

Zur Akustik von Weingläsern

Mit Messungen und Simulationen dem Klang auf der Spur

Marcus Mäder, Lennart Moheit, Lisa Kastenhuber, Steffen Marburg

Im Rahmen des Physikprojektes Austrian Young Physicists' Tournament untersuchte die Schülerin Lisa Kastenhuber die Akustik von Weingläsern in Abhängigkeit von der Glasform und vom Füllstand des Fluids – hier Wasser oder Honig. Am Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme der TU München konnte sie einen Einblick in die Arbeit von Akustik-Ingenieurinnen und -Ingenieuren gewinnen und ihre akustischen Messungen durchführen. Mit einem Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer machte sie die Schwingungen des Glases sichtbar, die für den Klang beim Anstoßen oder beim Fingerkreisen verantwortlich sind.

An der Materialforschungs- und -prüfanstalt der Bauhaus-Universität Weimar wurden optische Geometriescans durchgeführt und es entstanden hochpräzise Volumenmodelle der zuvor vermessenen Gläser, deren frequenzabhängige Schwingungsformen im Folgenden am Computer durch eine numerische Modalanalyse simuliert und visualisiert werden können. Es zeigte sich, dass neben den Materialkennwerten auch die nicht ganz perfekte Rotationssymmetrie eine entscheidende Rolle für den Klang des Glases spielt.

Um die aussagekräftigen Simulationsergebnisse auch ohne spezielle Software und Expertenwissen im Unterricht oder in der universitären Lehre einsetzen zu können, hat der Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme eine freie Browser-App entwickelt. Damit können Form und Füllstand des Glases variiert und dessen Eigenfrequenzen und Schwingungsformen simuliert und visualisiert werden.

Forschungsgegenstand Weinglas

Das Weinglas, das beim Höhepunkt der Arie durch die Stimme der Opernsängerin zerbricht oder mit dem Streichen der Fingerspitze über den Glasrand zu singen beginnt und die darin befindliche Flüssigkeit zur Ausprägung von Schwingungsmustern anregt – es ist ein wunderbares Anschauungsobjekt für Struktur- und Fluidschwingung in Wechselwirkung und oft schon Kindern und Jugendlichen ein bekanntes Phänomen der Physik. Das traf auch für Lisa Kastenhuber zu, eine Schülerin der 12. Klasse des Ignaz-Günther-Gymnasiums in Rosenheim, die im Rahmen des Austrian Young Physicists' Tournament genau diesem Phänomen auf den Grund gehen wollte und sich dafür an den Lehrstuhl für Akustik

On the acoustics of wine glasses

While participating in the Austrian Young Physicists' Tournament, Lisa Kastenhuber investigated the acoustics of wine glasses depending on the shape of the glass and on the volume of water or honey inside. At the Chair of Vibro-Acoustics of Vehicles and Machines at the TU Munich, the high school student could get an insight to the work of acousticians in engineering science and has been able to perform her measurements of the acoustics of the glass. Using a scanning laser Doppler vibrometer, she was able to visualize the vibrations of the glass, which are responsible for its sound due to clinking or sliding the finger tips. A geometric scan of the glasses was conducted in Weimar at the Bauhaus University and highly accurate volume models have been obtained. In the following, the frequencies of vibration and the corresponding deflection shapes of the virtual glasses are computed and visualized. It can be observed that, besides the material properties, the imperfectly symmetric shape of the glasses plays a major role for their sound.

Since the very descriptive visual results from numerical simulations often require software licenses or specific expertise, they seem not to be applicable in lectures at university or in school. For that purpose, the Chair of Vibro-Acoustics of Vehicles and Machines developed a free browser app, where the user can easily change the shape of the glass and the volume of the fluid inside, compute the natural frequencies, and visualize the shapes of vibration.

mobiler Systeme der TU München wandte.

Maßgeblich für den Klang eines Glases sind dessen Resonanzfrequenzen, in denen die Struktur mit nur wenig eingebrachter Energie sehr stark in Schwingungen versetzt werden kann. Trifft die Opernsängerin mit ihrer Stimme den richtigen Ton, wird das System aufgrund synchroner Wechselwirkung zwischen kinetischer und potenzieller Energie so angeregt, dass die gespeicherte Energie in beiden Formen wechselseitig zunimmt, bis eine Dämpfung erreicht ist, die eine weitere Zunahme begrenzt. Nimmt vorher die Schwingung soweit zu, dass die inneren Spannungen die inneren Gefügebindungen zerstören, kommt es zum Zerspringen. Die Eigenschaften der Schwingungen – deren Frequenzen und jeweili-

ge Dämpfung oder Abklingdauer – hängen von der Form und vom Material der Struktur ab.

