet, die aus Überlagerungen entstehen (Fletcher und Rossing, 1991, S. 651)

3 Trommelfelle

Als Fell bezeichnet man unabhängig vom Material die dünne Schicht, die auf der Trommel zu Schwingungen angeregt werden kann. Es gibt sowohl Felle, die traditionell aus Tierhaut gewonnen werden, als auch Kunststofffelle aus Polyester, Nylon oder Mylar⁷. Tierfelle haben gegenüber den Kunststoffellen den Nachteil, dass die Produktion aufwendig und zeitintensiv⁸ ist, sie sehr anfällig gegenüber klimatischen Einflüssen, ungleichmäßig in ihrer Dicke, nur begrenzt verfügbar und teurer sind. Die Dämpfung spielt bei Fellen nur eine untergeordnete Rolle, da sie dünn sind und die Hauptursache für Energieverlust hier in der Abstrahlung liegt (Fletcher und Rossing, 1991, S. 727ff).

Bei den Fellen aus Kunststoff, die seit den 60er Jahren immer mehr Anklang finden, gibt es viele verschiedene Varianten, die den Klang beeinflussen: Es gibt ein- und zweilagige, dicke und dünne sowie mit Öl gefüllte Felle.⁹ Die Größe des Fells ist natürlich abhängig von der Trommelgröße. Sie variiert zwischen 6 und 26 Zoll.¹⁰ Während das Schlagfell dazu

⁷http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_1.html

⁸Für einen ausführlicheren Bericht zur Herstellung empfiehlt sich der Artikel „Herstellung und Gebrauch von Paukenfellen“ von Alexander Peter.

⁹http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_3.html

¹⁰http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_1.html

dient, den Klang zu erzeugen, hat das Resonanzfell die Aufgabe die Frequenzen zu verstärken.¹¹ Wenn die Felle dicker, beschichtet oder mit einer geringen Menge Öl gefüllt sind, ist ihre Masse größer und deshalb liefern sie tiefere Frequenzen. Als Alternative zur Dämpfung mit Öl gibt es auch die Variante, dass Dämmringe an der Innenseite bereits vom Hersteller angebracht werden, oder, dass solche Ringe aus Kunststoff nachträglich auf das Fell gelegt werden. Zudem kann zwischen Kessel und Fell ein Schaumstoffring eingespannt werden, was eine sehr starke Dämpfung zur Folge hat. Der sogenannte Dot, die kreisrunde Verstärkung in der Fellmitte, hat denselben Zweck und macht das Fell haltbarer, weshalb er häufig bei der Snare eingesetzt wird.¹² Die Snare ist mit der Bassdrum die am häufigsten verwendete Trommel.

Zum Stimmen des zuerst komplett lockeren Fells werden abwechselnd und über Kreuz (s. Abb. 4) die Schrauben per Hand festgezogen, während man mit einem Finger der anderen Hand auf das Fell klopft, bis ein Klang entsteht. Danach nimmt man den Stimmschlüssel und zieht die Schrauben auch wieder über Kreuz mit $\frac{1}{8}$ Umdrehungen fest bis die gewünschte Stimmung erreicht ist, wobei wieder der Klang währenddessen überprüft wird.¹³ Wichtig für den Klang ist allgemein die Dicke der Felle: dickere Felle führen zu einem volleren Klang, wohingegen dünnere Felle eine „ausgeglichene Klangbalance“ bieten (Peter, 2010, S. 319).

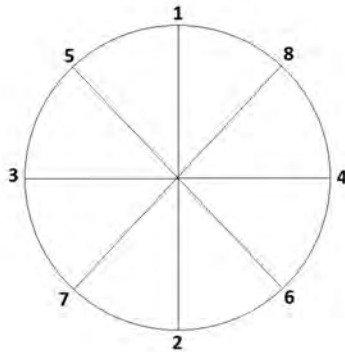


Abbildung 4: Reihenfolge des Schraubvorgangs beim Stimmen des Fells

¹¹http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_2.html

¹²http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_4.html

¹³http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_6.html

4 Pauken und Trommeln

Pauken (s. Abb. 5) haben im Gegensatz zu Trommeln einen geschlossenen Kessel, der mit einem Fell bespannt ist, Trommeln haben hingegen einen offenen Kessel, der ein- oder zweifellig bespannt ist. Unter den Membranophonen finden sich solche mit einer einzelnen Membran, die über einen Kessel gespannt sind, wie z. B. die Pauke, solche mit einer einzelnen Membran und einer geöffneten Seite nach unten (wie Bongos, Congas oder teilweise auch Tomtoms) und die Trommeln mit zwei Fellen, die durch die eingeschlossene Luft aneinander gekoppelt sind. Zu dieser Gruppe gehören die Bassdrum, die Snare und die Tomtoms.



Abbildung 5: Pauke (http://www.thomann.de/de/adams_32_universal_timp_fibre_fs.htm)

Trommeln kann man danach unterscheiden, ob ihr Klang eine klar erkennbare Tonhöhe liefert oder nicht. Pauken haben diese definierte Tonhöhe, während unter anderem Bassdrums, Snaredrums und Tomtoms keine wahrnehmbare spezifische Tonhöhe liefern (Fletcher und Rossing, 1991, S. 583 sowie Rossing, 1992, S. 128).

4.1 Pauken als Trommeln mit Tonhöhenempfindung

4.1.1 Die Stimmungstechnik der Pauke

Die vier verbreitetsten Pauken sind die Schrauben-, Hebelmaschinen-, Drehkessel-, und Pedalmaschinenpauke. Ihre Gemeinsamkeiten liegen in dem nach oben geöffneten Kessel mit darüber durch einen mit acht Spannschrauben versehenen Spannring gespannten Kalb-, bzw. Kunststofffell. Eine kleine Öffnung an der untersten Stelle des Kessels sorgt dafür, dass die verdichtete Luft ausströmen kann. Schraubepauken bedürfen zur richtigen Einstellung und zum Stimmen der Betätigung von sechs bis acht Schrauben, was sich nachteilig aufgrund der benötigten Zeit und der nicht optimal einstellbaren Stimmung auswirkt. Bei der Hebelmaschinenpauke sind die langen Spannspindeln über einen Metallkranz verbunden, der durch eine Hauptstimmspindel den Stimmvorgang erleichtert, weil

die Schrauben zur gleichen Zeit und in gleichem Maße gedreht werden können. Drehkesselpauken lassen sich durch Drehen des Kessels um die Rotationsachse stimmen, denn hier sind die Stimmschrauben mit dem Paukenfuß verbunden. Allerdings ist hierbei nachteilig, dass die Anschlagstelle damit immer variiert. Die technisch vorteilhafteste Version der Pauke ist die Pedalmaschinenpauke, bei der ein Pedal anstelle der Hauptstimmspindel zum Umstimmen genutzt wird, wobei der Umstimmvorgang auch während des Spiels aufgrund der geringen Geschwindigkeit des Stimmvorgangs erfolgen kann (Keune, 1977, S. 9ff).

Wegen des relativ kleinen Tonumfangs werden Pauken in verschiedenen Größen gebaut und im Orchester werden Sets aus vier bis fünf Pauken verwendet, um ein breiteres Tonspektrum zu erhalten (Keune, 1977, S. 13).

4.1.2 Akustische Eigenschaften der Pauke

„Auf den ersten Blick erscheint die Pauke als ein simples Instrument, dessen Funktionsprinzip offenkundig ist. Bei näherem Hinsehen zeigt sich jedoch, dass vielfältige Einflüsse den Klang und die Spielbarkeit beeinflussen, die sich erst bei intensiver Betrachtung erschließen.“ (Fleischer, 2010, S. 318)

Der Grund für die Sonderstellung der Pauke ist, dass ihrem Klang, wie auch antiken Zimbeln und der indischen Tabla, im Gegensatz zu dem der Trommel eine bestimmte Tonhöhe zugeordnet werden kann. Diese kann sowohl gemessen, als auch berechnet werden. Der bei der Klangentstehung wichtigste Teil der Pauke, das Fell, hat ähnlich wie eine Saite verschiedene Schwingungsmoden, mit dem Unterschied, dass das Fell zwei Dimensionen aufweist (Rossing, 1992, S. 128 sowie Fleischer, 2010, S. 291). Die Paukenmembran wird durch Anschlagen zu Schwingungen angeregt, die die im Resonanzkörper eingeschlossene Luft ebenfalls in Schwingung versetzen. Die Luft hat dann wiederum einen Einfluss auf die Schwingung des Paukenfells. Da die Paukenmembran unharmonisch schwingt, werden unharmonische Teiltöne erzeugt, sodass ein Geräusch entsteht. Die unharmonischen Teilschwingungen lassen sich aber minimieren, indem man den Kessel und das Fell bzw. die Fellspannung so wählt, dass die Grundfrequenzen ungefähr identisch sind. Da die Spannung der Quotient aus Normalkraft und Fläche ist, bewirkt eine Auslenkung eine veränderte Spannung, die die rücktreibende Kraft entscheidend beeinflusst. Zusätzlich kommt bei der Pauke noch eine Kraft aufgrund der Differenz des Luftdrucks hinzu. Durch Änderung der Spannung kann die Pauke gestimmt werden, hierbei führt eine höhere Spannung zu einer höheren Stimmung.

Während die Saite harmonische Obertöne hat, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind, hat die ideale Membran keine harmonischen Obertöne. Trotzdem besitzt die Pauke eine bestimmte Tonhöhe, weil die Obertöne ein harmonisches Verhältnis zum Grundton haben (Rossing, 1992, S. 128).¹⁴

Aus dem akustischen Spektrum eines Paukenschlags lassen sich mehrere Teiltöne herauslesen. Anhand von Versuchspersonen wurde getestet, mit welchem Sinuston die Tonhöhe des Paukenschlags am ehesten zu vergleichen ist. Der Hauptton des Paukenschlags wurde in einem Drittel der Fälle als solcher identifiziert. Das Zahlenverhältnis der Teiltongfrequenzen der Pauke entspricht nicht ganz dem exakten Verhältnis der Saite 1:2:3:4 usw. Durch gute Stimmung kann jedoch ein nahezu harmonisches Verhältnis der Frequenzen erreicht werden. Die bedeutsamen Frequenzen sind dabei der Hauptton, der den Klang dominiert und die geringste Frequenz hat, die Quinte, deren Frequenz das 1,5-fache der Haupttonfrequenz ist, und die Oktave, die die doppelte Frequenz des Haupttons aufweist (Fleischer, 2010, S. 295).

Bei der 01-Mode¹⁵ schwingt das Fell komplett nach oben und unten, bei der 11-Mode schwingen die beiden Membranhälften entgegengesetzt zueinander (s. Abb. 6) und bei der 21-Mode bewegen sich benachbarte Felder entgegengesetzt, gegenüberliegende gleich (Rossing, 1992, S. 130). Dass der Hauptton der Pauke durch die 11-Mode hervorgerufen wird, fand der britische Physiker Lord Rayleigh heraus. Bei richtiger Stimmung entstehen bei einer Pauke ein starker Hauptton und mindestens zwei harmonische. Die Frequenzverhältnisse der 11-, 21-, 31-, 41-¹⁶ und 51-Moden sind im Idealfall 2:3:4:5:6.

Einige Moden sind in Abbildung 7 auf einem Paukenfell zu sehen, Abbildung 8 zeigt mehrere Schwingungsmoden schematisch. Diese harmonischen Obertöne ermöglichen erst, wie oben angeführt, eine Tonhöhenwahrnehmung. Der Grund für das harmonische Verhältnis der Frequenzen liegt in der Masse der Luftsäule über der Membran, die eine Absenkung der Frequenzen hervorruft. Die beiden weiteren Faktoren, die Luft im Kessel und die Steifigkeit der Membran, haben eine Feinstimmung zur Folge, deren Einfluss auf die Abklingdauer dagegen größer ist. So ergaben Messungen ohne Kessel, dass die Modenfrequenzen 21 und 31 nahezu identisch zu denjenigen mit Kessel waren, weshalb die Luft im Kessel eine geringere Bedeutung als die Luftsäule über der Membran hat. Die Masse der

¹⁴Der Universalgelehrte und Physiker Hermann von Helmholtz erkannte, dass „*jeder Ton, der eine klare Empfindung der Tonhöhe auslöst, mehrere starke harmonische Obertöne enthalten muss*“. (Rossing, 1992, S. 130)

¹⁵Das Zahlenpaar mn gibt die Anzahl m der Knotendurchmesser und n der Knotenkreise an (Rossing, 1992, S. 128).

¹⁶Diese sind in Abbildung 7 zu sehen.

Luftsäule senkt die Frequenzen tieffrequenter Moden, während die hochfrequenten wenig beeinflusst werden. Dieser Aspekt beeinflusst auch die Frequenzberechnung.

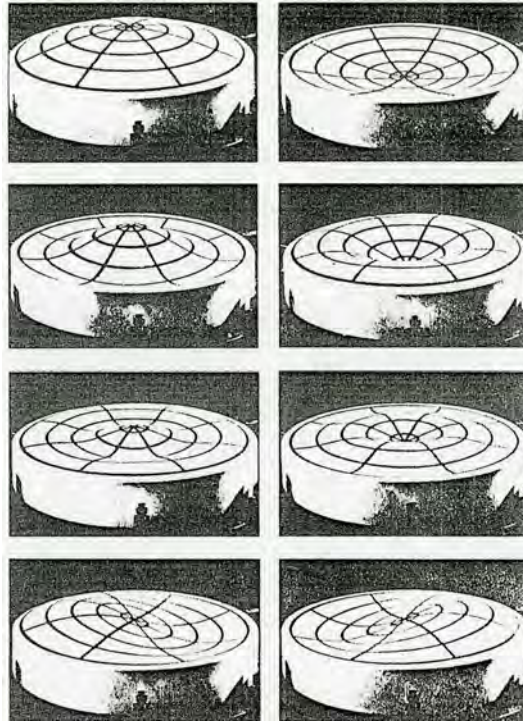


Abbildung 6: Darstellung einer schwingenden Membran, die rechten Bilder stellen die Schwingung nach der Zeit $\frac{T}{2}$ dar; Schwingungsmoden von oben nach unten: 01, 02, 03 und 11 (Hall, 1997, S. 181)

Das Schallspektrum ist von der Anschlagstelle, Form und Härte des Sticks, Stärke und Art des Schlags, sowie der Position des Instruments im Raum abhängig (Rossing, 1992, S. 131f.). Die Schallausbreitung wird von der Mode beeinflusst. Bei guter Schallabstrahlung klingt der Ton schnell ab, sodass ein nicht wohlklingendes, dumpfes Geräusch entsteht (Rossing, 1992, S. 133).

Durch das Anspielen des Fells und die damit verbundene Verformung werden verschiedene Eigenmoden angeregt, die sich in ihrer Frequenz, Form und Dämpfung unterscheiden. Um die Frequenzen den Moden zuzuordnen wird zuerst die erwartete Frequenz mit Hilfe vereinfachender Annahmen berechnet, um sie dann mit den Messwerten zu vergleichen. Das zu Grunde liegende physikalische Modell ist hier die ideale Membran. Dabei geht man davon aus, die Membran „*habe keinerlei Biegefestigkeit, sei vollständig homogen, überall gleich vorgespannt, verlustfrei, am kreisförmigen Rand festgehalten und schwinde (...) ohne Rückwirkung der Luft*“ (Fleischer, 2010, S. 297). Mit den Eigenwerten $(ka)_{mn}$ ergeben

sich die Eigenfrequenzen: $f_{mn} = \frac{(ka)_{mn} c_M}{2\pi a}$ wobei m die Anzahl der Knotendurchmesser, n die der Knotenkreise ist, a der Membranradius. Es gilt zudem $c_M = \sqrt{\frac{S}{\mu}}$ mit S als Vorspannkraft pro Längeneinheit und μ als Masse pro Flächeneinheit.

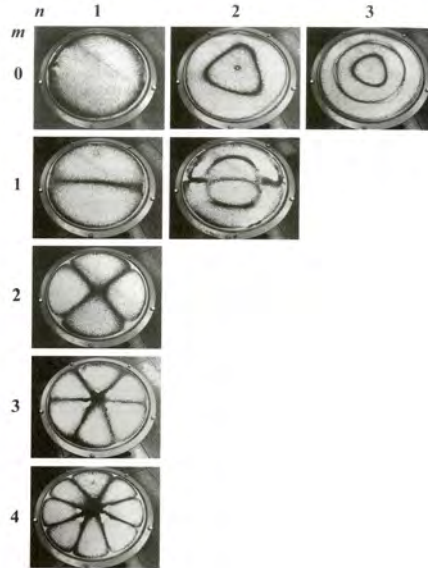


Abbildung 7: Klangfiguren der Mode mn auf einem Paukenfell (Fleischer, 2010, S. 306)

Beeinflussen kann man die auftretenden Teilmoden dadurch, dass eine Mode nur angeregt werden kann, wenn der Spieler nicht am Ort eines Knotens das Fell anschlägt. Beim Anschlag genau in der Fellmitte, würden die 01-, 02- und 03-Mode stärker angeregt werden, die keinen wünschenswerten Klang erzeugen, wohingegen durch das Anschlagen eine handbreit vom Rand entfernt (bzw. bei einem Viertel der Strecke zwischen Rand und Mitte (Fletcher und Rossing, 1991, S. 595)), die $m1$ -Moden, d. h. die harmonischen Obertöne, mehr hervortreten. Der Hauptton, die Quinte und die Oktave entsprechen dabei den 11-, 21- und 31-Moden. Damit liefert das Modell der idealen Membran die Schwingungsformen. Die Abweichungen der experimentellen und theoretischen Frequenzen liegen unter anderem auch in der idealisierten Membran begründet, denn, wie schon angemerkt wurde, hat auch die Luft eine Frequenzänderung zur Folge.

Da das Fell sehr leicht ist, muss, wie oben bereits erwähnt, die umgebende und eingeschlossene Luft berücksichtigt werden, denn die schwingende Membran verursacht neben der Abstrahlung von Schallenergie auch die Bewegung der Luft. Da die schwingende Luft wie eine zusätzliche Masse wirkt, wird die Masse der Luft berücksichtigt. Die so berechneten Frequenzen sind tiefer als die der idealen Membran. Die eingeschlossene Luft im

Kessel wirkt je nach Schwingungsform unterschiedlich auf das Fell. Mit einer Ausnahme wird durch die Hinzunahme der Luft im Inneren auch eine Absenkung der theoretischen Frequenzen erreicht. Bei antimetrischen $m1$ -Schwingungen entsteht der Eindruck einer schwereren Membran, während bei Schwingungen, die zu einer Verdichtung der Luft führen, die Membran wegen der zusätzlichen Federwirkung der Luft steifer wirkt. Da die Luft am stärksten bei der 01-Mode komprimiert wird, macht sich die zusätzliche Feder fast ausschließlich bei dieser Mode bemerkbar; die Frequenz wird erhöht. Bei idealer Stimmung wird die 01-Modenfrequenz so weit erhöht, dass der 11-Ton überwiegt und damit zum Hauptton wird. Insgesamt lässt sich sagen, dass je höher die Stimmung ist, desto geringer ist die Zusatzsteifigkeit und damit wird auch die Frequenz der 01-Mode tiefer als die des Haupttons und ist eventuell merklich hörbar. Dass der Ton, obwohl physikalisch existent, nicht gehört wird, hat seine Ursache in psychoakustischen Phänomenen (Fleischer, 2010, S. 296ff.).

Bei der Berechnung der Frequenzen erhält man ein annähernd harmonisches Verhältnis der $m1$ -Moden. Die Fellspannung, d. h. die Stimmung des Fells beeinflusst die Frequenzen insofern, dass bei einem weniger stark gespannten Fell die Frequenzen niedriger sind als bei einem stärker gespannten Fell. Von der Spannung unabhängig sind hingegen die Verhältnisse der Moden, die zur Klangbildung beitragen. Je stärker die Spannung, desto größer wird die Frequenz, d. h. umso kleiner wird die Schallwellenlänge (Fleischer, 2010, S. 304). Nicht nur die Spannung, auch der Radius der Pauke beeinflusst die Frequenz des Grundtons. Je größer der Radius ist, umso niedriger ist die Frequenz (Fleischer, 2010, S. 297, Rossing, 1992, S. 130). Herleiten kann man diesen Zusammenhang aus folgender Überlegung: Je größer der Radius der Membran, desto größer ist die halbe Wellenlänge im Fall der Schwingungsmode 01. Da sich Wellenlänge und Frequenz umgekehrt proportional zueinander verhalten ($f = \frac{c}{\lambda}$, wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit, also konstant, f die Frequenz und λ die Wellenlänge ist) wird also die Frequenz bei größerer Wellenlänge kleiner.

