

ZUM EINFLUSS DER WANDSCHWINGUNGEN BEI METALLBLASINSTRUMENTEN

Gunter Ziegenhals

IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V. an der Technischen Universität Dresden
post@ifm-zwota.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Wand (der Korpus) der Metallblasinstrumente wird beim Spielen über die im Inneren schwingende Luftsäule zu eigenen Schwingungen angeregt. Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass für das Aufrechterhalten der unter normalen Spielbedingungen festgestellten Betriebsschwingungen des Korpus zwischen 1% und im Extremfall 20% der Leistung benötigt wird, die im abgestrahlten Schall steckt. Diese Leistung geht entweder dem Ton verloren oder muss vom Spieler zusätzlich aufgebracht werden. Die Unterschiede der Wandschwingungen werden vom Spieler über den Tastsinn eindeutig wahrgenommen. Die Pegeländerungen liegen im Bereich $< 0,5\text{dB}$ und sind deshalb nur bedingt hörbar. Man kann die Verlustleistung der Wandschwingung durch Minimierung der Schwingwege vermindern. Dies realisieren offensichtlich steifer gebaute Instrumente, die aber nur von einem Teil der Musiker bevorzugt werden. Es ist wahrscheinlich, dass der Musiker als Reaktion auf unterschiedliche Energieaufnahme der Wand seinen Ansatz und damit die Klangfarbe des Instrumentes verändert, also ein indirekter Wandeinfluss auf den Klang vorliegt.

Effekte der Wandschwingung werden anhand extremer Beispiele diskutiert. Diese Beispiele gehen über die normale Spielsituation bzw. üblich verwendete Materialien hinaus. Die Effekte der Wand sollten hier extrem deutlich hervortreten. Da dies nicht der Fall ist, muss der Einfluss der Wandschwingungen als sehr gering eingestuft werden.

1. AUSGANGSSITUATION

Bereits einfache Versuche (es genügt das Betasten der Instrumente) belegen eindeutig, dass beim Spiel von Blasinstrumenten deren Wandung deutliche Schwingungen ausführt. Umstritten ist, in welchem Maße sich diese auf Klang und Ansprache der Instrumente auswirken. Die Literatur lässt Hinweise darauf zu, dass Eigenmoden der Wand (in der Literatur meist als Systemmoden bezeichnet) der Luftschwingung Energie entziehen und so auf Ansprache und Klang wirken.

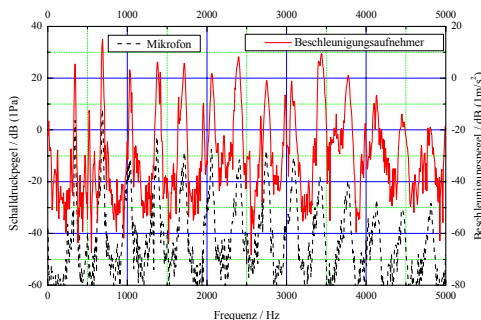


Abbildung 1: Schall- und Wandschwingungsspektrum einer Trompete

Messungen von Betriebsschwingungen an „dünnwandigen“ Metallblasinstrumenten zeitgleich mit dem abgestrahlten Schall zeigen, dass praktisch alle Frequenzkomponenten des Schalls auch in den Wandschwingungen vertreten sind (Abbildung 1). Die Amplituden der Wandschwingungen liegen je nach Frequenzbereich zwischen 1nm und $1\mu\text{m}$. Das Einschwingen der Wand hängt hinter dem Luftschall $5 \dots 10 \text{ms}$ nach. Ganz ähnliche Ergebnisse erhält man bei gleichartigen Messungen mit „dickwandigen“ Holzblasinstrumenten.

Aus entsprechenden Veröffentlichungen in Musiker-Fachzeitschriften (z.B. SONIC) und Gesprächen mit Herstellern kann man folgende, häufig wiederkehrende und in sich übereinstimmende Aussagen ableiten:

Stark schwingende Instrumente weisen vollere, dunklere Klangfarben auf und sprechen schlechter an. Schwingungen kann man durch eine steifere Bauweise (z. B. zusätzliche Verstrebungen) und eine höhere Masse eindämmen. Geht man davon aus, dass die Wand nur wenig zur Abstrahlung beiträgt, so könnten diese Effekte über eine Absorption hoher Frequenzen aus dem Luftschall prinzipiell beschrieben werden. Werden Wandschwingungen unterdrückt, so wird der Effekt abgeschwächt.