Nahezu unabhängig davon, auf welchem Wege eine Anregung erfolgt, das Glas reagiert in erster Linie in seinen Resonanzfrequenzen, wohingegen alle anderen Frequenzanteile außerhalb der Resonanzen zu keiner signifikanten Schallabstrahlung beitragen. Das Glas kann außer über Luftschall auch mittels eines Kraftimpulses (z. B. durch Anstoßen mit einem anderen Glas) zu Schwingungen angeregt werden. Ein weiterer Weg: Kreist man mit einer Fingerspitze gleichmäßig über den feuchten Glasrand, kommt der sogenannte Stick-Slip-Effekt zum Tragen, bei dem sich das Haften und Gleiten des Fingers über den Glasrand abwechselt und so – bei passender Geschwindigkeit – zu einer harmonischen Anregung der Glasresonanzen führt. Eine derartige Schwingung, welche maßgeblich durch die Reibung zwischen Glas und Fingerspitze beeinflusst wird, nennt man selbsterregte Schwingung. Ähnliches Verhalten findet sich bei Kurvenfahrten von Straßenbahnen oder beim Streichen mit dem Bogen über die Saite einer Violine. Im hier behandelten Fall haben die Gläserresonanzen sehr kleine Amplituden – typischerweise zwischen 10^{-10} m und 10^{-8} m im hörbaren Frequenzbereich – und sind daher mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen. Versucht man, ein Weinglas durch Beschallung zu zerstören, können diese Schwingungen bis in den Millimeterbereich anwachsen. Nichtsdestotrotz kann das menschliche Auge Schwingfrequenzen ab ca. $f = 25$ Hz nicht mehr erfassen. Die Schwingungen lassen sich jedoch beispielsweise mit einem Stroboskop sichtbar machen, indem Lichtblitze in einer Frequenz nahe der Resonanzfrequenz des Glases abgegeben werden, so dass sich die schnellen Bewegungen zu diskreten Standbildern reduzieren. Das menschliche Auge verknüpft dann diese diskreten Bilder zu einer kontinuierlichen und sichtbaren Schwingungsform. Die dann sichtbare Schwingfrequenz ergibt sich aus dem leichten Unterschied zwischen Schwingfrequenz des Glases und Blitzfrequenz des Stroboskops. Stimmen beide Frequenzen exakt überein, ergibt sich deren Differenz zu Null und es entsteht ein scheinbar statisches Verformungsbild. Weiterhin lassen sich die Glasschwingungen durch Frequenzverschiebung des Laserlichts mittels des Doppler-Effektes bestimmen oder am Computer simulieren. Beide Verfahren werden in diesem Artikel vorgestellt und miteinander verglichen. Die Untersuchungen erfolgten an drei Gläsern, die in Abbildung 1 zu sehen sind. Die Größe der Gläser betrug in der Höhe ca. 220 mm und in dem Durchmesser zwischen 60 mm und 100 mm. Da sich die nachfolgenden Erkenntnisse für alle drei Probekörper ähneln, wird im Weiteren exemplarisch nur das Glas 2 betrachtet.

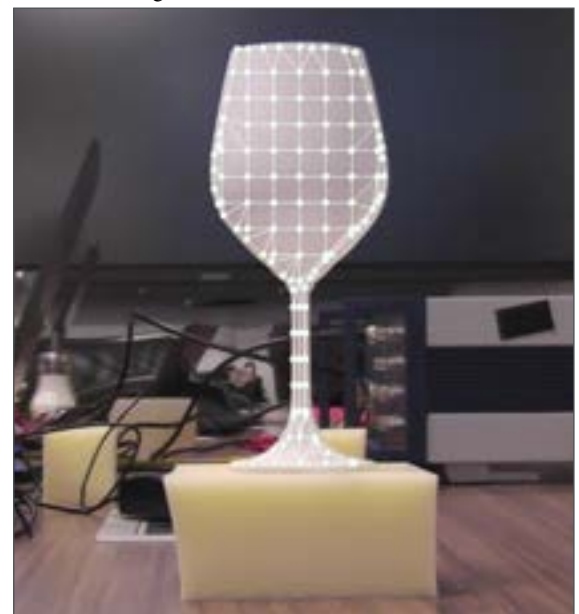


Abb. 1: Die drei Gläser als Probekörper
von links: Glas 1, Glas 2 und Glas 3

Experimentelle Untersuchung

Weingläser sind aus strukturdynamischer Sicht dünnwandige, schwach gedämpfte Systeme und reagieren damit ausgesprochen sensitiv auf äußere Einflüsse, wie beispielsweise den Füllstand oder den Punkt, an dem das Glas gehalten wird. So ist es nicht verwunderlich, dass das Glas anders klingt, wenn man es am Stiel oder am Glasrand hält und dadurch jeweils unterschiedliche Schwingungsformen mit ihren unterschiedlichen Frequenzen mit den Fingern dämpft, womit sich die spektrale Zusammensetzung des abgestrahlten Schalls verändert. Um sich dem Phänomen der schwingenden Weingläser zu nähern, sollte eine Messung der Strukturdynamik daher unbedingt berührungslos erfolgen. Berührungslos erfolgte auch die Anregung der Schwingungen, und zwar mithilfe eines Lautsprechers, welcher ein weißes Rauschen bis zu einer Frequenz von 6 kHz abstrahlte. In die-

Abb. 2: Scangitter auf Glas 2 für Laser-Doppler-Vibrometer-Messung



sem Rauschsignal sind – bei entsprechender Güte des Lautsprechers – über den gesamten Frequenzbereich alle Spektralanteile mit konstanter Leistung vertreten. Es ist zu erwarten, dass das Weinglas von dem Rauschsignal infolge der Resonanzen insbesondere zu den Schwingungen stark angeregt wird, die den Klang des Glases bestimmen. Um den Einfluss der Lagerung zu minimieren und im Hinblick auf die Vergleichbarkeit zu einer anschließenden numerischen Untersuchung, wurden die Gläser auf Schaumstoff gestellt.

Die Strukturschwingungen des Weinglases erfasst das am Lehrstuhl vorhandene Laser-Doppler-Vibrometer PSV500-3D der Firma Polytec. Es misst die Geschwindigkeiten der schwingenden Strukturoberfläche über die Frequenzverschiebung des Laserlichts mittels des Doppler-Effektes [1]. Abbildung 2 verdeutlicht den Messaufbau und zeigt das abgetastete Messgitter. Aus den Geschwindigkeitsdaten an allen gemessenen Punkten wurden anschließend Summenspektren gebildet, die beispielhaft für das zweite Glas in Abbildung 3 zu sehen sind.

