

Einschwingvorgänge bei Musikinstrumenten Highspeedkameraaufnahmen

Adrian Voßkühler & Volkhard Nordmeier
Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik

Kurzfassung

Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera wurden die Anregungsmechanismen von Stimmgabel, Saite und Bogen, Saxophon und Fagott im Detail aufgezeichnet. Dabei zeigen sich die Kopplung der Stimmgabelarme beim Einschwingen, die Sägezahnanregung der Saite durch den Bogen, sowie ein unerwartetes Schwingungsverhalten der Rohrblätter von Saxophon und Fagott.

1. Beschreibung des Versuchsaufbaus

Die Aufnahmen wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gemacht, die normalerweise für die Analyse von Crashtests verwendet wird.

Die Kamera kann z.B. 10.000 Bilder pro Sekunde mit einer Auflösung von 532x532 Pixel in Farbe aufzeichnen. D.h. eine Schwingung mit 400 Hz dauert bei einer Abspielrate von 25 Bildern pro Sekunde genau eine Sekunde und ist auf diese Weise deutlich in die einzelnen Bewegungsschritte auflösbar. Bei solchen Aufnahmen sind extreme Lichtintensitäten erforderlich. Für die Aufnahme von kleinsten Schwingungen, wie sie z.B. beim Einfachrohrblatt am Mundstück eines Saxophons auftreten, ist daher eine Fokussierung von bis zu 16 kW aus Halogenstrahlern auf den Bildausschnitt erforderlich.

Jede Aufnahme erfolgte nach demselben Prinzip: Zuerst wurden die Halogenstrahler angestellt, dann das Kommando zum Start der Aufnahme gegeben und sofort anschließend die Schwingung angeregt. Der Kameraspeicher füllte sich je nach Auflösung innerhalb etwa einer Sekunde, dann wurden die Strahler sofort wieder abgestellt, um die Objekte nicht zu verglühen und die Einzelbilder wurden aus dem Speicher auf den Rechner zur Kontrolle heruntergeladen.

2. Die Untersuchungsobjekte im Einzelnen

Der Auswahl der Untersuchungsobjekte liegt die Idee zugrunde für möglichst jede Stimmgruppe des Orchesters den gemeinsamen Anregungsmechanismus aufzuzeichnen, bei den Streichern Saite und Bogen und bei den Holzbläsern das Mundstück. Bei den Blechbläsern bewegen sich in erster Linie die Lippen, so dass hier eine Separierung der Anregung für die Aufnahmen zu schwer fiel und daher nicht versucht wurde.

In der Natur einer Videoaufnahme liegt leider, dass sie nicht zu Papier gebracht werden kann. Hier werden die wesentlichen Erkenntnisse aus den Aufnahmen erläutert, aber ausdrücklich darauf hinge-

wiesen, dass ein volles Verständnis und Erlebnis der Schwingungsvorgänge nur durch das Betrachten der auf der CD beiliegenden und im Text verlinkten Filme möglich ist.

2.1 Stimmgabel

Die Stimmgabel ist das „Urinstrument“ jedes Musikers und insofern eine genauere Betrachtung wert. Da die Schwingungsamplitude der Arme einer normalen Stimmgabel zu klein für die Videoaufzeichnung waren, wurde ein etwa 1,20m hohes Modell mit einer Eigenfrequenz von etwa 4 Hz gebaut. Daran wurden die von Maysenhölder u.a. [3] berechneten Schwingungsmoden, wie sie in Abbildung 1 zu erkennen sind, insbesondere der Einschwingvorgang der Grundmode beobachtet und auch filmisch aufgezeichnet.

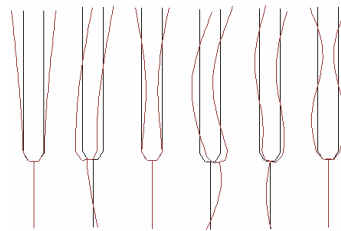


Abb.1: Schwingungsmoden einer Stimmgabel für verschiedene Frequenzen

Das Stimmgabelmodell (Abb. 2) besteht aus einem gebogenen Stahlflansch, an dessen Mitte ein Kopfstück mit Gewinde angeschweißt ist, in dem ein Edelstahlstab eingeschraubt ist, der wiederum in einer schweren Messingplatte als Standfuß eingeschraubt werden kann.