Der Kessel dient dem Zweck der Trennung von Ober- und Unterseite des Fells, sowie der Frequenzerhöhung der Zirkularmoden. Die Form des Kessels ist für den Klang nicht wichtig (Fletcher und Rossing, 1991, S. 599). Der Zweck der kleinen Öffnung im Kessel wurde zuerst in einer Dämpfung der Grundmode oder in einer weniger steifen Luftmasse vermutet. Versuche mit geschlossener Öffnung konnten jedoch beide Vermutungen widerlegen; es wurden keine nennenswerten Veränderungen des Klanges festgestellt (Rossing, 1992, S. 135).

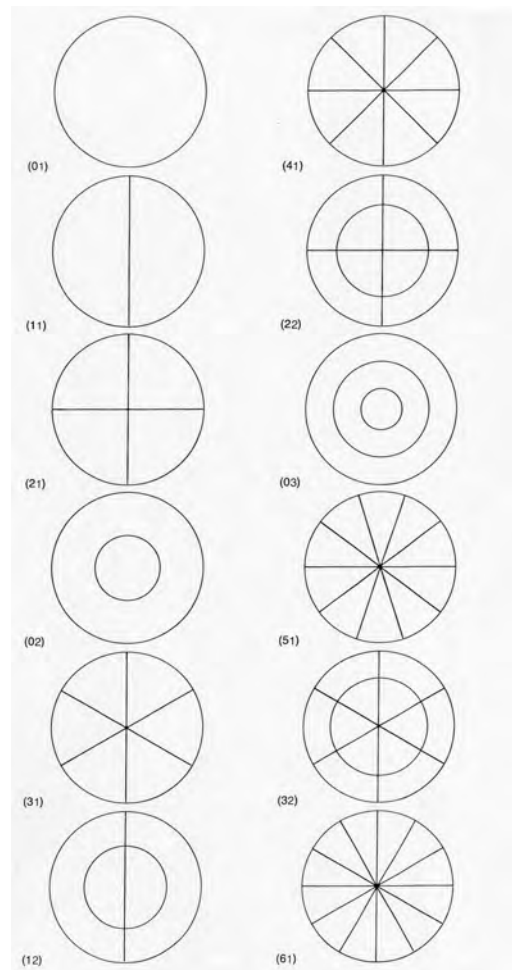


Abbildung 8: Klangfiguren der zwölf tiefsten Moden der idealen Membran beginnend mit der der tiefsten Frequenz zugehörigen Mode (Rossing, 1992, S. 131)

Erkenntnisse aus verschiedenen Messverfahren

Aus Experimenten ging hervor, dass die Abklingdauer sinkt, wenn die Frequenz steigt. Ebenfalls abhängig ist nach Meinung von Paukenspielern die Abklingdauer von der Art des Fells und vom Kesselmaterial. So zeigt sich bei Kalbsfell und Kupfer im Gegensatz zu Mylar und Kunststoff eine höhere Abklingdauer, die zu „besserem“ Klang führt. Die Dämpfungsgeschwindigkeit, also der Energieverlust bezogen auf die Zeit, wird entscheidend von der Schallabstrahlung beeinflusst (Rossing, 1992, S. 134).

Chladnische Klangfiguren: Hier werden die unterschiedlichen Moden (s. Abb. 7 und 8) sichtbar gemacht, indem Sand auf Platten oder Felle gestreut wird, die dann auf unterschiedliche Arten zum Schwingen angeregt werden. Allerdings werden weder die Amplitu-

de, noch die Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Schwingungsbäuchen gemessen. Zu diesem Thema findet sich in Kapitel 7 ein Versuch, der mit Schülern durchgeführt werden kann (Fleischer, 2010, S. 305ff.).

Laser-Messung: Diese Messung dient dazu berührungsfrei, d. h. ohne Verfälschung der Ergebnisse durch eine zusätzliche Masse der Apparatur, die Schwinggeschwindigkeit zu messen (Fleischer, 2010, S. 307).

4.2 Die Trommeln des Schlagzeugsets

Die Trommel besteht aus einem runden Holzzylinder, der oben mit dem Schlag-, unten mit dem Resonanzfell mittels zweier Spannreifen bespannt wird (s. Abb. 9). Die Schrauben, die an Schraubböcken die Spannreifen mit dem Kessel fixieren, können durch Drehen die Spannung und damit die Stimmung der Trommel verändern. Je mehr Stimmschrauben der Kessel hat, desto gleichmäßiger lässt sich die Trommel stimmen. Die kleinen Löcher in der Kesselwand dienen dem Druckausgleich.



Abbildung 9: Trommeln (Mikolajczak, 07/2012, S. 56)

Der Kessel wird aus circa sieben bis neun Lagen Holz aufgebaut oder aus Vollholz hergestellt, was zwar bei hochwertiger Anfertigung einen sehr guten Klang liefert, allerdings auch ein sehr aufwendiges Verfahren darstellt (die Snare kann auch aus Metall gefertigt sein, s. Kapitel 4.2.2). Bei dem Schichtverfahren werden die Holzlagen unter Druckeinwirkung so geklebt, dass die runde Form entsteht, und anschließend versiegelt.¹⁷ Innen sind die Kessel mit einer Lasur überzogen, die dem Eindringen von Feuchtigkeit entgegenwirkt und den Kessel verfestigt (Fletcher und Rossing, 1991, S. 723f.), außen gibt es verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten. Die Klangeigenschaften der Hölzer bleiben auch bei der

¹⁷http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_3.html

Herstellung aus Holzlagen erhalten. Ahorn ist für den Kesselbau die bevorzugte Holzart, da hier die tiefen Frequenzen gegenüber den mittleren und hohen hervortreten. Weitere verwendete Holzarten sind Birke, Buche, Eiche, Mahagoni (das ähnliche Klangeigenschaften wie Ahorn besitzt), Pappel und Linde.¹⁸ Interessant an diesem Material ist, dass nicht nur jeder Baum Holz verschiedener Maserung und Härte hervorbringt, sondern auch innerhalb eines Baumes Unterschiede feststellbar sind. Die Anisotropie einiger akustischer Eigenschaften erfordert eine klare Vorgabe der Richtung in der das Schnittholz verbaut wird. Das Holzstück wird in dünne Schichten geschnitten und zusammen geklebt, sodass die Maserung des Holzes längs des Instruments verläuft und die Jahresringe normal (also senkrecht) zur Oberfläche verlaufen (Fletcher und Rossing, 1991, S. 719ff). Das verwendete Holz hat zwar einen großen Anteil am Klang, aber die gesamte Trommel mit gewisser Materialstärke, Kesselgratung, Spannringen und Fell bestimmt, welche Klangeigenschaften die Trommel besitzt. Mit größerem Kesseldurchmesser wird bei der Fertigung auch die Anzahl der Schichten und damit die Dicke des Kessels erhöht. Der Rand, an dem die Felle aufliegen, die sog. Kesselgratung, sollte sehr eben sein, damit das Fell nicht reißt und gut klingt, denn die Beschaffenheit der Kesselgratung trägt maßgeblich zur Übertragung der Fellschwingungen an den Resonanzkörper, aber auch zu dessen Dämpfung bei. Daher muss hier ein Mittelmaß gefunden werden. Die verschiedenen Typen für die Kesselgratung sind wie in Abbildung 10, nach steigender Auflagefläche geordnet: die einseitige 45°-Gratung (1), die doppelseitige 45°-Gratung (2), die abgerundete, doppelseitige 45°-Gratung (3) und die Vintage-Gratung (4).¹⁹

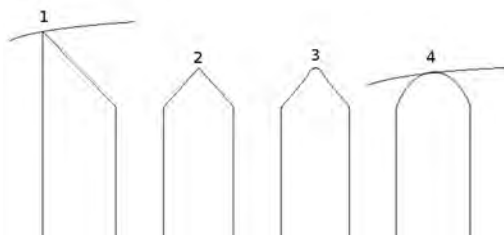


Abbildung 10: verschiedene Gratungsarten

Bei den Trommeln bewirkt die Luftschwingung im Inneren eine Anregung des Resonanzfells, welches dann das Fell beeinflusst und umgekehrt. Die Schallenergie wird über die Felle übertragen (Keune, 1975, S. 12). Musikalische Eigenschaften wie bei der Pauke beeinflussen auch hier die Luftsäule über der schwingenden Membran, die Luft im Kessel und

¹⁸http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_4.html

¹⁹http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_6.html

die Biegesteifigkeit die Frequenz der Membran. Im Gegensatz zur Pauke und zur indischen Tabla ist hier keine definierte Tonhöhe erkennbar (Fletcher und Rossing, 1991, S. 583). Je nach Größe und Klangeigenschaften unterscheidet man die Trommeln nach Bassdrum, Snaredrum und Tomtoms, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

4.2.1 Bassdrum und Fußmaschine

Die Bassdrum erzeugt die tiefen Töne²⁰ und strahlt im Orchester die meiste Energie ab (Fletcher und Rossing, 1991, S. 599). Sie wird auch Große Trommel genannt, denn sie ist die größte Trommel (s. Abb. 11) im Schlagzeugset; Ihre Größe variiert meist im Bereich von 16 bis 22 Zoll²¹. Sie besitzt zwei Felle, das Schlag- und das Resonanzfell, die unterschiedlich stark gespannt sind. (Meist wird das Schlagfell stärker gespannt als das Resonanzfell.) Seitlich befinden sich justierbare Ständer, die die Impulse durch die Fußtritte abfangen und die Basstrommel stabilisieren, was nicht nur wegen der häufig oben auf der Bassdrum angebrachten Tomtoms, sondern auch aufgrund der sonst auftretenden Verschiebung durch die Impulserhaltung sinnvoll ist.



Abbildung 11: Seitenansicht der Bassdrum mit Fußmaschine
(http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html)

Da die Basstrommel mit dem Fuß angespielt wird, bedarf es einer Fußmaschine, die unterschiedlich konstruiert sein kann und in die der Schlägel eingespannt wird wie in Abbildung 12 zu sehen ist. Die Fußmaschine gibt den Impuls des Fußes an den Schlägel weiter und wird zur Stabilisierung an dem unteren Rand der Trommel an der Schlagfellseite festgeschraubt. Eine Feder bewirkt, dass der Schlägel (auch Beater genannt) in seine Ausgangsposition zurückschwingt. Bei guten Fußmaschinen spricht der Beater schnell an und schwingt unvermittelt zurück. Sehr oft hat das Resonanzfell der Bassdrum ein Loch und die Bassdrum im Inneren Dämpfungsmaterial, damit kein Hall entsteht, wobei hier auf das richtige Maß

²⁰http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html

²¹http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_7.html

geachtet werden muss, denn zu viel Dämpfung hat einen zu dumpfen Klang zur Folge. Das Loch dient auch zur Tonabnahme, d. h. ein Mikrofon kann zu Aufnahmezwecken in die Bassdrum gelegt werden.²²



Abbildung 12: Fußmaschine (von Bohr, Juli/August 2012, S. 9)

Die Frequenzen der 01-, 11-, 21-, 31- und 41-Moden haben ein nahezu harmonisches Frequenzverhältnis; träten die unharmonischen Moden weniger hervor, hätte die Bassdrum eine definierbare Tonhöhe. Aus der Kopplung der beiden Felle entsteht bei niedrigen Frequenzen ein Phänomen, bei dem für den Fall, dass beide Felle dieselbe Stimmung haben, jeweils zwei Frequenzen für die 01- und für die 11-Mode auftreten. Dabei sind die Frequenzen der 01-Mode die eines zwei-Massen-Oszillators, mit $f_1 = f_0$ und $f_2 = \sqrt{f_0^2 + 2f_c^2}$ wobei f_0 die Frequenz der Membran ist und f_c die Kopplungsfrequenz²³. Bei fehlendem Resonanzfell besteht ein geringer Unterschied zu den gemessenen Frequenzen bei gleicher Fellspannung der beiden Felle. Die Abklingrate ist tendenziell größer, wenn beide Felle dieselbe Spannung haben, im Vergleich dazu, wenn das Resonanzfell die kleinere Spannung aufweist, fehlt oder die bevorzugte Stimmung vorliegt. Die Abklingrate ist auch vom umgebenden Raum abhängig, denn die Wellenlängen bei diesen Frequenzen sind im Meterbereich. Schwingt eine Membran mit endlicher Amplitude, so steigt ihre Durchschnittsspannung (Fletcher und Rossing, 1991, S. 599ff.).

²²http://www.thomann.de/de/onlineexpert_98_1.html

²³Die Frequenzen erhält man aus den beiden Differentialgleichungen $x''_A + (\omega_0^2 + \omega_c^2)x_A - \omega_c^2x_B = \frac{F_0}{m} \cos \omega t$ und $x''_B + (\omega_0^2 + \omega_c^2)x_B - \omega_c^2x_A = 0$. Die Addition liefert ω_1 , durch Subtraktion erhält man ω_2 , wenn $q_1 = x_A + x_B$, $q_2 = x_A - x_B$ über den Zusammenhang $\omega = 2\pi f$ schließlich f_1 und f_2 . (Fletcher und Rossing, 1991, S. 100)

4.2.2 Snaredrum

Die Snaredrum (s. Abb. 13), kurz Snare oder auch Kleine Trommel (Keune, 1975, S. 10) genannt, hat oft einen Durchmesser von 14 Zoll und variierende, aber wie der Name schon andeutet, vergleichsweise geringe Tiefen²⁴ und besitzt zwei Felle. Unter dem Resonanzfell befindet sich dabei ein sogenannter Snareteppich aus mehreren spiralförmigen Drähten, die durch die Membranschwingung des Resonanzfells zum Schwingen angeregt werden und so gegen das Fell schlagen (Fletcher und Rossing, 1975, S. 602). Durch einen mechanischen Hebel wird ein Ein- und Ausschalten des Snareteppichs ermöglicht, wodurch zwei unterschiedliche Klänge hervorgerufen werden. Mit anliegenden Drähten ist der Klang „metallener“, während die Snare ohne anliegende Drähte wie ein normales Tomtom klingt. Bei stärkerer Spannung des Teppichs klingt das Rasseln kürzer, bei weniger Spannung klingt es länger nach. Durch den Snareteppich klingt die Snare differenzierter, weshalb sie sich von den anderen Trommeln klanglich abhebt und somit auf ihr viel mehr Klangfiguren gespielt werden.²⁵



Abbildung 13: Snare (http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html)

Für die Art der mechanischen Abhebung gibt es unterschiedliche Lösungen. Bei der Parallelabhebung ist der Hebel mit einem Gestänge verbunden, das die andere Seite der Teppichhalterung mitbewegt, sobald der Hebel betätigt wird. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit der Pseudoparallelanhebung. Hier reagiert eine dem Hebel gegenüberliegende Feder auf Zug oder Lockerung durch die Hebelbewegung. Neben diesen ausgefeilten Techniken gibt es auch viele eher einfache Vorrichtungen. Snares sind die einzigen Trommeln innerhalb des Schlagzeugsets, die auch aus Metall hergestellt werden. Verwendung finden Stahl, Messing, Aluminium, Kupfer und Bronze.²⁶

Die Kopplung der beiden Felle tritt (wie bei der Bassdrum) auf, überwiegt im niedrigen Frequenzbereich und wird durch die eingeschlossene Luft oder den Kessel erzeugt. Dies führt zu Modenpaaren. In der 01-Mode schwingen beide Felle entweder in dieselbe oder die entgegengesetzte Richtung, wobei der zweite Fall eine größere Frequenz aufweist.

²⁴http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_7.html

²⁵http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html

²⁶http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_5.html

Bei der 11-Mode schwingt die Luft entweder von einer Seite zur anderen innerhalb der Trommel, oder beide Felle bewegen sich in dieselbe Richtung, wie in Abbildung 14 rechts, was eine höhere Frequenz liefert, da der Einfluss der Luftsäule hier geringer ist, denn der Druckunterschied zwischen der Luft im Kessel und außen ist hier geringer. Experimentell kann man die Frequenzen der einzelnen Felle ermitteln, indem das andere Fell beschwert wird. Dadurch gewährleistet man trotzdem die Existenz der eingeschlossenen Luft.

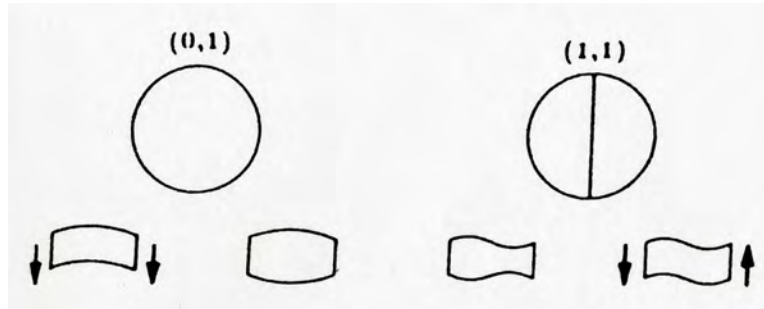


Abbildung 14: Die beiden niedrigsten Moden der Snare mit den jeweiligen Schwingvarianten (Fletcher und Rossing, 1991, S. 603)

Die tiefsten Moden des freien Kessels sind die zylinderförmigen Kesselmoden, also nicht die der Membran, mit m Knotenlinien und n Knotenkreisen (s. Abb. 15). Die Kopplung der beiden Felle ist von der Masse und Spannung abhängig. Bei guter Spannung und ausreichend großer Amplitude kommt es dazu, dass die Membran im Schwingungszyklus an derselben Stelle (Fletcher und Rossing, 1991, S. 603) bleibt, d. h. es bildet sich eine stehende Welle aus. Damit die Snare einen Klang erzeugt, ist eine gewisse Amplitude nötig, welche bei steigender Spannung zunimmt. Bei optimaler Spannung bewegen sich Snare und Fell mit maximaler Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung im Moment des Kontakts. Ist die Snare locker gespannt, so kann ein mittelstarker Schlag ausreichen damit die Membran die kritische Amplitude übersteigt; bei hoher Spannung ist ein starker Schlag nötig (Fletcher und Rossing, 1991, S. 602).