Es ist zu erkennen, dass sich der Einfluss des Füllstandes auf alle Resonanzen des Weinglases auswirkt – allerdings unterschiedlich: Resonanzen werden bei niedrigen Frequenzen weniger beeinflusst als bei höheren.

Die Resonanzfrequenz der ersten elastischen Schwingungsform des Glaskörpers ist für seinen typischen Klang maßgeblich verantwortlich. Betrachtet man diesen Frequenzbereich etwas genauer, wie in Abbildung 4, erkennt man zwei eng beieinander liegende Resonanzspitzen im Frequenzspektrum.

Aus der Theorie zur elastischen Verformung rota-

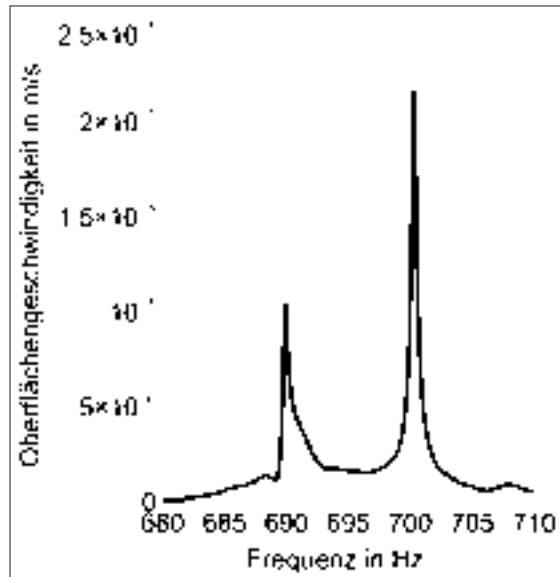
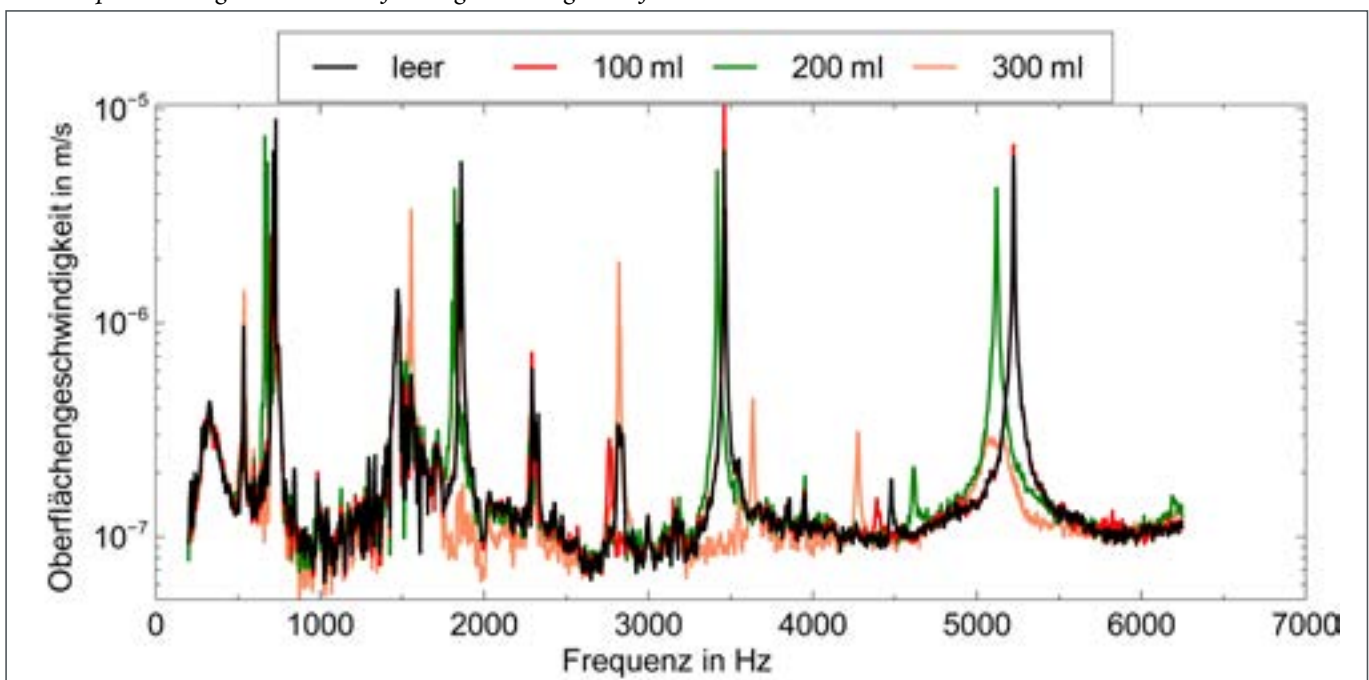


Abb. 4: Resonanztrennung infolge gegebener Asymmetrien

tionssymmetrischer Bauteile ist bekannt, dass bei perfekter Symmetrie zwei zueinander um 90 Grad rotierte Schwingungsformen dieselbe Frequenz einnehmen [2,3,4]. Diese werden auch doppelte Moden genannt. In der Realität ist diese perfekte Symmetrie praktisch ausgeschlossen, weshalb sich die Resonanzfrequenzen der paarweise auftretenden symmetrischen Moden trennen. Dabei ist die Resonanz einer Mode zu höheren Frequenzen und die der anderen zu niedrigeren Frequenzen verschoben. Wird das Glas beim Anstoßen in Schwingungen versetzt, erklingen beide Moden einer Schwingungsform in ihren jeweiligen Resonanzfrequenzen

