

COMSOL NEWS

SONDERAUSGABE **AKUSTIK**



Computergestützte Akustik sorgt für ein frühes Verständnis und ermöglicht Vorhersagen im Designprozess.

Wenn wir über Akustik sprechen, könnte einem als erstes das Bild eines lauten Subwoofers oder einer Konzerthalle mit ihren Schallwänden in den Sinn kommen. Es gibt jedoch sehr viel mehr Anwendungen in der Akustik, mit denen wir täglich in Kontakt kommen. Die Akustik ist eine multidisziplinäre Wissenschaft, die den Ingenieuren alles abverlangt und starke mathematische Modellierungstools benötigt. So können Produkte geschaffen werden, die die komplexen Kundenanforderungen zu deren Zufriedenheit erfüllen.

Diese Sonderausgabe der *COMSOL News* befasst sich mit den großartigen Designern, Ingenieuren und Forschern im Bereich der Akustik. Wie Sie beim Lesen ihrer Geschichten feststellen werden, eint sie alle ein gemeinsamer Nenner: Die Leidenschaft für hochgenaue multiphysikalische Modellierung, Flexibilität und die Möglichkeiten, ihre Arbeiten mit den Kollegen und Kunden über Simulations-Apps teilen zu können.

Von virtueller Produktentwicklung über NVH-Verhalten bis zu akustischen Tarnkappen und Rückkopplungsreduzierung: Lassen Sie sich von den zahlreichen Möglichkeiten der computergestützten Akustik inspirieren, um Lösungen für praktische Probleme und neue Wege des Designs innovativer Produkte zu entdecken.

Viel Spaß beim Lesen!



Valerio Marra
Marketing Director
COMSOL, Inc.

INTERAGIEREN SIE MIT DER COMSOL COMMUNITY



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL_Inc



plus.google.com/+comsol

BLOG comsol.de/blogs

Forum comsol.de/community/forums

Wir freuen uns auf Ihre Kommentare zu den *COMSOL News*. Kontaktieren Sie uns unter info@comsol.de

COMSOL NEWS 2017

Sonderausgabe
Akustik

© 2017 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server und LiveLink sind eingetragene Marken oder Marken von COMSOL AB. Alle anderen Marken sind Eigentum der jeweiligen Eigentümer. COMSOL AB und seine Tochtergesellschaften und Produkte sind mit diesen Markeneigentümern weder verbunden noch werden sie von diesen unterstützt oder gesponsert. Eine Liste dieser Markeneigentümer können Sie unter www.comsol.de/trademarks einsehen.

Das IN-Logo ist ein eingetragenes Markenzeichen oder Markenzeichen der LinkedIn Corporation und deren Tochtergesellschaften in den Vereinigten Staaten und/oder anderen Ländern. Das 'f'-Logo ist ein eingetragenes Markenzeichen von Facebook Inc. Das Vogel-Logo ist ein eingetragenes Markenzeichen von Twitter Inc. Das G+-Logo ist Markenzeichen von Google Inc.

INHALT



AKUSTIK-SIMULATION

4 | Gute Gründe für Akustik-Modellierung und Simulations-Apps.

VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG

6 | Virtuelle Abstimmung eines Audiosystems im Fahrzeug

HOCHPRÄZISIONSMIKROFONE

9 | Präzisionsleistung: Das Streben nach der perfekten Messung

VERBRENNUNGSINSTABILITÄT

12 | Multiphysikalische Software modelliert die Akustik in Raketensystemen unter Berücksichtigung gemittelter Strömung

NVH (NOISE, VIBRATION, HARSHNESS) LEISTUNG

15 | Hinter dem Röhren und Grollen der Mahindra Motorräder

TRANSFORMATORBRUMMEN

18 | Von der Tabellenkalkulation bis zur multiphysikalischen Anwendung: ABB setzt Impulse in der Transformatorindustrie



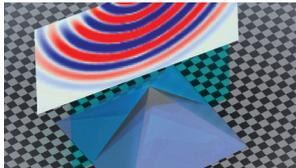
AUF DER TITELSEITE

Abenteuer-Tourer von Mahindra Mojo. Bild-Quellenangabe: Mahindra Two Wheelers Ltd.

HIGHLIGHTS

WECHSELWIRKENDE MEHRKÖRPERAKUSTIK

22 | Modellierung von Vibration und Schall in einem Getriebe



AKUSTISCHE TARNUNG

25 | Schall beeinflussen und kontrollieren: Wie die mathematische Modellierung modernste Metamaterialforschung in der Akustik fördert

INFRASCHALL-INDUZIERTER SCHWINGUNGEN

28 | Schütteln, Klappern und Walzen

RÜCKKOPPLUNGSREDUZIERUNG

30 | Innovativ in der Forschung für Hörgeräte

NICHTINVASIVE AKUSTIKTECHNOLOGIE

33 | Multiphysikalische Analyse verbessert die Leckerkennung

HOCHPRÄZISIONSWANDLER

36 | Musik für Ihre Ohren: Neue Wandler für elektrostatische Kopfhörer

MULTIPHYSIKALISCHE MODELLIERUNG

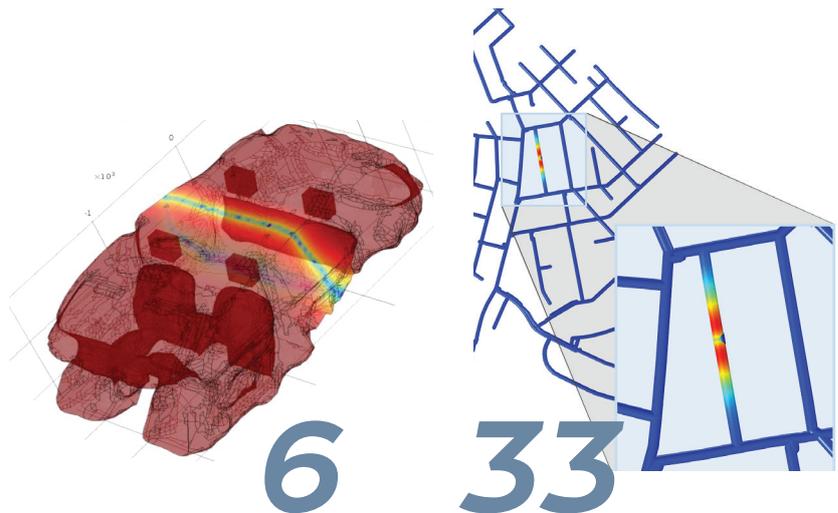
39 | Die Welt durch die Augen der Multiphysik simulieren

GASTBEITRAG

40 | Wie die computergestützte Akustik von der Multiphysik profitiert

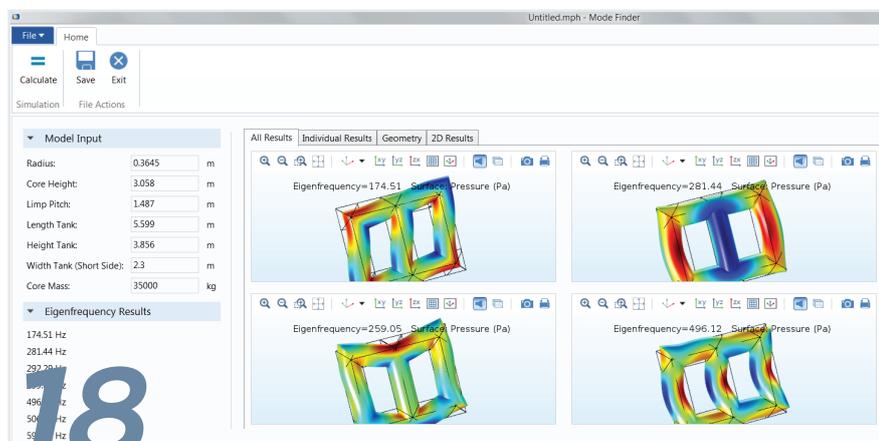


36



6

33

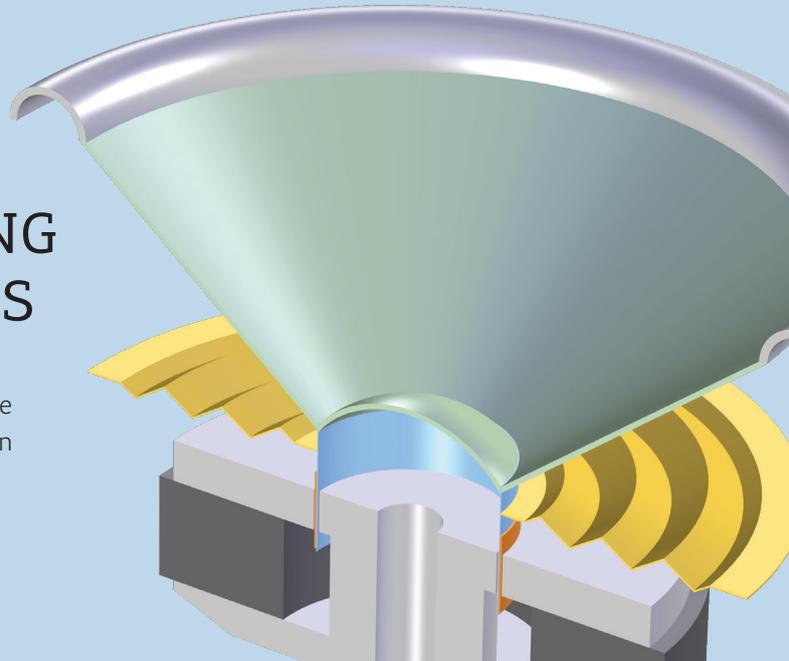


18

GUTE GRÜNDE FÜR AKUSTIK-MODELLIERUNG UND SIMULATIONS-APPS

Akustische Phänomene sind von Natur aus multiphysikalisch. Beim Erstellen eines Modells müssen Ingenieure verschiedene physikalische Prozesse und deren Kopplung auf verschiedenen Skalen und Frequenzen beachten.

VON **MADS J. HERRING JENSEN**



Mit zunehmend komplexeren Systemen und kürzeren Projektfristen verwenden Akustik-Ingenieure numerische Simulationssoftware, um ihre Arbeit zu erledigen. Durch die Verwendung computergestützter Werkzeuge können Designaufgaben beschleunigt und der Bedarf nach kostenintensiven und zeitraubenden physikalischen Prototypen reduziert werden. Die akustische Simulation erhöht außerdem das Verständnis für ein Design und stützt Entscheidungen, die auf guter Informationsversorgung basieren und damit Produkte von höherer Qualität schaffen.

Welche Fähigkeiten sind von Nöten, um aus der akustischen Simulation einen Nutzen zu ziehen? Anwendungen beinhalten oft die Reproduktion, Ausbreitung und den Empfang von Schallsignalen unter verschiedensten Bedingungen. Dies schließt nicht nur die Interaktion von Schallsignalen mit Strukturen, porösen Materialien und Strömungen ein, sondern auch die Modellierung der Wandler, die bei der Erzeugung und Erkennung von Schallsignalen involviert sind. Das alles sind von Natur aus multiphysikalische Probleme, welche die Akustiker für die effiziente Entwicklung von neuen Produkten und Technologien berücksichtigen müssen. Dies stellt eine kritische Anforderung an die Modellierungssoftware in Bezug auf die Fähigkeit dar, relevante physikalische Effekte mit dem gesamten System zu koppeln.

⇒ AKTUELLE TECHNOLOGISCHE HERAUSFORDERUNGEN IN DER AKUSTIK

Klangqualität ist ein immer wichtigeres Thema in vielen Industriezweigen. Dies betrifft die Klangreproduktion im Innenraum, zum Beispiel in Fahrzeuginnenräumen (Abbildung 1), aber auch

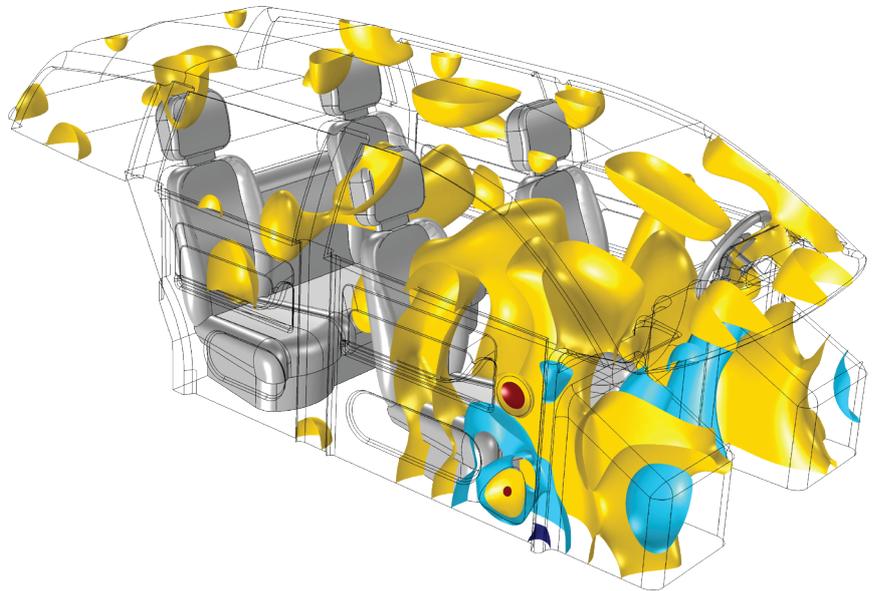


ABBILDUNG 1. Akustische Simulation im Innenraum einer Limousine mit Schallquellen an den typischen Lautsprecherpositionen. Die Ergebnisse zeigen das gesamte Schalldruckfeld innerhalb der Kabine.

den Klang von Auspuff- oder Endschalldämpferanlagen. Andere Beispiele beinhalten die Leistung und Optimierung von Kopfhörern und Lautsprechern oder die Lautsprechersysteme von mobilen Geräten. In all diesen Fällen ist ein umfassendes Verständnis von sowohl Schallausbreitung als auch Wandlerverhalten nötig, um die Systeme zu optimieren. Eine clevere, digitale Signalverarbeitung ist längst nicht mehr ausreichend, damit sich Systeme entsprechend verhalten und gut anhören. Um zum Beispiel die Leistungsfähigkeit von Hörgeräten mittels adaptiver Rückkopplungsauslöschung zu verbessern, ist die Kopplung eines Vibroakustik-Miniaturlautsprechermodells mit einem akustischen und festkörpermechanischen Finite-Elemente (FE) Modell nötig, um akkurate Simulationsergebnisse zu

erzeugen.

In der Lautsprecherbranche wurde für Standarddesigns eine Grenze erreicht, bei der Verbesserungen über die simple „Trial and Error“ Methode nicht mehr möglich sind (Abbildung 2). Die Optimierung erfordert eine detaillierte numerische Analyse. Lautsprechersysteme im Miniaturformat werden heutzutage mit derart hohen Schalldruckpegeln betrieben, dass Verzerrung und Dämpfung aufgrund von Nichtlinearitäten auftreten. Die gleichen Nichtlinearitäten spielen eine wesentliche Rolle bei Auskleidungen in Luft- und Raumfahrtanwendungen.