4.2.3 Tomtoms

Der Durchmesser der Tomtoms (s. Abb. 16), kurz Toms genannt, reicht von ungefähr 8 bis 18 Zoll, die Tiefen liegen zwischen 8 und 20 Zoll. Sie können ein oder zwei Felle besitzen. Besonders wenn sie einfellig sind, haben diese Trommeln, zu denen auch die Bongos oder Congas gehören, eine feststellbare Tonhöhe. Auch Felle mit sogenanntem „Dot“ (Fletcher und Rossing, 1991, S. 606), einer kreisrunden Verstärkung in der Mitte des Fells haben

aufgrund der Frequenzverschiebung eine besser erkennbare Tonhöhe. Insgesamt lässt sich feststellen, dass je größer dieser „Dot“ ist, desto harmonischer ist das Verhältnis und desto größer ist die Abklingdauer (ebenda, S. 606ff.). Falls die Trommeln zwei Felle besitzen, grenzen sie sich abgesehen von der Größe nicht von der Bassdrum ab. Die Größe der Tomtoms beeinflusst den Klang, kleine klingen hierbei ähnlich wie Bongos und haben eine höhere Frequenz, große erinnern an Pauken und weisen tiefere Frequenzen auf. Unterscheiden kann man die Tomtoms in Hängetoms, die auf der Basstrommel bzw. am Beckenständer befestigt sind und Standtoms, die auf ihren Standfüßen stehen, weshalb sie sich neben der Bassdrum befinden (s. Abb. 16).²⁷

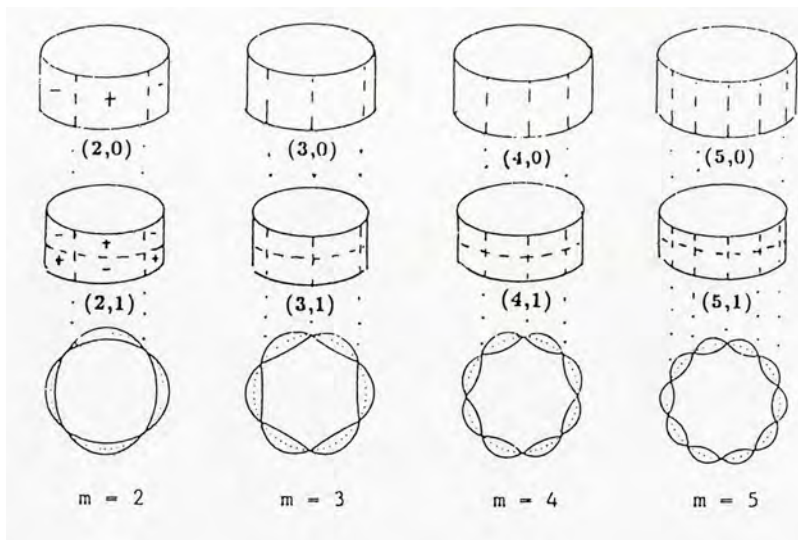


Abbildung 15: Schwingungsmoden des Zylinders (Fletcher und Rossing, 1991, S. 605)

Genau wie bei der Snare erhält man zwei 01-Moden, wenn das Tom zwei Felle besitzt. In diesem Fall ist auch die Schallabstrahlung effektiver. Mit starken Schlägen kann eine Spannungsänderung einhergehen, die zu einer kurzzeitigen Frequenzerhöhung und somit zu einer wahrnehmbaren Tonhöhe führt. Das anschließende Absinken der Frequenzen nach einer oder mehreren Sekunden bewirkt jedoch wieder eine sinkende Tonhöhe. Um diesem Phänomen entgegenzuwirken, kann ein Dämpfungsring auf das Tom gelegt werden, der aufgrund der zusätzlichen Masse zu einer erhöhten Schersteifigkeit führt und somit die Frequenzverschiebung verhindert. Auch bei erhöhter Spannung wird die Frequenzänderung geringer. Bei einem Schlag ins Zentrum der Membran geht ein hoher Anteil der Energie in die 01, 02-Moden usw. über. Diese Energie überträgt sich mit der Zeit auch auf

²⁷http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html

die anderen Moden (Fletcher und Rossing, 1991, S. 606ff.). *“The sound decay time depends on a number of factors, such as the type of drumhead, the tension, the kettle weight and material, and especially the way in which the drum is supported.”* (Fletcher und Rossing, S. 609) Die Abklingdauer ist von der Fellart, der Spannung, der Masse und vom Material des Kessels und besonders von der Art der Befestigung abhängig. Bei längeren Halterungen werden die Abklingzeiten wegen der zusätzlichen Masse kleiner.



Abbildung 16: Hänge- und Standtom
(http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html)

5 Sticks

Die in dieser Arbeit betrachteten Schlaginstrumente werden alle mit Trommelstöcken angeschlagen. Je nach Instrument bzw. gewünschtem Klang werden andere Schlägel verwendet, da unterschiedliche Stöcke verschiedene Klangfarben erzeugen. Für das Schlagzeug werden hauptsächlich Holzschlägel, sog. Drumsticks oder auch kurz Sticks, verwendet, für Pauken in der Regel Filzschlägel. Neben den Sticks gibt es auch Rods (gebündelte Stäbe) und Schlagzeugbesen (engl. Brushes), die eine geringere Lautstärke beim Anschlagen erzeugen, sowie Mallets, die einen weich überzogenen runden Kopf haben (s. Abb. 17) und noch viele weitere.²⁸

Da bei den hier besprochenen Schlaginstrumenten hauptsächlich Sticks verwendet werden, wird hier nur auf diese Form eingegangen. Der Stick ist ein gerader, schmaler Holzstock, der im oberen Viertel *„konisch verläuft und in einer erbsen- bis olivenförmigen Spitze (Schlägelkopf) endet.“* (Keune, 1975, S. 11). Den Übergang von der Spitze zum normal dicken Teil der Sticks, der konisch verläuft, wird Schulter genannt. Der schmalste Teil des Sticks ist direkt vor dem Kopf (s. Abb. 18).²⁹

Sticks können sich also nicht nur in ihrer Länge, Durchmesser, Material, Härte, Oberfläche, Masse, Geometrie und Balance sondern auch in ihrer Kopfform unterscheiden (Flet-

²⁸http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_4.html

²⁹http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_3.html

cher und Rossing, 1991, S. 639 Keune, 1975, S. 10).³⁰ Die Spitze des Sticks kann aus Holz oder aber auch aus Nylon sein, dabei hat Nylon den Vorteil, dass der Anschlag sowohl auf den Becken, als auch auf den Toms klarer klingt. Alle oben genannten Faktoren sowie die Anschlagstelle beeinflussen den Klang (Keune, 1977, S. 10, Rossing, 1992, S. 132, Fleischer, 2010, S. 297). Bei der Frage nach dem passenden Stick spielt deshalb auch die gewünschte Musikrichtung und Einsatzart eine Rolle.³⁰ Verwendete Materialien sind hauptsächlich Holz, bevorzugte Arten sind dabei Hickory (eine harte Nussholzart), Eiche, Ahorn und Hainbuche.³¹ Die Bassdrumbeater sind die Schlägel, die für die Fußmaschine verwendet werden. Auch hier werden verschiedene Materialien, Kontaktflächenrößen und Massen verwendet um verschiedene Klänge zu erzeugen.³²



Abbildung 17: Sticks, Besen, Rods und Mallets

Die Länge des Sticks hat eine Auswirkung auf den Schwerpunkt, deshalb sind längere Stöcke aufgrund der größeren Hebelwirkung lauter, kürzere sind besser kontrollierbar. Sticks sind meist zwischen 38,5 und 42,5 cm lang. Da man die Sticks näher am Schwerpunkt greift, hätten noch längere Sticks keinen größeren Spielradius. Je dicker ein Stick ist, desto haltbarer ist er, allerdings werden sie dann auch aufgrund der Massenträgheit schwerer händelbar. Abhängig von der Steilheit und Länge der Schulter ist die Massenverteilung und damit auch der Schwerpunkt anders. Eine längere Schulter bewirkt, dass der Stick wendiger ist. In diesem Fall sollte der Stick auch weiter hinten gegriffen werden, da der Schwerpunkt dort ist, falls die Schulter kürzer ist, liegt er mittiger. Ein schwererer Stick bringt das ganze Spektrum des Schlaginstruments hervor, ein leichterer Stock hingegen hat ein sehr obertonreiches Spektrum und erzeugt eine geringere Lautstärke. Eine kürzere Stickschulter bewirkt lautere Anschläge. Besonders beim Anspielen des Ridebeckens macht sich die Auswirkung der Kopfform (s. Abb. 19) und dessen Material auf den Klang bemerkbar. Die drei Kategorien der runden, ovalen und dreieckigen Köpfe, lassen sich weiter in die vorliegenden Formen Kugel und Fass, Oval bzw. Eichel und Tropfen unterteilen.

³⁰http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_1.html

³¹http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_2.html

³²http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_5.html

Der Tropfen ist sehr tiefenlastig, die Eichel bietet ein breites Spektrum. Die ovale Kopfform lässt viele Frequenzen der Mitten erklingen. Die Kugel bietet einen sehr klaren Klang beim Anspielen der Becken und das Fass eignet sich, wenn eine hohe Lautstärke erwünscht ist. Je mehr Kontakt der Stickkopf mit dem Fell hat, umso dumpfer ist der Klang, d. h. bei den Dreiecksformen kommt es auch auf den Winkel an, da ein zu steiler Winkel dazu führt, dass die Kontaktfläche größer wird. Bei den runden Formen ist die Kontaktfläche unabhängig vom Winkel immer dieselbe, der Klang ist klarer. Die ovale Kopfform ist ein guter Kompromiss zwischen den oberen beiden Formen, da der Klang wärmer ist und die Kontaktfläche zwischen den beiden anderen liegt.³³



Abbildung 18: Anatomie des Sticks
(http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_3.html)

Ein Schlägel, dessen Masse ungefähr der Masse des Fells entspricht, kann den maximalen Energiebetrag an die Membran transportieren. Die Kontaktzeiten für unterschiedlich schwere Schlägel variieren: leichte Schlägel haben eine kürzere, schwerere eine längere Kontaktzeit mit dem Fell. Die längere Kontaktzeit führt zu einer erwünschten Dämpfung der höheren Töne (wünschenswert ist bei Trommeln eine hohe Amplitude sowie eine kurze Abklingdauer). Das Hertzsche Gesetz sagt aus, dass die Kraft des Aufschlags proportional zur Deformation des Sticks ist: $F = R^{\frac{1}{2}} D \delta^{\frac{3}{2}}$. Dabei ist R der Radius des Sticks, D eine von den Eigenschaften des Schlägels abhängige Größe und δ die Deformation des Schlägels. Effektiv können Schlägelstöße durch einen piezoelektrischen Kraftumwandler getestet werden (Fletcher und Rossing, 1991, S. 639ff.).



Abbildung 19: Kopfformen der Sticks
(http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_3.html)

³³http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_3.html

Teil II

Versuche

In der 10. Jahrgangsstufe findet sich im Lehrplan des bayrischen Gymnasiums unter den Anregungen der Bereich Akustik mit den einzelnen Themen „*Schallpegel, Untersuchungen an Instrumenten, Fourier-Analyse, Physik des Hörens*“³⁴. Mit Hilfe der Schlaginstrumente können also klangliche Untersuchungen durchgeführt und die Klänge analysiert werden. Zudem wird auch die Physik am Computer, d. h. Computermodellierung und -simulation aufgeführt. Es besteht daher sowohl die Option in der 10. Klasse als auch in der Oberstufe im Rahmen eines Wissenschaftspropädeutischen Seminars die Physik des Schlagzeugs in abgewandelter Themenstellung z. B. als „Die Physik verschiedener Instrumente“ zu behandeln und dabei die Themen „Wellencharakter von Schall, Schalldruck und Schalldruckpegel, Frequenz und Tonhöhe“³⁵ miteinzubeziehen.

In Zusammenhang mit einem Musikinstrument wie den Schlaginstrumenten bietet sich die Möglichkeit interessante Teilbereiche der Akustik wie die Analyse von akustischen Signalen am Computer, Schwingungsmoden und Fourier-Analysen sowie Schall zu thematisieren. Die Schwingungsmoden helfen dabei den Ursprung akustischer Signale zu verstehen und zu interpretieren. Bei der Auswertung von Klangspektren kann die Fourier-Analyse verwendet werden und sich der Einsatz von Computern als sinnvoll und hilfreich erweisen.

Die Interessen an der Musik können sehr vielfältig sein. Die meisten Schüler hören Musik, viele spielen ein Instrument, singen oder tanzen. Somit findet sich die Musik nicht nur in ihrem Alltag sondern auch in ihrer persönlichen Welt. Die Musik kann einerseits subjektiv und andererseits physikalisch betrachtet werden. Denn Musik kann künstlerisch wertvoll sein und Emotionen hervorrufen, aber auch von einer objektiveren Seite betrachtet werden, denn „*Physikalisch ist eine Symphonie nichts anderes als eine Luftdruckkurve*“, wie bereits Albert Einstein feststellte (Nordmeier, Voßkühler, 2005, S. 9, in: Praxis der Naturwissenschaften).

Auch das Vorwissen der Schüler muss beachtet werden. So können Schüler der Primarstufe häufig noch nicht die Erhöhung der Amplitude eines Tons mit dem Anbringen eines Klangkörpers in Verbindung bringen. Genauso fehlt oft der direkte Zusammenhang zwischen der Ursache des Schalls, der Schwingung, und dem hörbaren Effekt, da die Schüler den Schlag fälschlicherweise als Ursache eines Tons interpretieren. „*Erst ab Klasse 4 sind*

³⁴<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26439>

³⁵<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=27147>

Vorstellungen einer allseitigen Ausbreitung im Sinne eines Strahlungsmodells erkennbar“ (Wulf, Euler, 1995, S. 43). Töne werden doppelt interpretiert: einerseits als Teilchenstrahl, andererseits als Welle. Letzteres erhält der Schüler erst durch die physikalische Betrachtung (Wulf, Euler, 1995, S. 42ff.) Berücksichtigt werden muss, dass das Vorwissen, das die Schüler mitbringen, aus dem Musikunterricht und aus der eigenen Erfahrung mit Musikinstrumenten stammt, sodass bisher wenig Musikalisches von der physikalischen Sichtweise aus betrachtet wurde und auch einer sehr subjektiven Wahrnehmung unterliegt, die auch zu falschen Schlussfolgerungen verleiten kann.

Die Akustik vereint Themenbereiche der Physik und der Musik. Auch die Mathematik liefert mit dem Lösen der Differentialgleichungen der Membranschwingung sowie der Fourier-Analyse einen wichtigen Beitrag zur Akustik, wodurch die viel geforderte fächerübergreifende Gestaltung des Unterrichts erreicht wird.

Das Problem des Schalls ist wie bei vielen Themen in der Physik, dass man ihn nicht beobachten kann und dass er nicht einfach, sondern nur indirekt darstellbar ist. Der große Vorteil ist jedoch, dass Schall ebenso wie die Eigenschaften des Schalls mit den Ohren wahrgenommen werden können.

Ziel der nun folgenden Versuche ist es, den Schülern die grundlegenden Phänomene der Akustik exemplarisch mit Hilfe ausgewählter Schlaginstrumente und deren Funktionsweise näher zu bringen, um damit die Akustik interessanter zu gestalten. Am Ende dieser Unterrichtseinheit sollen die Schüler die Fachtermini richtig einsetzen können, und ihr Wissen auch auf andere Instrumente bzw. allgemein auf Schallereignisse anwenden können.

Damit die Schüler die neuen Informationen im Bereich der Akustik gut einordnen können, ist es wichtig, dass bereits Grundlagen im Bereich der Physik und der Akustik geschaffen wurden. Dabei wird Folgendes vorausgesetzt bzw. als Grundlage vorbesprochen oder wiederholt: Ein Ton entsteht durch eine Schwingung (nicht durch einen Schlag, wie fälschlicherweise oft vermutet wird). Nur die Schwingung selbst wird bei Schlaginstrumenten (anders als bei Zupf-, Streich- und Blasinstrumenten) durch den Schlag hervorgerufen. Ein harmonischer Klang entsteht, wenn, im Falle gleichgespannter Saiten, ein harmonisches, d. h. ganzzahliges Verhältnis der Saitenlängen vorliegt. Ton, Klang, Geräusch und Knall sind Begriffe, die unterschieden werden. Die Lautstärke eines Klanges ist abhängig von dem Abstand des Zuhörers. Zur Schallausbreitung ist Materie nötig; Schall breitet sich radial aus. Eine Erhöhung der Lautstärke lässt sich durch das Anbringen eines Klangkörpers erzielen (Wulf, Euler, 1995, S. 39ff.).

Als methodische Großform eignet sich hier besonders das entdeckende Lernen, bei der ein ungelöstes Problem im Vordergrund steht. Als Sozialform ist beim Experimentieren

die Partnerarbeit oder Gruppenarbeit günstig. Der Einstieg sollte alle Schüler zu den Experimenten hinführen und das Grundwissen für die Experimente sichern. Die Erarbeitung übernehmen zum Großteil die Schüler, indem sie die Experimente nicht nur durchführen, sondern auch auswerten. Eine Hilfestellung können dabei die Ideen zur Realisierung einer Unterrichtseinheit sein, die nach dem jeweiligen Kapitel zu finden sind. Zum Schluss ist eine Ergebnissicherung durch die einzelnen Schüler in der ganzen Klasse sinnvoll, bei der der Lehrer kontrolliert und bei Bedarf Verbesserungsvorschläge äußern kann.

Die Medien, die hier bei der Recherche von Informationen nützlich sind, sind nicht nur Fachbüchern, sondern auch das Internet. Zur Auswertung wird auf jeden Fall ein Computer mit geeigneter Software benötigt. Die Ergebnissicherung kann unter dem Einsatz vielfältiger Medien erfolgen.

Der Lehrer hat die Aufgabe die Experimente zu planen, dazu gehört, dass er die Experimente zuvor auch selbst durchführt, den Schülern den Einstieg in das Thema zu erleichtern und beim Experimentieren den Schülern als Berater zur Seite zu stehen. Bei der Ergebnissicherung hat der Lehrer die Rolle des Kontrolleurs, der eingreift, wenn dies nötig ist.

Die nachfolgenden Kapitel dienen dem Lehrer als Orientierung und Anreiz zur Planung des Unterrichts im Themenbereich Akustik.

6 Klanganalyse

Ein durch ein Musikinstrument erzeugtes Geräusch kann nur selten wie etwa bei Pauken einer einzigen Tonhöhe zugeordnet werden. Die Komplexität der Schwingungen der Schlaginstrumente kann reduziert werden auf die gekoppelten Pendel, die ein einfacheres Schwingungssystem darstellen (Hall, 1997, S. 163). Untersucht werden kann hier nicht nur die klanglichen Unterschiede der verschiedenen Schlaginstrumente, der Einfluss der Anschlagstellen, die Dämpfung und Stimmung, sondern es können auch Schlag- und Stickarten verglichen werden.

Dieser Versuch soll den Schülern einen Einblick geben wie komplex natürlich erzeugte akustische Signale sind und zum Nachdenken über die Entstehungsursachen anregen. Der Versuch beinhaltet die Analyse von Klängen, d. h. es lassen sich die Frequenz, Amplitude und die Abklingdauer ermitteln und vergleichen. Der Schüler soll dadurch herausfinden, warum Geräusche so unterschiedlich sind und wie das zu erklären ist.

Schüler sollten hier lernen die Begriffe Ton, Klang, Geräusch und Knall von der Wortbedeutung und auf Diagrammen betrachtet unterscheiden zu können, falls dies noch nicht der Fall ist.

Ein Ton, welcher speziell durch eine Sinusfunktion darstellbar ist, ist ein gleichmäßiges Schallereignis. Im Gegensatz dazu ist ein Klang eine Überlagerung aus mehreren harmonischen Schwingungen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache voneinander sind. Den Gegenpol zu diesen Schallereignissen bilden das Geräusch und der Knall. Bei beiden ist keine Periodizität erkennbar, da hier viele unterschiedliche Schwingungen überlagert vorliegen. Der Knall weist insbesondere einen starken Anstieg der Amplitude zu Beginn auf, der mit einer schlagartigen Druckschwankung einhergeht (Kadner, 1994, S. 33ff.).

Benötigt werden hier:

- ein Schlagzeug mit Trommeln und Becken, evtl. eine Pauke
- verschiedene Sticks, Rods und Besen
- geeignete Mikrofone
- Computer mit einer Software zur Klanganalyse (im vorliegenden Fall wurde Sounds verwendet)

Einführung in den Versuch: Was ist eine Fourieranalyse?

Vor dem Versuch sollte den Schülern erklärt werden was eine Fourieranalyse ist und wozu diese gebraucht wird. In der heutigen Zeit spielt die Fourieranalyse z. B. bei der Speicherung von Audiodateien eine große Rolle.

Sinnvoll ist es, bei der Fouriersynthese, also der Überlagerung von Sinuswellen zu beginnen. Dabei kann ein Geogebra-Applet³⁶ hilfreich sein, bei dem zwei Graphen (schwarz und blau) mit veränderlichen Amplituden und Frequenzen und ein dritter Graph (rot) zu sehen ist (s. Abb. 20a). Die Schüler sollen mit Hilfe dieses Applets herausfinden wie diese drei Graphen zusammenhängen. Hieran kann man anknüpfen und erarbeiten, wann eine Superposition verschiedener Sinuswellen wieder eine periodische Welle liefert. Dies ist der Fall, wenn die Frequenzen der Sinuswellen eine Teiltonreihe bilden, d. h. wenn $f_k = n \cdot f_1$ gilt.