Bei der Testphase tauchte nun folgendes interessante Phänomen auf: War die Stimmgabel fest mit der Messingplatte verschraubt, also der „Fußstab“ fest eingespannt, so verhielten sich die Arme der Stimmgabel wie die Massen zweier Pendel, die durch eine Feder miteinander gekoppelt sind. Wurde die eine Seite angeschlagen, so gab es einen Energieübertrag auf die andere Seite bei der die



Abb.2: Modell einer Stimmgabel

Schwingung der angeschlagenen Seite langsam abebbte und die Schwingung der anderen Seite heftiger wurde, bis sich der Vorgang umkehrte; von der typischen symmetrischen Schwingung beider Arme einer Stimmgabel keine Spur. Tatsächlich konnte das Phänomen auch bei einer normalen Stimmgabel nachvollzogen werden, die, sobald ihr Fußstück in einem Schraubstock fest eingespannt war, keinen Ton mehr von sich gab. Die Erklärung dafür scheint darin zu liegen, dass durch das Fixieren des Fußpunktes keine genügend starke Kopplung der

beiden Schwingungsarme erfolgen kann, um zu einer symmetrischen Schwingung zu kommen.

Sobald die Verschraubung an der Messingplatte der großen Stimmgabel durch einen Gummiring gelockert und damit gelenkig wurde, konnte man den Einschwingvorgang mit anschließendem Gleichschwingen der Arme beobachten, dabei gilt: je weicher die Lagerung, desto schneller ist der Einschwingvorgang beendet.

In der folgenden Grafik (Abb. 3) ist der Einschwingvorgang anhand des Verlaufs der horizontalen Auslenkung beider Arme nachzuvollziehen. Man erkennt wie die Arme nach anfänglichem Nachlaufen in eine antisymmetrische Schwingung koppeln. Diese Messwerterfassung wurde mit der Videoanalysesoftware Viana der Uni Essen [1] direkt aus dem Video vorgenommen.

Das Video ist auf der TagungsCD zu finden und kann mit einem DivX Player abgespielt werden. ([Stimmgabel.div](#))

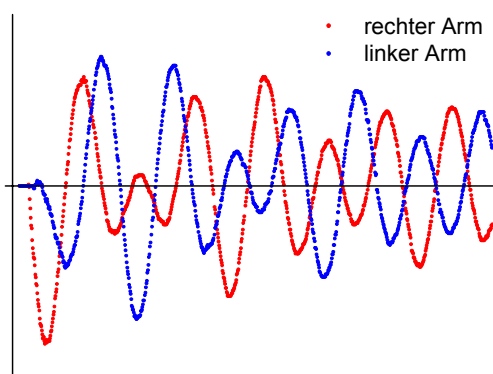


Abb.3: Auslenkungs-Zeitdiagramm zur Modell-Stimmgabel.

2.2 Saite und Bogen

Schon von Helmholtz [4] stammt eine klare Vorstellung, wie der Bogen die Saite anregt, nämlich als Sägezahnanregung.

Die tiefe Schwingung einer Kontrabasssaite war langsam genug, um sie mit der Kamera auflösen zu können. Hier wurde die Aufnahme an der interessierenden Stelle des Ansatzes des Bogens auf der Saite als Bildausschnitt gewählt. Wie auf dem Video zu sehen ist ([Bass.div](#)), wird tatsächlich die Saite von den Bogenhaaren ein gutes Stück mitgenommen und reißt dann plötzlich ab, wird wieder eingefangen und der Vorgang beginnt von neuem. Ob allerdings, wie Helmholtz schreibt, der Auslöser des Abreißens im Zurückkehren der ersten Auslenkung begründet ist, lässt sich aus der Aufnahme leider nicht erschließen.

Durch Zufall wurde eine Aufnahme gemacht, in der deutlich zu sehen ist, wie die Saite nicht in einem Rutsch abreißt, sondern in zwei oder sogar drei Abschnitten unter dem Bogen zurückrutscht, bis sie sich wieder fängt und erneut mitgenommen wird. Der Grund dafür ist aus der Aufnahme nicht abzulesen. Das Ergebnis dieser Art von Anregung war aber deutlich zu hören, es wurde nicht mit genügend Bogendruck gespielt, der Ton hörte sich instabil und obertonreich an. Wer schon einmal Kontrabass gespielt hat, kennt diesen Klang, man sagt dann: „der Ton spricht nicht gut an“. Schon im Lehrbuch der Akustik von Trendelenburg [2] wird darauf hingewiesen, dass dieser Effekt nicht durch die Helmholtzschen Berechnungen begründbar ist und eine Folge zu geringen Bogendrucks oder zu hoher Bogeneschwindigkeit ist. Sie werden dort als Unstetigkeiten des Typs erster, zweiter Ordnung, je nach Zahl der Unterteilungen bezeichnet. Weiter wird dort ausgeführt, dass derjenige Oberton des Klangs dann besonders stark anspricht, dessen Ordnungszahl dem Typ der Unstetigkeit entspricht, was den Klangeindruck bestätigt.¹

Ein Saitenmodell

Für die detailliertere Untersuchung wurde ein Saitenmodell (vgl. Abb.4) gebaut, welches aus einem 2,50m langen Latexschlauch besteht, der mit Stahlkugeln gefüllt ist, um die Amplitude zu vergrößern.