Ein anderes Beispiel für multiphysikalische Kopplungen — Elektrostatik, strukturelle Membrane und thermoviskose Akustik — betrifft die Entwicklung von Kondensatormikrofonen. Die

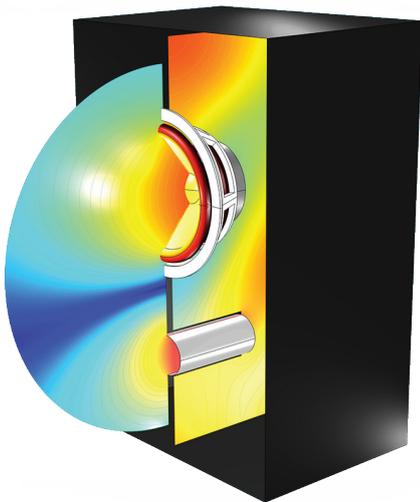


Abbildung 2. Die Simulationsergebnisse zeigen die Schalldruckverteilung in einem Lautsprechergehäuse.

physikalischen Effekte sind eng gekoppelt und für eine korrekte Bestimmung der Mikrofon-Empfindlichkeit entscheidend.

⇒ COMSOL MULTIPHYSICS UND DAS ACOUSTICS MODULE

Das Acoustics Module — ein Add-on Produkt zu der COMSOL Multiphysics® Software — ist die ideale Lösung zur Modellierung über alle Größenordnungen an Frequenzen in der Akustik. Von Infraschall bis Ultraschall sowie der mehrskaligen Natur der Akustik wie z.B.

bei thermoviskosen Verlustmechanismen oder der Aeroakustik. Die akustischen Simulationsfähigkeiten der Software beinhalten integrierte und einfach zu verwendende multiphysikalische Kopplungen zwischen unterschiedlichsten physikalischen Prozessen. Alle sind dabei nahtlos in der gleichen Modellierungsumgebung aufgesetzt, wobei durch das Acoustics Module den verfügbaren Gleichungen spezialisierte Formulierungen der Akustik hinzugefügt werden.

⇒ AKUSTISCHE SIMULATIONS-APPS

Um den akustischen Herausforderungen zu begegnen, können Anwender ohne vorherige Simulationserfahrung Apps verwenden, die mit vordefinierten Ein- und Ausgaben speziell auf ihre Bedürfnisse zugeschnitten sind. Dies ist möglich, indem Apps verwendet werden, die mittels des Application Builders in der COMSOL Multiphysics Software erzeugt wurden. Simulations-Apps sind multiphysikalische Modelle, die in ein individuelles Nutzerinterface integriert wurden. Mit diesem Tool können Spezialisten eine komplexe Simulation „verpacken“ und es den Nutzern ermöglichen, Designparameter zu ändern und Resultate autonom — unter Bezugnahme auf Industriestandards und Kundenanforderungen — zu analysieren.

Dank einer lokalen Installation des COMSOL Server™ können Apps auf einfache Art und Weise durch das gesamte

Unternehmen hinweg verwendet und weltweit den Kollegen und Kunden zur Verfügung gestellt werden. Nutzer können sich mittels des COMSOL Clients oder einem der gängigen Webbrowser verbinden. Für Simulationsexperten war es nie einfacher, akustische Geräte mit einer derart hohen Genauigkeit zu modellieren und die Kollegen an den Vorteilen der Arbeit teilhaben zu lassen. ❖

VERFÜGBARE PHYSIK-SCHNITTSTELLEN IM ACOUSTICS MODULE

Druckakustik: Das Schallfeld wird durch akustische Variationen um den statischen Umgebungsdruck dargestellt. Poröse und Fasermaterialien, enge Strukturen und Massenabsorptionsverhalten werden modelliert. Perfectly Matched Layers (PMLs) sind verfügbar, um unbegrenzte Modellbereiche einzugrenzen.

Akustik-Struktur-Wechselwirkung: Modelliert Phänomene, bei denen der Schalldruck im Fluid eine Last auf den Festkörper ausübt und dadurch entlang der Fluid-Festkörper-Grenze eine Beschleunigung verursacht. Beinhaltet piezoelektrisches Material, elastische und poroelastische Wellen und Rohrakustik.

Aeroakustik: Löst die einseitige Interaktion einer Hintergrund-Fluidströmung mit einem akustischen Feld.

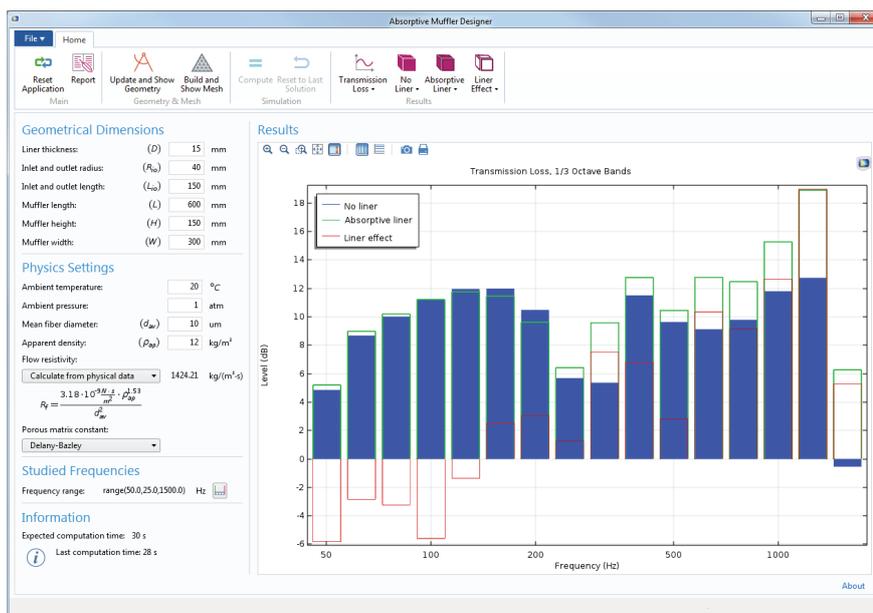
Thermoviskose Akustik: Präzise Modellierung der Akustik in Geometrien mit geringen Abmessungen, bei denen der Effekt der viskosen und thermischen Grenzschicht in der Nähe der Wand wichtig ist.

Ultraschall: Löst große, transiente lineare Akustikprobleme, die viele Wellenlängen beinhalten und sich in stationären Hintergrund-Strömungsfeldern ausbreiten.

Geometrische Akustik: Modelliert Akustik in der Hochfrequenzgrenze, bei der die Wellenlänge bedeutend kleiner ist als die charakteristischen geometrischen Längenskalen.

RESSOURCEN

- [COMSOL Blog](#)
- [COMSOL Video Gallery](#)
- [COMSOL Application Gallery](#)



ABILDUNG 3. Diese Beispiel-App basiert auf einem COMSOL Multiphysics® Modell eines absorbierenden Endschalldämpfers. Der Nutzer kann neben dem geometrischen Design des Endschalldämpfers die Umgebungstemperatur und den Druck sowie die Materialeigenschaften verändern, um das daraus resultierende akustische Verhalten zu evaluieren.

VIRTUELLE ABSTIMMUNG EINES AUDIOSYSTEMS IM FAHRZEUG

Experten bei HARMAN verwenden physikalische Experimente in Verbindung mit mathematischer Modellierung und numerischer Simulation, um den Entwicklungsprozess für modernste Infotainment Technologie von Fahrzeugen zu verbessern.

von **JENNIFER HAND**



ABBILDUNG 1. Lautsprecherpositionierung im Fahrzeuginnenraum.

Heutige Fahrzeuge bieten umwerfende elektronische Unterhaltungsmöglichkeiten, von der Smartphone-Konnektivität hin zu interaktiven Displays und Bildschirmen. HARMAN ist Marktführer dieser vernetzten Autoeinrichtungen und stattet mehr als 80% der weltweiten Luxusfahrzeuge mit Audiosystemen im Premiumsegment aus.

Jedes Fahrzeugmodell erfordert eine individuelle Konfiguration und HARMANs Team aus Akustik- und Simulationsspezialisten stellt sicher, dass verschiedene Komponenten und die Fahrzeugakustik während des Designprozesses berücksichtigt werden. Details wie die ideale Platzierung und Ausrichtung der Lautsprecher, Lautsprechereinfassung und die Gehäusegeometrie, zum Beispiel bei Autotüren, beeinflussen die Soundqualität.

Das Team nutzt physikalische Experimente in Verbindung mit numerischen Analysen, um die Produktentwicklung zu beschleunigen und indem die Systeme virtuell abgestimmt werden, bevor ein Prototyp erstellt wird. Dies spart Zeit bei physikalischen Tests und die virtuellen Tests können das direkte Zuhören ersetzen. Dadurch kann das Team die Produkte noch vor den finalen Fahrzeugdesigns fertigstellen.

„Wir werden unter Umständen sehr früh an dem Entwicklungsprozess des Fahrzeugs beteiligt, wenn ein Fahrzeugentwickler zum Beispiel noch nicht entschieden hat, welche Anforderungen an das Audiosystem gestellt werden“, erklärt Michael Strauss, Leitender Manager für virtuelle Produktentwicklung und Tools (VPD) bei HARMAN. „Oft stehen uns auch nur grundlegende Details wie Größe und Ausmaß der Fahrzeugkabine zur Verfügung. Dennoch müssen wir innerhalb

weniger Tage ein Konzept präsentieren. Dies stellt uns vor eine schwierige Herausforderung, da wir natürlich die Anforderungen unserer Kunden erfüllen und hochqualitative Systeme entwickeln müssen.“

⇒ ZUSAMMEN-SCHLUSS DER BEREICHE SIMULATION UND EXPERIMENTE FÜR DIE ZUFRIEDENHEIT DER KUNDEN

Um den Kunden eine sowohl präzise als auch schnelle Rückmeldung geben zu

„Wir benötigten die Möglichkeit für eine mechanische, akustische und elektrische Simulation in einer einzigen integrierten Umgebung und ein Programm, welches Zeit und Aufwand spart, die sonst in die Erstellung und Aktualisierung eigener Tools fließen würde.“

können, befassen sich die Ingenieure bei HARMAN mit der mathematischen Modellierung, welche mit der COMSOL Multiphysics® Software durchgeführt wurde. „Wir benötigten die Möglichkeit für eine mechanische, akustische und elektrische Simulation in einer einzigen integrierten Umgebung und ein Programm, welches Zeit und Aufwand spart, die

sonst in die Erstellung und Aktualisierung eigener Tools fließen würde,“ sagt François Malbos, Leitender Akustikingenieur bei HARMAN.

„Der multiphysikalische Ansatz ist einer der wichtigsten Bestandteile für den virtuellen Produktentwicklungsprozess“, sagt Michal Bogdanksi, Simulationsingenieur und Projektleiter bei HARMAN. „Wir können das akustische Verhalten eines Lautsprechers in Bezug auf alle Teile der Fahrzeugstruktur — z.B. Steifigkeit einer Tür — untersuchen und unserem Kunden dann eine Richtlinie für das Design der Tür zur Verfügung stellen.“

In einem Fall wurde das von den Lautsprechern produzierte Schalldrucklevel in der Kabine eines Mercedes Benz ML (Abbildung 1) gemessen und simuliert, um die numerischen Modelle zu validieren und später zur Optimierung der akustischen Ausstattung zu nutzen.

„Simulationen in der Fahrzeugkabine sind eine große Herausforderung, da dabei zahlreiche Bereiche der Physik involviert sind“, erklärt Strauss. Glücklicherweise bietet die COMSOL® Software verschiedene Optionen, um die akustischen, mecha-

nischen und elektrischen Effekte im gesamten System zu koppeln.

Um die Bemühungen der Ingenieure unternehmensweit zu unterstützen, hat das Team von Strauss eine Bibliothek validierter Modelle und bekannter Lösungen geschaffen, die eine Leistungsvorhersage verschiedenster Lautsprecherkonfigurationen ermöglichen. „Wir sind in der Lage, alles anzubieten. Von Trendanalysen auf hohem

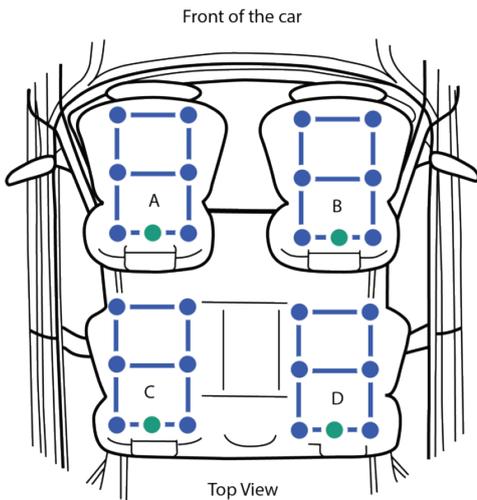


ABBILDUNG 2. Ansicht von oben auf die an vier verschiedenen Stellen positionierten Mikrofon-Arrays.



ABBILDUNG 3. HARMANs 3D Scan der Fahrzeugkabine.

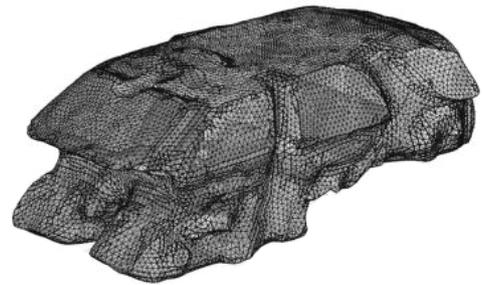


ABBILDUNG 4. Flächennetz der Fahrzeugkabine.

Niveau bis hin zu einem detailliertem Design, das die Leistung eines Teilsystems untersucht“, führt er weiter aus.

⇒ ANALYSIEREN DER LAUTSPRECHERLEISTUNG VON FAHRZEUGEN

In einer Studie haben HARMAN Ingenieure COMSOL für die Simulation eines Soundsystems im Fahrzeug verwendet, um die Lautsprecherakustik, insbesondere hinsichtlich niederfrequenter Schallwellen, zu optimieren. Anschließend haben sie eine Reihe von Tests entwickelt, um das Modell zu validieren. Einmal validiert, ermöglicht es das Modell dem HARMAN Team, die beste Lautsprecherkonfiguration für das gegebene Fahrzeugmodell auszuwählen.

In Validierungstests wurde ein Lautsprecher in einem steifen Gehäuse in der Nähe des Fahrersitzes montiert. Vier in der gesamten Kabine verteilte Mikrofon-Array Sets haben die lokalen mittleren Schalldruckpegel gemessen (siehe Abbildung 2).

Für Frequenzen unterhalb von einem kHz wurde der Lautsprecher als starrer Flachkolben mit einem vereinfachten Effektivparameter Modell (Lumped Parameter Model, LPM) unter Berücksichtigung der Spannung an den

Polklemmen der Schwingspulen, der Steifigkeit der Aufhängung und Oberfläche der Lautsprechermembrane, verknüpft. Die Geometrie wurde mittels eines manuellen 3D Scans generiert (siehe Abbildung 3). Unter Verwendung eines in der MATLAB® Software implementierten Nachbearbeitungsalgorithmus und einem Add-on Produkt für COMSOL® namens LiveLink for MATLAB®, das eine bidirektionale Verbindung zwischen den beiden Programmen schafft, hat das Team die von dem Scan erzeugte Punktwolke in ein Flächennetz der Fahrzeugkabine umgewandelt (siehe Abbildung 4) und ein optimiertes Netz für das Studium akustischer Druckwellen geschaffen.

Die Simulation hat die

Interaktion der von den Lautsprechern erzeugten Schallwellen mit verschiedenen Materialien für Windschutzscheibe, Boden, Sitzen, Kopfstützen, Lenkrad und anderen Bereichen wie z.B. Dach, Türen und Armaturenbrettern analysiert, die alle verschiedenste Absorptionseigenschaften haben.