Nun kann umgekehrt die Fourieranalyse diskutiert werden. Dabei gilt, dass jede beliebige Wellenform aus einer Addition verschiedener Sinuswellen gewonnen werden kann, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Haupttonfrequenz sind. Hier kann nun das zweite Geogebra-Applet verwendet werden, bei dem vier Graphen zu sehen sind, von denen zwei (schwarz und blau) eine veränderliche Amplitude und Frequenz aufweisen, und die beiden anderen (rot und grün) zur Deckung gebracht werden sollen. Auch hier ist wieder der rote Graph die Überlagerung aus dem schwarzen und blauen (s. Abb. 20b), der grüne ist vorgegeben und unveränderlich. In Abbildung 20c ist die Lösung des zweiten Geogebra-Applets zu sehen.

Diese Einführung erleichtert den Schülern das Verständnis bei der Betrachtung und Auswertung der Zeitreihendarstellung mit dem Programm Sounds. Der Zusammenhang zu den FFT-Darstellungen, in denen die Amplitude über der Frequenz aufgetragen ist, lässt sich mit einem Frequenz-Analyzer veranschaulichen, der durch einen variablen Filter nur bestimmte Frequenzen durchlässt und deren Amplitude misst. Da das gesamte Frequenzspektrum analysiert wird, ergibt sich dann der Amplitudenverlauf, wie in Abbildung 22 und 23 zu sehen ist (Hall, 1997, S. 146ff.).

³⁶Ein umfangreicheres Geogebra-Applet findet sich in der Hausarbeit "Physik und Musik" von Englert

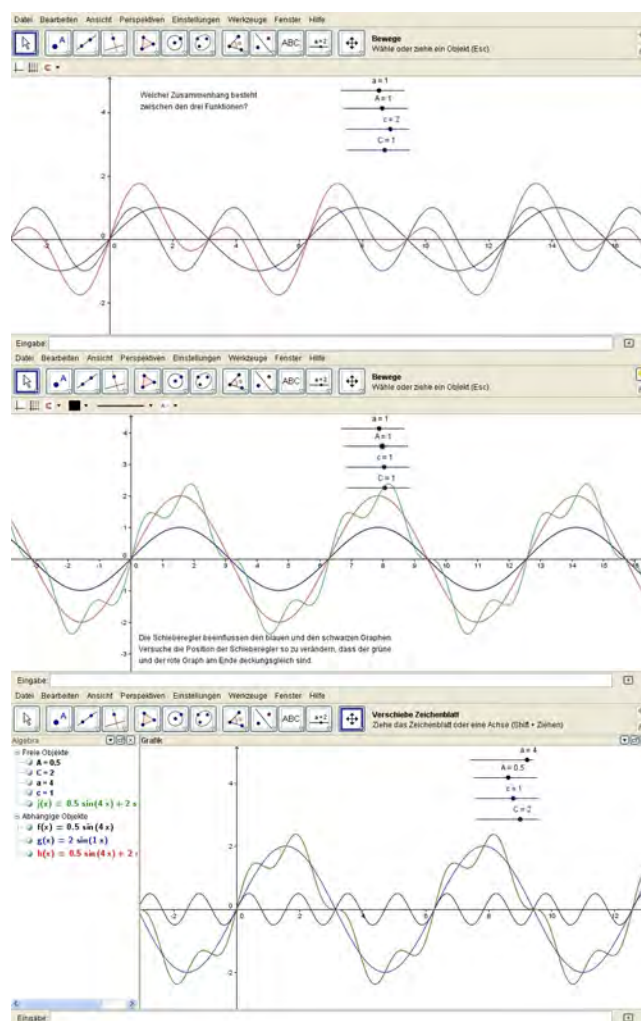


Abbildung 20: Screenshots der Geogebra-Applets: a) erstes Applet mit der Überlagerung zweier Graphen, b) zweites Applet mit der Aufgabe den roten und den grünen Graphen zur Deckung zu bringen, in c) sieht man die Lösung der Aufgabe aus dem zweiten Applet

Aufbau und Durchführung

Für die Durchführung wäre es praktisch eine mit einem Schlagzeug vertraute Person die Geräusche einspielen zu lassen. Dies gewährleistet nicht nur, dass die Person gleichmäßig stark spielt und dass wenn erforderlich dieselbe Stelle angeschlagen wird, sondern auch, dass die Instrumente sachgerecht behandelt werden.

Eine gute Alternative ist es, die Klänge direkt über das im Laptop integrierte Mikrofon, bzw. über ein extern angeschlossenes Mikrofon, und nach dem Aufrufen des Programms Sounds unter der Einstellung „Musik mit dem Mikrofon aufzeichnen“, aufzunehmen (Nordmeier und Voßkühler, 2006, S. 5).

Statt mit der Klasse alle diese Aufnahme zu machen, kann hier auch auf die aufgenommenen Klänge der CD zurückgegriffen werden, denn die Aufnahme benötigt viel Zeit, man gewinnt aber nur wenige neue Erkenntnisse. Der interessante Aspekt an diesem Versuch ist die Auswertung. Allerdings sollte das Prinzip besprochen und auch ein paar Klänge nach technischen Möglichkeiten aufgenommen werden, damit der Vorgang an sich nachvollzogen wird und Zusammenhänge zwischen realer Wahrnehmung und Darstellung durch das Programm beobachtet werden können. An diesen Aufnahmen kann dann auch ein Vergleich mit den CD-Aufnahmen stattfinden. Auch wäre hier eine Thematisierung der Funktionsweise von Mikrofonen passend und sinnvoll. Die CD-Aufnahmen sind professionell gefertigt worden, d. h. es wurde ein akustisch präparierter Raum gewählt, der wenig Hall erzeugt und die verschiedenen Mikrofone (Overhead- und Bassdrum- und dynamische Mikrofone) wurden genauso positioniert wie im Aufnahmestudio. Die Aufzeichnung ist also von hoher Qualität.

Sounds

Das zur Analyse verwendete Programm Sounds bietet die physikalische Visualisierung von akustischen Signalen. Es ermöglicht nicht nur die Fourieranalyse, sondern auch die Zeitreihendarstellungen und Analysen in Echtzeit. Eine weitere hilfreiche Möglichkeit bietet die Angabe des Notenbildes und des Obertonspektrums, da es erlaubt Rückschlüsse auf das Instrument oder die Stimmgruppe zu ziehen. Die Funktion Sonogrammdarstellung zeigt die Fourierspektren als Sonogramm. Dazu wird der Hauptton rot, die Obertöne in anderen Farben wiedergegeben, sodass für diverse Klänge inhaltsreiche Darstellungen entstehen wie in Abbildung 21 zu sehen ist (Nordmeier und Voßkühler, 2005, S. 10ff. in: Physik der Naturwissenschaften und Nordmeier und Voßkühler, 2005, S. 2ff. in: CD-Rom zur Frühjahrstagung der Physik).

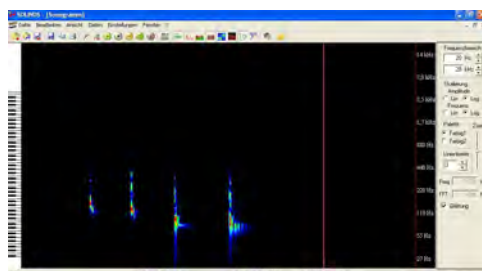


Abbildung 21: Screenshot des Programms Sounds im Modus Sonogrammdarstellung

Die Schalldruckkurven liefern allerdings keine Aussagen über den Wert des Musikstücks, das analysiert wird (Nordmeier und Voßkühler, 2005, S. 10, in: Physik der Naturwissenschaften).

Beobachtung

Die Kurven der Klänge der Becken, der Hi-Hat, der Snare, Bassdrum und Toms im Frequenz-Amplitude-Diagramm sind wie erwartet mit mehreren Peaks bei verschiedenen Frequenzen versehen. Die Kurven der unterschiedlichen Instrumente unterscheiden sich deutlich, die Kurven eines Instruments, aufgenommen unter verschiedenen Bedingungen, ähneln sich stark. Qualitative Erkenntnisse, die gewonnen werden können, sind vor allem die unterschiedlichen Klänge der einzelnen Schlaginstrumente, sowie der Sticks. Die Becken können eindeutig unterschieden werden. Auch die Anschlagstelle hat einen nicht nur messbaren (wie in Teil I erwähnt), sondern auch einen hörbaren Einfluss auf den Klang.

Die Zeitreihendarstellungen zeigen keine einfachen harmonischen, sondern überlagerte Schwingungen.

6.1 Auswertung der FFT-Diagramme

Das Diagramm zum Vergleich der Anschlagstelle auf der Snare (Abb. 22a) zeigt drei Snare-Schläge: einmal im Zentrum, den zweiten zwischen Zentrum und Rand und den dritten in Randnähe. Der Schlag ins Zentrum zeigt die am wenigsten definierte Tonhöhe, also den breitesten Peak. Bei den anderen beiden Schlägen sind die Peaks schmaler. Der Schlag in Randnähe weist in den höheren Frequenzen noch einen Peak höherer Amplitude auf, was darauf schließen lässt, dass hier die Schwingungen des Kessels stärker angeregt werden.

In dem Diagramm „Vergleich der Toms“ (Abb. 22b) sind die unterschiedlichen Frequenzen der Toms gut ablesbar. Die blaue Kurve ist vom höchsten und kleinsten Tom, die grüne entspricht dem nächstgrößeren, die rote dem zweitgrößten, die gelbe ist die des tiefsten und größten Toms. Angeschlagen wurden die Toms hier zwischen Zentrum und Rand. Hier werden die unterschiedlichen Tonhöhen gut sichtbar.

Die unterschiedliche Stimmung der Snare wurde in dem Diagramm „Vergleich der Snare bei verschiedenen Spannungen“ (Abb. 22c) untersucht. Erwartungsgemäß hat die höhere Spannung zu einer höheren Stimmung, also zu einer höheren Frequenz geführt.

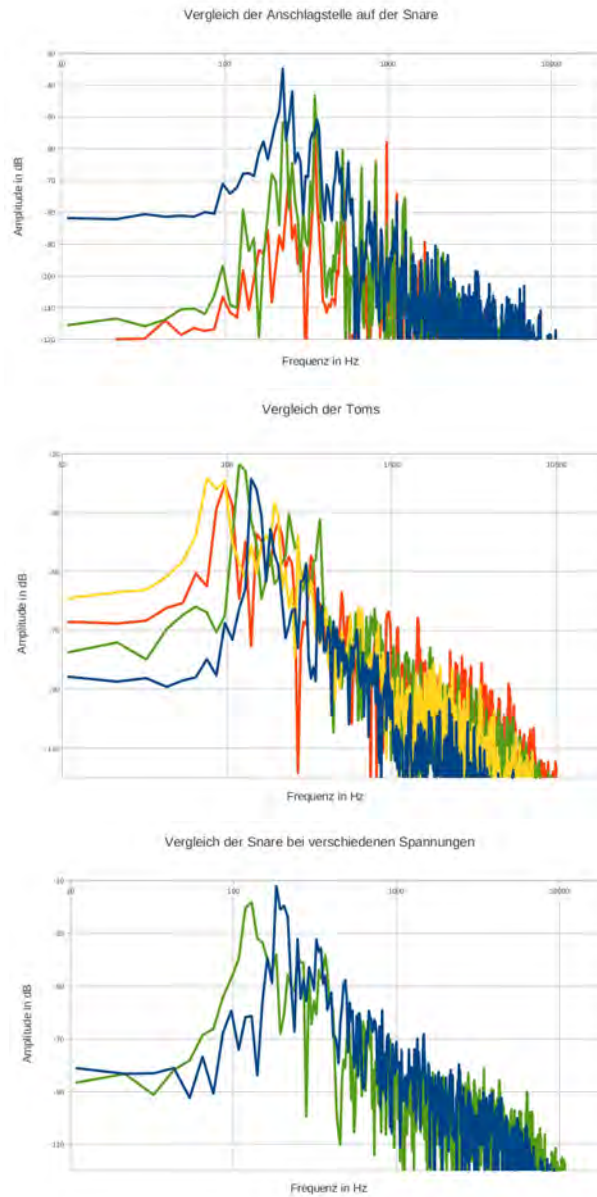


Abbildung 22: FFT-Diagramme: Vergleich der Anschlagstellen auf der Snare, Vergleich der Toms und Vergleich der Snare bei verschiedenen Spannungen

Das Diagramm, in dem vier verschiedene Instrumente in direktem Vergleich sichtbar sind (s. Abb. 23a), macht die Unterschiede besonders deutlich und ermöglicht eine genaue Zuordnung der Kurven zu den Instrumenten. Die Bassdrum-Kurve zeigt eine hohe Amplitude über einen größeren Tieffrequenzbereich verteilt, mit Maxima bei 32,3 Hz, 96,9 Hz und 129,1 Hz. Das Tomtom erreicht maximale Werte bei 75,3 Hz, 96,9 Hz und 193,7 Hz, der zweite Wert ist an derselben Stelle wie das zweite Maximum der Bassdrum zu sehen, der

sich durch das Mitschwingen der Bassdrum beim Anschlagen der Tom erklären lässt. Das Maximum der Snare ist bei 226 Hz und 247,5 Hz. Die Amplitude ist im niedrigeren Frequenzbereich geringer als bei der Bassdrum und dem Tom, aber höher als beim Becken, im höheren Frequenzbereich weisen die Frequenzen der Snare und des Beckens höhere Amplituden auf als die der Bassdrum und des Toms. Das Crashbecken erreicht maximale Amplituden bei 3777,2 Hz und 4928,7 Hz. Die ermittelten Frequenzen entsprechen qualitativ den wahrgenommenen Frequenzen, denn die Bassdrum hat die tiefste Frequenz, gefolgt von dem Tomtom, der Snare und dem Crashbecken.

Für die unterschiedlichen Stickarten wurde die Snare angeschlagen. Das Diagramm Sticks (s. Abb. 23b) zeigt den Vergleich von Rods, Besen und einem Filzschlägel. Hierbei erfolgt die Zuordnung hauptsächlich über die Amplitude, denn die Filzschlägel ergeben das lauteste Geräusch, die Besen die leisesten.

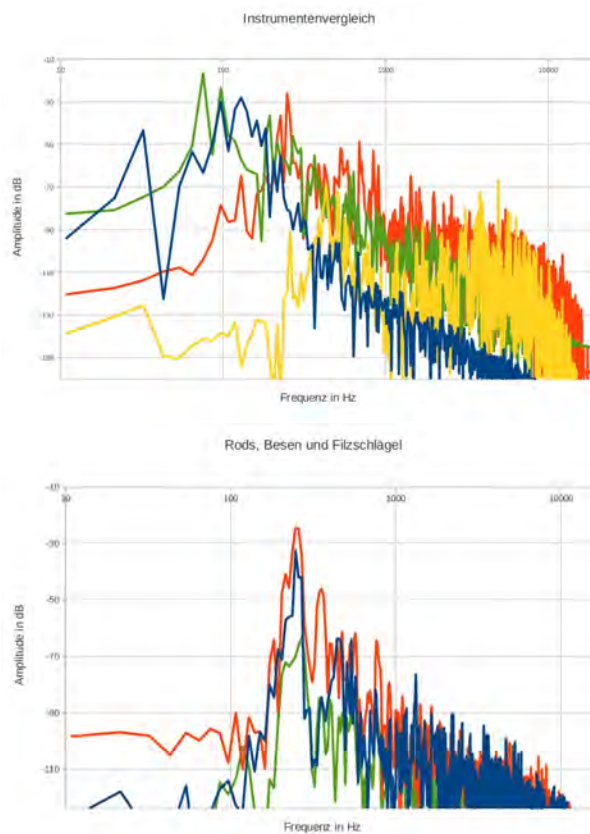


Abbildung 23: FFT-Diagramme: Instrumentenvergleich und Vergleich verschiedener Stickarten auf der Snare

6.2 Andere Darstellungsarten

Abklingdauer

Die Abklingdauer wurde mangels fehlender geeigneter Programmeinstellungen und zu schwacher Rechenleistung nicht gemessen. Dafür wurde die Klangdauer grob aus der Amplitude-Zeit-Darstellung abgelesen, die das Programm Audacity liefert. Das Becken hat demnach ungefähr eine gesamte Signaldauer von 2s, die Bassdrum 0,5s und das Tomtom eine von 1,2s. Diese Beobachtung stimmt sehr gut mit den aus der Theorie gewonnenen Erkenntnissen überein.

Zur Messung der Abklingdauer kann in das Hauptfenster von Sounds gezoomt und der zu untersuchende Ausschnitt markiert werden, wodurch dieser unterhalb nochmals vergrößert erscheint. Nach dem Export der Daten kann nun eine Excel-Tabelle und ein Diagramm erstellt werden. Dabei sollte die Anzahl der Messdaten gering gehalten werden, da sonst die Rechenleistung nicht ausreichen kann.

Zeitreihendarstellung

Die Zeitreihendarstellung der Snare, der Tomtoms und des Jazz-Ridebeckens (spezielles Ridebecken) zeigen, dass bei diesen Instrumenten mehrere Schwingungen interferieren. Die Frequenz ist hier auch qualitativ betrachtet höher als die des Toms; die Amplitude der Trommel ist jedoch höher als die des Beckens. Das Jazz-Ridebecken zeigt eine deutliche Abnahme der Amplitude, wenn man das erste Diagramm, das die Schwingung zu einem früheren Zeitpunkt t_1 , mit dem zweiten zum Zeitpunkt t_2 vergleicht. Das dritte Diagramm zeigt die Zeitreihe des Beckens im Abklingvorgang, dort sieht die Zeitreihe „geordneter“ aus, da schon viele Frequenzen eine so geringe Amplitude haben, also abgeklungen sind, dass sie keinen Einfluss mehr auf die Zeitreihe haben.

In dem Diagramm des Tomtoms und des Ridebeckens 3, lassen sich die verschiedenen Teilschwingungen gut erkennen. Auf den ersten Blick sind im Diagramm der Toms zwei Sinuswellen überlagert. Dabei hat die Welle mit der kleineren Periodendauer eine Frequenz von $f_1 = 75,5$ Hz, die andere hat eine Frequenz von $f_2 = 12,45$ Hz. Es gilt also: $f_1 \approx 6 \cdot f_2$. Das Diagramm des Jazz-Ridebeckens liefert die drei Frequenzen: $f_1 = 526,9$ Hz, $f_2 = 108,1$ Hz und $f_3 = 14,4$ Hz. Hier gilt: $f_1 \approx 5 \cdot f_2$, $f_2 \approx 7,5 \cdot f_3$ und $f_1 \approx 39 \cdot f_3$. Wie zu erwarten sind die Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Frequenz des Haupttons.

Allgemeine Erklärung der Zeitreihendarstellungen

Bei der Betrachtung der Diagramme in Abbildung 24 lässt sich erkennen, dass die Schwingungen keine einfachen harmonischen Schwingungen sind, wie dies bei einer Stimmgabel nach einer gewissen Einschwingphase der Fall ist. Direkt nach dem Anschlagen ist auch bei der Stimmgabel ein weiterer Ton, der viel höher als der Grundton ist, wahrnehmbar, der auch durch eine harmonische Schwingung gegeben ist. Durch die Überlagerung dieser beiden Frequenzen entsteht dann die anfangs nicht einfache Schwingung (Hall, 1997, S. 165f.). Nach ein paar Millisekunden ist die Schwingung nahe an dem durch ein Oszilloskop erzeugten Sinuston.

Nachvollziehen kann man die Entstehung dieser Schwingung auch durch die Betrachtung der Eigenschwingungen zweier, durch eine Feder gekoppelte Pendel: Entweder schwingen die Pendel in dieselbe oder in entgegengesetzte Richtung. Jede Schwingung in dieser Ebene lässt sich also als Kombination dieser beiden Eigenschwingungen darstellen (Hall, 1997, S. 167f.).

Zur Anwendung dieses Prinzips auf Schlaginstrumente, können mehrere Pendel untersucht werden, die gekoppelt sind, oder die Begrenzung auf eine Ebene aufgehoben werden, sodass die Pendel nicht nur nach links und rechts, sondern auch nach vorne und hinten schwingen können (Hall, 1997, S. 170f.). Instrumente, die wohlklingend sind, haben gleichmäßigere Schwingungsmuster (Hall, 1997, S. 164).