Abb. 3: Spektren der gemittelten Oberflächengeschwindigkeiten für Glas 2



gleichzeitig, d. h. im vorliegenden Beispiel bei etwa 690 Hz und 700 Hz. Durch die eng beieinander liegenden Frequenzen kommt es zu einer Interaktion der beiden abgestrahlten Schalldruck-Sinuswellen. Sie überlagern sich und bilden eine amplitudenmodulierte Schwingung, welche auch als Schwebung bekannt ist. Die oben beschriebene Möglichkeit zur Visualisierung der Schwingungen mit einem Stroboskop bedient sich dieses Effekts. Solange der Frequenzunterschied weniger als 20 Hz beträgt, ist das menschliche Gehör in der Lage, diese Schwebung zu erkennen, welche den Klangcharakter des Weinglases mitbestimmt. Im vorliegenden Fall erwartet man folglich eine Schwebung mit einer Modulationsfrequenz von ca. $f_m = 10$ Hz.

Mit der berührungslosen Messung können folglich die Resonanzfrequenzen der Gläser ermittelt werden, die zusammen deren Klang bestimmen. Doch wie ändert sich der Klangcharakter des Weinglases, wenn Flüssigkeit hineingefüllt wird? Um sich der Antwort auf diese Frage zu nähern, kann man die relative Änderung der paarweise auftretenden Resonanzfrequenzen über den Füllstand betrachten.

Abbildung 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang für das erste elastische Verformungsmodenpaar des Glaskörpers. Als Bezugswert zur Bestimmung der relativen Abweichungen wurde der Mittelwert der beiden paarweise auftretenden Resonanzfrequenzen des leeren Glases gewählt.

Es zeigt sich, dass mit steigendem Füllstand die Resonanzfrequenzen sinken. Die zugeführte Flüssigkeit besitzt folglich einen höheren Masseffekt als einen Steifigkeitseffekt in Bezug auf das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems.

Weitere Versuche mit Honig im Glas zeigten, dass auch dieser einen ähnlich massedominierten Effekt auf die Strukturschwingung hat. Erwartungsgemäß konnte eine weitaus höhere Dämpfung beobachtet werden, was sich durch den nicht-newtonschen Flüssigkeitscharakter des Honigs erklären lässt.

Simulationen

Neben den Experimenten helfen computergestützte Simulationen der Strukturmechanik, das Schwingungsverhalten des Glases anhand eines virtuellen Modells abzuschätzen, bevor das eigentliche Objekt tatsächlich hergestellt wird. Im Bereich des Ingenieurwesens sind numerische Simulationen mittlerweile Stand der Technik. Nichtsdestotrotz sind mit der Modellbildung gewisse Unsicherheiten verbunden, etwa bedingt durch vereinfachende Modellannahmen, Randbedingungen, Lösungsverfahren und Werkstoffkennwerte. Die simulierten Ergebnisse bedürfen immer einer fachlichen Interpretation, und das gewählte Simulationsmodell sollte anhand von

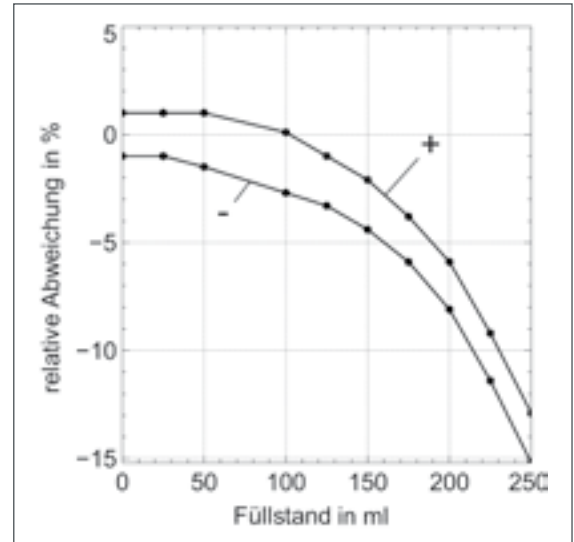


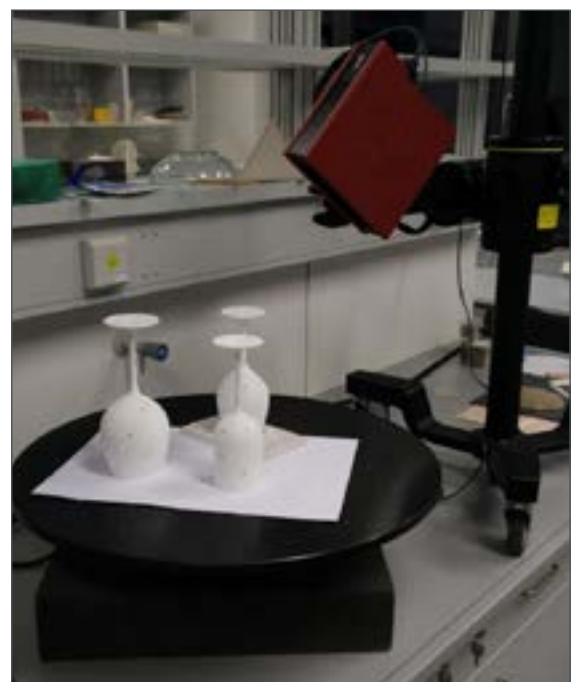
Abb. 5: Relative Abweichung der beiden ersten Resonanzfrequenzen zu deren Mittelwert im leeren Glas bei steigendem Füllstand;

- erste Resonanz, + zweite Resonanz

Experimenten validiert sein, um den Vertrauensbereich des Modells besser einschätzen zu können.