⇒ OPTIMIERUNG DES AKUSTISCHEN MODELLS

Über die Berücksichtigung verschiedener Materialien hinaus, hat das Team die Bewegung und Beschleunigung der Lautsprechermembrane, basierend auf dem Volumen des Gehäuses und unter Verwendung von LiveLink™ für MATLAB®, definiert und spezielle MATLAB® Skripte entwickelt, um die Bearbeitungsschritte für die Vor- und Nachbereitung zu vereinfachen.

„Alles ist vollständig optimiert und automatisiert, so dass wir die Beschleunigung nicht für jeden einzelnen Fall berechnen müssen. Wenn eine Simulation abgeschlossen ist, startet die nächste“, erklärt Michal Bogdanski. „Dies stellt einen einfachen und fehlerfreien Prozess sicher. Wir lassen einfach die Skripte durchlaufen.“

Das Team hat außerdem die frequenzabhängigen Absorptionskoeffizienten optimiert, die nötig sind, um eine starke Korrelation zwischen gemessenem und simuliertem

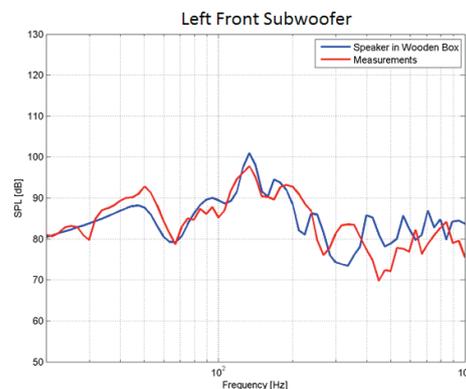
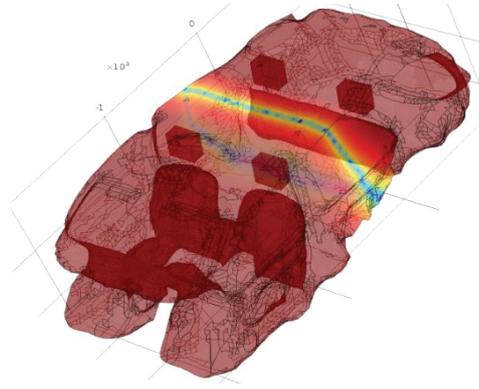


ABBILDUNG 5. Schalldruckpegel für ein Mikrofon-Array (links) und in der Kabine (rechts).



Schalldruck zu erzielen. Die Analyse gab dann die Schalldruckpegel aus, die von jedem Mikrofon-Array ausgehen (siehe Abbildung 5).

⇒ **OBJEKTIVE UND SUBJEKTIVE AUSWERTUNGEN IM FAHRERSITZ**

Mittels ihrer validierten Simulationen kann HARMAN noch in der Konstruktionsphase des Fahrzeugs bereits mit der Entwicklung des Soundsystems beginnen. Die präzise Vorhersage des Schalldruckfelds innerhalb der Fahrzeugkabine ermöglicht eine Optimierung der Audiosystemleistung. Equalizer und psychoakustische Effekte werden bei ihren Abstimmalgorithmen

„Mittels der Simulation werden HARMAN Ingenieure in der Lage sein, die Leistung eines in Betracht zu ziehenden Soundsystems zu bewerten, zu optimieren und vorherzusagen, auch wenn dieses noch gar nicht existiert.“

ebenfalls berücksichtigt und ermöglichen auch ohne einen physischen Prototypen Änderungen am Design.

Die Auralisation oder virtuelle/computergestützte Klangerzeugung ist für die Schaffung eines erstklassigen Soundsystems von hohem Interesse. Ingenieure bei HARMAN haben unter Verwendung von High-End-Kopfhörern ein Wiedergabesystem entwickelt, das Hören, Auswertung und Vergleich von Audiosystemen mit Subwoofern, Mitteltönern und Hochtönern ermöglicht. „Alles basierend auf Simulationsergebnissen und Signalverarbeitung“ sagt Malbos.

Die Ingenieure bei HARMAN schließen die Auswirkungen des menschlichen Kopfes, Torsos und der Hörkanäle auf die Akustik mit ein, indem sie binaurale Impulsantworten (BRIR) vorhersagen oder auch wie der Schall auf die Ohren trifft. Um den vollen 3D-Klang zu erfassen, werden die BRIR an verschiedenen Kopfpositionen der Azimutebene berechnet. Das Wiedergabesystem verwendet einen Tracker für die Kopfposition, um ein perfektes Klangerlebnis zu reproduzieren, so wie es z.B. auch ein Zuhörer in einer Fahrzeugkabine wahrnehmen würde.

Abbildung 6 zeigt das mit der COMSOL® Software erstellte Netz, das bei der Vorhersage des BRIR verwendet wurde. Abbildung 7 zeigt einen Vergleich zwischen vorhergesagter und simulierter BRIR.

Die Auralisation birgt ihre eigenen Herausforderungen. Die Auralisierungsqualität ist von Natur aus subjektiv zu betrachten und muss mit dem realen Hörerlebnis verglichen werden. Daher werden subjektive Messungen durchgeführt, um die Qualität des Hörerlebnisses sicher zu stellen.

Die Möglichkeit, ein Audiosystem lediglich aufgrund der Simulation zu beurteilen, hat bei HARMAN die Produktqualität und Geschwindigkeit der Produktentwicklung erheblich erhöht. Die Reaktionsfähigkeit gegenüber Kunden wurde verbessert und durch die niedrigeren Kosten für Designänderungen hat sich bei den Ingenieuren ein gewisser Geist der Gestaltungsfreiheit durchgesetzt.

„Das Schöne an der Simulation ist, dass System-Ingenieure sich am Schreibtisch Kopfhörer aufsetzen können und mit der Abstimmung eines Systems ohne das eigentliche Fahrzeug beginnen können“, sagt Strauss. „Mittels der Simulation werden HARMAN Ingenieure in der Lage sein, die Leistung eines in Betracht zu ziehenden Soundsystems zu

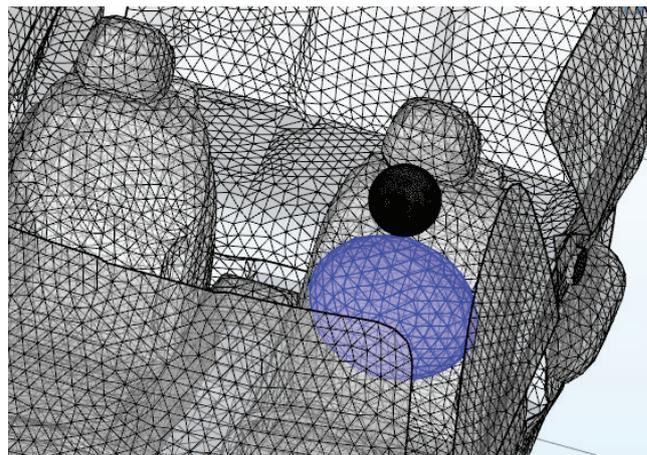


ABBILDUNG 6. Durch COMSOL® erzeugtes Netz, das für die Vorhersage von binauralen Impulsantworten verwendet wurde oder um festzustellen, wie der Schall auf das menschliche Ohr trifft.

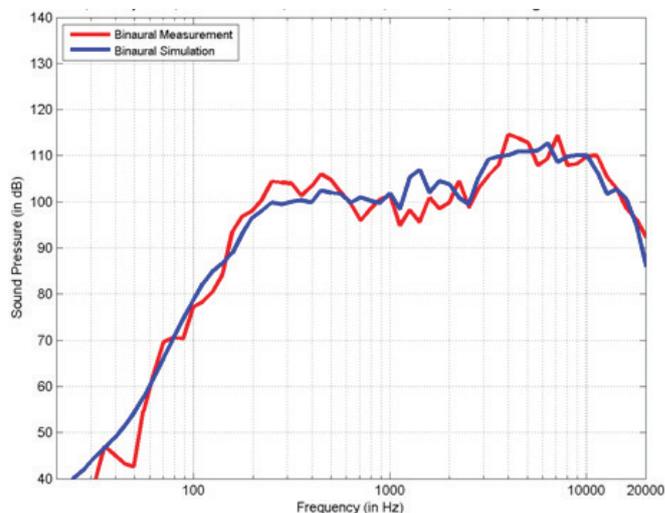


ABBILDUNG 7. Vergleich zwischen gemessener und simulierter BRIR im Frequenzbereich.



Das HARMAN VPD Team besteht aus Maruthi Srinivasarao Reddy, Michał Bogdanski, Michael Strauss, Nirranjan Ambati und François Malbos.

bewerten, zu optimieren und vorherzusagen, auch wenn dieses noch gar nicht existiert.“ ❖

Präzisionsleistung: Das Streben nach der perfekten Messung

Forscher von Brüel & Kjær nutzen Simulation, um neue Stufen der Präzision und Genauigkeit für ihre industriellen und messtechnischen Mikrofone und Wandler zu erreichen.

von **VALERIO MARRA**

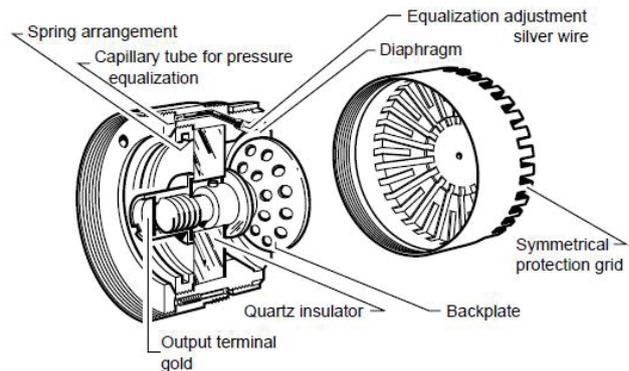


ABBILDUNG 1. Links: Foto eines 4134-Mikrofons einschließlich des über der Membran montierten Schutzgitters. Rechts: Schnittdarstellung der Hauptkomponenten einer typischen Mikrofonkapsel.

Es wird niemals eine perfekte Messung oder ein unfehlbares Instrument geben. Während wir den Messungen, die wir durchführen, vertrauen können, wird keine Messung jemals fehlerfrei sein, da unsere Instrumente nicht definieren, was sie messen. Stattdessen reagieren sie auf umgebende Phänomene und interpretieren Daten gegenüber einer unvollkommenen Darstellung eines absoluten Standards.

Daher haben alle Instrumente einen gewissen Grad akzeptabler Fehler – ein erlaubter Wert, um den Messungen sich unterscheiden dürfen, ohne dass ihr Nutzen beeinträchtigt wird. Die Herausforderung besteht darin, Instrumente mit einem Fehlerbereich zu entwerfen, der auch über längere Zeiträume bekannt und konsistent ist.

Brüel & Kjær A/S ist seit über 40 Jahren marktführend im Bereich der Schall-/Schwingungsmessung und Analyse. Zu ihren Kunden zählen unter anderem Airbus, Boeing, Ferrari, Bosch, Honeywell, Caterpillar, Ford, Toyota, Volvo, Rolls-Royce, Lockheed Martin und die NASA.

Da die Herausforderungen hinsichtlich Klang und Vibration in der Industrie sehr vielfältig sind – von Verkehrs- zu Flughafengeräuschen über Windturbinengeräusche und Produktqualitätskontrollen – muss Brüel & Kjær Mikrofone und

Beschleunigungsmesser konzipieren, die eine ganze Reihe an verschiedenen Messnormen erfüllen. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, beinhalten die Forschungs- und Entwicklungsprozesse des Unternehmens Simulationen, um die Präzision und Genauigkeit ihrer Geräte zu verifizieren sowie neue und innovative Designs zu testen.

⇒ ENTWICKLUNG UND HERSTELLUNG PRÄZISER MIKROFONE

Brüel & Kjær entwickelt und produziert Kondensatormikrofone, die alle Frequenzen von Infraschall bis Ultraschall sowie Pegel unterhalb der Hörschwelle bis zum höchsten Schalldruck in normalen atmosphärischen Bedingungen abdecken. Die Produktpalette umfasst normale Arbeits- und Labormikrofone sowie Sondermikrofone für Spezialanwendungen. Beständigkeit und Verlässlichkeit sind Schlüsselparameter für die Entwicklung aller Brüel & Kjær Mikrofone.

„Wir nutzen die Simulation, um Kondensatormikrofone zu entwickeln und sicher zu stellen, dass diese die relevanten Normen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (ICE) und der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erfüllen,“ sagt Erling

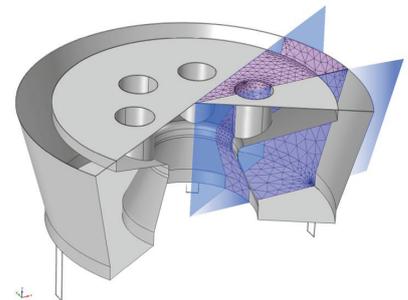


ABBILDUNG 2. Geometriedarstellung des Kondensatormikrofons vom Typ 4134. Die Abbildung zeigt das in der reduzierten Bereichsgeometrie verwendete Netz, was 1/12 der Gesamtgeometrie entspricht.

Olsen, Entwicklungsingenieur in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Brüel & Kjær. Die Simulation wird als Teil unserer Forschungs- und Entwicklungsprozesse – zusammen mit anderen Tools – verwendet. Somit können wir sicher sein, dass unsere Mikrofone verlässlich unter verschiedensten Bedingungen arbeiten. Wir kennen zum Beispiel den Einfluss des statischen Drucks, Temperatur und Feuchtigkeit sowie die Auswirkungen anderer Faktoren auf unsere Mikrofone sehr genau. Das sind alles Parameter, die ohne Simulation nur sehr schwierig zu messen wären.

Das in Abbildung 1 gezeigte Brüel & Kjær Kondensatormikrofon vom Typ

4134 ist ein altes Mikrofon, das über die Jahre schon sehr vielen theoretischen und praktischen Untersuchungen unterzogen wurde. Daher diente es als Prototyp für die Entwicklung multiphysikalischer Modelle der Brüel & Kjær Kondensatormikrofone. Um die Leistung des Mikrofons zu analysieren, beinhaltet Olsens Simulationen die Bewegung der Membran, die elektromechanischen Interaktionen der Membranverformung mit elektrischer Signalerzeugung, die Resonanzfrequenz und die viskosen und thermischen Verluste, die in den Innenhohlräumen des Mikrofons auftreten.

⇒ **MIKROFON-MODELLIERUNG**

Wenn ein Ton in ein Mikrofon eintritt, induzieren Schalldruckwellen Verformungen in der Membran, die als elektrische Signale gemessen werden. Die elektrischen Signale werden dann in Dezibel umgerechnet. „Die Modellierung eines Mikrofons beinhaltet das Lösen eines beweglichen Netzes und eng gekoppelte mechanische, elektrische und akustische Probleme. Ohne Multiphysik wäre dies nicht möglich“, sagt Olsen. „Die Modelle müssen sehr detailliert sein, da in den meisten Fällen große Aspektverhältnisse (aufgrund der Form der Mikrofonkapseln) und geringe Abmessungen thermische und viskose Verluste verursachen, die eine sehr wichtige Rolle bei der Leistungsfähigkeit der Mikrofone spielen.