Anmerkung

Eine weitere Möglichkeit der Entstehung von Klängen auf den Grund zu gehen bieten verschiedene Software-Programme, wie z. B. das Programm Geogebra (s. „Einführung des Versuchs“ in diesem Kapitel). So kann man Grundtöne mit verschiedenen Obertönen überlagern und somit die Visualisierung von Klängen erzeugen, also eine veranschaulichte Klangsynthese, was einer umgekehrten Sichtweise zur Klanganalyse, bei der ein Klang aufgenommen und in den Grund- und die Obertöne zerlegt wird, entspricht (Kircher, 2000, S. 429).

Auch das Rückwärtsabspielen der aufgenommenen Schallsignale bietet eine andere Sichtweise und damit einen anderen Zugang, da die verfremdeten Signale objektiver untersucht werden (Kircher, 2000, S. 435).

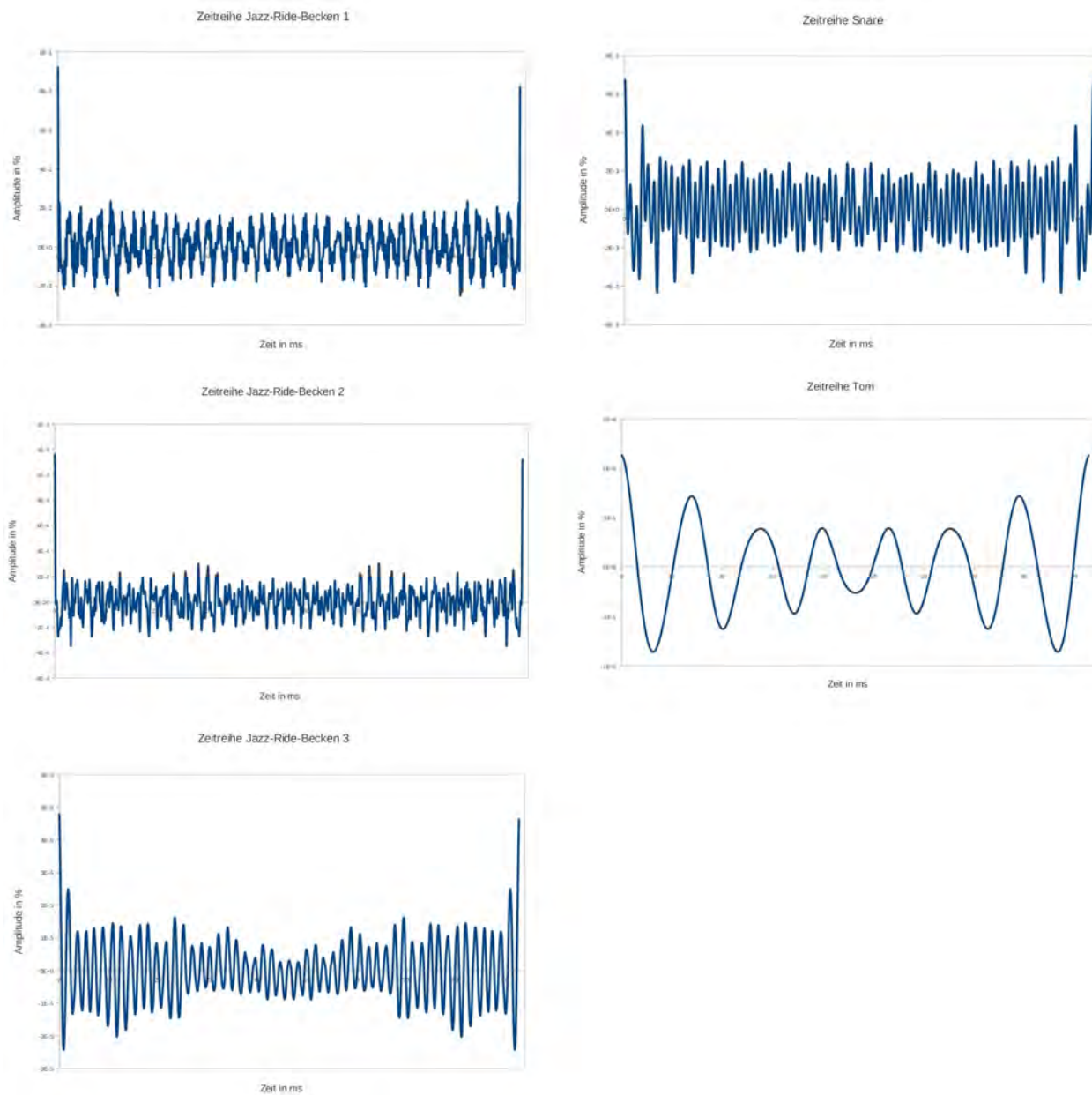


Abbildung 24: Zeitreihe des Jazzbeckens (links), der Snare (rechts oben) und des Tomtoms (rechts unten)

Auswertung der 3D-FFT

In diesem Diagramm wird bei vielen Instrumenten ein charakteristisches Objekt sichtbar, dass es ermöglicht das Instrument zu bestimmen. Bei der 3D-FFT der Bassdrum ist der sogenannte Fingerabdruck ein Schlaufengebilde (s. Abb. 25). Bei der Auswertung war

sie das einzige Schlaginstrument, das eine erkennbare Figur lieferte. Die Betrachtung der anderen 3D-FFT-Darstellungen ergab keine nennenswerten Zusammenhänge, dort waren nur Häufungen von Punkten zu erkennen.

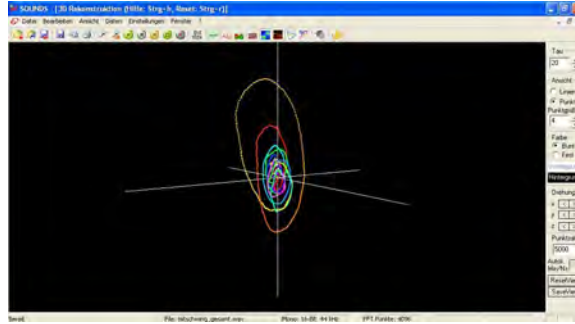


Abbildung 25: Screenshot der 3D-FFT-Darstellung der Bassdrum mit dem Programm Sounds

6.3 Zusammenhang zwischen Größe und Frequenz der Trommeln

Aus den vergleichenden Diagrammen der Crashbecken und Toms wurden jeweils die Peaks herausgelesen und die Frequenzen in Abhängigkeit der Durchmesser und im Fall der Toms auch der Tiefen dargestellt. Bei den Crashbecken ergab sich kein Zusammenhang zwischen den Durchmessern der Frequenz, obwohl nur Becken einer Baureihe und Art ausgewählt wurden. Dies kann daran liegen, dass die klanglichen Eigenschaften trotz gewisser Gemeinsamkeiten bei der Herstellung beabsichtigt differenziert werden.

Bei den Toms ergab sich folgender Zusammenhang (s. Abb. 26): Je größer der Durchmesser d oder die Tiefe t der Toms ist, desto tiefer ist ihr Klang.

Bei den Diagrammen ergeben sich folgende Graphen zur Annäherung an die realen Frequenzwerte:

$$g_1 = \frac{\text{Konstante}}{d \cdot \pi}$$

$$g_2 = \frac{\text{Konstante}}{t \cdot \pi}$$

Das experimentell ermittelte Ergebnis der Trommeln kann nun mit der Formel für Pauken aus Kapitel 4.1.2 verglichen werden (für Trommeln wurde in der verwendeten Literatur keine hilfreiche Formel gefunden): $f_{mn} = \frac{(ka)_{mn} c_M}{2\pi a}$ wobei a der Radius der Membran ist,

zudem ist $c_M = \sqrt{\frac{S}{\mu}}$ mit S als Vorspannkraft pro Längeneinheit und μ als Masse pro Flächeneinheit (s. Kapitel 4.1.2.). Da μ konstant ist, weil alle Trommeln mit einem Fell derselben Reihe ausgestattet waren, S aber keinesfalls für alle Trommeln gleich ist, genauso wie der Eigenwert (der von der Mode abhängt), kann anders als im Experiment keine Formel zur Berechnung der Frequenz hergeleitet werden, die nur von einer Größe, nämlich der Tiefe oder des Durchmessers, abhängt. Festgehalten werden kann hier, dass im Versuch genau wie in der Theorie eine indirekte Proportionalität zwischen Frequenz und Durchmesser festgestellt wurde.

Die Crashbecken lieferten im Gegensatz zu den Toms keinen erkennbaren Zusammenhang, obwohl nur Becken derselben Art und Baureihe verwendet wurden. Bei Becken bestehen also größere Unterschiede aufgrund der Herstellung.

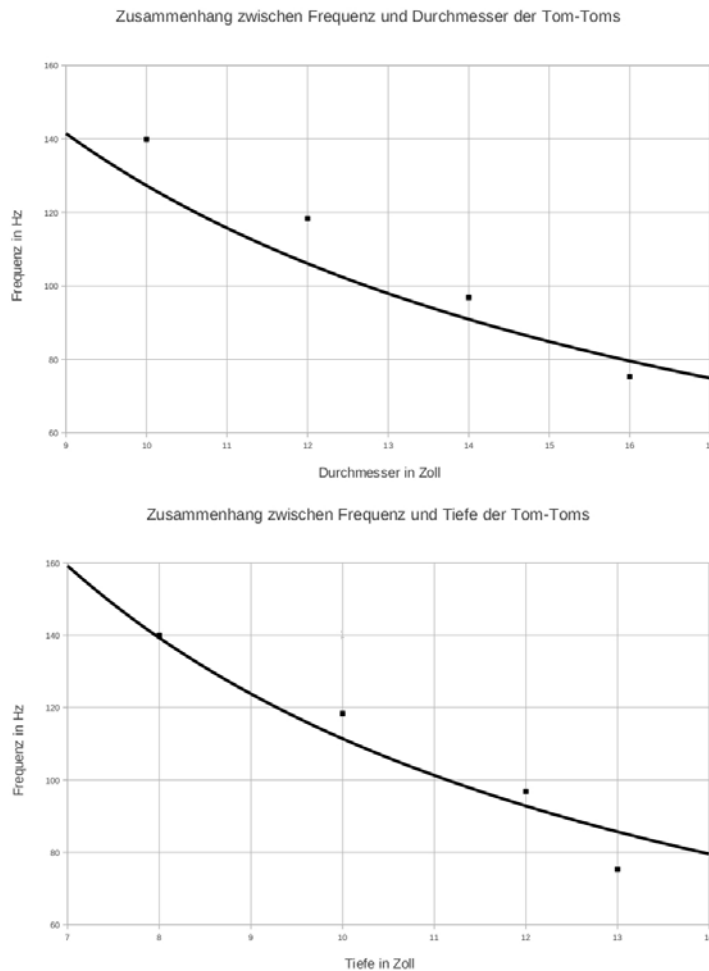


Abbildung 26: Abhängigkeit der Frequenz der Toms vom Durchmesser bzw. von der Tiefe

Bemerkung

Diese Versuchsgruppe bietet den Vorteil verschiedenste Klangeigenschaften von Musikinstrumenten herauszufinden und auf unterschiedlichste Art darzustellen. Nachteilig wirken sich hier der Zeitaufwand der Schüler für das Erlernen des Umgangs mit den Programmen und die Erstellung der Diagramme aus. Diese Nachteile können durch eine gute Vorbereitung des Lehrers und einer Einschränkung der zu untersuchenden Aspekte abgeschwächt werden.

Idee zur Realisierung einer Unterrichtseinheit

Hier sind nun ein Arbeitsauftrag bzw. Fragen formuliert, wie eine Unterrichtseinheit zu diesem Versuch gestaltet werden könnte. Unter den Fragen sind Antwortmöglichkeiten formuliert. Das zentrale Problem ist hier: Wie können Klänge von Instrumenten untersucht werden? Dazu können die Schüler zuerst Ideen notieren, wenn nötig, Hintergrundinformationen recherchieren und die Umsetzung eines Versuchs planen. Zur Verfügung stehen dabei verschiedene Materialien (Laptop, Metallplatte, Trommeln usw.). Im Anschluss können, wenn nötig, die Fragen bearbeitet und besprochen werden.

1. Auf dem Laptop findest du das Programm Sounds. Öffne die Datei _ und probiere aus, was das Programm darstellen kann. Welche Informationen liefert die Fouriertransformations-, die Zeitreihen- und die Sonogramm-Darstellung?

Allgemein visualisiert das Programm Klänge. Bei der Fouriertransformation erhält man die Amplitude in Abhängigkeit der Frequenz, die Zeitreihendarstellung liefert die Amplitude im Zeitverlauf betrachtet und die Sonogrammdarstellung zeigt das Frequenzspektrum fortlaufend mit der Zeit, wobei die Amplituden farblich angezeigt werden. Eine kräftigere Farbe, wie beispielsweise rot, deutet auf eine hohe Amplitude hin, während hellere Farben niedrigere Amplituden anzeigen.

2. Überlege dir, wie du die Klänge der Trommel, des Beckens und der Snare auswerten kannst.

Vergleich der Frequenzen und Amplituden (in einem FFT-Diagramm); Vergleich der Abklingdauer; Vergleich der Schwingungen (in der Zeitreihendarstellung); Untersuchung der charakteristischen Darstellung eines Instruments in der 3D-FFT usw.

3. Tipp: Die Daten der einzelnen Darstellungen können exportiert und in Excel eingefügt werden. Was stellst du fest? Welche Informationen erhältst du konkret?

Frequenzen der Trommel sind tiefer als die der Snare; mehrere Frequenzmaxima (bei der Trommel verglichen mit der Snare im tieferen Bereich); die Amplitude des Toms ist höher als die der Snare; die Schwingungen sind nicht einfach, es überlagern sich mehrere Frequenzen

4. Von welchen physikalischen Größen oder Eigenschaften ist der Klang eines Instruments abhängig? Untersuche zwei deiner Vermutungen!
Stimmung; Dämpfung; Radius der Trommel; Tiefe der Trommel; Anschlagstelle; Stickart: z.B. Vorder- oder Rückseite, Rods, Besen
5. Fasse die Ergebnisse so zusammen, dass du sie den anderen Schülern vorstellen kannst.

7 Chladnische Klangfiguren

Ernst Florens Friedrich Chladni³⁷ beschäftigte sich eingehend mit den Klangfiguren, die er auf Platten erzeugte. In mehreren Veröffentlichungen zwischen 1787 und 1817 gab er über hundert unterschiedliche Klangfiguren an, indem er das jeweilige Muster und das Tonverhältnis zur Grundfrequenz anführte. Für die Experimente nutzte er Platten aus Glas, Metall oder Holz und einen Geigenbogen, mit dem man senkrecht an der Platte entlangstreichen kann, sodass der aufgestreute Sand *„von den schwingenden Theilen weggeworfen wird, auf den festen Linien aber ruhig bleibt und sich anhäuft“* (Bärnighausen, 1996, S. 10). Zur Frequenzmessung verwendete er lediglich sein Gehör, das bei einem Messumfang von fünf Oktaven eine Genauigkeit bis auf einen halben Ton aufwies. In Vorträgen referierte Chladni über seine ästhetische Entdeckung in der Akustik und verdiente auf diese Art Geld. Die Faszination dieses Versuches lag in der Überwindung der Wahrnehmungsgrenzen des Menschen. Vorteile des Versuchs sind die Einfachheit des Versuchsaufbaus, vor allem bei der Variante mit Metallplatte und Geigenbogen, und die Visualisierung der Ergebnisse. Die wichtigste Erkenntnis dieses Versuches ist die Existenz zweidimensionaler stehender Wellen. Eine mögliche Verwendung ist die Analogie zum Eigenwertproblem in der Quantenmechanik (Bärnighausen, 1996, S. 18f.). Der Nachteil ist hier die komplexe Theorie, die hinter den stehenden Wellen steckt. Für eine korrekte mathematische Beschreibung der Biegeschwingung der Platten ist eine Differentialgleichung nötig, die für Schüler noch nicht verständlich ist (Bärnighausen, 1996, S. 14). Allerdings muss diese

³⁷Deutscher Physiker, *1756, † 1827 (Kadner, 1994, S. 9)

mathematische Formel nicht für Berechnungen genutzt werden, ein Hinweis auf die komplizierte Theorie kann den Schülern schon die Einsicht liefern, dass auch hinter anschaulichen Phänomenen nicht nur für Schüler schwierige Betrachtungen stecken. Dieser Versuch ist aus diesem Grund auf die qualitative Betrachtung ausgerichtet.

7.1 Klangfiguren auf dem Trommelfell

Dieser Versuch liegt in dem Problem der Unsichtbarkeit der akustischen Wellen bei Trommelfellen begründet. Ein möglicher Einstieg in dieses Thema wäre die Frage an die Schüler, wie man diese Bewegung der Instrumente sichtbar machen kann, wenn geklärt ist, dass die Voraussetzung für Klänge das Schwingen der Gegenstände ist. Ziel ist es, den Schülern die Ursache der Klangentstehung zu vermitteln. Die Schüler sollten für diesen Versuch mit Wellenphänomenen vertraut sein und die Begriffe „Stehende Welle“ sowie „Schwingungsknoten“ und „-bäuche“ richtig einsetzen können. Die nötigen Materialien sind hier:

- Frequenzgenerator
- Vibrationsgenerator
- Halterung
- Kabel
- Trommel mit Trommelfell
- Quarzsand (am besten farbig)
- Multimeter
- Digitalkamera

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 27 zu sehen, die zugehörige Schaltung in Abbildung 28.

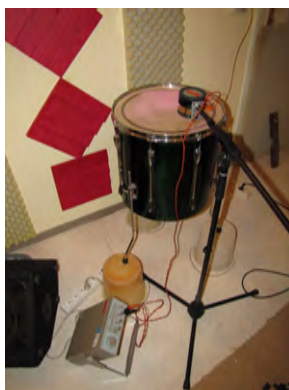


Abbildung 27: Versuchsaufbau

Um eine Rückkopplung zu vermeiden, wird das Resonanzfell entfernt. Der Sand wird auf dem so gut wie möglich gestimmten Trommelfell, das waagrecht ausgerichtet ist z. B. mit einem Streuer gleichmäßig verteilt. Der Vibrationsgenerator wird am Frequenzgenerator angeschlossen, wobei für den Anschluss ein Adapter nötig ist, der vom BNC- auf die 4 mm-Laborkabel wechselt.

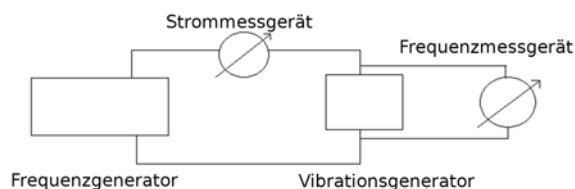


Abbildung 28: Schaltkreis

Je nachdem, ob die Stromstärke oder die Spannung gemessen wird, muss das Multimeter entweder in Reihe, oder parallel zum Vibrationsgenerator geschaltet werden (s. o.). Nun wird der Vibrationsgenerator an einer Halterung befestigt, die eine Nachjustierung der „Anschlagsstelle“ in der Ebene des Fells ermöglicht. Dazu wurden im vorliegenden Fall ein Mikrofonständer und ein Winkel, der passend gebogen und in den noch Löcher zur Befestigung gebohrt wurden, verwendet.

Durchführung

Durch Einstellen verschiedener Frequenzen wird versucht, dass die Bewegung des Fells durch die Sandkörner sichtbar wird. Dazu wird die Amplitude runtergeregelt, bevor die Frequenz erhöht wird, und anschließend die Amplitude wieder langsam erhöht, um genau

feststellen zu können, wo die Sandkörner ruhen und wo nicht. Bei maximaler Amplitude ist meist alles in Bewegung.

Bemerkung

Da an den Stellen, an denen der Sand hüpfet, Schwingungsbäuche vorliegen, sind an der Anregungsstelle demnach nur Schwingungsbäuche, und keine Knotenlinien.

Beobachtung

Es richteten sich zwar keine Figuren aus, bei denen der Sand an den Schwingungsbäuchen zu den Knoten hin verschwindet, bei sehr genauer Betrachtung konnten jedoch Gebiete mit sich bewegenden und ruhenden Sandkörnern betrachtet werden. In Abbildung 29 ist das Trommelfell mit Sand von oben zu sehen.

In Tabelle 1 sind die Frequenzen mit den dazugehörigen wahrgenommenen Moden in Abhängigkeit der Anregungsstelle aufgelistet.