Um die Simulation der Weingläser mit möglichst hoher Genauigkeit durchführen zu können, bedarf es der Kenntnis über deren exakte Geometrie. Zu diesem Zweck gingen die Gläser per Post nach Weimar zur Materialforschungs- und -prüfanstalt der Bauhaus-Universität Weimar. Dort konnten mittels optischer Messverfahren die Gläser geometrisch gescannt werden, um präzise 3D-Volumenmodelle für computergestützte Simulationen zu erzeugen. Dazu

Abb. 6: Geometriescan; Foto: Heiko Beinersdorf, MFPA Weimar



wurden die Gläser für die optische Messung mit einem Reflexionsspray oberflächendeckend besprüht und mit Referenzpunkten zum Abgleich mit der Messung beklebt, siehe Abbildung 6.

Das Ergebnis des Scans ist ein hochaufgelöstes Oberflächen-Polygonnetz (Dreiecksnetz) des Glases mit einer geschätzten Scangenaugigkeit im Bereich von $10\text{ }\mu\text{m}$ – $30\text{ }\mu\text{m}$. Die Detailtreue des Modells ist abhängig von der Scangenaugigkeit und der aufgetragenen zusätzlichen Farbschicht. Zusätzlich konnte die Masse der Gläser mithilfe einer Präzisionswaage hochgenau ermittelt werden. Aus diesen Daten, d. h. dem Volumen aus dem 3D-Scan und der gewogenen Masse, konnte die jeweilige Dichte bis auf drei Nachkommastellen genau berechnet werden. Für das oben aufgeführte Glas 2 ergab sich eine Dichte von $\rho = 2,556\text{ g/cm}^3$.

Am Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme existiert eine langjährige Erfahrung im Bereich der Finite-Elemente-Methode (FEM), welche hier verwendet wird [5]. Hierfür stand ABAQUS als bekanntes Berechnungstool zur Verfügung, um das Schwingungsverhalten der Struktur, d. h. die Verschiebung der einzelnen Elementknoten zu simulieren. Aus einem diskreten, mathematischen Modell des Glases lassen sich über die sogenannte Modalanalyse

dessen Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen ermitteln. Diese entstammen der Lösung einer mathematischen Formulierung zur Beschreibung des physikalischen Problems auf Basis des virtuellen Modells. In der Analyse der Systemdynamik geht man davon aus, dass das Gesamtschwingungsverhalten des Systems aus einer Überlagerung aller theoretisch möglichen Schwingungsformen rekonstruierbar ist, wobei die jeweiligen Moden die Form der Glasschwingung in den Resonanzen dominieren. Dadurch ist es möglich, die Eigenfrequenzen der Simulation mit den Resonanzfrequenzen der Messung direkt zu vergleichen.

Mithilfe eines eigens entwickelten gradientenbasierten Optimierungsverfahrens wurden die Materialparameter so lange verfeinert, bis die erste Resonanzfrequenz des Glaskörpers mit der entsprechenden Eigenfrequenz aus der Simulation übereinstimmte [6,7]. Auf diese Weise ist es möglich, die Werkstoffparameter des zugrundeliegenden Materialmodells (E-Modul und Querkontraktionszahl des Hooke'schen Materials) zu ermitteln [8]. Am Ende der Optimierung konnten die entsprechenden Werte für den E-Modul zu $E = 68,29\text{ GPa}$ und die Querkontraktion zu $\nu = 0,22$ bestimmt werden, welche mit Angaben aus der Literatur übereinstimmen [9].



Make better spaces

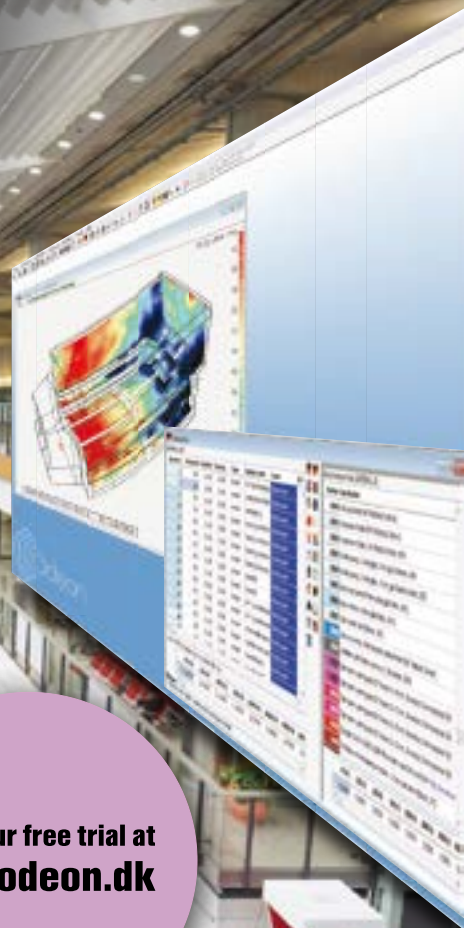
with the complete software solution for room acoustics

Elegant and user friendly interface

Fast and reliable simulations and measurements

Available as: **B** Basics, **I** Industrial, **A** Auditorium & **C** Combined

Start your free trial at
www.odeon.dk



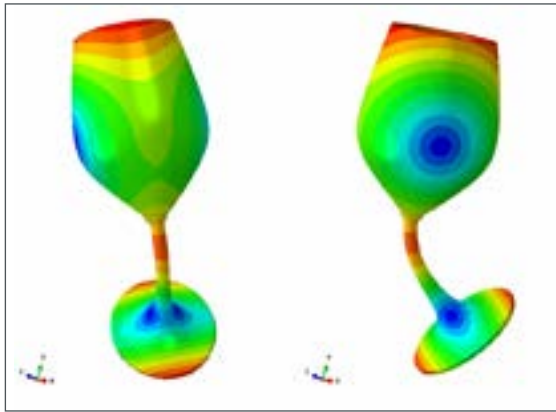


Abb. 7: Erste elastische Verformung, Gesamtglas
rot: starke Verformung; blau: geringe/keine Verformung