Das Modell kann auch dazu verwendet werden, die Interaktionen, die zwischen der Rückwand und der Membran auftauchen, vorherzusagen. Neben anderen Faktoren beeinflusst dies die Richtcharakteristiken des Mikrofons. „Wir nutzen die Simulation, um das Biegemuster der Membran zu analysieren“, sagt Olsen. Für Simulationen der thermischen Last und Resonanzfrequenz wurde die Modellsymmetrie verwendet, um die Berechnungszeiten zu verringern (siehe Abbildung 2). Das reduzierte Modell wurde ebenso verwendet, um den Schalldruckpegel im Mikrofon für Geräusche zu analysieren, die senkrecht auf die Mikrofonmembran (siehe Abbildung 3) auftreffen. Wenn der Schall jedoch schräg in das Mikrofon eintritt, ist die Membran einer nicht symmetrischen Randbedingung ausgesetzt. Dies erfordert eine Simulation, bei der die gesamte Geometrie berücksichtigt wird, um das Biegen der Membran präzise zu erfassen

(siehe Abbildung 4).

Die Simulation wurde auch verwendet, um den Einfluss der Öffnung im Mikrofon zur Messung von niederfrequenten Tönen zu bestimmen. „Wir haben das Mikrofon entweder mit einer dem externen Schallfeld ausgesetzten Öffnung, einer außerhalb des externen Schallfeldes positionierten Öffnung oder ohne Öffnung modelliert“, sagt Olsen. „Während letztere Option in der Praxis nicht gängig ist, hat uns dies erlaubt, die Interaktion zwischen der Öffnungskonfiguration und den Ergebnissen des Eingangswiderstands für verschiedene niederfrequente Verhaltensweisen zu ermitteln. Dies ist eines der wichtigsten Dinge bei der Simulation: Wir können Änderungen an den Parametern eines Modells durchführen, die von bereits gefertigten Geräten abweichen. Dies ermöglicht es uns, andere Designs zu testen und die Grenzen eines Geräts auszuloten (siehe Abbildung 5).“

Mit der Simulation als Teil des Forschungs- und Entwicklungsprozesses sind Olsen und seine Kollegen nicht nur dazu in der Lage, einige der Kernprodukte von Brüel & Kjær zu designen und zu testen, sondern es können auch Geräte auf Basis spezifischer Kundenanforderungen kreiert werden.

„Mittels der Simulation können wir Ansätze zielgenau festlegen, um spezifische Verbesserungen basierend auf Kundenbedürfnissen durchzuführen. Auch wenn es

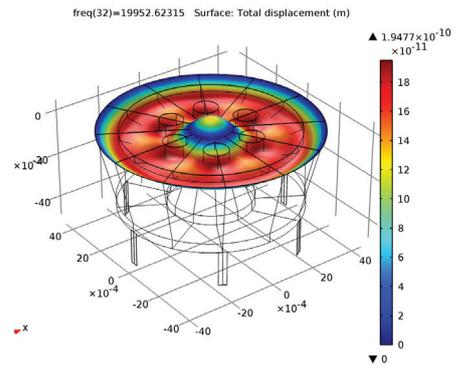


ABBILDUNG 3. Repräsentation des Schalldruckpegels unterhalb der Membran für senkrechten Einfall berechnet unter Ausnutzung von Bereichssymmetrie. Die Membranverformung wird bei $f = 20$ kHz evaluiert.

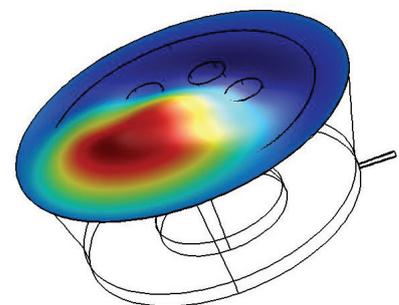


ABBILDUNG 4. Simulationsergebnisse zeigen die Membranverformung, die bei schräger Einfallsrichtung und 25 kHz berechnet wurde. Da die Verformung asymmetrisch ist, wird unter Verwendung des vollen 3D Modells gerechnet.

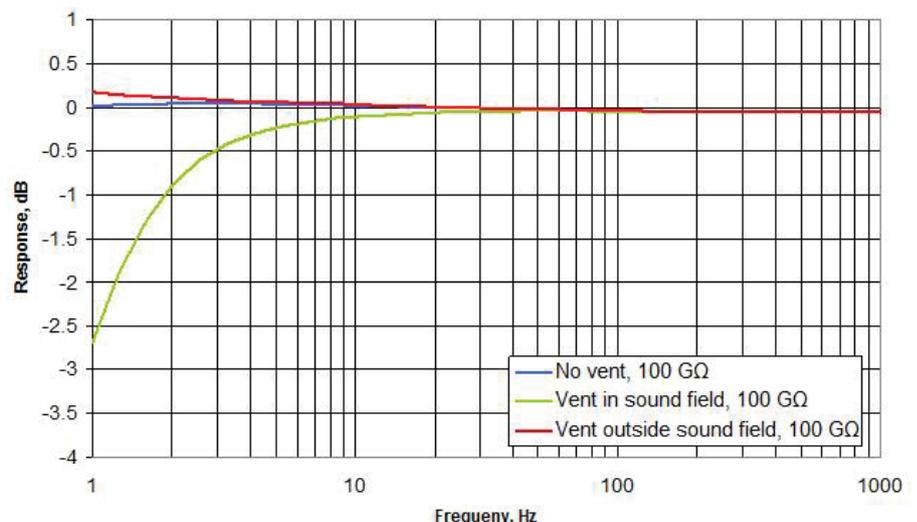


ABBILDUNG 5. Bei der Konfiguration ohne Öffnung ist eine Zunahme der Empfindlichkeit darauf zurückzuführen, dass das Schallfeld innerhalb des Mikrofons bei sehr niedrigen Frequenzen rein isotherm wird. In der Konfiguration mit Öffnung außerhalb des Schallfeldes folgt die Kurve zunächst der Verlaufskurve ohne Öffnung, aber die Empfindlichkeit nimmt weiter zu, da die Öffnung zu einer Druckentlastung auf der Rückseite der Membran führt.

sehr schwer ist, die Akustik eines Mikrofons nur durch Tests zu messen, sind wir — nach der Validierung unserer Simulationen anhand eines physischen Modells und für eine bestimmte Konfiguration — in der Lage, Simulation für die Analyse anderer Konfigurationen und Rahmenbedingungen von Fall zu Fall zu verwenden.“

⇒ MODELLIERUNG SCHWINGUNGSWANDLER

Der Entwicklungsingenieur Søren Andresen von Brüel & Kjær verwendet die Simulation für das Entwerfen und Testen von verschiedenen Schwingungswandler-Designs.

„Eine der Schwierigkeiten bei der Gestaltung von Wandlern für die Schwingungsanalyse sind die rauen Umgebungsbedingungen, die diese Geräte verkraften müssen“, sagt Andresen. „Wir wollten ein Gerät entwickeln, das extrem rauen Umgebungsbedingungen standhalten kann“.

Die meisten mechanischen Systeme neigen dazu, ihre Resonanzfrequenzen auf einen relativ geringen Bereich zu beschränken. Dieser liegt meist zwischen 10 und 1000 Hz. Einer der wichtigsten Aspekte bei der Konstruktion von Wandlern ist, dass die Geräteresonanz nicht auf der gleichen Frequenz wie die zu messenden Vibrationen liegt, da dies die gemessenen Ergebnisse beeinträchtigen würde. Abbildung 6 zeigt die mechanische Verschiebung eines aufgehängten Schwingungswandlers sowie die Darstellung der Resonanzfrequenz für das Gerät.

„Wir möchten, dass der Wandler einen flachen Verlauf und keinerlei Resonanzfrequenz für den gewünschten zu messenden Vibrationsbereich hat“, sagt Andresen. „Wir haben COMSOL verwendet, um mit verschiedenen Designs zu experimentieren und die Kombination von Materialien und Geometrie festzulegen, die für ein bestimmtes Design keine Resonanz produzieren. In diesem Bereich wird der Wandler verwendet“.

Bei der Gestaltung des Wandlers kann ein Tiefpassfilter oder

„Mittels der Simulation können wir Ansätze zielgenau festlegen, um spezifische Verbesserungen basierend auf Kundenbedürfnissen durchzuführen.“

— ERLING OLSEN, ENTWICKLUNGSINGENIEUR BEI BRÜEL & KJÆR

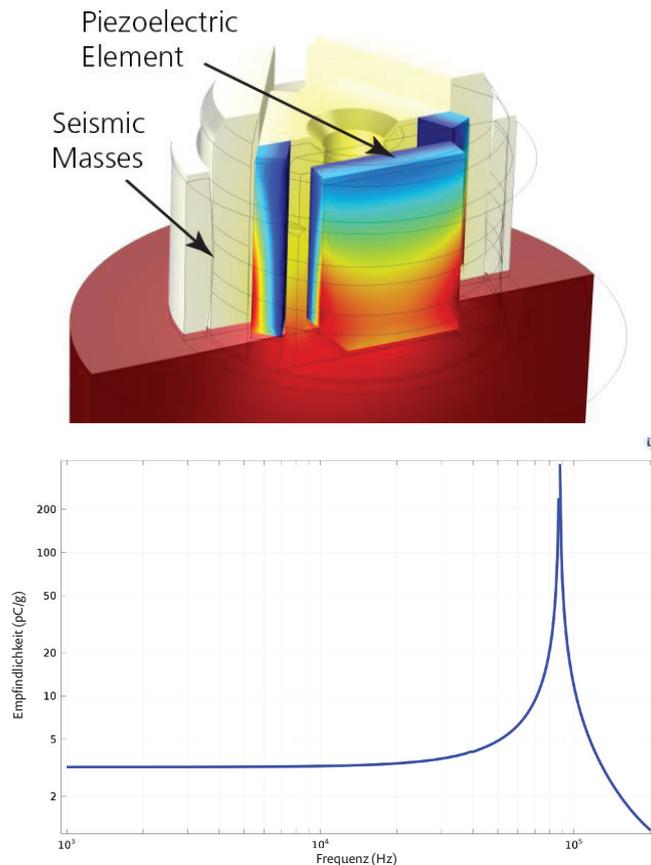


ABBILDUNG 6. Simulationsergebnisse eines aufgehängten, piezoelektrischen Schwingungswandlers. Oben: Mechanische Deformation und elektrisches Feld im piezoelektrischen Sensorelement und den seismischen Massen. Unten: Frequenzgang-Diagramm zeigt die erste Resonanz des Wandlers bei ungefähr 90 kHz. Dieses Gerät sollte nur für die Messung von Objekten verwendet werden, bei denen die Frequenzen deutlich unterhalb von 90 kHz liegen.

mechanischer Filter verwendet werden, um, falls vorhanden, unerwünschte Signale, die von der Resonanz des Wandlers erzeugt werden, wegzuschneiden. Diese Filter bestehen aus einem Medium (meistens Gummi) und liegen zwischen zwei Montagescheiben, die dann zwischen Wandler und Montagefläche fixiert werden.

„Als Faustregel setzen wir das obere Frequenzlimit auf 1/3 der Resonanzfrequenz des Wandlers, so dass die Vibrationskomponenten, die am oberen Frequenzlimit gemessen werden, um nicht mehr als 10 bis 12 % verfälscht

werden“, sagt Andresen.

⇒ SO GENAU UND PRÄZISE WIE MÖGLICH

Auch wenn es nicht möglich ist, den perfekten Wandler zu konstruieren oder unfehlbare Messungen durchzuführen, rücken die Forschungs- und Designteams so eng zusammen wie noch nie, da es ihnen ermöglicht wird, schnell und effizient neue Designlösungen für verschiedene Betriebszenarien zu testen.

„Wir benötigen spezifisches und einzigartiges Wissen, um der Konkurrenz einen Schritt voraus zu sein“, sagt Andresen. „Die Simulation stellt uns dieses Wissen zur Verfügung. Wir können Anpassungen durchführen und virtuelle Messungen vornehmen, die wir anderenfalls nicht experimentell festlegen könnten. Dadurch können wir innovative neue Designs austesten und optimieren.“ ❖

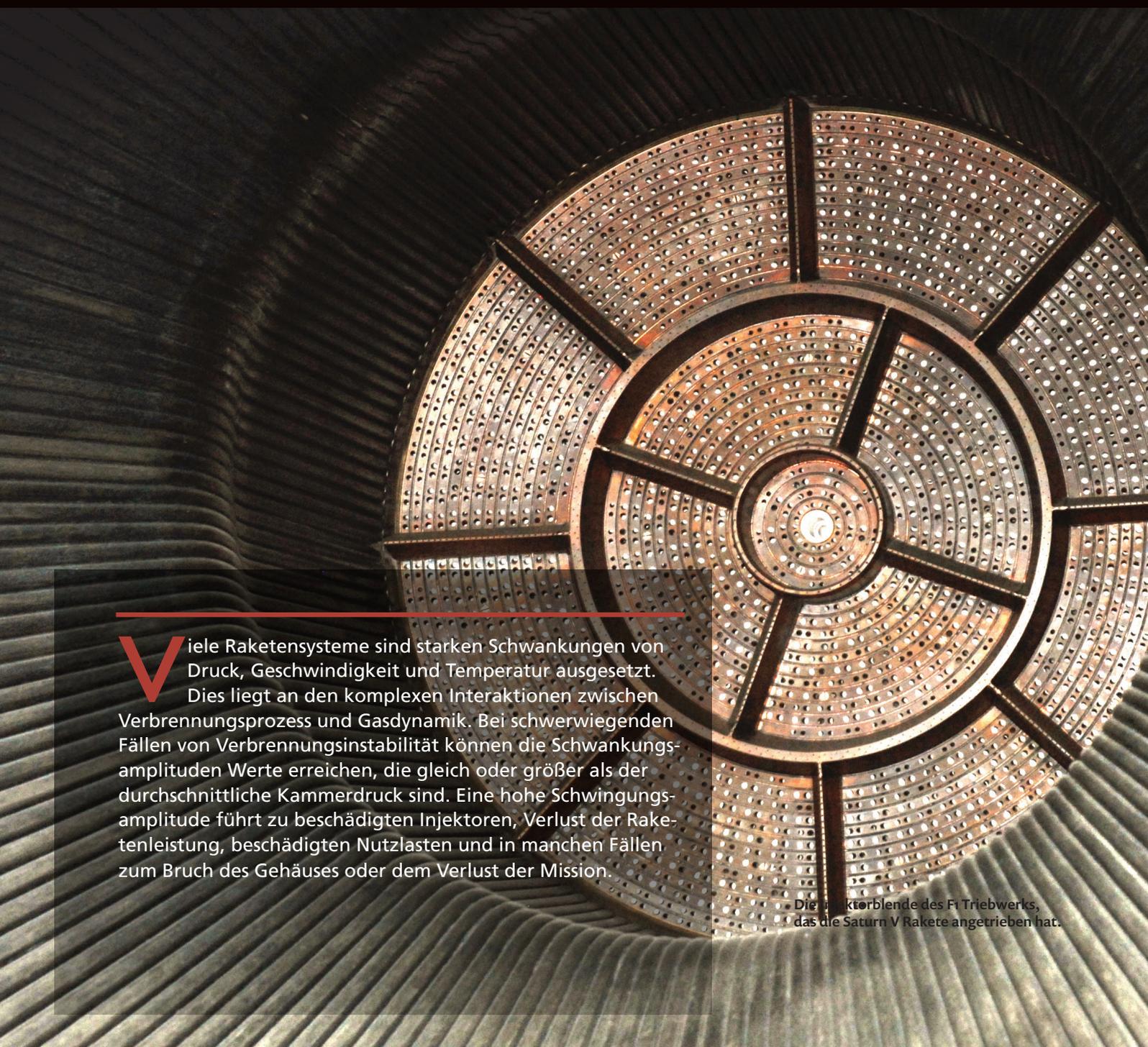
MULTIPHYSIKALISCHE SOFTWARE MODELLIERT DIE STRÖMUNGSBEEINFLUSSTE AKUSTIK IN RAKETENSYSTEMEN

Die Verbrennungsinstabilität in festen Raketentriebwerken und Flüssigkeitstriebwerken stellt Konstrukteure und Ingenieure weiterhin vor große Herausforderungen. Die Einführung eines hoch genauen Modellierungsansatzes, der durch eine multiphysikalische Analyse unterstützt wird, ermöglicht eine bessere Einsicht und Vorhersagbarkeit.

von SEAN R. FISCHBACH

Viele Raketensysteme sind starken Schwankungen von Druck, Geschwindigkeit und Temperatur ausgesetzt. Dies liegt an den komplexen Interaktionen zwischen Verbrennungsprozess und Gasdynamik. Bei schwerwiegenden Fällen von Verbrennungsinstabilität können die Schwingungsamplituden Werte erreichen, die gleich oder größer als der durchschnittliche Kammerdruck sind. Eine hohe Schwingungsamplitude führt zu beschädigten Injektoren, Verlust der Raketenleistung, beschädigten Nutzlasten und in manchen Fällen zum Bruch des Gehäuses oder dem Verlust der Mission.