Abbildung 29: Chladnische Klangfigur auf einem Trommelfell

| Frequenz in Hz | Anregung in Randnähe | Anregung in Nähe des Zentrums |
|----------------|----------------------|-------------------------------|
| 350 | 02 | 02 |
| 380 | 01 | - |
| 400 | 11 | 01 |
| 500 | - | 21 |

Tabelle 1: Beobachtete Moden in Abhängigkeit der Frequenzen

Erklärung und Auswertung

Das Fell wird über den Generator zum Schwingen angeregt, wodurch eine stehende Welle erzeugt wird. Die Schwingungen können unterschiedlich viele Schwingungsknotenlinien aufweisen, das bedeutet hier, dass sich der Sand auf Kreislinien oder -durchmessern ansammelt. Die Bereiche, an denen wenig bis kein Sand ist, sind die Schwingungsbäuche. Die Anzahl der Knotendurchmesser und -kreise sind abhängig von der Frequenz und von der Anregungsstelle. In Abbildung 30 sind die Schwingungsmoden real auf einem Paukenfell sichtbar und in 31 ist die perspektivische Darstellung der Chladnischen Klangfiguren abgebildet, wobei der Sand im ersten Bild (Abb. 30) dunkel eingefärbt ist und im zweiten (Abb. 31) hell dargestellt wurde.

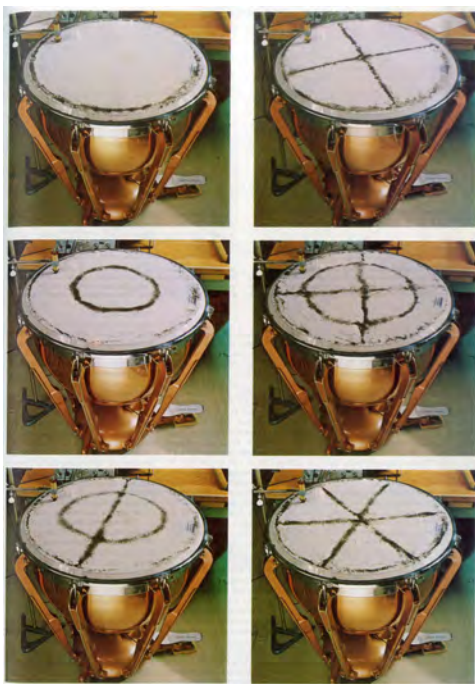


Abbildung 30: Chladnische Klangfiguren auf einer Pauke mit den Moden 01, 21, 02, 22, 12 und 31 (Rossing, 1992, S. 129)

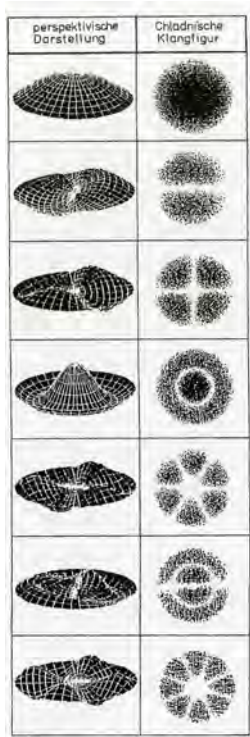


Abbildung 31: Moden der idealen Membran: 01, 11, 21, 02, 31, 12, und 41 (Fleischer, 2010, S. 298)

Auffällig ist, dass bei einigen Moden die Frequenz in Abhängigkeit der Anregungsstelle variiert, z. B. tritt die 01-Mode bei der Anregung in Zentrumsnähe erst bei 400 Hz in Erscheinung, bei der dezentralen schon bei 380 Hz. Bei 700 Hz springt der Sand sehr hoch und wandert in eine Richtung; Bei 750 Hz ist keine Sandwanderung beobachtbar, dafür aber ein äußerst leiser Summton zu hören, der unabhängig von der Amplitude leiser ist, als bei allen anderen Frequenzen. Das Maximum der tiefsten Trommel, das aus dem Kapitel Klananalyse entnommen wurde, liegt bei ca. 75,3 Hz. Der Grund für die nicht sichtbaren Muster bei niedrigeren Frequenzen liegt wohl an der zu geringen Leistung der einzigen verfügbaren Lautsprechermembran. Zudem ist die optimale Spannung des Schlagfells nur äußerst schwer zu gewährleisten. Dies verfälscht die Ergebnisse. Auch durch die Anregung ergeben sich Fehler, obwohl die optimale Anschlagstelle aufgrund von Aussagen in Teil I der Arbeit abgeschätzt wurde. Da keine Pauke verwendet werden konnte, bei der die Teilmoden gut zum Vorschein kommen, sondern eine Trommel, waren meist Überlagerungen verschiedener Teilmoden zu sehen. Die Muster lassen sich nur ohne Gewähr ablesen. Deshalb kann hier noch ein zweiter Versuch durchgeführt werden, der die Stehenden Wellen leichter sichtbar macht.

7.2 Klangfiguren auf einer Metallplatte

Das Ziel und die Voraussetzungen sind hier dieselben wie beim vorherigen Versuch. Der Bezug zum Schlagzeug ergibt sich hier über die Becken, die als flache Metallplatten abstrahiert werden können. Benötigt werden hier:

- eine dünne, runde Metallplatte mit Loch in der Mitte zur Befestigung
- Halterung
- Lautsprecher und Frequenzgenerator oder Geigen- bzw. Cellobogen
- Quarzsand

Versuchsaufbau

Die Metallplatte wird so an der Halterung platziert, dass sie in der Mitte fixiert ist und frei schwingen kann. Bei der Variante mit dem Lautsprecher muss dieser wie in der obigen Schaltung anstelle des Vibrationsgenerators angeschlossen werden. Der Lautsprecher wird dann an eine Stativstange befestigt, sodass die Höhe verstellt werden kann und möglichst nah unter die Platte positioniert. Im Versuchsaufbaubild (Abb. 32) ist keine Stativstange zu sehen.



Abbildung 32: Versuchsaufbau mit Frequenzgenerator

Durchführung

Die Frequenzen werden wieder langsam nacheinander eingestellt und dabei die sich ergebenden Muster beobachtet. Alternativ kann hier ein Cellobogen verwendet werden, der im

90°-Winkel an der Kante entlang gestrichen wird, was auch einen hörbaren Klang hervorrufen sollte. Für beide Varianten sind für die Durchführung der Versuche Fingerspitzengefühl und Übung hilfreich.

Beobachtung

Bei der Einstellung der Frequenzen 8,8 kHz (11-Mode, s. Abb. 35 viertes Bild) und 14,5 kHz (21-Mode, ansatzweise zu sehen, in Abb. 35 siebtes Bild) ergaben sich die beiden Bilder in Abbildung 33; Mit dem Geigenbogen ergaben sich die 20- und die 30-Mode (s. Abb. 34). Dies entspricht in Abb. 35 Bild eins und drei.

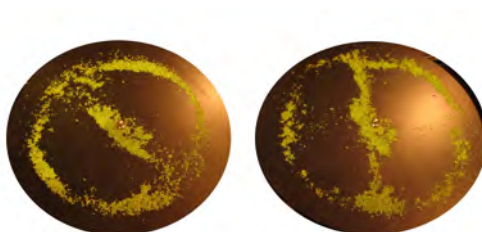


Abbildung 33: Chladnische Klangfiguren der Moden 11 und 21 auf einer Metallplatte durch einen Lautsprecher erzeugt



Abbildung 34: Chladnische Klangfiguren der Moden 20 und 30 auf einer Metallplatte durch einen Cellobogen erzeugt

Erklärung

Genauso wie im ersten Versuch, bilden sich hier stehende Wellen aus. Der Unterschied zum Trommelfell liegt in der Befestigung. Da die Platte nur in der Mitte gehalten wird, hat sie außen keine Knotenkreislinie. Das sich ausbildende Muster hängt sowohl vom Ort ab, an dem der Geigenbogen angesetzt wird, als auch vom Druck, der auf die Platte mit dem Bogen ausgeübt wird, und von der Art der Aufhängung. In der Variante mit dem

Frequenzgenerator hängen die Figuren von dem Lautsprecher sowie von dessen Position ab. Mögliche Fehlerquellen sind hier der Ort und die Leistung des Lautsprechers. Die Platte muss die richtige Dicke aufweisen; Zu dicke Platten schwingen nicht. Mit dem Geigenbogen sollte man relativ viel Druck ausüben und die Halterung sollte am besten ein Stab mit einer Schraube am oberen Ende sein, woran man die Platte mit Loch in der Mitte festschrauben kann. Diese Halterung sollte relativ fest sein, damit sich die Platte nicht zu der Seite neigt an welcher der Cellobogen angesetzt wird. Eine weitere Variante besteht darin, dass die Platte auch an einer Stelle festgehalten werden kann und an einer 45° entfernten Position der Bogen angesetzt wird. Dazu ist jedoch viel Kraft von Nöten, weshalb damit im vorliegenden Fall keine Klangfigur erzeugt werden konnte. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Anregung mit den Lautsprechern einfacher ist, als die durch den Cellobogen.

Die Figuren, die sich auf Platten ausbilden können, sind in der folgenden Abbildung aufgelistet.



Abbildung 35: Chladnische Klangfiguren auf einer Platte (Bärnighausen, 1996, S. 12)

Bemerkung

Dieser Versuch zeigt die Klangentstehung von Trommeln und Becken (abstrahiert als Platte) exemplarisch für alle Musikinstrumente. Denn durch Anregung der Zupf-, Streich-, Blas- oder Schlaginstrumente werden diese in Schwingung versetzt, wodurch ein Klang

entsteht. Der entstehende Schall breitet sich dann ebenfalls in Form von akustischen Wellen aus. Ein weiterer großer Vorteil des Versuchs liegt in der Anschaulichkeit und der Ästhetik. Ein Nachteil ist die Tatsache, dass die Klangfiguren auf Trommeln nicht auf triviale Art erzeugt werden können, da hier die Membranspannung einen großen Einfluss auf das Versuchsergebnis hat.

Eine weitere gute Möglichkeit der Visualisierung der Schwingungen ergibt sich durch die Nutzung des DOS-Programms MEMBRAN³⁸, das eine Draufsicht auf eine schwingende Membran ermöglicht, in der die Knotenlinien durch eine Punkteverteilung angegeben werden und einer im Filmmodus dreidimensionalen Darstellung der Schwingung. Dazu können Gitterpunkte als fest, freischwingend oder als Erregerzentrum definiert werden. Screenshots aus dem Filmmodus sind in Abbildung 36 zu sehen.

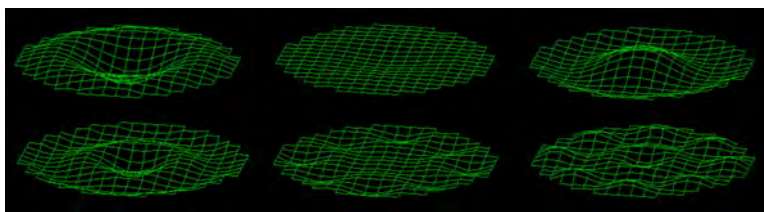


Abbildung 36: Screenshots des Programms MEMBRAN, mit den Schwingungsmoden 02 (erste Reihe), 03 (erstes Bild zweite Reihe) und einer Überlagerung der Moden 02 und 41 (zwei übrige Bilder)

Idee zur Realisierung einer Unterrichtseinheit

Im Zentrum steht hier die Frage: Wie können Klänge von Instrumenten sichtbar gemacht werden? Dazu können die Schüler wieder Ideen notieren, recherchieren und sich Versuche und mögliche Auswertungen der Versuche überlegen.

1. Die Metallplatte kann Klänge erzeugen. Wie klappt das am besten?
Der Geigen- oder Cellobogen sollte senkrecht zur Platte gehalten werden, zur Tonerzeugung ist relativ viel Kraft nötig.
2. Streue nun den Sand auf die Platte und versetze die Platte in Schwingungen. Was kannst du beobachten? Was ist eine mögliche Erklärung dafür? Welcher Zusammenhang besteht hier zu den Klängen?
Es bilden sich Muster aus, die ihre Ursache in den stehenden Wellen haben. Der

³⁸Eine Erläuterung dieses Programms findet sich in Eckert et al., 1989.

Sand sammelt sich in den Schwingungsknoten. Diese akustischen Wellen werden von uns als Klang wahrgenommen.

3. Kannst du verschiedene Muster erzeugen? Warum?

Ja, weil die Platte unterschiedlich schwingen kann.

4. Worauf ist dieses Prinzip übertragbar?

Allgemein kann diese Vorgehensweise auf alle Instrumente übertragen werden, bei einigen lässt sich dies leichter realisieren (Trommeln, Metallplatten), bei anderen ist es schwieriger (Geige, Gitarre, Xylophon). Auch in der Schwingungsanregung muss man unterscheiden, ob dies mit einem Lautsprecher (Metallplatte, Trommel), mechanisch mit einer Membran (Trommel) oder mit einem Cellobogen (Metallplatte) möglich ist.

5. Fasse deine Ergebnisse nachdem du dich über das Phänomen erkundigt hast in der Form zusammen, dass du es den anderen Schülern vorstellen kannst.

8 Messung der Beschleunigung des Sticks mit dem Beschleunigungssensor

Dieser Versuch soll Aufschluss über den Bewegungsverlauf des Sticks anhand der Messung der Beschleunigung liefern. Die Schüler sollten dazu mit der mehrdimensionalen Beschleunigung vertraut sein.

Hierzu sind folgende Materialien nötig:

- Stick und Übungspad (bzw. Trommel)
- Beschleunigungssensor
- Computer mit der Software measure von Phywe

Funktionsweise des Sensors

„Ein Beschleunigungssensor misst eigentlich die Auslenkung eines Probekörpers und diese ist wiederum ein Maß für die auf diesen Probekörper wirkenden Kräfte. Im Allgemeinen sind dies zwei Kräfte: die Gewichtskraft und eine Trägheitskraft. Die auf die Masse bezogene Kraft nennt man dann (meist

gedankenlos) Beschleunigung. Wenn beim ruhenden Sensor die Gewichtskraft durch eine Zwangskraft auf das Gerät kompensiert wird, misst man ohne eine stattfindende Bewegung die Erd“beschleunigung“. Beim fallenden Sensor misst man dagegen nichts, da sich die beiden Kräfte kompensieren. Sinnvoll ist deshalb, falls möglich, vor Beginn der Bewegung in der Ruhe den Tara-Knopf zu drücken und somit alle Beschleunigungskomponenten auf null zu setzen; nur dann wird die tatsächliche Beschleunigung gemessen – falls der Sensor während der Bewegung nicht verkippt wird. Bei Bewegungen, bei denen der Sensor verkippt wird, wird dagegen die Erdbeschleunigung immer wieder in anderen Richtungen gemessen, eine Nullsetzung ist hier nicht möglich.“ (Wilhelm et al., 2013, S. 2)

Zudem muss bei der Interpretation der Diagramme immer das Vorzeichen kritisch betrachtet werden. Bei dem vorliegenden Beschleunigungssensor wurde das negative Vorzeichen eingestellt, d. h. es wird die Scheinkraft aus subjektiver Sicht angezeigt. Bei der untersuchten Bewegung wurde der Sensor auch gekippt, sodass eine Kalibrierung nicht möglich war.

Aufbau

Der Computer wird eingeschaltet und der Beschleunigungssensor angeschlossen. Nach dem Öffnen des Programms muss noch das richtige Gerät („Messung Kraft“) ausgewählt werden.

Durchführung

Für die Durchführung muss der Beschleunigungssensor am Arm fixiert werden. Dann wird die Messung gestartet. Der Arm wird nun mit dem Stick in der Hand wie beim Schlagzeugspielen bewegt (siehe hierzu das Video 0-Gesamtbewegung.avi). In einer Messung können auch mehrere Einzelbewegungen aufgezeichnet werden. Am Ende der Messung wird die Messung gestoppt.

Auswertung

Es ergeben sich hier die Verläufe der drei Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung.

Im ersten Diagramm (s. Abb. 37a) zeigt sich die Beschleunigung bei der Bewegung durch einen Anfänger, das zweite (s. Abb. 37b) zeigt die eines fortgeschrittenen Schlagzeugspielers. Zuerst fällt auf, dass beide Diagramme einen komplexen Bewegungsablauf

zeigen. Das Erkennen des Auftreffzeitpunktes wird zudem durch den obig erklärten Vorzeichenwechsel und die fehlende Orts- oder Geschwindigkeitskurve erschwert.

Was allerdings aus dem Vergleich der beiden Diagramme festgestellt werden kann, ist die Ausrichtung des Sensors im Raum. Im ersten Diagramm wurde der Arm so gehalten, dass die Anzeige des Sensors nach oben gerichtet war, weshalb die z-Komponente hier den größten Betrag hat, im zweiten zeigte die Anzeige nach rechts. Darum muss die z-Komponente aus Diagramm a mit der y-Komponente aus Diagramm b verglichen werden. Bei Markierung 1 bzw. 3 ist die Beschleunigung beim Aufprall des Sticks auf dem Pad zu sehen. Insgesamt und qualitativ betrachtet ist im zweiten Diagramm ein „harmonischerer“ Bewegungsablauf zu sehen. Der Rebound (Markierung 4 im Vergleich zu Markierung 2), also der Rückprall des Sticks von dem Pad wird hier sanfter abgebremst; hier ist annähernd eine Wellenform der Beschleunigung erkennbar.

Auch in der Länge unterscheiden sich die Bewegungsabläufe: Diagramm a) zeigt eine Bewegungsdauer von $t = 1,2\text{ s}$, in Diagramm b) ist die Bewegung schneller ausgeführt worden, dort ist $t = 1\text{ s}$. Die Beschleunigung beträgt im ersten Diagramm beim Auftreffen $a_1 = 2 \cdot 9,81\text{ m/s}^2 = 19,62\text{ m/s}^2$, im zweiten $a_2 = 1,5 \cdot 9,81\text{ m/s}^2 = 14,72\text{ m/s}^2$.

Bemerkung

Da der Sensor am Arm befestigt ist, ergeben sich natürlich Fehler, da der Arm andere Beschleunigungen erfährt, als beispielsweise die Spitze des Sticks.

Der Versuch bietet eine schöne Möglichkeit die Komplexität der Bewegung zu veranschaulichen. Die Auswertungsmöglichkeiten sind hier jedoch im Vergleich zu den anderen Versuchen weniger vielfältig. Eine Kombination dieses Versuches mit der Videoanalyse, d. h. eine parallele Videoaufzeichnung und Bewegungsausführung mit dem Sensor, ist eine gute Möglichkeit die Beschleunigung bzw. die Krafteinwirkung auf den Stick besser vergleichen zu können. Berücksichtigt werden muss hier auch, dass nicht die tatsächliche Beschleunigung gemessen wurde.

Idee zur Realisierung einer Unterrichtseinheit

Im Unterricht eignet sich dieser Versuch besonders als Vorführversuch durch die Lehrkraft, da die Messung genauso wie die Auswertung relativ kurzweilig sind.

