# Interaktive Akustik-App zur Visualisierung akustischer und strukturdynamischer Effekte an Musikinstrumenten

Jonas Schmid, Johannes Schmid, Lennart Moheit, Steffen Marburg
*Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, TU München, 85748 Garching bei München, Deutschland, Email: jonas.m.schmid@tum.de*

## Einleitung

Akustische und strukturdynamische Phänomene lassen sich meist nicht mit dem bloßen Auge erfassen. Zum Verständnis dieser Effekte sind jedoch für den Menschen neben den akustischen auch visuelle Eindrücke sehr wichtig. Dafür sich Messgeräte und Messaufbauten notwendig, die vielerorts schlichtweg nicht verfügbar und zudem meist sehr teuer und zeitaufwändig sind. Durch den Einsatz von Simulationstools können viele dieser Experimente simulativ nachgestellt und dadurch Zeit und Geld im Vergleich zum realen Experiment eingespart werden. Jedoch sollen die digitalen Experimente aufgrund der fehlenden Haptik nicht als Ersatz, sondern eher als Ergänzung der realen Experimente gesehen werden, wie Moheit et al. [1] anmerken. Dennoch eröffnen sich durch das Visualisieren von beispielsweise Strukturschwingungsformen oder Schalldruckverteilungen neue Sichtweisen und Erkenntnisse auf physikalische Phänomene. Speziell der Einsatz dieser "virtuellen Experimente" in der Lehre kann zu einem besseren Verständnis für Schüler oder Studierende beitragen.
Bisher war die Visualisierung akustischer Phänomene Experten mit meist teurer Simulationssoftware und Fachwissen vorbehalten. Deshalb war es die Motivation des *Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme* der TU München, frei zugängliche Simulations-Apps anzubieten, die jedem Nutzer ermöglichen, sich ohne spezielle Simulationssoftware akustische Phänomene einfach und interaktiv zu veranschaulichen. Zur Bedienung sind keine tiefgreifenden Simulationskenntnisse nötig. Die Akustik-Apps sollen daher dem Nutzer auf spielerische Art und Weise akustische Phänomene näherbringen und veranschaulichen und dazu beitragen, diese besser zu verstehen.

## Das Prinzip

Die Apps können unkompliziert und kostenlos über einen Web-Browser geöffnet werden. Die App-Bibliothek, in der alle Apps hinterlegt sind, kann über die Homepage des *Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme* [2] aufgerufen werden. Das heißt, die Apps sind sowohl auf einem Computer als auch über ein Tablet oder Smartphone einfach aufrufbar, ohne dazu eine eigene Software herunterladen zu müssen.
Hat der Nutzer dann eine der Apps geöffnet, kann er zum einen die Geometrie über die Maus bzw. über den Touchscreen intuitiv bedienen, zum anderen hat der Nutzer die Möglichkeit die Geometrie- und Berechnungsparameter über Schieberegler und Eingabefelder interaktiv zu verändern.
Nach der Berechnung kann der Nutzer die Ergebnisse direkt über verschiedene Darstellungsmöglichkeiten und Animationen auswerten und sich veranschaulichen.
Die Berechnungen werden dabei im Hintergrund auf einem Server durch die kommerzielle Simulationssoftware COMSOL Multiphysics® auf Basis der Finite-Elemente Methode (FEM) durchgeführt. Somit werden auf dem ausführenden Gerät des Nutzers nur die Ergebnisse angezeigt, jedoch keine Berechnung durchgeführt. Dies bietet den Vorteil, dass die Apps auch auf weniger leistungsfähigen Geräten ausgeführt werden können.

## Musikinstumente-App

In diesem Beitrag werden speziell die Funktionen und Möglichkeiten der Musikinstrumente-App, die ebenfalls über die App-Bibliothek der TU München aufrufbar ist, vorgestellt. Ziel dieser App ist es, dem Nutzer die akustischen und strukturdynamischen Effekte, die beim Spielen eines Musikinstruments ablaufen, zu veranschaulichen und zu verdeutlichen. Dabei kann der Nutzer zwischen den drei Instrumenten Posaune, Geige und Pauke auswählen. Somit ist sowohl von der Gruppe der Blechblasinstrumente, der Saiteninstrumente und der Schlaginstrumente ein Instrument vertreten. Diesen verschiedenen Instrumentengruppen liegen jeweils sehr unterschiedliche physikalische Prinzipien zugrunde, die durch die App einfach visualisiert werden können. Dies soll zu einem tiefgreifenderen Verständnis der ablaufenden Effekte führen. Dadurch können beispielsweise Schülern, Studierenden oder auch Musikern neue Erkenntnisse und Sichtweisen auf Musikinstrumente ermöglicht werden.
In den folgenden Abschnitten wird zuerst kurz der Aufbau der App diskutiert und anschließend die Funktionen und Möglichkeiten zur Visualisierung der Ergebnisse der einzelnen Instrumente aufgezeigt.