Die Injektorblende des F1 Triebwerks, das die Saturn V Rakete angetrieben hat.



Historische Schwierigkeiten bei der Modellierung und Vorhersage der Verbrennungsinstabilität führten bei den meisten Raketensystemen, die einer Instabilität unterlagen, zu sehr kostenintensiven Reparaturen durch Tests (siehe Abbildung 1) oder zur Verschrotung des gesamten Systems.

„Eine komplexere Darstellung von Schwingungen der Verbrennungsinstabilität wird durch eine globale, energiebasierte Bewertung erreicht.“

In den frühen Entwicklungsjahren der Raketenantriebstechnologie wurden Wissenschaftler und Ingenieure durch die Messung von vibrierenden Testständen, die Beobachtung von schwankenden Abgaskrümmern und vor allem die hörbaren Töne, die Instabilitäten begleiteten, auf die zugrunde liegende Physik hingewiesen. Durch diese Beobachtungen legten die Forschungspioniere der Verbrennungsinstabilität ihren Fokus bei der Modellierung auf die akustischen Wellen innerhalb der Verbrennungskammern.

Der Fokus auf die Akustik ergibt Sinn, wenn man bedenkt, dass die gemessene Frequenz der Schwingungen oftmals den normalen akustischen Schwingungsmoden der Verbrennungskammer stark ähnelt. Dieser Fokus beachtet jedoch nicht das Zutun der Rotations- und thermischen Wellen, die ein direktes Resultat der Schallwelle oder mit dieser eng gekoppelt sind. Eine komplexere Darstellung von Schwingungen der Verbrennungsinstabilität wird durch eine globale, energiebasierte Bewertung erreicht.

Jüngste Fortschritte in der energiebasierten Modellierung von Verbrennungsinstabilitäten erfordern eine genaue Bestimmung von akustischen Frequenzen und Schwingungsformen. Von besonderem Interesse sind die akustischen Wechselwirkungen mit der gemittelten Strömung innerhalb des konvergenten Bereichs einer Raketendüse, bei denen Gradienten von Druck, Dichte und Geschwindigkeit sehr groß werden. Der schwankende Ausstoß von Energie durch die Raketendüse ist die vorherrschende Quelle für die Schalldämpfung der meisten Raketensysteme.

Kürzlich wurde ein Ansatz zur Dämpfung der Düsen mit den Effekten der

mittleren Strömung von French² implementiert. Dieser neue Ansatz erweitert die ursprüngliche Arbeit von Sigman und Zinn³ durch das Lösen der akustischen Geschwindigkeits-Potentialgleichung (AVPE), die durch die Störung der Euler-Gleichung formuliert ist⁴.

Das Festlegen von Eigenwerten der AVPE, bei denen ψ das komplexe akustische Potential ist, λ die komplexen Eigenwerte, c die Schallgeschwindigkeit, und M der Mach-Vektor,

$$\nabla^2 \psi - \left(\frac{\lambda}{c}\right)^2 \psi - M \cdot [M \cdot \nabla(\nabla \psi)] - 2 \left(\frac{\lambda M}{c} + M \cdot \nabla M\right) \cdot \nabla \psi - 2\lambda \psi \left[M \cdot \nabla \left(\frac{1}{c}\right)\right] = 0$$

ist um einiges komplexer als die traditionell verwendete druckbasierte Wellengleichung

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p\right) + \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

und erfordert numerische Näherungen des Strömungsfelds der Kammer und Eigenwerte.

⇒ **MODELLIERUNG DER KAMMER-GASDYNAMIK**

Die neuesten theoretischen Modelle für oszillierende Störungen in Hochgeschwindigkeitsströmungen erfordern eine präzise Festlegung der akustischen Eigenformen der Kammer. Zuerst muss

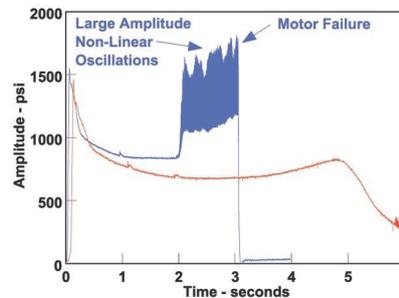


ABBILDUNG 1. Druckverlauf eines stabilen (rot) und instabilen (blau) Feststoffraketenmotors¹.

jedoch eine Simulation der gemittelten Strömungseigenschaften der Verbrennungskammer durchgeführt werden.

Die COMSOL Multiphysics® Software bietet eine numerische Plattform für einfaches und genaues Simulieren der Kammer-Gasdynamiken und internen Akustik. Dieses Finite Elemente-Softwarepaket bietet viel vordefinierte Physik zusammen mit einer verallgemeinerten mathematischen Schnittstelle.

Die aktuelle Studie verwendet das Finite-Element-Framework von COMSOL, um die stetigen Strömungsfeld-Parameter eines

generischen Flüssigkeitsmotors unter Verwendung des High Mach Number Flow, Laminar Interfaces zu modellieren, welches die vollständig komprimierbaren Navier-Stokes-Gleichungen für ein ideales Gas zusammen mit den Gleichungen für Energie- und Massenerhaltung löst.

Um die Einspritzung von heißem Gas aufgrund des brennenden Treibmittels zu berücksichtigen, wird die Injektorblende mit einem gleichmäßigen Zustrom von verbranntem Treibgas modelliert (siehe Abbildung 2). Alle anderen festen Ränder werden mit der Gleitrandbedingung modelliert und die Austrittsebene wird mit der Hybridbedingung für ausströmenden Fluss modelliert. Dies bedeutet, dass sowohl Unterschall als auch Überschallströme berücksichtigt werden.

Die Resultate der gemittelten Strömungsanalyse werden überprüft, um eine gültige und konvergierte Lösung sicherzustellen. Parameter der gemittelten Strömung wie Druck, Dichte, Beschleunigung und Schallgeschwindigkeit werden benötigt, um die AVPE zu modellieren. Die Werte der gemittelten Strömung im konvergenten Bereich der Düse, in der Nähe der schallschluckenden Ebene, sind von bedeutendem Interesse. Die Schallmauer, wo die Mach-Zahl gleich 1 ist, erzeugt eine akustische Barriere in der Strömung. Um eine genaue Geometrie für die akustische Analyse zu schaffen, wird die Schallmauer (magentafarben in Abbildung 3 dargestellt) von der Analyse der mittleren Strömung extrahiert.

⇒ **MODELLIERUNG DER KAMMERAKUSTIK**

Das Coefficient Form PDE Interface von COMSOL Multiphysics wird verwendet, um die komplexen Eigenwerte der AVPE festzulegen. Terme der gemittelten Strömung in der AVPE werden durch die Lösung der Analyse der gemittelten Strömung zur Verfügung gestellt. Gasdynamiken innerhalb der Verbrennungskammer spielen bei der Definition der Randbedingungen für die akustische Analyse eine Schlüsselrolle. Innerhalb des konvergierenden und divergierenden Abschnitts der Raketendüse werden die Gradienten des Kammerdrucks, der Geschwindigkeit und der Dichte an der Schallmauer, wo die Machzahl gleich 1 ist, theoretisch unendlich groß. Im Abwärtsstrom der Schallmauer bewegen sich akustische Störungen mit der gemittelten Strömung bei Geschwindigkeiten, die größer als die Schallgeschwindigkeit sind.

Diese Bedingung verhindert, dass sich Störungen im Abwärtsstrom der

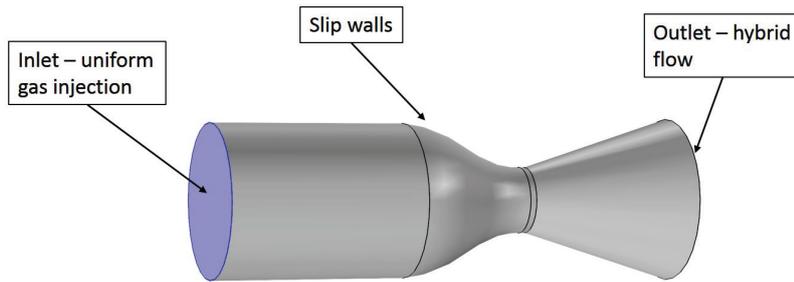


ABBILDUNG 2. Simulierte Flüssigkeitsmotor-Geometrie mit Randbedingungen.

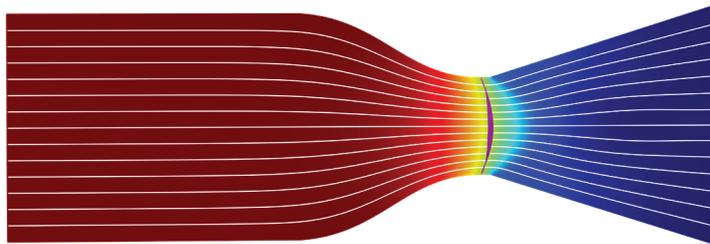


ABBILDUNG 3. Geschwindigkeits-Stromlinien über dem Kammerdruck aufgetragen. Die Mach 1-Oberfläche ist magentafarben eingezeichnet.

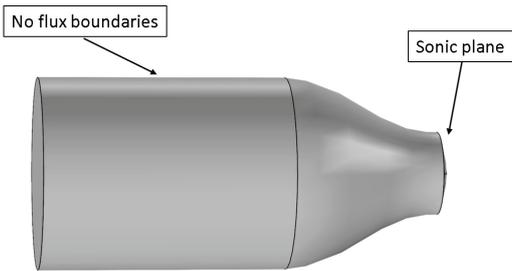


ABBILDUNG 4. Geometrie der akustischen Analyse mit Randbedingungen.

Schallebene wieder stromaufwärts ausbreiten. Der divergierende Abschnitt der Düse ist akustisch gesehen geräuschfrei und beeinträchtigt die Akustik der Kammer nicht. Die Simulationsgeometrie wird an der Schalllinie der Düse eingegrenzt, wo eine Kein-Fluss-Randbedingung genügt (siehe Abbildung 4). Die verbleibenden Ränder werden ebenfalls mit einer Kein-Fluss-Randbedingung modelliert und gehen von einer verschwindenden akustischen Absorption auf allen Oberflächen aus.

Die Eigenwert-Analyse produziert komplexe Eigenformen und Eigenwerte, von denen jeder eine akustische Mode und ihre komplex konjugierte repräsentiert. Der Realteil des komplexen Eigenwerts ist die zeitliche Dämpfung der akustischen Mode, der Imaginärteil definiert die Oszillationsfrequenz. Der komplexe Eigenvektor stellt die räumliche Amplitude und zeitliche Staffelung der akustischen Welle dar.

Ein Vergleich der durch die klassische

homogene Wellengleichung (Helmholtz-Gleichung) abgeleiteten akustischen Schwingungsformen mit den mittels AVPE abgeleiteten zeigt die Vorzüge der hochgenauen Modelle, welche die zugrunde liegenden physikalischen Effekte korrekt darstellen (siehe Abbildung 5). Die Einbeziehung der Terme der gemittelten Strömung in die AVPE modelliert

exakt die Phasenverschiebung aufgrund der stetigen Gasströmung. Die Phasenverschiebung ist besonders wichtig, da die Verbrennungsinstabilitätsmodelle die zeitliche und räumliche Integration des akustischen Eigenvektors berücksichtigen.

Der Einsatz von COMSOL Multiphysics zur Simulation der Raketengasdynamik und akustischen Eigenformen sorgt gegenüber herkömmlichen Techniken für exaktere Schwingungsformen. Die hochgenaue akustische Darstellung lässt sich leicht in Verbrennungsinstabilitätsmodelle integrieren, um Raketentechnikern und Ingenieuren bessere Möglichkeiten der Prognose an die Hand zu geben. Die Einbeziehung von Dämpfungsvorrichtungen wie Schallwänden oder eine Änderung der Betriebsbedingungen kann nun vor dem Testen exakter modelliert werden.

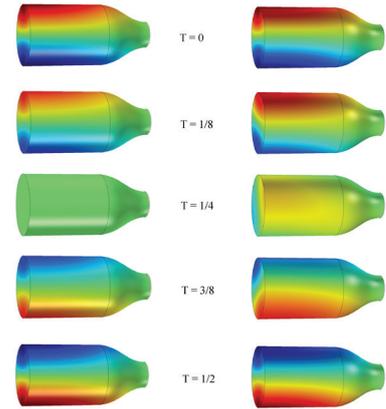


ABBILDUNG 5. Vergleich der ersten tangentialen Eigenform, berechnet mit der klassischen homogenen Wellengleichung (links) und der AVPE (rechts) für eine halbe Oszillationsperiode (T).

⇒ FORTFÜHRUNG DER ARBEITEN

Zu einer umfassenderen Abbildung der Verbrennungsinstabilität gehört die Rotationsschwingung und thermische Schwingung im Zusammenhang mit der Kammerakustik. Rotationsschwingungen treten als direktes Ergebnis der akustischen Schwingungen auf, während thermische Wellen auch auftreten können, wenn keine akustische Schwingung besteht. Bei der Fortführung der Arbeiten mit COMSOL Multiphysics wird ein Schwerpunkt auf den Rotationswellen liegen, die jede akustische Schwingung begleiten. ❖

Autor dieses Artikels: Sean R. Fischbach, Marshall Space Flight Center/Jacobs ESSSA Group, MSFC, Huntsville, Alabama (USA).

REFERENZEN

- 1 F. S. Bloomshield, *Lessons Learned in Solid Rocket Combustion Instability*, 43rd AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2007-5803, Cincinnati, OH, July 2007.
2. J. C. French, *Nozzle Acoustic Dynamics and Stability Modeling*, Vol. 27, Journal of Propulsion and Power, 2011.
3. R. K. Sigman and B. T. Zinn, *A Finite Element Approach for Predicting Nozzle Admittances*, Vol. 88, Journal of Sound and Vibration, 1983, pp. 117-131.
4. L. M. B. C. Campos, *On 36 Forms of the Acoustic Wave Equation in Potential Flows and Inhomogeneous Media*, Vol. 60, Applied Mechanics Reviews, 2007, pp. 149-171.