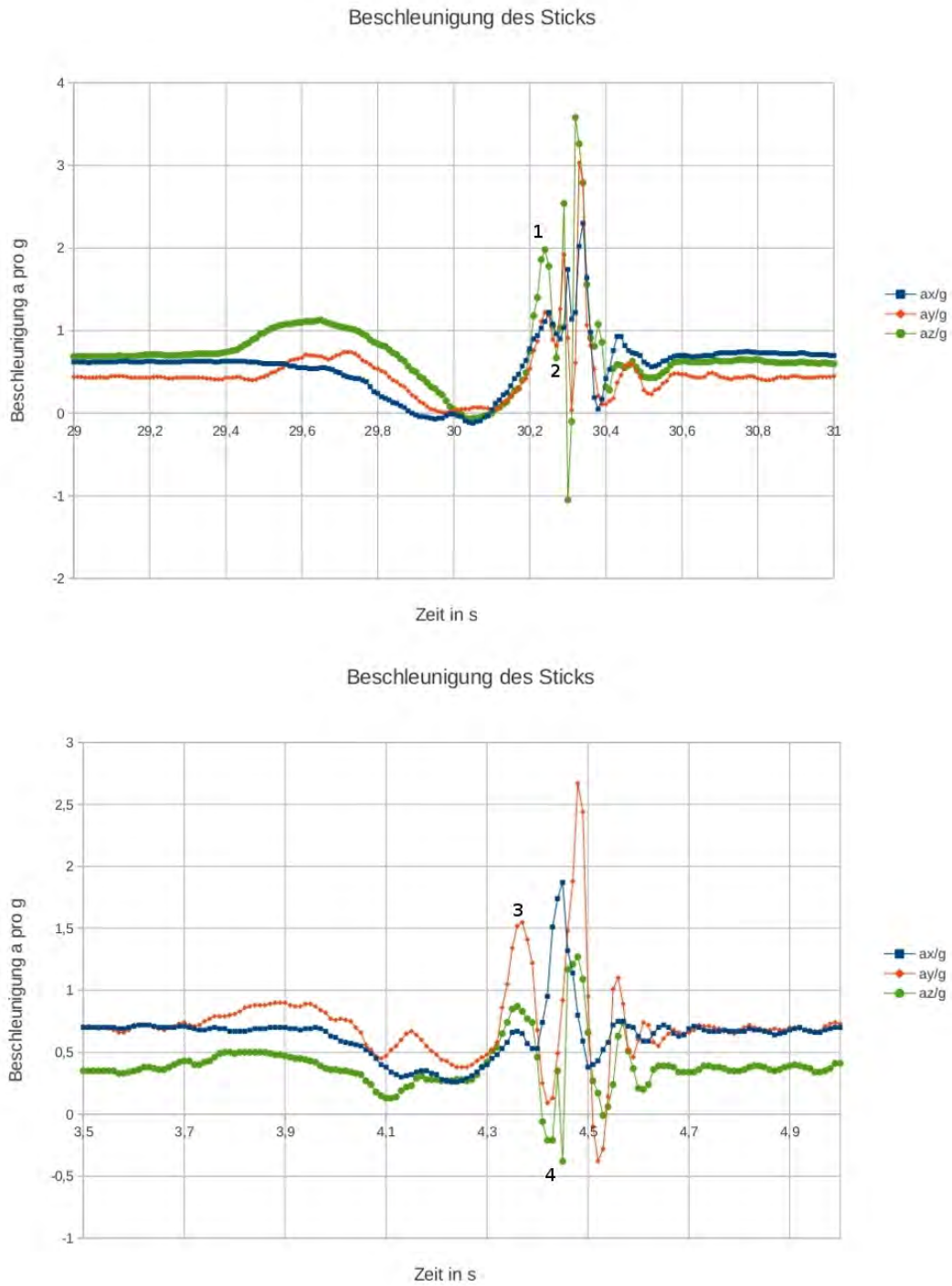


Abbildung 37: Vergleich zweier Messungen mit verschiedener Testpersonen: a) Anfänger
b) Fortgeschrittener

9 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Schwingungen von Musikinstrumenten sind von so geringer Amplitude und so kleiner Frequenz, dass sie für das menschliche Auge kaum wahrnehmbar sind. Bei einer schwingenden Saite sieht man zwar die beiden Stellen maximaler Auslenkung, die Schwingung an sich jedoch nicht (Stauder, 1976, S. 15). Bei Schlaginstrumenten ist die Wahrnehmung noch eingeschränkter, da bei den Trommelfellen nur die Draufsicht möglich ist und die Becken zwar durch den Schlag pendeln, jedoch keine Schwingung mit bloßem Auge erkennbar ist. Dieser Versuch bietet die Möglichkeit das Unsichtbare sichtbar zu machen. Anders als bei dem Versuch der Chladnischen Klangfiguren werden nicht die Schwingungsknoten visualisiert, sondern die Schwingung selbst.

Aufnahme der Membran- und Beckenschwingung

Auf der beiliegenden CD finden sich auch zwei selbst erstellte Videos, einmal von einer schwingenden Trommelmembran, das zweite von einem Becken. Bei dem ersten Video muss man ganz genau auf die schwarzen Dämpfungsstreifen auf dem Fell achten, um die Schwingung zu sehen, bei letzterem ist die Schwingung sehr gut sichtbar. Diese Videos wurden mit einer Framerate von 420 fps (frames per second) und unter Verwendung eines Baustrahlers aufgezeichnet.

Gute Video-Beispiele für die Schwingung des Beckens und der Trommelfelle finden sich hier und auf der beiliegenden CD:

- <http://www.youtube.com/watch?v=kpoanOlb3-w>
- <http://www.youtube.com/watch?v=STSWLX23xqc> (zuletzt aufgerufen am 01. 03. 2013)

Außerdem befinden sich auf der CD vier Videos, die die Schwingung der Trommelmembran durch Stroboskoplicht sichtbar machen. Dazu verwenden Geipel und Heuer vier Lautsprecher, die je nach gewünschter Resonanzform in Phase oder gegenphasig geschaltet werden. Die Lautsprecherfrequenz kann variiert werden, die Frequenz der beiden Stroboskoplampen liegt etwas über dieser Frequenz. Dadurch entsteht der Eindruck einer verlangsamten Bewegung der Membran (Heuer, 2003). Diese Qualität zu erreichen ist relativ schwierig, denn je höher die Framerate unter den Kameraoptionen eingestellt wird, desto heller sollte das zu filmende Objekt beleuchtet werden (Benz, 2008, S.8).

In der Staatsexamensarbeit „Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „measure Dynamics““ von Herrn Benz finden sich viele hilfreiche Tipps zur Videoaufzeichnung, Videobearbeitung und Erläuterungen zum Programm measure dynamics.

9.1 Die Frequenz der Trommel

In diesem Versuch wurde die Schwingung der Trommel und des Beckens aufgenommen und die Schwingungsfrequenz der Trommel ermittelt. Dazu waren folgende Materialien nötig:

- Trommel, Becken und Sticks
- Hochgeschwindigkeitskamera (z. B. Casio Exilim EX-FS10)
- Stativ
- Baustrahler
- Diffusorfolie (dafür eignet sich auch Backpapier)
- Software zur Auswertung (hier wurde Measure Dynamics verwendet)

Zur Auswertung wurde die Anzahl der Schwingungsmaxima der tiefsten Trommel mit Hilfe des VLC-Players und der variablen Abspielgeschwindigkeit ermittelt. Dies erwies sich als relativ schwierig, da die Qualität des Videos nicht hochwertig ist. Die genaue Bildanzahl konnte mit measure dynamics ermittelt werden. Es ließen sich 59 Schwingungsmaxima in einem Intervall von 338 Bildern zählen. Dies entspricht einer Zeit von $t = 337 \cdot \frac{1}{420} \text{ s} = 0,802 \text{ s}$, da eine Bildrate von 420 fps verwendet wurde. Die Frequenz ist damit $f = \frac{59}{0,802} \text{ Hz} = 73,57 \text{ Hz}$. In der Klanganalyse ergab sich aus dem FFT-Diagramm (s. Abb. 22b) der Trommeln ein Maximum bei 75,3 Hz. Es liegt somit die Vermutung nahe, dass genau diese Frequenz beobachtet wurde, da diese nach dem Diagramm auch im Vergleich zu allen anderen Frequenzen mit der höchsten Amplitude vorlag.

Der Vorteil dieser Methode liegt in der Einfachheit des Versuchsaufbaus und der schnellen Auswertung, denn es ist keine vollständige Videoanalyse des Programms nötig. Der Nachteil liegt darin, dass eine gute Kamera nötig ist, um verlässliche Ergebnisse zu ermitteln. Auch einen zweiten Baustrahler einzusetzen wäre sinnvoll. Der Versuch verliert dennoch seinen didaktischen Wert nicht, wenn am Ende kein „richtiger“ Wert ermittelt wurde.

9.2 Stickbewegung

Für die Analyse der Stickbewegung reichen schon 210 fps aus. Interessant sind hier vor allem die Änderung des Winkels, der Zeitpunkt der Winkeländerung, die Beschleunigung, die Geschwindigkeit des Sticks kurz vor dem Auftreffen, die Kontaktzeit und die mittlere Kraft. Ziel des Versuchs ist es, die physikalischen Formeln an einem realen Beispiel anzuwenden. Deshalb sollten die Schüler mit den Grundkenntnissen der Mechanik vertraut sein. Die Materialien sind dieselben wie in Kapitel 8.1, statt einer Trommel kann auch ein Übungspad verwendet werden.

Versuchsaufbau

Vor den Baustrahler wird die Diffusorfolie im Abstand von 15 bis 20 cm mit einem Stativ angebracht. Der Baustrahler wird auf das zu filmende Objekt gerichtet. Die Kamera sollte so positioniert sein, dass die Stickbewegung in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse erfolgt (Benz, 2008, S.8). Im vorliegenden Fall wurden Leuchtstoffröhren verwendet, weshalb ein leichtes Flackern in den Videos zu sehen ist, welches nicht weiter stört, da die Framerate relativ gering im Vergleich dazu ist.

Durchführung

Die Kamera muss nun in den richtigen Modus eingestellt werden. Bei der verwendeten Kamera wurde zuerst im Menü die Qualität, dann die Bildrate 210 fps ausgewählt. Zur Aufnahme wird der Record-Knopf gedrückt um diese zu starten und zu stoppen.

Beobachtung

Erwartungsgemäß lässt sich erkennen, dass der Stick in der Aufwärtsbewegung relativ gleichmäßig steigt und in der Abwärtsbewegung zuerst beschleunigt und dann das Handgelenk geknickt wird um diese Beschleunigung zu erhöhen. Zusätzlich tritt ein Rebound, d. h. eine Abfederung des Sticks nach dem Kontakt mit dem Pad, auf.

Auswertung

Mit *measure dynamics* lassen sich Stroboskopbilder und Diagramme erstellen und Geschwindigkeitspfeile einblenden.

Für die Auswertung wurde das Video in drei Teile unterteilt, in denen die Aufwärtsbewegung, die Abwärtsbewegung und der Rebound zu sehen sind.

Die manuelle Analyse mit *measure dynamics* liefert dabei die Zeit, die x- und y-Koordinate, sowie die Geschwindigkeit und die Beschleunigung jeweils zerlegt in den x- und y-Anteil. Die automatische Analyse wurde hier aufgrund der erschwerten Objekterkennung nicht verwendet. Das Programm konnte zwar zuverlässig den Stick erkennen, allerdings variierte der Markierungspunkt entlang des Sticks. Da jedoch für eine zuverlässige Analyse immer dieselbe Stelle verwendet werden sollte, wurde manuell immer der Stickkopf (s. Abb. 38b) gewählt. Abbildung 38a zeigt das Stroboskopbild der gesamten Bewegung, in Abbildung 38b und c ist lediglich die Abwärtsbewegung dargestellt.

Nachfolgend sind die drei Diagramme des Ortes, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit von der Abwärtsbewegung des Sticks zu sehen (s. Abb. 39). Dabei ist die Geschwindigkeit $v_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{\Delta t}$, die Beschleunigung $a_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{\Delta t}$. Dadurch ergibt sich die Beschleunigung aus langen Zeitintervallen von $4(t_i - t_{i-1})$ (Michel, 2010, S.28).

Die maximale Geschwindigkeit des Sticks in y-Richtung ergibt sich aus der manuellen Auswertung des Videos mit *measure dynamics* zu $v_y = 11,47 \text{ m/s}^2$. Direkt vor dem Auftreffen auf dem Pad, also ein Zeitintervall später als die maximale Geschwindigkeit, beträgt die Geschwindigkeit $v = 11,17 \text{ m/s}^2$. Diese geringe Abnahme könnte in der manuellen Auswertung des Videos begründet liegen, denn die Markierung der Abstände des Sticks von einem Bild zum nächsten wurden per Hand eingetragen. Bei einer nur etwas dezentralen Platzierung des Markierungspunktes kann es schon zu einer zu kurzen Strecke und damit zu einer geringeren Geschwindigkeit kommen.

Die Winkeländerung ist in dem folgenden Diagramm (Abb. 40) zu sehen, berechnet wurde sie mit der Formel $\Delta\alpha_i = \alpha_{i-1} - \alpha_i$. Gemessen wurden die einzelnen Winkel mit *measure dynamics*, indem der Winkel zwischen dem Lot und der Spitze des Sticks gemessen wurden. Hier wird ersichtlich, dass das Handgelenk im Verlauf geknickt wird, am stärksten jedoch kurz vor dem Auftreffen auf die Unterlage. Bei 0,07 bis 0,08 Sekunden wird der Stick gedreht, also das Handgelenk so bewegt, dass der Stick eine zusätzliche Beschleunigung erfährt.

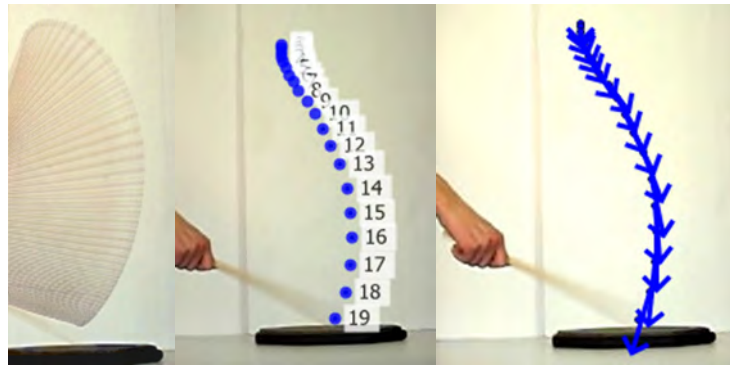


Abbildung 38: Stroboskopbild, Bild mit eingblendeten Punkten zur Messwerterfassung und Bild mit eingblendeten Geschwindigkeitspfeilen (aus measure dynamics)

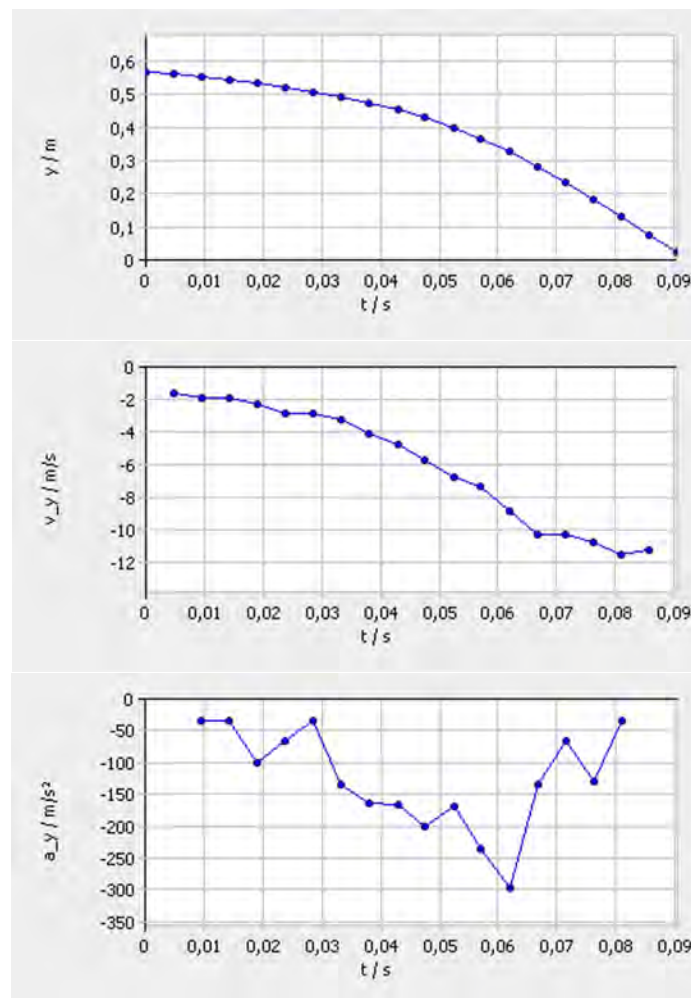


Abbildung 39: Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Diagramm der Abwärtsbewegung des Sticks (aus measure dynamics)

Die Kontaktzeit lässt sich wie folgt abschätzen: Bei der gegebenen Bildrate von 210 fps³⁹, beträgt die Zeit pro Bild 0,00476 s. Bei dem ausgewerteten Video ist der Stick weniger als ein Bild in Kontakt mit dem Pad, d. h. $t \leq 0,00476$ s. Somit kann aus der Masse des Sticks von $m = 57$ g und der Geschwindigkeit $v = 6,69$ m/s, sowie der Zeit die mittlere Kraft auf den Stick bzw. das Pad mit der Formel $F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$ abgeschätzt werden. So ergibt sich: $F = \frac{m\Delta v}{\Delta t} = \frac{0,057 \cdot 11,17}{0,00476} \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2 = 133,76$ N. Dabei ist F ca. das 239-fache der Erdbeschleunigungskraft.

Verglichen mit den Werten aus dem Versuch des Beschleunigungssensors lässt sich feststellen, dass die Beschleunigungen in etwa bei 15 m/s^2 und 20 m/s^2 , hier bei 300 m/s^2 liegen. Dies liegt vor allem daran, dass zwei unterschiedliche Schläge ausgewertet wurden. So kann es durchaus sein, dass bei dem Versuch mit dem Beschleunigungssensor weniger Kraft durch die Testperson aufgewendet wurde. Auch beim Schlagzeugspielen werden Schläge unterschiedlich stark ausgeführt, um Akzente zu setzen, unterschiedliche Werte sind also nicht verwunderlich. Zudem muss auch hier beachtet werden, dass nicht die tatsächliche Beschleunigung mit dem Beschleunigungssensor gemessen wurde (s. Kapitel 8).

Das zweite Video eignet sich zur Analyse der Anzahl der Schläge pro Sekunde. Dazu wird die Anzahl der Schläge für ein bestimmtes Bildintervall gezählt. So lassen sich hier für die ersten 362 Bilder 20 Schläge zählen. Da zwischen zwei Bildern die Zeit von $t = 0,00476$ s verstreicht, ergibt sich für die Anzahl der Schläge pro Sekunde: $N = \frac{20}{361 \cdot 0,00476} \text{ s}^{-1} = 11,6 \text{ s}^{-1}$.

Bemerkung

Dieser Versuch eignet sich sehr gut um die Bewegung des Sticks zu untersuchen. Ein Nachteil ist, dass auch hier genauso wie bei der Aufzeichnung der Schwingung der Trommel und des Beckens eine höhere Framerate mit gleich bleibender oder besserer Qualität noch überzeugendere Werte liefern könnte. Nichtsdestotrotz konnten anhand des Videos verschiedene Größen wie die Geschwindigkeit, Beschleunigung und die Änderung des Winkels betrachtet werden, die den Schülern aus dem gängigen Physikunterricht bereits bekannt sind. Bereits erworbenes Wissen kann hier also angewendet und erweitert werden.

³⁹Von einer höheren Rate wurde hier abgesehen, um eine ausreichende Bildqualität zu erhalten.