## Aufbau

In Abbildung 1 ist das generelle Layout der Musikinstumente-App am Beispiel der Posaune dargestellt. Zentrales Element der App ist ein großes Grafikfenster, in dem die Geometrie des Instruments und nach der Berechnung auch die Ergebnisse dargestellt werden. Am linken Rand hat der Nutzer die Möglichkeit, verschiedene Berechnungs- und Geometrieparameter interaktiv zu verändern und so die gewünschte Geometrie nachzubilden.
Am oberen Rand befindet sich eine Funktionsleiste, mit der zwischen den verschiedenen Instrumenten hin und her gewechselt und das zur Berechnung erforderliche Finite-Elemente Netz dargestellt werden kann. Über die Schaltfläche „Compute“ kann die gewünschte Berech-

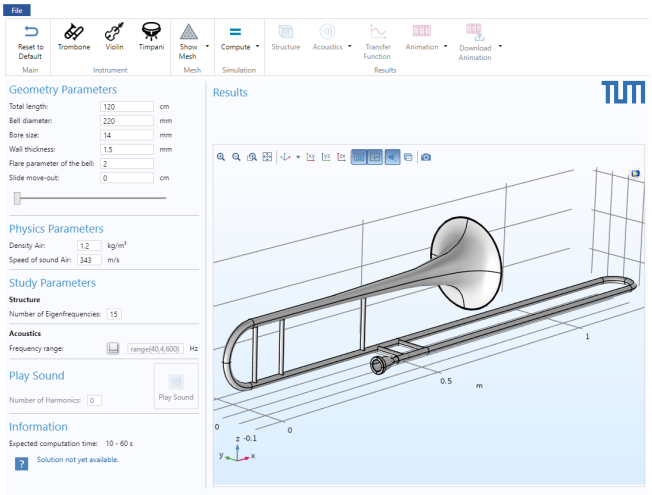


**Abbildung 1:** Generelles Layout der Musikinstrumente-App mit der Geometrie der Posaune.

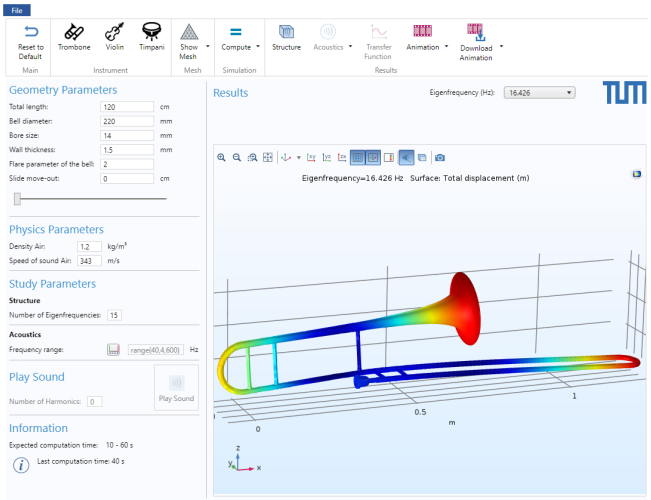


**Abbildung 2:** Verschiebungsfeld der ersten Eigenschwingungsform einer Posaune, dargestellt in der App.

nung gestartet werden.
Sobald die Ergebnisse berechnet sind, kann sich der Nutzer diese über verschiedene Darstellungsmöglichkeiten visualisieren und sich dadurch die ablaufenden akustischen sowie strukturdynamischen Effekte einfach veranschaulichen. Es stehen nicht nur unterschiedliche graphische Darstellungen zur Visualisierung zur Verfügung, sondern auch die Möglichkeit, sich die Ergebnisse zu animieren. Diese Animationen können entweder direkt in der App abgespielt oder für den späteren Gebrauch, beispielsweise in einer Präsentation, lokal heruntergeladen werden.
In den folgenden Abschnitten wird genauer auf die Berechnungs- und Darstellungsfunktionen der verschiedenen Instrumente eingegangen.

## Posaune

Die Auswahl des Instruments Posaune in der Musikinstrumente-App bietet die Möglichkeit, die Struktureigenschwingungsformen einer Posaune mit den dazugehörigen Eigenfrequenzen zu berechnen. In Abbildung 2 ist beispielsweise der Betrag der Verschiebung der ersten Biegeeigenschwingungsform einer Posaune dargestellt.