Massiven Materialien, wie Kupfer und Silber, wird ein dunklerer Klang als Messing zugeschrieben. Nimmt man als gegeben an, dass ein Wandeinfluss vorliegt, so ist diese Aussage eher kritisch zu bewerten. Kupfer und Messing weisen ähnliche Werte für ρ und E auf, während Silber deutlich andere Werte besitzt. Ein Unterschied wäre also bestenfalls für Silber zu erwarten.

Die Aussagen von Musikern zum Thema erscheinen auf den ersten Blick chaotisch und extrem widersprüchlich. Sie lassen sich aber letztlich auf folgenden Kern reduzieren:

- Steif gebaute, wenig schwingende Instrumente liefern mehr Sound.
- Baut man nur wenige Streben zwischen die Rohre und Ventile, so schwingt die Trompete freier, der Ton wird voller und weicher. Stützt man dagegen die Rohre an mehreren Stellen gegeneinander ab, so wird die Eigenschwingung eingegrenzt, der Ton wird härter und zentrierter.

Stark schwingende Instrumente entziehen dem Schall also Energie, insbesondere im oberen Frequenzbereich. Dies sollte man eigentlich grundsätzlich als negativ bewerten. Aber viele Musiker wünschen sich doch eher stark schwingende Instrumente.

Die grundlegenden Aussagen der Musiker entsprechen physikalischen Überlegungen. Die gesamte Energie für Luftschall- und Wandschwingungen muss vom Spieler aufgebracht werden. Der Energieanteil, der in die Wandschwingungen fließt, geht dem direkten Schall verloren. Wie groß ist aber der Energieanteil der in die Wandschwingungen fließt und wie ist seine Frequenzverteilung? In welchem Maß kann er verändert werden und wie verändert dies den abgestrahlten Schall im Fernfeld (beim Zuschauer) und im Nahfeld (am Spielerohr)? Die Beeinflussung des abgestrahlten Schalls durch die Wandschwingung kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen, durch Energieentzug und eigene Abstrahlung durch die schwingenden Wände.

Es schließt sich sofort eine weitere Frage an: Wie nimmt der Spieler die Veränderungen wahr? Über das Ohr oder über den Tastsinn anhand der reinen Schwingungsveränderung und wie bewertet er diese Beobachtung? Verbindet er heftige Wandschwingungen, die er mit den Händen spürt, mit einem guten Klang? Über viele Jahre wurde diesen Fragen nur geringe Beachtung geschenkt.

2. SCHALLLEISTUNG DER WANDSCHWINGUNG

Die Schallleistung geblasener Töne wurde im reflexionsarmen Raum des IfM gemessen. Dabei erfolgte eine Aufzeichnung der Schwingungspegel an den vier Punkten. In einem zweiten Versuch wurde die Wand über einen Shaker mit dem aufgezeichneten Schwingungssignal so angeregt, dass die Schwingungspegel an den vier Punkten wie beim Anblasen ausfielen, d.h. annähernd gleiche Wandschwingungen vorherrschten. Die nun von der Wand abgestrahlte Schallleistung konnte so gemessen werden. Es zeigten sich folgende Ergebnisse:

- Typische Schallleistung Trompete *mf*: 102 dB (lin.)
- Typische Schallleistung Trompetenwand: 56 dB (lin.)
- Typische Schallleistung Tuba geblasen *mf*: 105 dB (lin.)
- Typische Schallleistung Tubawand: 56 dB (lin.)

Man kann im Ergebnis der Messungen feststellen, dass die von der Wand abgestrahlte Schallleistung mehr als 45 dB geringer ist als die „Luftschallleistung“. Es kann damit ausgeschlossen werden, dass Zuhörer Wandschallanteile hören.

3. ZUM EINFLUSS DER WANDMODEN

An einer Trompete und einer Tuba wurden Modalanalysen vorgenommen und anschließend die Spektren von Betriebschwingungen der Wandung bei Einzeltonanspielen ermittelt. Abbildung 2 zeigt das entsprechende Gitternetzmodell einer Tuba.