HINTER DEM RÖHREN UND GROLLEN DER MAHINDRA MOTORRÄDER

Mahindra Two Wheelers setzte multiphysikalische Simulation ein, um bei seinen hoch entwickelten Luxusmotorrädern die gesetzlichen Lärmschutzvorgaben einzuhalten und dennoch Kundenwünsche zu erfüllen.

von **VALERIO MARRA**

Mahindra Two Wheelers stellt eine breite Palette von Motorrollern und Motorrädern für den indischen Markt her. Dank des Einsatzes numerischer Simulationstools in einem frühen Entwicklungsstadium können sich Fahrer und Beifahrer einer großartigen Betriebs- und Fahrleistung bei gleichzeitig gehobenem Fahrkomfort auf den rauen indischen Straßen erfreuen. Mahindra setzte multiphysikalische Simulation ein, um das NVH-Verhalten (Noise, Vibration, Harshness) der Motoren, Ansaug- und Ausblasselemente seiner Motorräder zu untersuchen.

Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen ermöglichten es den Ingenieuren des Unternehmens, die strukturelle Konstruktion der Motorradmotoren zu verbessern, um den gewünschten Schallpegel zu erreichen. „Durch die COMSOL-Software konnten wir die Anzahl der erforderlichen Design-Zyklen deutlich senken und so viel Zeit sparen“, erklärt Niket Bhatia, Deputy Manager für Forschung und Entwicklung bei Mahindra.

⇒ DER WEG ZUM OPTIMALEN SCHALLPEGEL

In einem Motor gibt es viele Quellen der Geräuschentwicklung, von den Ansaug- und Verbrennungsprozessen über Kolben, Antriebs- und Ventiltrieb bis hin zum Ausblasselement. Verbrennungsgeräusche entstehen aufgrund struktureller Vibrationen durch einen schnellen Druckanstieg innerhalb der Zylinder. Diese Vibrationen setzen sich über den Antriebsstrang und die Lager auf das Motorgehäuse fort und strahlen Geräusche ab.

Eine akustische Analyse durch rein physikalische Tests kann ein teures und zeitaufwändiges Verfahren darstellen. Das Mahindra-Team entschied sich dafür, die physikalischen Tests mit Akustik-Modellierung zu begleiten, um so zu untersuchen, wie die Motorstruktur die Geräuschentwicklung beeinflusst. Ziel dabei war

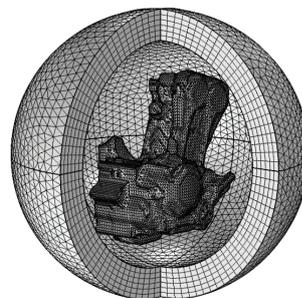
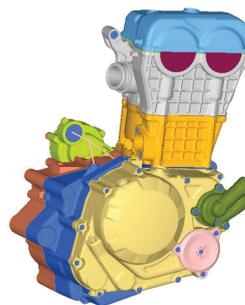


ABBILDUNG 1. Oben: CAD-Motorgeometrie Unten: 3D-Netzmodell im Perfectly Matched Layer (PML)

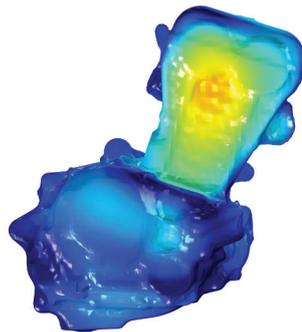
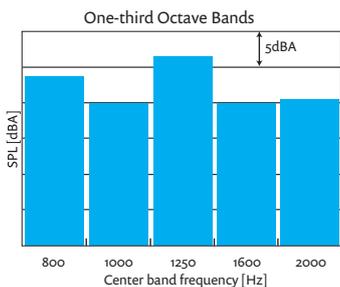


ABBILDUNG 2. Links: Drittel-Oktavband-Plot. Rechts: 3D-Oberflächenplot der Ergebnisse der Schalldruckpegel-Simulation (SPL).

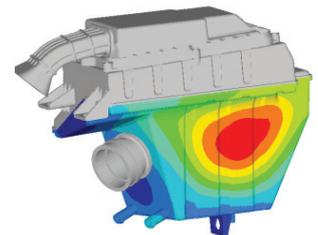


ABBILDUNG 3. Konstruktion des Luftfilters. Links: Originalentwurf. Rechts: Modifizierter Entwurf mit Rippen zur Verbesserung der ATF.

es, die Motorteile mit der höchsten Geräusentwicklung zu ermitteln und strukturelle Veränderungen zu ihrer Eingrenzung zu entwickeln.

Mit der COMSOL Multiphysics®-Software erstellten die Konstrukteure eine Analyse der akustischen Strahlung für einen Einzylinder-Verbrennungsmotor unter Last. Die Ingenieure betteten die Motorhülle innerhalb einer Simulationsdomain in ein Perfectly Matched Layer (PML) ein. PMLs dämpfen die ausgehenden Wellen mit geringer oder keiner Reflexion (Abbildung 1). Dies erzeugt exakte Ergebnisse bei gleichzeitiger Verkleinerung des Simulationsgebiets.

Das Team entschied sich bei der Analyse für einen Frequenzbereich von 800–2000 Hz, da physikalische Tests vermuten ließen, dass die Schallabstrahlung des Motorradmotors unter Verbrennungslast in diesem Bereich des akustischen Spektrums am stärksten ist. So konnte das Team bei möglichst geringen Simulationsressourcen besser ermitteln, welche Bereiche die größte Schallabstrahlung verursachen.

Auf Grundlage dieser Analyse wurde der Schalldruckpegel (Sound Pressure Level, SPL) untersucht. An Zylinderkopf und Motorblock wurden Modifikationen etwa bei Rippenhöhe, Wanddicke sowie eine Verstärkung der Montagestelle vorgenommen (Abbildung 2). Durch die Anpassung dieser Parameter konnte im untersuchten Frequenzbereich eine Senkung des SPL erreicht werden.

⇒ SENKUNG DES KÖRPERSCHALLS BEIM ANSAUGEN

Sowohl Ansaug- als auch Ausblasgeräusche sind in hohem Umfang für das Vorbeifahrgeräusch verantwortlich. Die Schallabstrahlung des üblicherweise aus Kunststoff bestehenden Luftfilters trägt maßgeblich zum Ansaugeräusch bei. Für die Kunststoffwände des Luftfilters wurde eine Analyse der akustischen Übertragungsfunktion (ATF) ausgeführt. Die Struktur des Luftfilters wurde durch das Einfügen von Rippen modifiziert, um so den ATF-Wert zu verbessern (Abbildung 3). Dies unterstützte die Senkung des Luftfilter-Körperschalls (Abbildung 4).

⇒ ANALYSE DER TRANSMISSIONSDÄMPFUNG ZUR OPTIMIERUNG DES AUSPUFFGERÄUSCHES

Gesetzliche Vorgaben stehen immer dem Kundenwunsch nach einem lauterem „Röhren“ des Auspuffs entgegen, das als wichtiger Indikator für die Leistung des Motorrads wahrgenommen wird. Im Rahmen der Vorgaben für das Vorbeifahrgeräusch standen die Ingenieure von Mahindra vor der Herausforderung, das „Röhren“ des Auspuffs bei niedrigen Frequenzen zu verstärken, jedoch den Schallpegel bei höheren Frequenzen zu senken.

Primäre Aufgabe des Auspuffs ist die Dämpfung des Ausblasgeräuschs des Motors. Faktoren wie die Senkung des Gegendrucks und die Einhaltung der Grenzwerte beim Vorbeifahrgeräusch sind jedoch ebenfalls zu beachten. Die Leistung des Auspuffs in einem Kraftfahrzeug-Abgassystem wird von drei Parametern bestimmt: Transmissionsdämpfung, Einfügedämpfung und Schallabstrahlpegel. Als wichtigster Parameter wird hierbei die Transmissionsdämpfung angesehen. Sie wird unabhängig von der Druckquelle ausschließlich von der Konstruktion des Auspuffs bestimmt. Das Mahindra-Team hatte die anspruchsvolle Aufgabe, die Transmissionsdämpfung eines Motorradauspuffs zu berechnen und dann die Dämpfung im Hinblick auf den gewünschten Pegel für eine bestimmte Frequenzspanne zu optimieren.

Untersucht wurde der Auspuff eines Einzylinder-Motorradmotors. Für die Transmissionsdämpfungs-Analyse des Auspuffs wurde COMSOL Multiphysics eingesetzt. Mit dem Akustik-Modul wurden Randbedingungen wie Kontinuität und schallharte Wand an entsprechender Position eingesetzt.

Perforierungen in Leitungen wurden durch Angabe von Details zur Porosität im perforierten Bereich mittels des integrierten Transferimpedanz-Modells definiert. Für die Analyse waren Bereichsoporosität, Schallwand und Leitungsdicke sowie der Lochdurchmesser anzugeben. Für poröse Materialien wie etwa Glaswolle wurde der Strömungswiderstand mit einem in der Software verfügbaren poro-akustischen Modell bestimmt. Der Druck im Ansaugbereich wurde vorgegeben und sowohl für Ansaug- als auch Ausblasbereich wurde

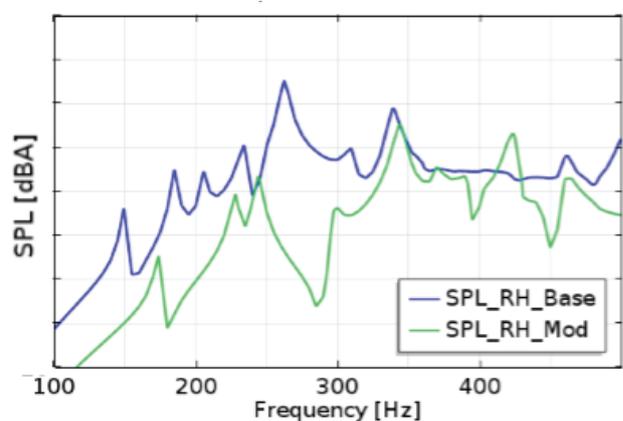


ABBILDUNG 4. Die Simulationsergebnisse zeigen eine Senkung des Körperschalls beim modifizierten Luftfilter.

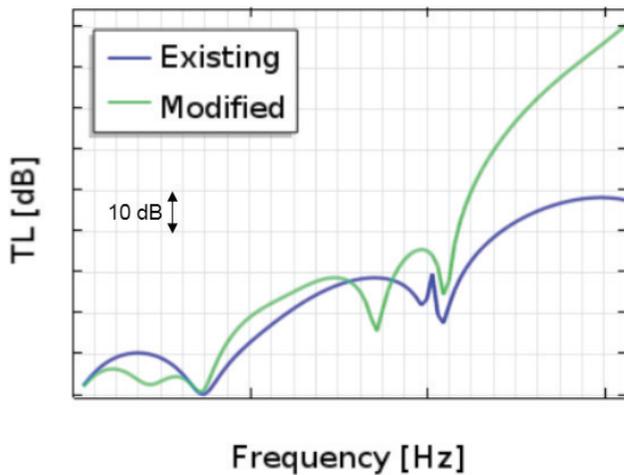


ABBILDUNG 5. Vergleich Transmissionsdämpfung (TL) der beiden Entwürfe. Beim modifizierten Entwurf ist bei niedrigen Frequenzen eine geringere Transmissionsdämpfung, bei hohen Frequenzen eine stärkere Transmissionsdämpfung festzustellen. So erzielt die neue Konstruktion das gewünschte „Röhren“ und hält gleichzeitig die gesetzlichen Vorgaben ein.

„Wir haben mit dem Application Builder eine Simulations-App erstellt, um die Ausgabedateien der Analyse zu vergleichen und die SPL-Daten aufzuzeichnen – ein enormer Zeitgewinn.“

— ULHAS MOHITE, MANAGER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG, MAHINDRA

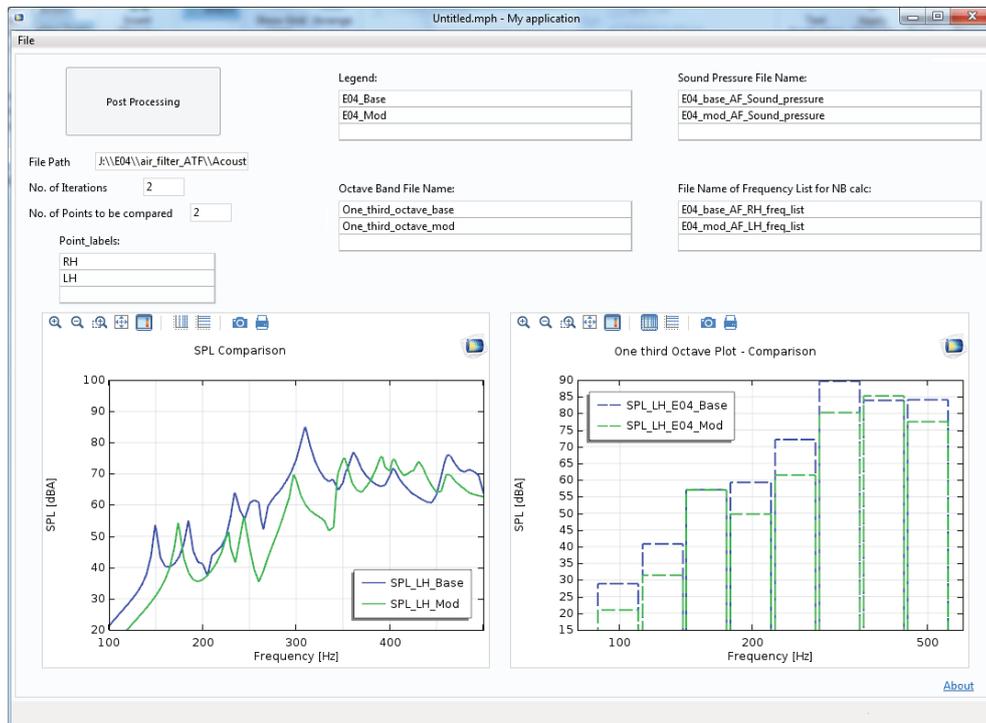


ABBILDUNG 6. Mit dem Application Builder erstellten die Mahindra-Ingenieure eine benutzerfreundliche Simulations-App zum Vergleich von Analysedateien und zur Aufzeichnung der Schalldruckpegel-Daten (SPL).

als Randbedingung eine ebene Welle angesetzt.

Auf Grundlage der Ergebnisse wurde die Auspuffkonstruktion durch eine Erhöhung der Leitungslänge innerhalb des Auspuffs geändert. Durch diese Modifizierung erzielte das Team eine geringere Transmissionsdämpfung bei niedrigen Frequenzen (Abbildung 5). Dies ergab das gewünschte Ziel: erhöhter Schallpegel bei niedrigen Frequenzen — das „Röhren“ — war erreicht.