Dem Nutzer wird dadurch verdeutlicht, dass beim Spielen nicht nur die Luftsäule, sondern auch die Struktur der Posaune zu Schwingungsformen angeregt wird. Durch Verändern der Geometrieparameter, beispielsweise das Ausziehen des Posaunenzuges, hat der Nutzer die Möglichkeit, den Einfluss der Geometrie auf die Eigenfrequenzen der Struktur zu untersuchen und zu verstehen.
Des Weiteren kann mit der App das akustische Schalldruckfeld im Inneren der Posaune bei einer Anregung der Luftsäule am Mundstück für einen frei wählbaren Frequenzbereich berechnet werden. Als Darstellungsmöglichkeiten kann sich der Nutzer den Schalldruck, den Schalldruckpegel und die Isoflächen des Schalldrucks im Inneren der Posaune anzeigen lassen. Darüber hinaus bietet die App die Möglichkeit, den Verlauf des Graphen der akustischen Eingangsimpedanz, also das Verhältnisses von Schalldruck zu Schallschnelle an der Stelle des Mundstücks, aufzuzeigen. Darin lassen sich sehr gut die Resonanzfrequenzen der Luftsäule ablesen, die mit den dazugehörigen Frequenzwerten, der korrespondierenden musikalischen Note und der Abweichung davon in Cent angegeben werden. Die Resonanzfrequenzen entsprechen den Naturtönen, die von dem Musiker angespielt werden können. Die App ermöglicht somit Musikern umfangreiche Einblicke in die ablaufenden physikalischen Effekte beim Spielen einer Posaune. Über die Schaltfläche „Play Sound“ lassen sich schließlich die in dem gewählten Frequenzbereich berechneten Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Amplituden aus der Übertragungsfunktion durch eine einfache Überlagerung von reinen Sinustönen auralisieren.
Des Weiteren kann sich der Nutzer das abgestrahlte Schalldruckfeld vom Schallbecher der Posaune bei einer Frequenz darstellen. Der Außenraum wurde in der Modellierung durch ein sphärisches Perfectly-Matched-Layer (PML) abgebildet. Dadurch kann sich der Nutzer sehr schön die frequenzabhängige Richtcharakteristik des Instruments deutlich machen. In Abbildung 3 ist das abgestrahlte Schalldruckfeld bei einer Frequenz von 500 Hz dargestellt.

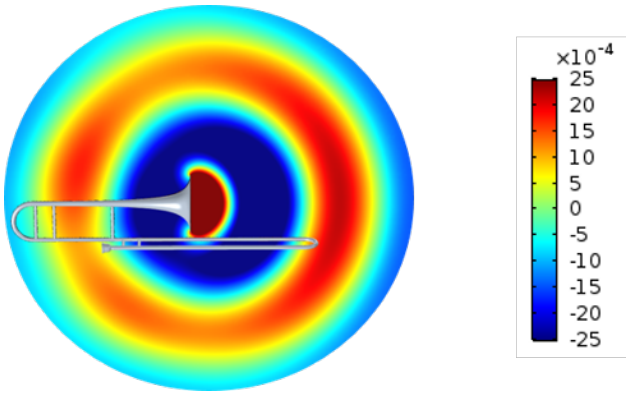


**Abbildung 3:** Abgestrahltes Schalldruckfeld einer Posaune in Pascal bei einer Frequenz von 500 Hz

## Geige

Wird in der Musikinstrumente-App die Geige als Instrument ausgewählt, bietet die App die Möglichkeit, die Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen der Struktur der Geige zu berechnen und anschließend zu visualisieren. Einen großen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Geigenkorpusses hat die Position des sogenannten Stimmstocks, der die Decke und den Boden des Korpusses miteinander verbindet. Dieser hat die Hauptaufgabe, die Schwingungen der Decke auf den Boden zu übertragen. Die App bietet die Funktion, die Position des Stimmstocks frei zu variieren. Dadurch kann sich der Nutzer interaktiv den Einfluss des Stimmstocks auf das Schwingungsverhalten des Geigenkorpusses verdeutlichen. In Abbildung 4 ist die Schnittansicht einer Eigenschwingungsform des Korpusses dargestellt, in der sehr gut die Kopplungsfunktion des Stimmstocks ersichtlich ist.