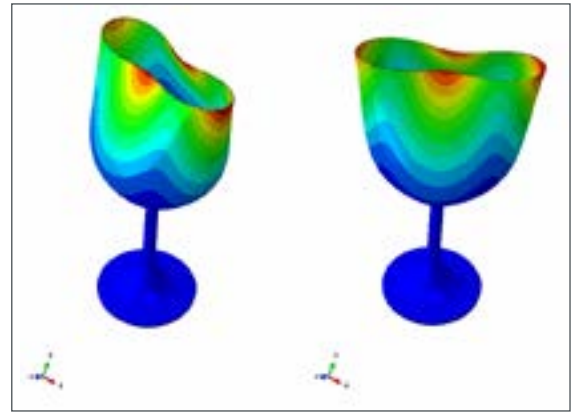


Abb. 8: Erste elastische Verformung, Glaskörper

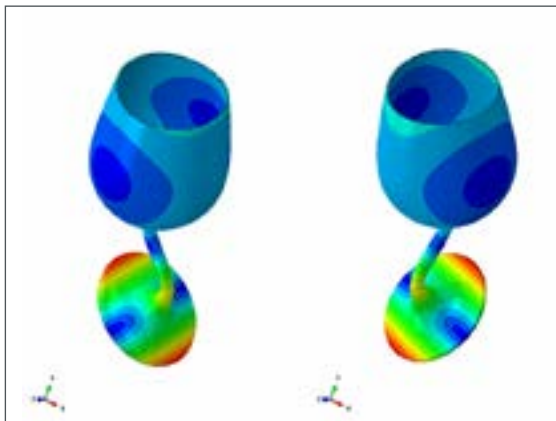


Abb. 9: Zweite elastische Verformung, Gesamtglas

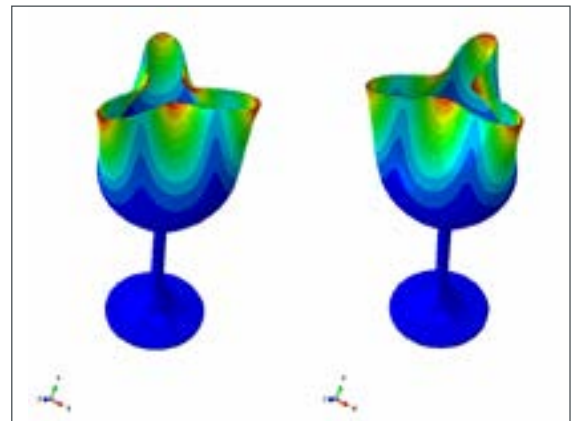


Abb. 10: Zweite elastische Verformung, Glaskörper

Die resultierende Abweichung zur ersten und zweiten Resonanz beträgt $\Delta f_1 = 0,008 \%$ bzw. $\Delta f_2 = 0,565 \%$, wobei die jeweiligen Resonanzfrequenzen aus den Messungen zugrunde gelegt werden. Für die höheren Resonanzen liegt die Modellgüte in einem Genauigkeitsbereich von $\pm 5 \%$. Mit dem angepassten Modell kann das Schwingungssystem weiter untersucht werden. Im ersten Schritt empfiehlt es sich, seine Eigenschwingungsformen zu betrachten, um ein Gefühl für die Strukturmechanik des Weinglases zu erlangen.

Die Abbildungen 7 bis 10 stellen die möglichen elastischen Verformungen des virtuellen Weinglases dar, die mit der zugehörigen Eigenfrequenz in Resonanz schwingen. Bei den dargestellten Schwingungsformen handelt es sich um stark überzeichnete Relativbewegungen der Struktur. Die Farbe Rot steht für eine starke Verformung, wohingegen blaue Bereiche Schwingungsknoten, also Bereiche ohne Bewegung, kennzeichnen.

Zu erkennen sind Muster, bei denen sich entweder der Fuß und der obere Glaskörper gegeneinander verschieben oder bei denen sich lediglich der obere Glasrand verformt. Je höher die Eigenfrequenz, desto komplexer sind die zu beobachtenden Schwingungsformen, wobei in erster Linie die erste elastische Verformung des oberen Glaskörpers (Abbildung 8) für

den dominanten Klang des Glases beim Anstoßen verantwortlich ist, da diese Schwingungsform sehr schwach von der Struktur gedämpft wird.

Im Weiteren wird auf die Asymmetrie des Weinglases eingegangen, welche für die Aufspaltung der doppelten Moden verantwortlich ist. Aus dem Experiment hat sich ein Frequenzunterschied des Modenpaares der ersten elastischen Verformung des Glaskörpers von $f_m = 10 \text{ Hz}$ ergeben. Aus mechanischer Sicht ist diese Differenz bereits signifikant und spricht für eine Asymmetrie in der Form des Glases, die man auf den ersten Blick nicht annehmen würde. Hier lohnt sich der Blick auf den sogenannten Trägheitstensor des Glases, der beschreibt, wie träge der Körper gegen Verdrehungen um die x -, y - und z -Achse reagiert [8].

Für einen ideal rotationssymmetrischen Körper (um die z -Achse) ist zu erwarten, dass er gegen Verdrehungen um die x - und um die y -Achse gleichermaßen träge reagiert. Aus dem Simulationsprogramm ABAQUS lässt sich der Trägheitstensor der folgenden Form extrahieren:

$$J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix},$$

wobei die Einträge die folgenden Trägheitsterme $J_x = 6,555 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$, $J_y = 6,541 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ und $J_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ haben.