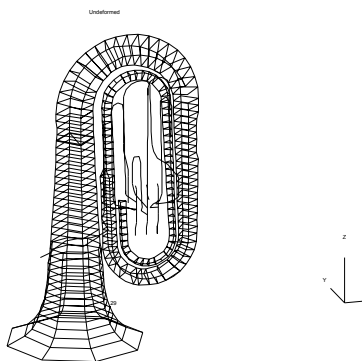


Abbildung 2: Gitternetzmodell Tuba für Modalanalyse

An folgenden vier Punkten am Instrument befanden sich die Beschleunigungsaufnehmer:

- Schallstück (29)
- Mitte Schallstückbogen (177)
- Unterseite zweites Ventil (199)
- Mundstückzwinge (266)

Die Nummern kennzeichnen die Punkte im Gitternetzmodell.

Abbildung 3 zeigt nun die Spektren der Betriebschwingungen einer Trompete, gespielter Ton b. Die gestrichelten senkrechten Linien kennzeichnen die Frequenzen der gefundenen Wandmoden. Die Modalanalyse erfolgte bis zu einer Frequenz von 2 kHz.

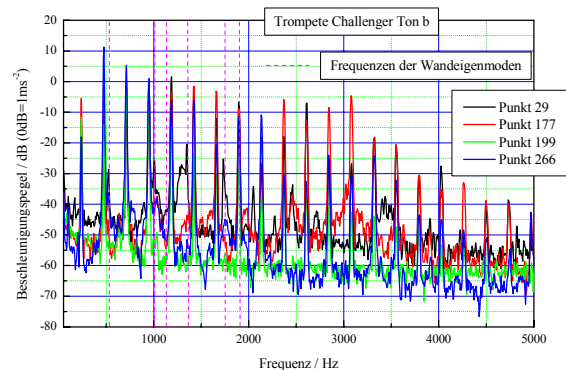


Abbildung 3: Schwingungsspektren verschiedener Instrumentenpunkte

Die Schwingungsspektren zeigen, dass Effekte von Wandmoden nur an den Schallstücken nachweisbar sind. Man erkennt deutlich die kräftig ausgeprägte Teiltonreihe des gespielten Tones. Die Instrumentenwand führt also ausgeprägte, von den Schwingungen der Luftsäule angeregte (erzwungene) Schwingungen aus. Die Amplitudenverteilung ist deutlich anders als bei den Eigenmoden. Praktisch alle Teile des Instrumentes sind nahezu gleichwertig (gleich heftig) an den Schwingungen beteiligt. Schwingungsanteile der Eigenmoden findet man wie zu erwarten nur auf dem Schallstück und in geringem Maße auf dem Schallstückbogen. Die Eigenmoden werden durch den Anfangsimpuls angeregt und klingen rasch ab. Ein Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der ermittelten Moden und der Ausprägung der erzwungenen Schwingungen ließ sich nicht herstellen.

4. SCHALLMESSUNGEN AM SPIELEROHR

Infolge der Abstrahlcharakteristik nehmen Zuhörer und Spieler typisch unterschiedliche Klänge der Instrumente wahr. Im messtechnischen Sinne verstehen wir unter Zuhörer eine Position in 1 m Entfernung vom Spieler (2 m bei Tuben) in typischer Richtung der Zuschauer. Beobachtet wurden im Rahmen unserer Messungen wiederum Musikertestanspiele im reflexionsarmen Raum des IfM. Neben dem „Zuschauer-mikrofon“ in der oben beschriebenen Position wurde ein zweites Mikrofon jeweils am rechten Spielerohr positioniert. Die Musiker bliesen Einzeltöne der Grundnaturtonreihe. Die beiden Mikrofon-signale wurden zunächst auf DAT aufgezeichnet und anschließend verschiedenen Analysen unterzogen. Die Aufzeichnung der beiden Mikrofon-signale sichert, dass jeweils an beiden Mikrofonpositionen wirklich das gleiche Anspiel bewertet wird. Um die Wirkung evtl. Wandabstrahlungen besser trennen zu können, erfolgte ein Teil der Aufnahmen mit vollständig von Schaumstoff eingeschlossenen Instrumenten.