Es ist nicht gelungen einen Bogen für den Latexschlauch zu bauen, der eine Sägezahnsschwingung, wie sie der echte Bogen ausführt, erzeugt. Daher wird die Modellsaite mit einem über einen Frequenzgenerator gesteuerten Experimentierlautsprecher angesteuert. Auf diese Weise kann die Sägezahnsschwingung durch den Frequenzgenerator den Eigenfrequenzen der Saite angepasst werden. Hier ist also wegen der geschilderten Problematik eine Modellvereinfachung durchgeführt worden.

¹ siehe Trendelenburg [2], S. 149 ff.

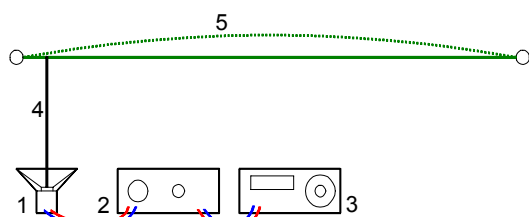


Abb.4: Versuchsaufbau Saitenschwingung
 1: Experimentierlautsprecher, 2: Gleichspannungsverstärker,
 3: Frequenzgenerator, 4: steife Ankopplung der Saite an den
 Lautsprecher, 5: Modellsaite aus einem Latexschlauch,
 gefüllt mit Stahlkugeln

Mit der Kamera wurden nun einmal das Phänomen der gezupften Saite und die verschiedenen Eigenmoden der Schwingung aufgezeichnet. Ziel war es hier zu versuchen die Erzeugung der Obertöne durch die sägezahnförmige Anregung als Oberschwingungen über der Grundschwingung sichtbar zu machen, da ja oftmals die Frage bei der Analyse jedes Instruments auftaucht: „Wo kommen denn die Obertöne her?“ Könnte man bei einer Saite, die in der Grundmode schwingt, die erste und zweite Oberschwingung überlagert sehen, dann könnte man plausibel erläutern, dass alle hörbaren Oberschwingungen durch die Sägezahnanregung des Bogens *gleichzeitig* präsent sind und über den Steg an den Korpus übertragen werden.

Das dies so ist, sieht man in den dazugehörigen Ausschnitten aus den Filmaufnahmen ([Gummisaite.div](#))

2.3 Einfachrohrblatt

Eine weitere wichtige Stimmgruppe sind die Holzblasinstrumente. Ihnen gemeinsam ist mit Ausnahme der Querflöte die Anregung des Instruments durch die Schwingung von Rohrblättern. Dabei gibt es zwei Formen. Bei der Klarinette und beim Saxophon und den dazugehörigen Familien besteht das Mundstück aus einem Hohlkörper, auf den ein Blättchen montiert ist, das so gestaltet ist, dass es unter dem Luftdruck des Spielers zu Schwingungen um die Ruhelage angeregt wird, und dabei die Luftsäule zum Instrument periodisch öffnet und schließt. Ob nun die Öffnung immer vollständig geschlossen wird, worin sich der bei Klarinettenanfängern so gehasste Quietschton vom richtigen Klang unterscheidet und ob sich das Blättchen auch in verschiedenen Schwingungsmoden bewegen kann, waren die anfänglichen Fragen an das System. Da ja der interessante Teil der Bewegung, die Schwingung der dünnen Seite des Blättchens während des Spielens im Mund des Instrumentalisten verschwindet, wurde versucht einen Anregungsmechanismus zu bauen, durch den man hindurchfilmen kann. Realisiert wurde ein luftdichter Plexiglastasten mit Zuluftanschluss und Befestigungsmöglichkeiten für die verschiedenen Mundstücke, in dem das Blättchen zu einer freien Schwingung veranlasst werden sollte (vgl. Abb.5). Das erste Testobjekt, ein Klarinetten-

mundstück der Marke „Solist“ mit einem Rohrblatt der Stärke 3,² konnte durch genügend hohen Anblasdruck am Einblasstutzen zu heftigen Schwingungen angeregt werden, die aber vom Klang eher als Quietschen, denn als Ton eingeordnet werden mussten. Außerdem stellte sich heraus, dass die Amplitude der Schwingung für eine Kameraaufnahme zu gering war. Ein Ton, der mit den Tönen, die das Mundstück beim Anblasen mit dem Mund produzieren kann, vergleichbar ist, konnte auf diese Weise nicht erzeugt werden.