Der Vergleich zwischen den Werten J_x und J_y offenbart eine Asymmetrie des Glases in Folge einer Fertigungsungenauigkeit, welche in Abbildung 11 vergrößert dargestellt ist. Die verbleibenden Ungenauigkeiten zwischen den Eigenfrequenzen des Simulationsmodells und den gemessenen Resonanzfrequenzen sind beispielsweise in der Annahme linearelastischen Materialverhaltens begründet. Weiterhin geht die Simulation von einer homogenen Materialverteilung innerhalb des Gesamtvolumens aus. Um diese Unsicherheiten weiter zu ergründen, ließe sich der gesamte Produktionsprozess von der Schmelze über das Bilden eines Vorformlings, die Formgebung im Werkzeug und das anschließende Abkühlen bis zur thermischen Nachbehandlung zum inneren Spannungsabbau nachbilden.

Der dargestellte Versuch zeigt die Stärken, aber auch die Herausforderungen bei der Modellbildung und computergestützten Simulation. Für Ingenieurinnen und Ingenieure sind beide in den unterschiedlichsten Bereichen wesentliche Hilfsmittel, die aber die Reflexion und die Überprüfung der Ergebnisse durch die Fachfrau/den Fachmann nicht überflüssig machen.

Die Weinglas-App

Mit der Weinglas-App des Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme schließt sich ein Kreis: Mit ihrer Idee, für ihr Projekt im Physikunterricht in der Schule die Akustik von Weingläsern zu erforschen, gewann Lisa Kastenhuber einen Einblick in die Arbeitswelt von Akustik-Ingenieurinnen und -Ingenieuren an der TU München. Sie half bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen und ermittelte die akustischen Eigenschaften der Gläser. Am Lehrstuhl konnten die Messergebnisse mit FEM-Computersimulationen auf Basis der präzisen 3D-Daten ausgewertet werden. Die App bringt diese Erfahrungen nun wieder zurück in den Unterricht und macht die Simulationstools der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für Schülerinnen und Schüler zugänglich. Im Webbrowser auf dem PC, Tablet oder Smartphone kann die Anwendung in der App-Bibliothek des Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme genutzt werden.

Mit den Fingern auf dem Touchpad können die Schülerinnen und Schüler das virtuelle Glas drehen und wenden und mit Schiebereglern dessen Form und Füllstand variieren. Mit einem Klick werden die Eigenfrequenzen und -schwingungsformen der Struktur und des Fluids darin (online) simuliert und die Amplituden farbig dargestellt oder als Video animiert. Die Glasschwingung, die sonst bisher nur hörbar schien, wird auf diese Weise sichtbar gemacht.

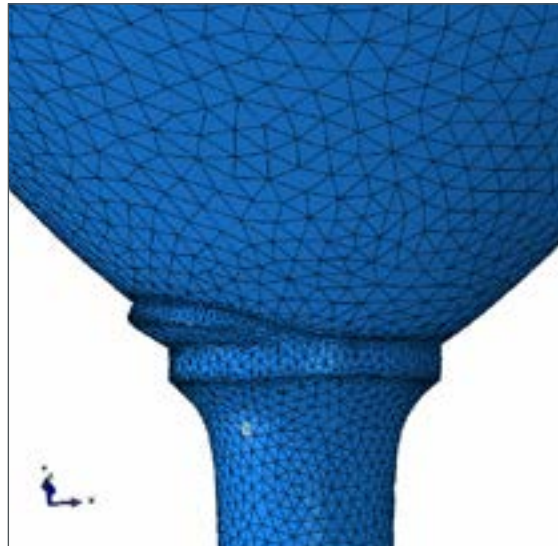


Abb. 11: Asymmetrie bei einem Weinglas (stark hervorgehoben)

Das eröffnet neue Möglichkeiten für Schülerinnen und Schüler, physikalische Effekte zu untersuchen und nachzuvollziehen, die bisher im klassischen Physikunterricht oder in der Lehre der Akustik aufgrund aufwändiger oder teurer Messaufbauten so nicht untersucht werden konnten. Vom Einsatz digitaler Medien erhoffen sich die Autoren zudem, den Schülerinnen und Schülern die Angst vor der vermeintlich zu abstrakten Physik zu nehmen und Begeisterung für das Fachgebiet Akustik und Schwingungen zu erzeugen.

Da die Berechnungen im Hintergrund auf einem Server laufen, lässt sich die App auch ideal von unterwegs steuern. Die Simulationssoftware COMSOL Multiphysics stellt diese Technik bereit.

Abbildung 12 (siehe folgende Seite) zeigt eine entsprechende Simulation, bei der das Weinglas zum großen Teil gefüllt ist und, zum Zweck der Visualisierung der Druckverteilung innerhalb der Flüssigkeit, geteilt ist.

Zugang zur App-Bibliothek

www.apps.vib.mw.tum.de

Nach Bestätigung der akademischen Nutzung ist der Login mit einem Gastaccount nötig.

Kontakt unter apps@vib.mw.tum.de

Danksagung

Wir danken Herrn Heiko Beinersdorf von der Materialforschungs- und -prüfanstalt der Bauhaus-Universität Weimar für die sehr genaue Vermessung der Gläser.

Literatur

- [1] Ewins, D. J.: Modal testing: theory, practice, and application. Research Studies Press. 2000.