Die Analysen zeigten keine Hinweise auf Schallanteile der Wand. Die Schallspektren mit und ohne Schaumstoffpackung waren sowohl am Zuhörer- als auch am Spielerohrmikrofon praktisch identisch. Deutliche Unterschiede zeigen sich allerdings zwischen Zuschauer- und Spielerperspektiven. Insbesondere bei den Trompeten (Abbildung 4). Unter dem mittleren Spektrum in Abbildung 4 wird die Mittelung über alle im Rahmen dieser Versuchreihe vorgenommenen Trompetenanspiele verstanden. Man erkennt, dass der Schalldruckpegel oberhalb 1500 Hz am Spielerohr deutlich abfällt. Ursache ist die

gerichtete Abstrahlung des Schalltrichters bei höheren Frequenzen. Der Spieler hört also sein Instrument deutlich weniger hell, scharf und brillant als ein Zuhörer. Bei Tuben ist der Effekt deutlich weniger ausgeprägt. Zum einen ist die Position des Spielerohrs zum Schalltrichter eine andere, zum anderen treten bei Tuben mehr wesentliche Klanganteile in tieferen Frequenzbereichen auf.

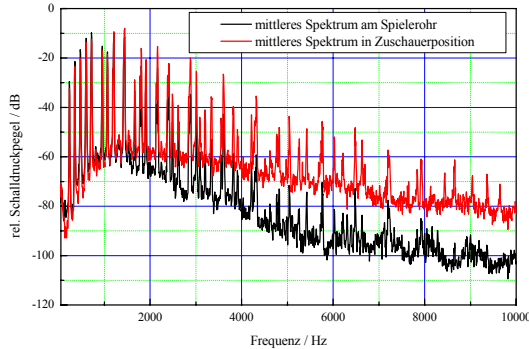


Abbildung 4: Vergleich mittlerer Schalldruckspektren von Trompeten am Spielerohr und beim Zuschauer

5. ENERGIEVERTEILUNG

Wenn also weder Spieler noch Zuhörer Wandschall wahrnehmen können, woher kommt dann der immer wieder beschriebene Wandeffekt? Wir wollen dazu die im Schall und in der Wandschwingung steckenden Energien, die beide vom Spieler aufgebracht werden müssen, vergleichen. Die gemessenen Schallleistungen von 100...105 dB entsprechen einer Leistung im SI-System von 0,01...0,032 Nms⁻¹. Für die Ermittlung der Energie der Wandschwingung wiederholten wir den oben beschriebenen Versuch zur Erregung einer spieläquivalenten Betriebsschwingung mittels Shaker. Dabei wurde aber nun am Shaker sowohl die erzeugte Schwingung als auch die eingeleitete Kraft über einen Impedanzmesskopf aufgezeichnet.



Abbildung 5: Anordnung zur Simulation der Betriebschwingungen ohne Luftschall

Aus den Messwerten für Kraft und Schwingungsgeschwindigkeit kann man die eingespeiste, also zur Aufrechterhaltung der Wandschwingung erforderliche Leistung berechnen. Die Auswertung liefert für Trompeten 0,0001...0,0006 Nms⁻¹ und für Tuben 0,0001...0,002 Nms⁻¹. D.h. es wandern zwischen 1% und 20% der im Instrumentenklang steckenden Leistung in die Wandschwingung ab. Dieser Effekt wird

vom Musiker zweifellos wahrgenommen als zusätzliche Mühe um den gewünschten Klang zu erreichen.