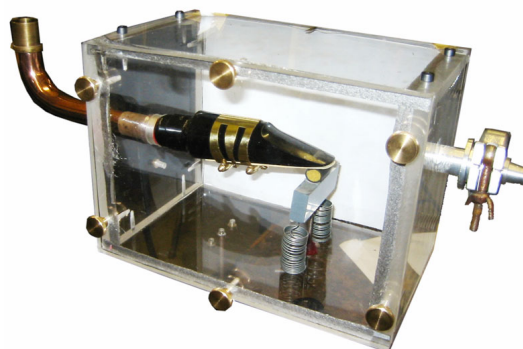


Abb.5: Anblasmechanismus für Saxophon- und Fagottmundstücke

Als zweites Testobjekt diente daher ein Mundstück eines Baritonsaxophons, das etwa die doppelte Größe eines Klarinettenmundstücks hat und entsprechend längere und breitere Rohrblätter benötigt. Die Amplitude war nun ausreichend. Auf diese Weise bestätigte sich die allen Holzbläsern völlig offensichtliche Vermutung, dass ohne Lippendruck auf das Blättchen keine kontrollierte Tonerzeugung möglich ist. Stellt man nun die Frage wie dieser Lippendruck denn beschaffen ist, um daraufhin ein Modell einer Ersatzlippe zu bauen, so bekommt man folgende empirischen Regeln mitgeteilt: ein zu fester Lippendruck kann die schon bekannten Quietschtöne erzeugen, ein zu leichter Lippendruck gibt einen instabilen Klang, ein guter Ton erfordert eine starke und vor allem seitliche Lippenspannung, die Auflagefläche der Lippe darf nicht zu groß sein und entscheidend ist vor allem die Position der Lippe auf dem Blättchen. Ist sie zu weit weg vom Herz, bekommt man überhaupt keinen Ton heraus, ist sie zu weit in Richtung Blattherz, ist die Quietschgefahr besonders groß, die aber gleichzeitig auch durch den Lippendruck beeinflusst werden kann. Entscheidend ist auch die richtige Unterstützung der Lippe durch die darunter liegende Zähne.

² Die Klarinetten- und Saxophonblätter werden in verschiedenen Materialstärken angeboten. Je größer die Zahl, desto stärker ist die Schicht am sogenannten Herz des Blättchen und desto schwerer fängt es an zu schwingen, aber je leichter das Blättchen ist, desto schneller wird es das gefürchtete Quietschen produzieren.

Die Ersatzlippe in ihrer jetzigen Form hat einige wesentliche Eigenschaften, die den menschlichen Mund nachbilden. So ist die eigentliche Lippe ein rundes Dichtungsgummi mit einer weichen Füllung, ähnlich der Haut der Lippe und dem darunter liegenden Gewebe, und ist an den Rändern aufgebo-gen, so dass die seitliche Lippenspannung nachemp-funden wird. Als „Zahnersatz“ dient ein Hartplastik-körper der wiederum auf Spiralfedern schwingungs-fähig gelagert ist, denn der Unterkiefer eines Holz-bläusers ist auch nicht fest eingespannt. Eine feste Einspannung am Plexiglaskörper des Gehäuses (wie bei den ersten Versuchen) erzeugte das selbe Problem wie die am Fuß im Schraubstock eingespannte Stimmgabel, die nicht schwingen konnte. Die offen-sichtlich nötige weiche Kopplung zwischen Rohr-blatt und Lippe war so unterbunden. Es muss jedoch hinzugefügt werden, dass dies nur Vermutungen sind, da eine genaue Untersuchung des Anregungs-mechanismus sicherlich eine eigene Arbeit wert wäre und entsprechend Zeit erforderte.

Wegen der trotz allem relativ hochfrequenten Schwingung musste bei den Aufnahmen die Blende der Kamera ganz aufgemacht werden, so dass die Tiefenschärfe darunter gelitten hat, aber anders war die für die hohe Bildraten nötige Helligkeit nicht zu erreichen.

Aus den Aufnahmen geht hervor, dass das Quietschen durch ein vom restlichen Klangkörper abge-koppeltes extrem hochfrequentes Schwingen des Rohrblatts hervorgerufen wird. Es entsteht bei frei schwingendem Blatt durch die fehlende Dämpfung seiner offensichtlich sehr hohen Eigenfrequenz und beim zu stark abgedrückten Blatt durch die (durch die Abpressung) extrem verkürzte Schwingungslän-ge.