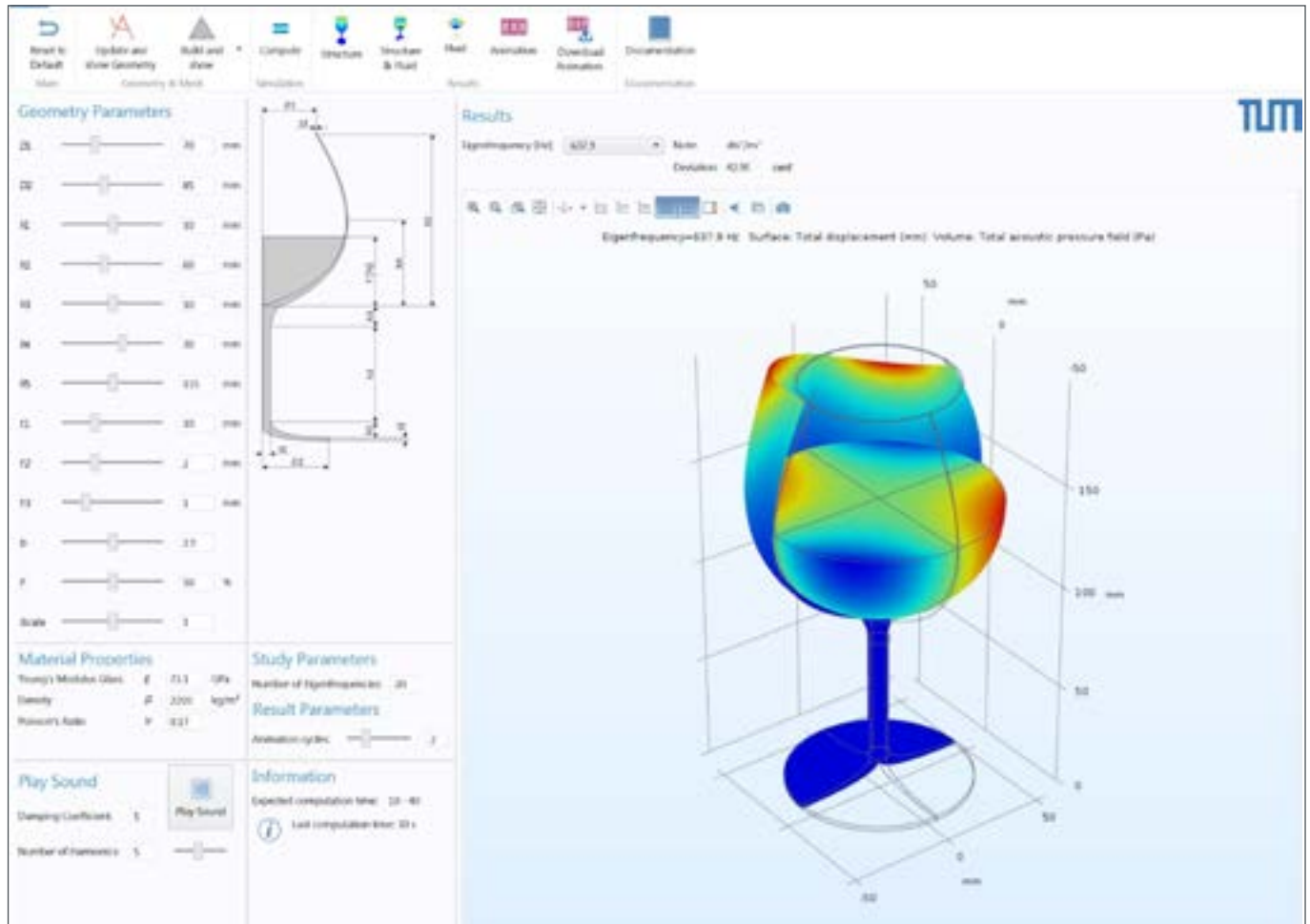


Abb. 12: Weinglas-App

**Dipl.-Ing.
Marcus Mäder**
TU München,
Lehrstuhl für Akustik
mobiler Systeme

**Lennart Moheit,
M. Sc.**
TU München,
Lehrstuhl für Akustik
mobiler Systeme

Lisa Kastenhuber
Schülerin des Ignaz-
Günther-Gymnasi-
ums, Rosenheim

**Prof. Dr.-Ing.
Steffen Marburg**
TU München,
Lehrstuhl für Akustik
mobiler Systeme

- [2] Dietzsch, F.; Hervella-Nieto, L.; Marburg, S.; Rodriguez, R. & Weisbecker, H.: Physical and spurious modes in mixed finite element formulation for the Galbrun equation. Acta Acustica united with Acustica, 3(100), 2014.
- [3] Fleischer, H.: Spinning Modes. Univ. der Bundeswehr München. 1994.
- [4] Fleischer, H.: Schwingung und Schall von Glocken. Fortschritte der Akustik – DAGA 2000, 26. Jahrestagung für Akustik, Oldenburg, S. 38–47.
- [5] Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L.: The finite element method for solid and structural mechanics. Elsevier. 2005.
- [6] Marburg, S.: Developments in structural-acoustic optimization for passive noise control. Archives of computational methods in engineering, 4(9), S. 291–370, 2002.
- [7] Marburg, S.; Sheperd, M. & Hambric, S. A.: Structural–Acoustic Optimization. In S. A. Hambric, S. H. Sung & D. J. Nefske: Engineering Vibroacoustic Analysis: Methods and Applications, 1, S. 528. John Wiley & Sons, Ltd. 2016.
- [8] Dankert, J. & Dankert, H.: Technische Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kine-

tik. Springer. 2013.

- [9] Roos, E. & Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure, Grundlagen Anwendung, Prüfungen, Zweite neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg. 2005 ■