⇒ FRÜHE OPTIMIERUNG IM DESIGNZYKLUS SPART KOSTEN UND ZEIT

„Mir persönlich haben die Flexibilität der Software und Werkzeuge wie die COMSOL API besonders gefallen“, berichtet Ulhas Mohite, Manager für Forschung und Entwicklung bei Mahindra. „So konnten wir den Automatisierungsprozess mit Java-Code ausführen, was es uns zum Beispiel bei der akustischen Analyse ermöglichte, unterschiedliche Netze für verschiedene Frequenzstufen einzusetzen, um den richtigen Kompromiss zwischen Simulationsgenauigkeit und Rechenzeit zu finden. Außerdem konnten wir die gewünschte Ausgabeform wie etwa SPL-Oberflächen-Plots und SPL-Fernfelddaten während des Simulationszyklus automatisch exportieren. Das hat viel Zeit bei der manuellen Nachbearbeitung und dem Datenexport gespart.“

Auch der Application Builder der COMSOL-Software erwies sich für Mahindra als äußerst nützliches Werkzeug. „Wir haben

mit dem Application Builder eine Simulations-App (Abbildung 6) erstellt, um die Ausgabedateien der Analyse zu vergleichen und die SPL-Daten aufzuzeichnen. Ein enormer Zeitgewinn.“

Die Analyseergebnisse kamen den Daten der physikalischen Tests sehr nahe. Durch die Simulation konnten die Mahindra-Ingenieure zu einem frühen Zeitpunkt im Designzyklus Korrekturmaßnahmen in Form struktureller Modifikationen auf Grundlage der Analyseergebnisse vornehmen. Dies führte zu einer deutlichen Senkung des Zeit- und Kostenaufwands für die Produktentwicklung. „Die Kombination aus den Tests und den Simulationen hat uns den Weg zu einer effizienten Lösung für die Thematik der Geräuschentwicklung der Motorräder gewiesen“, stellt Bhatia abschließend fest. ❖

QUELLEN

1. Mohite, U., Bhatia, N. und Bhavsar, P., „An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load,“ SAE Technical Paper 2015-01-2244, 2015, DOI:10.4271/2015-01-2244.
2. Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling, COMSOL Blog



VON DER TABELLENKALKULATION BIS ZUR MULTIPHYSIKALISCHEN ANWENDUNG: ABB SETZT IMPULSE IN DER TRANSFORMATORINDUSTRIE

Bei der Entwicklung neuer und verbesserter Netztransformatoren entstehen den Unternehmen Kosten für Prototypen und Tests zur Reduzierung des Transformatorbrummens. Bei ABB entwickelt ein Ingenieurteam multiphysikalische Simulationen und maßgeschneiderte Applikationen zur Untersuchung seiner Entwürfe.

von **LEXI CARVER**

Vom Kochen bis zum Aufladen unserer Mobiltelefone: Täglich nutzen wir das elektrische Netz, das Wohnhäuser, Schulen, Unternehmensstandorte und andere Gebäude versorgt. Dieses komplexe Netz umfasst Anlagen zur Energieerzeugung, Hochspannungsleitungen zur Übertragung des Stroms über große Entfernungen, Verteilungsleitungen zur Versorgung einzelner Gebäude und Gebäudekomplexe sowie die entsprechende Infrastruktur zur Steuerung

und zum Schutz der Technologie.

Zu dieser Infrastruktur gehören auch Netztransformatoren zur Erhöhung und Senkung der Spannungspegel in Stromleitungen für Wechselstrom (siehe Abbildung 1). Die Stromübertragung bei höheren Spannungen verursacht geringere Verluste und wird daher für die Übertragung über größere Entfernungen bevorzugt. Solch hohe Spannungen würden jedoch an beiden Enden der Leitungen ein Sicherheitsrisiko darstellen. Daher werden

Transformatoren eingesetzt, um die Spannung am Einspeisungspunkt zu erhöhen und in der Nähe der Entnahmestellen wieder zu senken.

Transformatoren erzeugen jedoch Geräusche, die in der Umgebung des Geräts meist als schwaches Brummen oder Summen zu hören sind. Zwar ist es unmöglich, sie völlig verstummen zu lassen, doch die gesetzlichen Vorgaben schreiben sichere Grenzwerte vor. Gutes Produktdesign kann die akustischen Effekte eingrenzen.



ABBILDUNG 1. Bild eines Transformators für Hochspannungsleitungen.

Einer der weltweit größten Hersteller von Transformatoren, ABB mit Hauptsitz in Zürich (Schweiz), hat numerische Analysen und Computersimulationen eingesetzt, um den Geräuschpegel seiner Transformatoren im Voraus zu berechnen und zu minimieren. Mit der COMSOL Multiphysics® Simulationssoftware und ihrem Application Builder wurden virtuelle Designprüfungen ausgeführt, verschiedene Konfigurationen getestet und die Simulationsergebnisse dann über maßgeschneiderte Userinterfaces verbreitet.

⇒ **GERÄUSCHE UNTERSCHIEDLICHEN URSPRUNGS BESEITIGEN**

Transformatorgeräusche haben ihren Ursprung oft in unterschiedlichen Quellen wie etwa Schwingungen im Transformator Kern oder zusätzlichen Lüftern und Pumpen des Kühlsystems. Jede dieser Quellen erfordert unterschiedliche Maßnahmen zur Senkung der Geräuschentwicklung.

ABB-Transformatoren enthalten einen Metallkern mit um verschiedene Abschnitte gewickelten Drahtspulen, ein Gehäuse oder Behälter zum Schutz dieser Komponenten sowie ein isolierendes Öl innerhalb des Gehäuses (siehe

Abbildung 2 oben). Fließt Wechselstrom durch die Windungen einer Spule, erzeugt dies einen magnetischen Fluss, der Strom in der benachbarten Spule erzeugt. Die Spannungsänderung wird durch die unterschiedliche Anzahl von Spulenwindungen erreicht.

Da der Kern aus Stahl besteht, einem magnetostruktiven Material, erzeugt der magnetische Fluss — der die Richtung ändert — mechanische Beanspruchung. Dies erzeugt durch das schnelle Ausdehnen und Schrumpfen des Metalls Schwingungen. Die Schwingungen wandern durch das Öl bis zu den Gehäusewänden und den Befestigungspunkten, die den inneren Kern an Ort und Stelle halten. So entsteht ein hörbares Brummen, das als Kerngeräusch bezeichnet wird (siehe Abbildung 2 unten).

Neben dem Kerngeräusch bewirkt der Wechselstrom in den Spulen Lorentzkräfte in den einzelnen Windungen, die als Lastgeräusch bezeichnete Schwingungen erzeugen, welche die auf das Gehäuse übertragene mechanische Energie verstärken.

Angesichts dieser unterschiedlichen Geräuschquellen und der miteinander in Beziehung stehenden relevanten elektromagnetischen, akustischen und mechanischen Faktoren mussten die Ingenieure im ABB Corporate Research Center (ABB CRC) im schwedischen Västerås die internen Vorgänge in den Transformatoren

besser verstehen, um deren Konstruktion im Hinblick auf eine Minimierung des Brummens zu optimieren.

⇒ **KOPPLUNG AKUSTISCHER, MECHANISCHER UND ELEKTROMAGNETISCHER EFFEKTE ZU EINEM GANZEN**

„Wir beschlossen, COMSOL Multiphysics einzusetzen, denn es ermöglicht die einfache Kopplung mehrerer unterschiedlicher physikalischer Effekte“, berichtet Mustafa Kavasoglu, Wissenschaftler des ABB CRC. „Das Projekt erforderte die gleichzeitige Modellierung von Elektromagnetik, Akustik und Mechanik. Die COMSOL® Software erwies sich als beste Lösung, da sie alle drei Bereiche in einer einzigen Umgebung abbilden kann.“

Dr. Anders Daneryd, leitender Wissenschaftler, und Dr. Romain Haettel, leitender Ingenieur, bildeten gemeinsam mit Mustafa Kavasoglu das Team für Transformatorakustik. Ziel dabei war es, eine Reihe von Simulationen und Simulations-Apps zu entwickeln: zur Berechnung des im Kern und den Windungen des Transformators erzeugten magnetischen Flusses (siehe Abbildung 3 links), der Lorentzkräfte in den Windungen (siehe Abbildung 3 rechts), der mechanischen Verschiebung durch

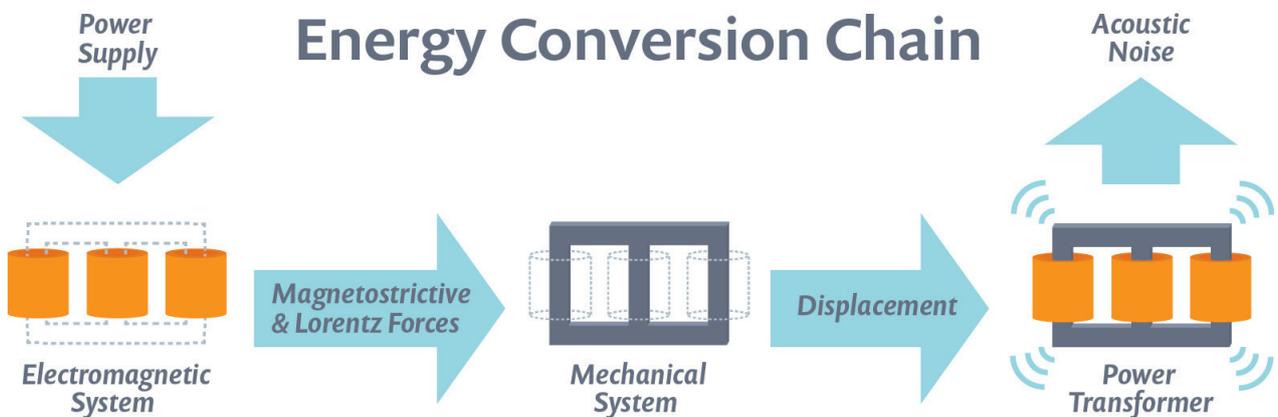
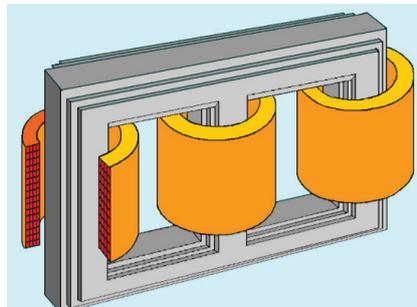


ABBILDUNG 2. Oben links: CAD-Modell des aktiven Teils eines Drei-Phasen-Transformators mit Windungen um den Kern. Oben rechts: Aktiver Teil eines Netztransformators in einem ölgefüllten Gehäuse. Unten: Energieumwandlungskette für Kerngeräusch- und Lastgeräuschentwicklung (Magnetostruktions im Kern und Lorentzkräfte in den Windungen).

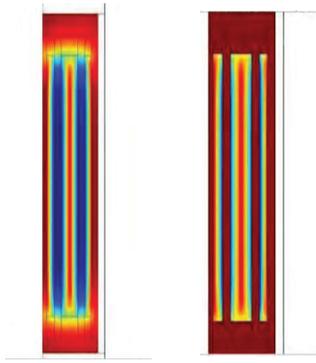


ABBILDUNG 3. Die Simulationsergebnisse zeigen die Dichte des magnetischen Flusses (links) und die Lorentzkräfte (rechts) in den Spulenwindungen des Transformators.

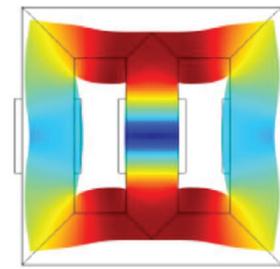
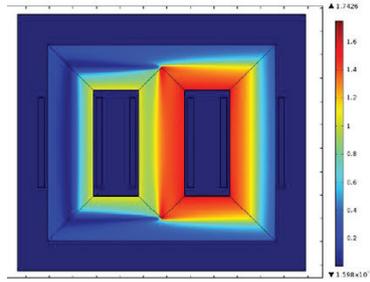


ABBILDUNG 4. Links: Die Ergebnisse der COMSOL®-Software zeigen die Ebenen des magnetischen Flusses im Stahl. Rechts: Ergebnisplot der Kernresonanz. Die Verformungen werden für bessere Sichtbarkeit übertrieben dargestellt.

die magnetostruktive Belastung und die daraus entstehenden Druckpegel akustischer Wellen innerhalb des Gehäuses.

Das Team arbeitete eng mit dem Geschäftsbereich ABB Transformers zusammen, oft unterstützt durch die Erfahrung und Fachkenntnis von Dr. Christoph Ploetner, anerkannter Spezialist für Netztransformatoren, um sicherzustellen, dass alle geschäftlichen Erfordernisse berücksichtigt werden.

Eine der Simulationen bildet das Geräusch ab, das aufgrund der Magnetostruktion im Kern entsteht. Zunächst begann das Team mit einem elektromagnetischen Modell, um die vom Wechselstrom induzierten magnetischen Felder zu prognostizieren und anschließend die magnetostruktive Belastung des Stahls.

Im Geometrie-Aufbau waren der Stahlkern, die Windungen und ein Außenbereich enthalten, der das Gehäuse darstellte. „Wir erhielten die Verschiebung aufgrund der magnetostruktiven Belastung und berechneten dann mittels einer Modalanalyse die Resonanz für verschiedene Frequenzen“, erläutert Kavasoglu (siehe Abbildung 4). „Magnetostruktive Belastung ruft leicht Resonanzen hervor und

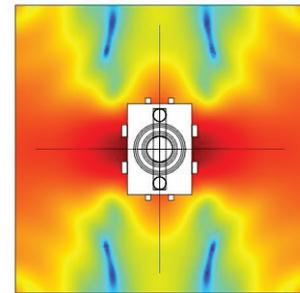
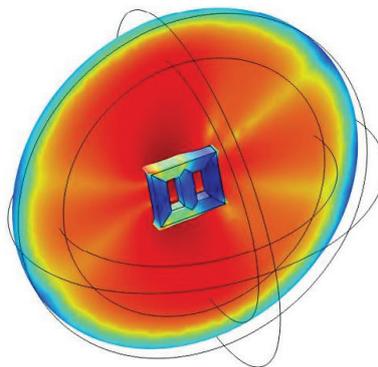


ABBILDUNG 5. Die Ergebnisse der akustischen Analyse zeigen das Schalldruckfeld um den Kern (links) und um den Transformator (rechts).

verursacht bei diesen Frequenzen eine starke Schwingungsverstärkung.“

Das Team konnte nun die durch das Öl fließenden Schallwellen prognostizieren und die daraus entstehende Schwingungen des Tanks berechnen, die Geräusche in die Umgebung abstrahlen (siehe Abbildung 5).

Darüber hinaus simulierte das Team die Verschiebung der Spulenwindungen, die Lastgeräusche verursacht, und ermittelte den durch das Schallfeld entstehenden Oberflächendruck an den Gehäusewänden (siehe Abbildung 6).

Eine Parameterstudie zur Darstellung der komplexen Beziehungen zwischen den Konstruktionsparametern (wie

etwa Gehäusedicke und Materialeigenschaften) und dem daraus entstehenden Transformatorbrummen ermöglichte eine Anpassung der Geometrie und der Gestaltung von Kern, Windungen und Gehäuse zur Minimierung des Geräusches.

⇒ AUSWEITUNG DER SIMULATIONS-NUTZUNG BEI ABB

Das CRC-Team setzt weiterhin die COMSOL-Software ein, nicht nur, um ihre eigenen Kenntnisse und Modelle zu verbessern, sondern auch, um ihr Wissen anderen Konstrukteuren bei ABB und weiteren Unternehmensbereichen zugänglich zu machen. Mit dem Application Builder von COMSOL Multiphysics arbeiten sie derzeit an der Entwicklung von Apps aus ihren multiphysikalischen Modellen, die leicht an den Bedarf jeder Abteilung angepasst werden können.