Die tonerzeugende Schwingung sieht in der Auf-nahme wie ein Schlagen des Rohrblatts auf die Bahn des Mundstücks aus, was sicherlich charakteristisch für den Klang ist. ([Saxophon.div](#))

2.4 Doppelrohrblatt

Im selben Plexiglaskasten wie die Klarinetten- und Saxophonmundstücke wurde zur Vervollständigung der verschiedenen Anregungssysteme bei Holzbläsern auch das Mundstück eines Kontrafa-gotts eingebaut. Dieses besteht aus einem Doppel-rohrblatt, dessen Einzelblätter am einen Ende, dort wo nachher die Lippen liegen, hauchdünn zusam-mengeführt werden, wobei in der Mitte eine linsen-förmige Öffnung bleibt und am anderen Ende in ein kreisrundes stabiles Loch zum Aufstecken auf den S-Bogen münden (s. Abb.6). Die linsenförmige Öffnung wird durch das gegenläufige Schwingen der Blättchen geöffnet und geschlossen und so die

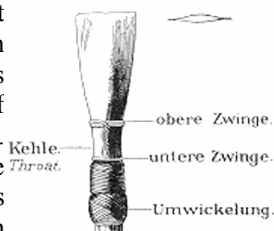


Abb.6: Aufbau eines Fagottmundstücks

periodische Schwingung im Resonanzkörper er-zeugt.

Interessanterweise ist bei diesem Aufbau die Aufgabe der Lippen nicht so klangentscheidend wie beim Einfachrohrblatt. Im Versuch gelingt es ohne eine Nachbildung der Lippen mit einer richtig abge-stimmten Resonanzröhre (hier einem Strohhalm) einen tieffrequenten Ton stabil zu erzeugen. Natür-lich wird jeder Fagottist einwenden, dass die Lip-penspannung ein ausschlaggebendes Kriterium für die Tonqualität ist, was bei einer Kopplung an das eigentliche Instrument sicher richtig ist. Die große Erleichterung für das Experiment ist aber, dass die Lippe zur Erzeugung eines richtigen Tons nicht zwangsläufig erforderlich ist, im Gegensatz zu den Einfachrohrblattinstrumenten.

Das Resonanzrohr hat in diesem Falle aber eine wichtige Funktion für die Rückkopplung und damit Steuerung der Rohrblattfrequenz. Verkürzt man nämlich das Resonanzrohr, bzw. verändert seine Steifigkeit durch Aufkleben von Tesafilmstreifen, so kommt es auch hier durchaus zu den typischen Quietschtönen.

In der Aufnahme ([Fagott.div](#)) kann man erken-nen, dass das Aufgehen des Blättchens sehr schnell geht, es im offenen Zustand einige Zeit verbleibt und dann „zuschnappt“. Das Blättchen bleibt relativ lange geschlossen. Die Schwingung ist nicht sinus-förmig.

3. Zusammenfassung

Mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnten die wesentlichen Anregungsmechanismen von Orchesterinstrumenten im Detail visualisiert werden, ihre Analyse, insbesondere ihre Relevanz für den Klang bleibt noch zu untersuchen.

4. Literatur

- [1] Kersting, Thomas, u.a.: Viana Videoanalysesoftware, Essen, <http://didaktik.physik.uni-essen.de/viana/>, Stand März 2005
- [2] Trendelenburg, Ferdinand: Einführung in die Akus-tik. - 3. Auflage, Berlin [u.a]: Springer, 1961
- [3] Maysenhölder, M.; Schneider, M.; Naßhan, K.: Swin-gingGraph - ein Werkzeug zur Untersuchung der Schwingungen von zweidimensionalen Stabwerken - Fachhochschule Stuttgart, Hochschule für Technik http://www.ibp.fhg.de/ba/simulation/swg/tuning_fork.html
- [4] Helmholtz, Hermann: Die Lehre von den Tonemp-findungen - Braunschweig: 1865.
- [5] Voßkühler, Adrian: Physikalische Untersuchungen zur Analyse und Visualisierung von Klängen aus dem Blickwinkel des Physikunterrichts. Berlin 2004; E-xamensarbeit, unveröffentlicht.

5. Kontakt:

Adrian Voßkühler und Volkhard Nordmeier
Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik / AG Didak-tik der Physik, Arnimallee 14, 14195 Berlin

Email: adrian@physik.tu-berlin.de/nordmeier@physik.tu-berlin.de