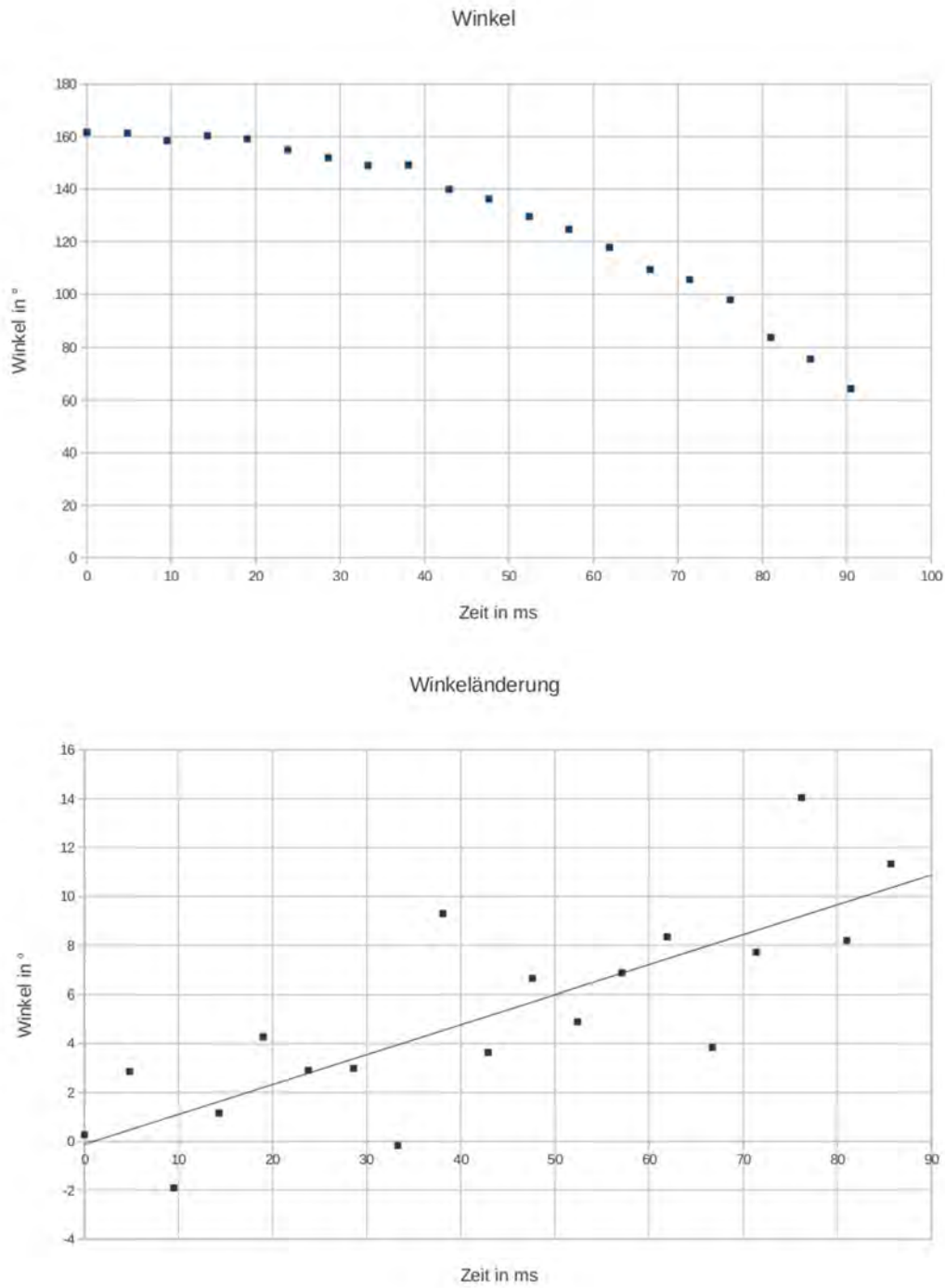


Abbildung 40: Winkel und Winkeländerung in Abhängigkeit der Zeit

Idee zur Realisierung einer Unterrichtseinheit

Hier soll folgende Frage beantwortet werden: Wie kann die Bewegung des Sticks untersucht werden? Die Schüler können dazu wieder selbst tätig werden.

1. Überlege dir, was sich alles aus diesem Video ermitteln lässt.
Kontaktzeit des Sticks; Änderung des Winkels; zu welchem Zeitpunkt der Stick gedreht wird; Geschwindigkeit kurz vor dem Auftreffen des Sticks; Beschleunigung des Sticks; Mittlere Kraft über $F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$
2. Mache dich mit der Kamera vertraut.
Modus auf HS (Highspeed), Qualität auswählen, Bildrate auf 240 fps (432x320 Pixel), Aufnahme: Start und Stopp: rec-Symbol
3. Worauf sollte beim Filmen mit der Kamera geachtet werden?
Die Ebene der Stickbewegung sollte senkrecht zur optischen Achse sein uvm.
4. Wähle zwei deiner Ideen zur Auswertung aus und setze diese um! Tipps zur Aufzeichnung: Es sollte sehr hell sein, deshalb ist die Verwendung eines Baustrahlers mit davor im Abstand von 15 bis 20 cm angebrachter Diffusorfolie sinnvoll.
s. Versuchsauswertung
5. Kann man das Versuchsprinzip auch auf andere Themengebiete übertragen?
Ja, z. B. auf die Bewegung eines Balls, eines Sportlers usw.
6. Fasse die Ergebnisse so zusammen, dass du sie den anderen Schülern vorstellen kannst.

10 Fazit und Schlussgedanke

Das Schlagzeug bietet, wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, einen lebensnahen Anwendungsbezug zu Versuchen über die akustische Physik. Aus dem ersten Teil der Arbeit können die Informationen als Anregungen für weitere Versuche genutzt werden. Der zweite Teil stellt konkrete Versuche vor. Die Durchführung verschiedener Versuche an Objekten mit Bezug zum Alltag, d. h. in diesem Fall an Instrumenten, wie denen des Schlagzeugs und der Pauke, kann das Interesse der Schüler wecken. Die Verwendung verschiedener Software wie Sounds, Audacity oder measure dynamics erleichtert die Auswertung der Versuche. Alle diese drei Programme liefern analytische, sowie ästhetisch wertvolle Darstellungen

physikalischer Zusammenhänge. In Sounds kann die Fourier-Transformation, auch in 3D, sowie die Zeitreihe der aufgenommenen Klänge untersucht und verglichen werden. Bei der Videoanalyse mit *measure dynamics* kann der Ort, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Stickbewegung in Diagrammen ausgewertet werden. Zudem können im Video selbst Markierungspunkte und Pfeile z. B. für die Geschwindigkeit an der Spitze des Sticks eingeblendet werden. Auch die Chladnischen Klangfiguren bieten einen ästhetischen Zugang zur physikalischen Betrachtung des Phänomens der stehenden Welle am Beispiel der Becken und Trommelfelle. Die stehenden Wellen auf Trommelfellen sichtbar zu machen ist aufgrund der nie gleichmäßig realisierbaren Spannung schwierig, auf Pauken ist dies leichter möglich. Zusätzlich kann hier noch ein zu diesem Themenbereich passender Versuch zur Messung der Kraft des Sticks mit einer Kraftmessplatte durchgeführt werden.

Ein interessanter und weiterführender Aspekt im Zusammenhang zu dem Thema dieser Arbeit wäre die Funktionsweise akustischer Geräte wie den Mikrofonen und Verstärkern und die physikalische Betrachtung weiterer Instrumente oder Instrumentengruppen, wie der Zupf-, Streich- und Blasinstrumente.

Literatur

- [1] FLETCHER, Neville H.; ROSSING, Thomas D.: *The Physics of Musical Instruments*. New York u.a. : Springer, 1991.
- [2] HALL, Donald E.: *Musikalische Akustik : Ein Handbuch*. Mainz : Schott Music, 1997.
- [3] HOLLAND, James: *Das Schlagzeug*. Unterägeri (Zug) : Bergh, 1983.
- [4] JAKOB, Friedrich: *Schlagzeug*. Bern, Stuttgart : Hallwag, 1979.
- [5] KADNER, Immo, *Schulphysik Akustik*. In: Praxis-Schriftenreihe/Physik 51, Köln : Aulis-Verl. Deubner, 1994.
- [6] KEUNE, Eckehardt: *Schlaginstrumente - Ein Schulwerk : Pauken*. Leipzig : Bärenreiter, 1977.
- [7] KEUNE, Eckehardt: *Schlaginstrumente - Ein Schulwerk : Die kleine Trommel*. Leipzig : Bärenreiter, 1975.
- [8] KIRCHER, Ernst; GIRWIDZ, Raimund; HÄUSSLER, Peter: *Physikdidaktik - Eine Einführung in Theorie und Praxis*. Braunschweig [u.a.] : Vieweg, 2000.
- [9] STAUDER, Wilhelm: *Einführung in die Akustik*. Wilhelmshaven : Heinrichshofen, 1976.
- [10] RIELÄNDER, Michael M.: *Reallexikon der Akustik*. Frankfurt am Main : Bochinsky, 1982.
- [11] BÄRNIGHAUSEN, Eckehard: *Über Chladnische Klangfiguren*. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, Nummer 2/45 (1996), S. 10-19
- [12] ECKERT, Bodo; KORSCH, Hans Jürgen; JODL, Hansjörg: *Membran - Ein Simulationsprogramm zweidimensionaler Schwingungssysteme*. In: Physik und Didaktik, Nummer 3 (1989), S. 191-206
- [13] FLEISCHER, Helmut: Die Pauke aus der Sicht der Physik. In: Schmuhl, Boje; Lustig, Monika; Omonsky, Ute: *Perkussionsinstrumente in der Kunstmusik vom 16. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts XXXV : Wissenschaftliche Arbeitstagung und 28. Musikinstrumentenbau-Symposium Michaelstein, 4. bis 7. Oktober 2007*, Augsburg : Wißner, 2010.

- [14] NORDMEIER, Volkhard; VOSSKÜHLER, Adrian: „Da sieht man plötzlich, was man hört“ - Zur Visualisierung und Analyse von Musik aus physikalischer Perspektive. In: *Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule*, Nummer 6/54 (2005), S. 9-17
- [15] NORDMEIER, Volkhard; VOSSKÜHLER, Adrian: SOUNDS : Computer und Musik - Mit der Soundkarte Töne und Klänge entdecken. In: *Grundschulunterricht Sonderheft Computer+Internet*, Nummer 5 (2006), S. 4-14
- [16] PETER, Alexander: Herstellung und Gebrauch von Paukenfellen. In: Schmuhl, Boje; Lustig, Monika; Omonsky, Ute: *Perkussionsinstrumente in der Kunstmusik vom 16. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts XXXV : Wissenschaftliche Arbeitstagung und 28. Musikinstrumentenbau-Symposium Michaelstein, 4. bis 7. Oktober 2007*, Augsburg : Wißner, 2010.
- [17] ROSSING, Thomas D.: Die Pauke. In: *Die Physik der Musikinstrumente*. Heidelberg, Spektrum, (1992)
- [18] WILHELM, T.: Chancen und Probleme von Beschleunigungssensoren. In: Bernholt, S. (Hrsg.): *Inquiry-based learning - Forschendes Lernen, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik*, Jahrestagung in Hannover 2012, Band 33, 2013, S. 443 - 445
- [19] WULF, Patrick; EULER, Manfred: Ein Ton fliegt durch die Luft : Vorstellungen von Primarstufenkindern zum Phänomenbereich Schall. In: *Physik in der Schule*, Nummer 33 (1995), S. 254- 260
- [20] BENZ, Michael: *Digitale Videoanalyse von Bewegungen – Neue Möglichkeiten mit der Software „measure Dynamics“*. Würzburg, Universität, Hausarbeit, 2008
- [21] ENGLERT, Simon: *Schülerlabor „Physik und Musik“*. Würzburg, Universität, Fachbereich Physik und ihre Didaktik, Hausarbeit, 2010
- [22] MICHEL, Maximilian: *Hochgeschwindigkeitskameras im Physikunterricht - Physik unter der (Zeit-) Lupe*. Würzburg, Universität, Fachbereich Didaktik der Physik, Hausarbeit, 2010
- [23] MIKOLAJCZAK, Axel: *Sticks : Magazin für Schlagzeug + Perkussion*. 07/2012
- [24] MÜLLER, Renato: *Paiste: Cymbals, Sounds, Gongs* The official Paiste Magazine. 2011

[25] VON BOHR, Manfred: *drums & percussion*. Nr. 4 Juli/August 2012

Weitere Quellen

CD-Rom

HEUER, D. ET AL.: Dorn.Bader Physik Sek II. PAKMA 2002, CD-ROM, Schroedel-Verlag, Hannover, 2003, ISBN: 3-507-10729-5

NORDMEIER, Volkhard; VOSSKÜHLER, Adrian: *Neue Wege in der Akustik - Visualisierung und Analyse von Klängen*. In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Berlin 2005 (2005)

Internetquellen

Diril Cymbals-Beckenherstellung

<http://www.dirilcymbals.de/index.php?page=tradition>

ISB-Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München:

<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26439>

<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=27147>

Versandhaus Thomann: Onlineratgeber

Pauke

http://www.thomann.de/de/adams_32_universal_timp_fibre_fs.htm

Becken http://www.thomann.de/de/onlineexpert_52_2.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_52_3.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_52_4.html

Trommeln http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_1.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_3.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_4.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_5.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_6.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_7.html

Drumsticks http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_1.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_2.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_3.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_4.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_5.html

Schlagzeugfelle http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_1.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_2.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_3.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_4.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_97_6.html

Fußmaschine und Hi-Hat http://www.thomann.de/de/onlineexpert_98_1.html

http://www.thomann.de/de/onlineexpert_98_2.html, alle zuletzt aufgerufen am 21.03.2013

Magazin für Schlagzeug und Percussion

<http://kingkalli.de/schlagzeug-und-percussion/>, zuletzt aufgerufen am 22.03.2013

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Schlagzeug mit Bassdrum (1), Snare (2), zwei Hängetoms (3), einer Standtom (4), einem Ride- (5), einem Crashbecken (6) und einer Hi-Hat (7) (http://kingkali.de/schlagzeug-und-percussion/) | 8 |
| 2 | Becken (Müller, 2011, S. 14) | 9 |
| 3 | Schwingungsmoden mn eines Beckens; die ersten sechs sind identisch zu denen einer flachen Platte, danach sind die Moden abgebildet, die aus Überlagerungen entstehen (Fletcher und Rossing, 1991, S. 651) | 12 |
| 4 | Reihenfolge des Schraubvorgangs beim Stimmen des Fells | 13 |
| 5 | Pauke (http://www.thomann.de/de/adams_32_universal_timp_fibre_fs.htm) | 14 |
| 6 | Darstellung einer schwingenden Membran, die rechten Bilder stellen die Schwingung nach der Zeit $\frac{T}{2}$ dar; Schwingungsmoden von oben nach unten: 01, 02, 03 und 11 (Hall, 1997, S. 181) | 17 |
| 7 | Klangfiguren der Mode mn auf einem Paukenfell (Fleischer, 2010, S. 306) . | 18 |
| 8 | Klangfiguren der zwölf tiefsten Moden der idealen Membran beginnend mit der der tiefsten Frequenz zugehörigen Mode (Rossing, 1992, S. 131) | 20 |
| 9 | Trommeln (Mikolajczak, 07/2012, S. 56) | 21 |
| 10 | verschiedene Gratungsarten | 22 |
| 11 | Seitenansicht der Bassdrum mit Fußmaschine (http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html) | 23 |
| 12 | Fußmaschine (von Bohr, Juli/August 2012, S. 9) | 24 |
| 13 | Snare (http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html) | 25 |
| 14 | Die beiden niedrigsten Moden der Snare mit den jeweiligen Schwingvarianten (Fletcher und Rossing, 1991, S. 603) | 26 |
| 15 | Schwingungsmoden des Zylinders (Fletcher und Rossing, 1991, S. 605) . . . | 27 |
| 16 | Hänge- und Standtom (http://www.thomann.de/de/onlineexpert_92_2.html) | 28 |
| 17 | Sticks, Besen, Rods und Mallets | 29 |
| 18 | Anatomie des Sticks (http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_3.html) | 30 |
| 19 | Kopfformen der Sticks (http://www.thomann.de/de/onlineexpert_96_3.html) | 30 |

| | | |
|----|--|----|
| 20 | Screenshots der Geogebra-Applets: a) erstes Applet mit der Überlagerung zweier Graphen, b) zweites Applet mit der Aufgabe den roten und den grünen Graphen zur Deckung zu bringen, in c) sieht man die Lösung der Aufgabe aus dem zweiten Applet | 36 |
| 21 | Screenshot des Programms Sounds im Modus Sonogrammdarstellung . . . | 37 |
| 22 | FFT-Diagramme: Vergleich der Anschlagstellen auf der Snare, Vergleich der Toms und Vergleich der Snare bei verschiedenen Spannungen | 39 |
| 23 | FFT-Diagramme: Instrumentenvergleich und Vergleich verschiedener Stickarten auf der Snare | 40 |
| 24 | Zeitreihe des Jazzbeckens (links), der Snare (rechts oben) und des Tomtoms (rechts unten) | 43 |
| 25 | Screenshot der 3D-FFT-Darstellung der Bassdrum mit dem Programm Sounds | 44 |
| 26 | Abhängigkeit der Frequenz der Toms vom Durchmesser bzw. von der Tiefe | 45 |
| 27 | Versuchsaufbau | 49 |
| 28 | Schaltkreis | 49 |
| 29 | Chladnische Klangfigur auf einem Trommelfell | 50 |
| 30 | Chladnische Klangfiguren auf einer Pauke mit den Moden 01, 21, 02, 22, 12 und 31 (Rossing, 1992, S. 129) | 51 |
| 31 | Moden der idealen Membran: 01, 11, 21, 02, 31, 12, und 41 (Fleischer, 2010, S. 298) | 52 |
| 32 | Versuchsaufbau mit Frequenzgenerator | 53 |
| 33 | Chladnische Klangfiguren der Moden 11 und 21 auf einer Metallplatte durch einen Lautsprecher erzeugt | 54 |
| 34 | Chladnische Klangfiguren der Moden 20 und 30 auf einer Metallplatte durch einen Cellobogen erzeugt | 54 |
| 35 | Chladnische Klangfiguren auf einer Platte (Bärnighausen, 1996, S. 12) . . . | 55 |
| 36 | Screenshots des Programms MEMBRAN, mit den Schwingungsmoden 02 (erste Reihe), 03 (erstes Bild zweite Reihe) und einer Überlagerung der Moden 02 und 41 (zwei übrige Bilder) | 56 |
| 37 | Vergleich zweier Messungen mit verschiedener Testpersonen: a) Anfänger b) Fortgeschrittener | 60 |
| 38 | Stroboskopbild, Bild mit eingeblendeten Punkten zur Messwerterfassung und Bild mit eingeblendeten Geschwindigkeitspfeilen (aus measure dynamics) | 65 |

| | | |
|----|---|----|
| 39 | Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Diagramm der Abwärtsbewegung des Sticks (aus measure dynamics) | 65 |
| 40 | Winkel und Winkeländerung in Abhängigkeit der Zeit | 67 |

Inhaltsverzeichnis der CD

Audiodateien

1. Bassdrum (1x)
2. Becken (Ride, Splash, China, Hi-Hatx2, Jazz-Ride)
3. Crashbecken (16, 18, 21 Zoll)
4. Snare hoch, ohne Teppich, 2x Snare tief, ohne Teppich, 2x
5. Snare, Vergleich der Anschlagstelle (Zentrum, zwischen Zentrum und Rand, in Randnähe)
6. Toms (angeschlagen mit Nylontip): 10, 12, 14, 16 Zoll
7. Stickarten: Nylon, Stick, Rückseite, Rods, Besen, Filz

Diagramme

1. Instrumentenvergleich
2. Vergleich der Toms
3. Vergleich verschiedener Stickarten
4. Videoanalyse der Abwärtsbewegung

Geogebra-Applets

1. 1_FFT: Superposition zweier Sinusfunktionen
2. 2_FFT: Aufgabe: Herausfinden der Terme der Sinusfunktionen
3. 2_FFT_LSG: Lösung des Applets 2_FFT

Poster

Videos

1. Selbst gedrehte Videos

- 0-Gesamtbewegung
- 1-Aufbewegung
- 2-Abbewegung
- 3-Rebound
- 4-Kontakt
- Becken

Trommelmembran

Video 2

2. Videos der Schwingung der Trommelmembran (angeregt durch vier Lautsprecher, sichtbar gemacht durch Stroboskoplicht)

01-Mode

02-Mode

11- Mode

21-Moden

Membran, pdf-Dokument, Schwingende Trommelmembran, Versuchsanleitung Autoren:
Geipel, Tobias; Heuer, Dieter

3. Youtube-Videos

Snare-Drum_Highspeedvideo_3000fps

Becken_Highspeedvideo_1000fps

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen herzlich für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit danken.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Wilhelm für seine engagierte Betreuung bedanken, die er trotz seines Universitätswechsels leistete. Bei Herrn Tidecks möchte ich mich für die Literaturhinweise bedanken und bei Herrn Heiszler für das Bereitstellen der nötigen Versuchsmaterialien. Herrn Björn Baser möchte ich für die Bereitstellung des Programms „Membran“ danken.

Ein besonderer Dank für Vorschläge und Korrekturen gilt Bastian Brück, Bernhard Kinast, Moritz Hille und Ramona Merkle. Mein größter Dank gilt Christian Widmann, der mich als erfahrener Schlagzeuger mit Hilfestellungen bei den Versuchen unterstützte.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Bildliche Darstellungen habe ich, soweit nicht anders angegeben, selbst angefertigt.

Augsburg, den 09. April 2013

Jil Hümmer