Bei der gemessenen Leistung handelt es sich um eine Wirkleistung. Sie muss im stationären Teil des Tones permanent aufgebracht werden um die Wandschwingung aufrecht zu erhalten. Durch Reibung und in geringerem Maße durch Abstrahlung wird der Wandschwingung permanent Energie entzogen. Es ist jedoch noch eine zweite Leistung zu erbringen, nämlich die Wandschwingung erst einmal in Gang zu setzen. Da man am Ende vom Ton diese Leistung rein physikalisch wiederbekommt, handelt es sich hier um eine Blindleistung. Der Musiker kann diese zurückgegebene Leistung aber nicht nutzen. Er muss sie bei jedem Ton erneut aufbringen, was insbesondere bei schnellen Passagen kurzer Töne von Bedeutung sein kann. Eine exakte Bestimmung dieser Blindleistung ist uns nicht möglich gewesen. Wir haben sie deshalb anhand der gemessenen mittleren Schwingungsamplituden auf der Instrumentenwand und den Instrumentenmassen abgeschätzt. Es ergeben sich für

- Trompeten 3.10-5...0,001 Nms⁻¹

und für

- Tuben 2.10-5...0,0002 Nms⁻¹,

also 0,1%...10% der in die Schallerzeugung steckenden Leistung. Auch dies sollte der Musiker wahrnehmen.

Beide Leistungen können durch Verringerung der möglichen Schwingwege, also steifer gebaute Instrumente, verringert werden. Eine Tonabhängigkeit konnte nicht festgestellt werden. Steifere Instrumente nehmen weniger Leistung in die Wandschwingung auf. Für die Klangerzeugung steht mehr Energie zur Verfügung. Da keine tendenzielle Frequenzabhängigkeit der Effekte nachgewiesen werden konnte, stellt sich die Frage, worauf die immer wieder von Musikern beschriebenen Klangunterschiede basieren. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Bläser in Abhängigkeit von der erforderlichen Leistung seinen Ansatz und damit den Klang verändert.

6. INSTRUMENTE IN SAND GEPACKT

Um Wandeffekte unter extremen Bedingungen zu studieren, wurden die Instrumente jeweils in 15 kg Quarzsand gepackt und im Vergleich zum Normalzustand geblasen sowie bzgl. des Eingangsimpedanzverlaufs vermessen.



Abbildung 6: "Einsanden" einer Trompete

Durch das Einsanden wird der Schwingungspegel der Wand um mehr als 10 dB gesenkt. Die gemessene Stimmung der „eingesandeten“ Instrumente sinkt um 10 ... 15 cent insbesondere im mittlere Tonbereich (Abbildung 7). Festgestellte Unterschiede im Pegel und im Spektrum in Zuschauerposition

und am Spielerohr konnten letztlich auf die zusätzliche Richtwirkung der Apparatur zurückgeführt werden.

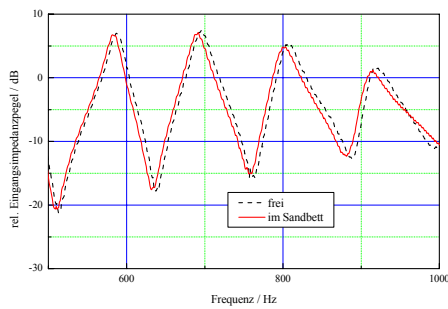


Abbildung 7: Ausschnitt Eingangsimpedanzverlauf Trompete

Die Testmusiker beschrieben einheitlich zunächst eine erschwerte Kontrolle der eingesandeten Instrumente. Dieses Phänomen konnte geklärt werden, indem ein typgleiches Instrument parallel angespielt wurde und zwar so, dass der Musiker auch dieses Instrument nicht mit den Händen berühren konnte (Abbildung 8). Dabei traten ähnlich Probleme auf. Der Musiker benutzt also offensichtlich den Tastsinn für die Kontrolle des Instrumentes. Nach einiger Übung konnten die Musiker beide Instrumente gleich anblasen und stellten keine Unterschiede mehr fest.

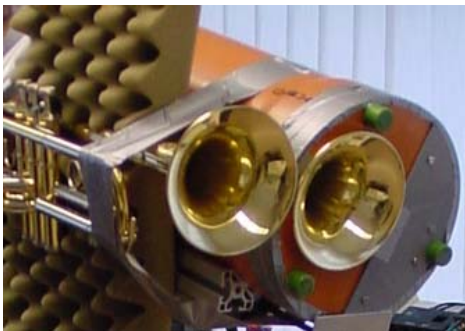


Abbildung 8: Zwei typgleiche Trompeten

7. MATERIALVARIATION

Im Rahmen von Arbeiten zur Vuvuzela, nahmen wir Messungen an einfachen Metallblasinstrumenten sehr verschiedener Materialien vor:

- Messing, $l = 410$ mm, $m = 118$ g (ohne Mundstück)
- Papier, $l = 410$ mm, $m = 23$ g (ohne Mundstück)
- Styropor, $l = 500$ mm, $m = 44$ g.