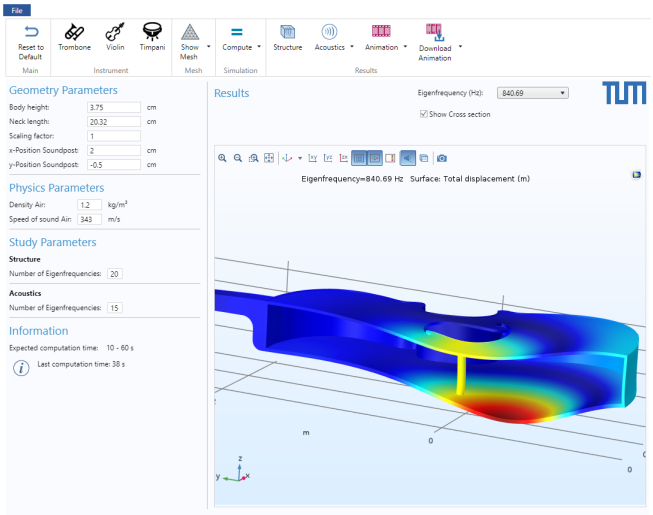


**Abbildung 4:** In der App dargestellte Schnittansicht des Verschiebungsfeldes einer Eigenschwingungsform des Geigenkorpusses, in der sehr gut die Funktion des Stimmstocks veranschaulicht wird.

Darüber hinaus können über die App die akustischen Moden der Luftkavität im Inneren der Geige berechnet und dargestellt werden. Dadurch kann sich der Nutzer die Schalldruckverteilung im Inneren des Instruments bei verschiedenen Eigenfrequenzen einfach visualisieren.

## Pauke

Wählt der Nutzer in der Musikinstrumente-App die Pauke als Instrument aus, stehen ihm drei Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung. Zum einen können die Eigenschwingungsformen und die dazugehörigen Eigenfrequenzen des Paukenfells berechnet, dargestellt und animiert werden. Dadurch kann sich der Nutzer die verschiedenen Eigenschwingungsformen der Membran sehr gut visualisieren und verdeutlichen. Für die Berechnung kann der Nutzer die Vorspannkraft am Rand des Paukenfells frei einstellen und so den Einfluss der Vorspannung auf die Eigenfrequenzen und somit die Tonhöhe des Klangs untersuchen. Zum anderen bietet die App dem Nutzer die Möglichkeit, sich die akustischen Moden der Luftkavität im Inneren der Pauke zu berechnen. Als dritte Berechnungsmöglichkeit kann der Nutzer über eine Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) die Eigenschwingungsformen des gekoppelten Systems von Paukenfell und Luftkavität berechnen und darstellen. In Abbildung 5 ist eine der Eigenschwingungsformen des gekoppelten Systems dargestellt. Man sieht deutlich, wie die Schwingung des Paukenfells Einfluss auf die Schalldruckverteilung der Luftkavität nimmt.

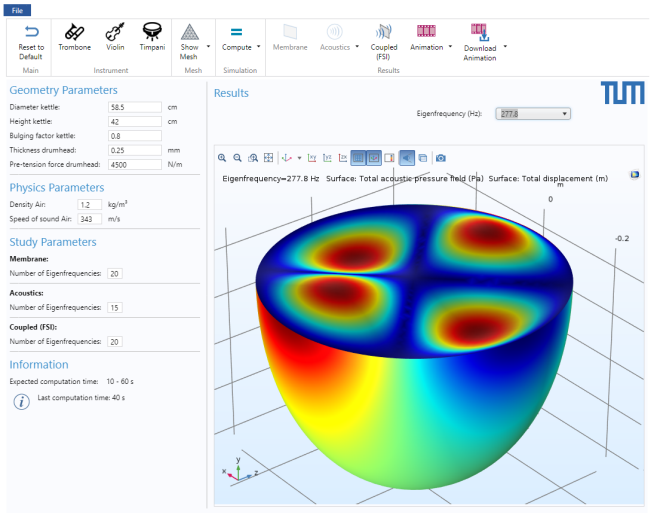


**Abbildung 5:** Eigenschwingungsform des gekoppelten Systems aus Paukenfell (Verschiebungsfeld) und Luftkavität (Schalldruckfeld), dargestellt in der App.

## Zugang zu der App-Bibliothek

Die App-Bibliothek [2] kann sowohl über die Homepage des *Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme* als auch direkt über die URL `http://apps.vib.mw.tum.de` aufgerufen werden. In der Bibliothek befinden sich neben der Musikinstrumente-App noch viele weitere frei zugängliche Akustik-Apps zur Veranschaulichung anderer interessanter Phänomene der Akustik, Strukturdynamik und Mechanik.

## Ausblick

Die App-Bibliothek befindet sich momentan noch im Aufbau, sodass sowohl die Anzahl als auch die Funktionen der Apps stetig ausgebaut und verbessert werden. Die Autoren sind deshalb sehr interessiert an Anregungen und Feedback zur Verbesserung des App-Angebots unter `apps@vib.mw.tum.de`.

## Literatur

[1] Moheit, L., Mäder, M., Marburg, S.: Interaktive Akustik-Apps - Akustik 'klickbar' machen in Schule, Studium und Beruf. Fortschritte der Akustik - DAGA 2018 (2018), 834 - 835

[2] Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, TU München, App-Bibliothek, URL: `http://apps.vib.mw.tum.de`