Abbildung 9: einfache Instrumente, (Al-Mundstück, $m = 34$ g)

Beobachtet wurden im Toneinsatz und im stationären Klang der Schall (1 m vor Schallstück) und die Wandschwingungen im Bereich des Schallstücks. Obwohl eigentlich zu erwarten, ist es verblüffend, wie gering die wahrnehmbaren Unterschiede beim Anblasen ausfallen. Die folgenden Diagramme zeigen Spektren und Zeitsignale von Wandschwingungen und abgestrahltem Schall.

Die folgenden Diagramme zeigen Spektren und Zeitsignale von Wandschwingungen und abgestrahltem Schall.

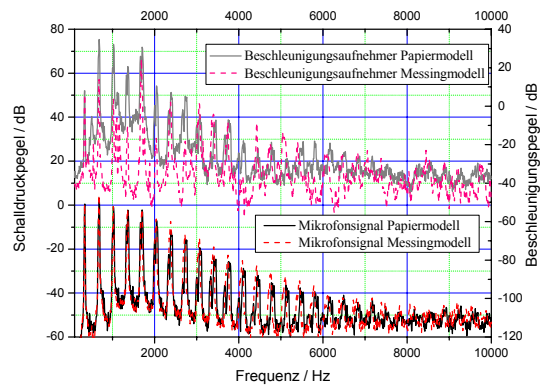


Abbildung 10: Beschleunigungs- und Schallspektren des Toneinsatzes von Papier- und Messinginstrument

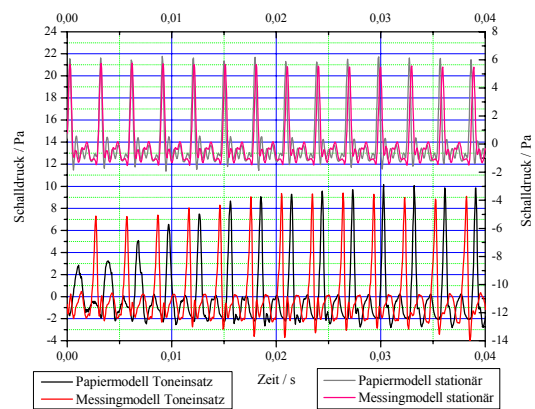


Abbildung 11: Schallsignal von Toneinsatz und stationärem Ton Papier- und Messinginstrument

Man erkennt im Toneinsatz deutlich stärkere Wandschwingungen des Papiermodells, was sich in einem etwas langsamerem Aufbau des Schalls widerspiegelt. Die Verzögerung liegt im Bereich um 15 ms ... 20 ms.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Wir finden zwei Einflüsse der Wandschwingungen auf den Klang des Instrumentes vor: Einen indirekten Einfluss über den Bläser und einen direkten Einfluss infolge von Abwandern von Energie in die Wandschwingung.

Eine Reihe von Bläsern nutzen die mit den Händen wahrgenommenen Wandschwingungen als Kontrollanzeige für den aktuellen Schwingungszustand der Luftsäule. Insbesondere scheint diese Technik von Bedeutung in Situationen, in denen sich der Spieler selbst schlecht hört. Der Spieler reagiert auf unterschiedliche Wandschwingungen einzelner Instrumente mit einem veränderten Ansatz. Dadurch verändert sich nun die Klangfarbe. Dies nimmt ein Zuhörer eindeutig wahr.

Deutlich geringer sind die direkten Einflüsse, durch die den Schallschwingungen der Luftsäule Energie entzogen wird. Die Wirkung ist im Bereich des Toneinsatzes am deutlichsten. Obwohl sie technisch durchaus nachweisbar sind, werden sie aber erst beim Einsatz extremer Materialvarianten, die in der Praxis nicht wirklich Verwendung finden, tatsächlich wahrnehmbar.

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Forschungsarbeiten wurden z. T. aus Haushaltemitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF „Otto von Guericke“ e.V. gefördert.