Diese Simulations-Apps vereinfachen die Test- und Prüfverfahren für die Entwickler und Ingenieure: „Die Entwickler haben bisher Werkzeuge auf Grundlage von Statistik und empirischen Modellen verwendet. Durch die Bereitstellung der Simulations-Apps füllen wir die Lücken. Mit dem Application Builder

„Wir haben auch die COMSOL Server™-Lizenz eingesetzt, um unsere App anderen Büros für Testzwecke zur Verfügung zu stellen. So ist eine gemeinsame Nutzung ganz leicht. Die weltweite Lizenz war dabei sehr hilfreich: Als global tätiges Unternehmen möchten wir, dass auch die Nutzer an unseren anderen Standorten von diesen Apps profitieren können.“

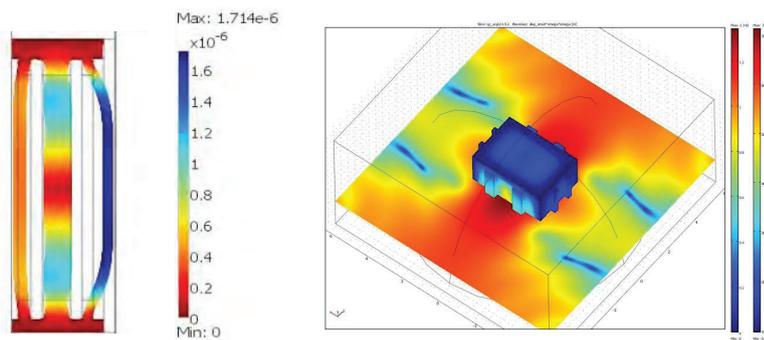


ABBILDUNG 6. Links: Die Simulationsergebnisse zeigen die Verschiebung der Windungen. Die Verformungen werden für bessere Sichtbarkeit übertrieben dargestellt. Rechts: Die Ergebnisse zeigen die Schalldruckpegel außerhalb des Gehäuses und die Verschiebung der Wände.

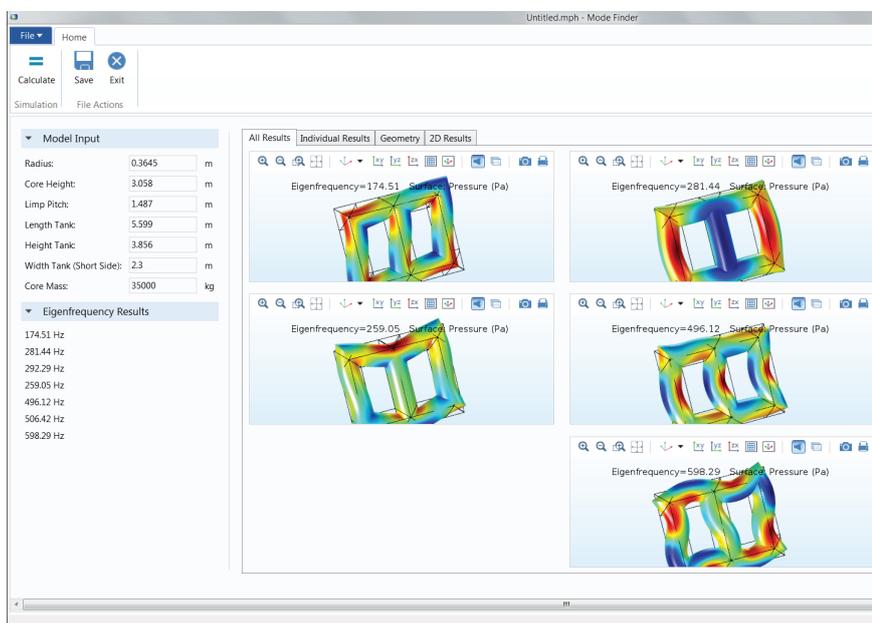


ABBILDUNG 7. Screenshot-Ausschnitt der ersten Simulations-App zur Berechnung der Eigenfrequenzen des Transformator Kerns. Links ist ein Bereich der App für die Modell-Eingaben zu sehen, rechts werden die Ergebnisse für die berechneten Eigenfrequenzen angezeigt. Die Verformungen werden für bessere Sichtbarkeit übertrieben dargestellt.

verschaffen wir Ihnen den Zugriff auf die Finite-Elemente-Analyse über eine Benutzerschnittstelle, ohne dass sie sich mit der Theorie der Finiten Elemente auseinandersetzen müssen“, erläutert Haettel.

Eine App (siehe Abbildung 7) berechnet die spezifischen Eigenfrequenzen des Transformator kerns, die bei Frequenzen innerhalb des hörbaren Bereichs zu einer unerwünschten Geräuschentwicklung führen können. Diese App umfasst sowohl das mit der COMSOL®-Software entwickelte physikalische Modell als auch in Java®-Code mit dem Application Builder maßgeschneiderte Methoden.

„Unsere Entwickler verwenden Standard-Tabellenkalkulation, was für häufig gebaute Transformatoren

gut funktioniert. Wenn jedoch neue Entwürfe oder andere Abmessungen eingeführt werden, können mit diesem Ansatz Probleme auftreten, wie fehlerhafte Ergebnisse, die ungenauere Schallpegeldata liefern. Das kann recht kostspielig werden, wenn zusätzliche Maßnahmen zur Geräuschdämmung am fertigen Transformator erforderlich werden“, fährt Haettel fort.

„Neben den Kosten spielt auch die Zeit eine Rolle. Mit der neuen App können die Entwickler aufgrund der Präzision des FEA-Code besser und effizienter arbeiten.“

Die maßgeschneiderte App ermöglicht dem Nutzer, ganz bequem zu prüfen, wie bestimmte Kombinationen von Geometrie, Materialeigenschaften und anderen Konstruktionsparametern das

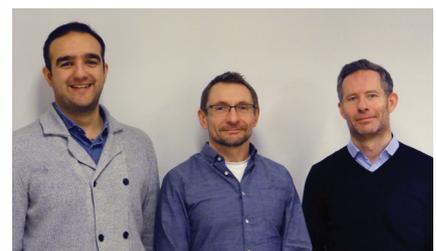
entstehende Transformatorbrummen beeinflussen. „Wir haben die Parameter, auf die man zugreifen kann, ganz bewusst ausgewählt, um die wichtigsten bereitzustellen“, fügt Kavasoglu hinzu.

Angesichts der breiten Palette von Industrieanwendungen, in denen ABB-Transformatoren eingesetzt werden, ist diese Flexibilität außerordentlich hilfreich für die Entwicklung und die virtuellen Prüfverfahren. „ABB stellt Transformatoren für jeden Industriebedarf her. Derzeit konzentrieren wir uns auf große Wechselstrom-Transformatoren, wie sie üblicherweise von Energieversorgern eingesetzt werden, die Strom in Städten übertragen und verteilen“, erklärt er.

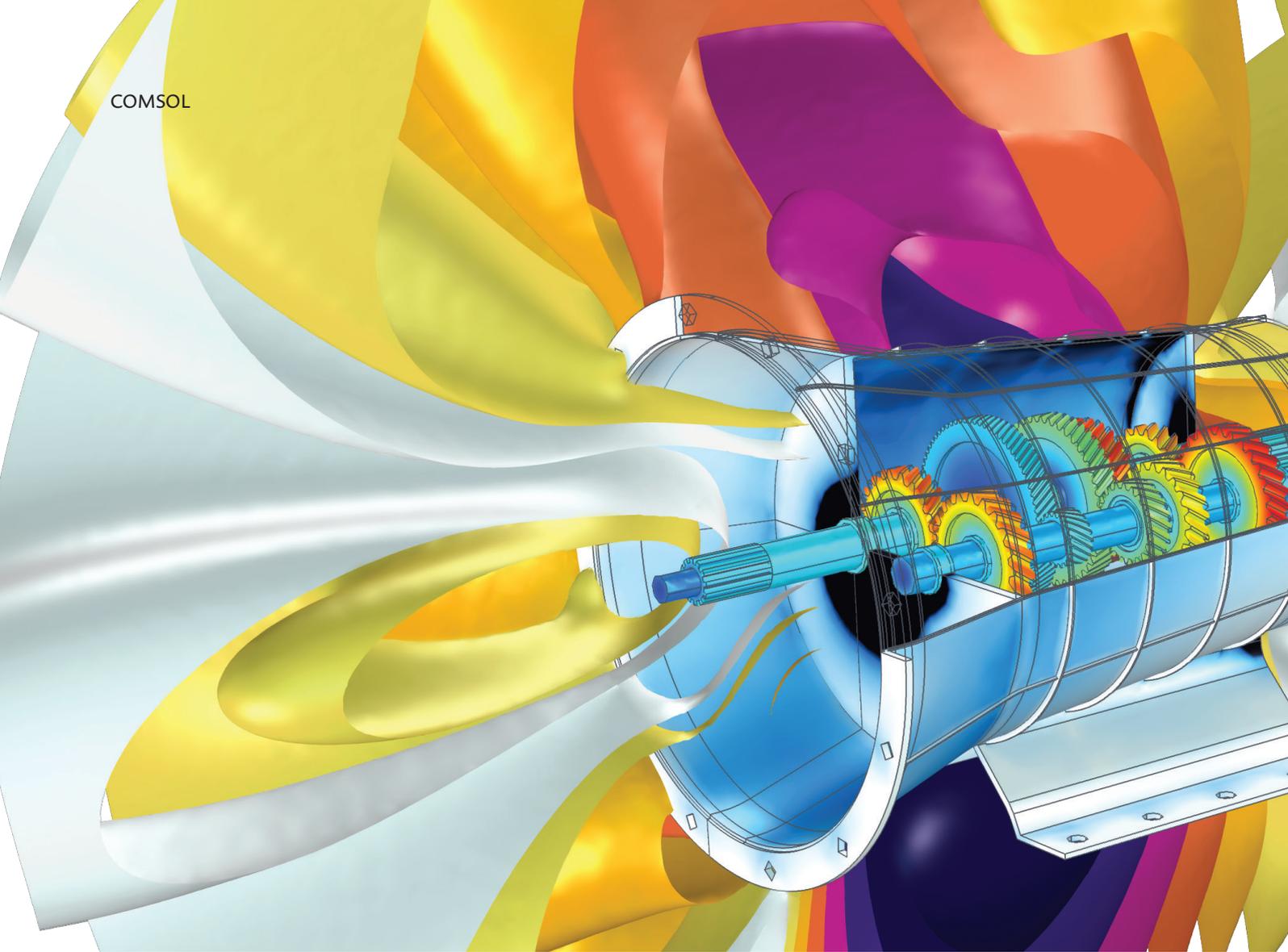
„Aber unsere Arbeit kann auf jede Art von Transformatoren übertragen werden. Wenn wir eine spezielle Anfrage erhalten, passen wir die App natürlich auf diesen Bedarf an. Dies ermöglicht es uns die zusätzliche Entwicklungsarbeit leicht zu erledigen. Der Application Builder hat den Transfer von Wissen und Technologie stark vereinfacht.“

Wir haben auch die COMSOL Server™-Lizenz eingesetzt, um unsere App anderen Büros für Testzwecke zur Verfügung zu stellen. So ist eine gemeinsame Nutzung ganz leicht. Die weltweite Lizenz war dabei sehr hilfreich: Als global tätiges Unternehmen möchten wir, dass auch die Nutzer an unseren anderen Standorten von diesen Apps profitieren können.“ Mit einer lokalen Installation von COMSOL Server können Simulationsexperten ihre Apps verwalten und bereitstellen. Der Zugriff darauf erfolgt über einen Client oder Web-Browser.

Das Team arbeitet jetzt an einer zweiten App zur Berechnung des Lastgeräusches. Nach ihrer Bereitstellung für die Geschäftsbereiche wird diese App weitere ermüdende Berechnungen unnötig machen — Entwickler und Ingenieure können mehr virtuelle Tests durchführen, ohne mit einem detaillierten Modell arbeiten zu müssen. So kann ABB noch schneller und einfacher die besten Transformatoren der Welt produzieren. ❖



Von links nach rechts: Mustafa Kavasoglu, Romain Haettel und Anders Daneryd vom ABB CRC.



MODELLIERUNG VON VIBRATION UND SCHALL IN EINEM GETRIEBE

Die Prognose der Schallabstrahlung eines dynamischen Systems wie eines Getriebes sorgt früh im Entwicklungsprozess für Erkenntnisse.

von **PAWAN SOAMI**

Ein Getriebe, das Kraft vom Motor auf die Räder überträgt, strahlt aus zwei Gründen Schall ab. Erstens üben die Zahnräder zur Übertragung der Kraft von einer Welle auf die andere unerwünschte seitliche und axiale Kräfte auf Lager und Gehäuse aus. Zweitens kann die Flexibilität der verschiedenen Getriebekomponenten wie etwa Lager und Gehäuse Schwingungen verursachen.

In einem Getriebe verursacht die variierende Steifigkeit des Zahneingriffs anhaltende Schwingungen, die auf das Gehäuse übertragen werden, das seinerseits schwingt und die Energie auf das umgebende Fluid — z. B. Getriebeöl

— überträgt. Dadurch werden akustische Wellen abgestrahlt. Um dieses komplexe Phänomen exakt zu modellieren und zu simulieren, sollte eine Kontaktanalyse, eine Mehrkörperdynamikanalyse und eine akustische Analyse ausgeführt werden.

Das in der vorliegenden Analyse betrachtete Getriebe verfügt über eine mit der Vorgelegewelle verbundene Antriebswelle und fünf Schrägstirnräderpaare (Abbildung 1). Die Zahnräder sind unterschiedlich groß, bestehen jedoch aus demselben Material: Baustahl.

⇒ KONTAKTANALYSE DES ZAHNEINGRIFFS

Der Zahneingriff, der elastisch ausgeführt sein soll, ist eine anhaltende Quelle für Schwingungen. Die Steifigkeit der Zahnräder an sich muss in verschiedenen Positionen bewertet werden. Da sich die Zahnradzähne während des Betriebs verformen, wird eine stationäre Parameteranalyse ausgeführt, um die Variation der Steifigkeit über einen Eingriffszyklus zu ermitteln. Ein Penalty-Contact-Verfahren wird eingesetzt und Bedingungen definiert, um das Drehen der Zahnräder und die daraus resultierenden Kontaktkräfte einzubeziehen.

Die Simulationsergebnisse zeigen die Verteilung der Von-Mises-Spannung in einem Zahnradpaar, wobei hohe Spannungswerte an den Kontaktpunkten und an der Zahnbasis angezeigt werden (Abbildung 2). Durch Einsatz der Simulation ist es möglich, die Variation der Steifigkeit des Zahneingriffs bei Wellenrotation festzustellen, wie in Abbildung 2 dargestellt.

⇒MEHRKÖRPERANALYSE DER WELLEN, ZAHNRÄDER UND DES GEHÄUSES

Die Mehrkörperanalyse wird im Zeitbereich einer vollen Umdrehung der Antriebswelle unter Verwendung der Daten für die Steifigkeit des Zahneingriffs aus der Kontaktanalyse durchgeführt. Diese Analyse ist zur Berechnung der Zahnradynamik und der daraus resultierenden Schwingungen des Gehäuses erforderlich. Im vorliegenden Fall wird die Analyse bei einer Motordrehzahl von 5000 U/min und einem Ausgangsdrehmoment von 2000 N·m durchgeführt. Für die Wellen und Zahnräder wird Steifigkeit angenommen, mit Ausnahme des Zahneingriffs, für den die Steifigkeitsdaten aus der vorherigen Kontaktanalyse verwendet werden. Das Gehäuse besteht aus Stahl und wird als elastisch angesehen.

Die Verteilung der Von-Mises-Spannung im Gehäuse, die durch die über Antriebs- und Vorgelegewelle übertragenen Kräfte verursacht wird, wird in Abbildung 3 dargestellt. Die normale Beschleunigung des schwingenden Gehäuses, die für die Schallabstrahlung verantwortlich ist, ist ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 4 zeigt den zeitlichen Verlauf und das Frequenzspektrum der normalen Beschleunigung an der Oberseite des Gehäuses. Die dominanten Frequenzen, bei denen das Gehäuse schwingt, liegen zwischen 1500 Hz und 2000 Hz. Die Gehäuseverformung wird in Abbildung 5 dargestellt.

⇒AKUSTISCHE ANALYSE DER SCHALLABSTRAHLUNG VOM GEHÄUSE

Die normale, auf das Gehäuse wirkende

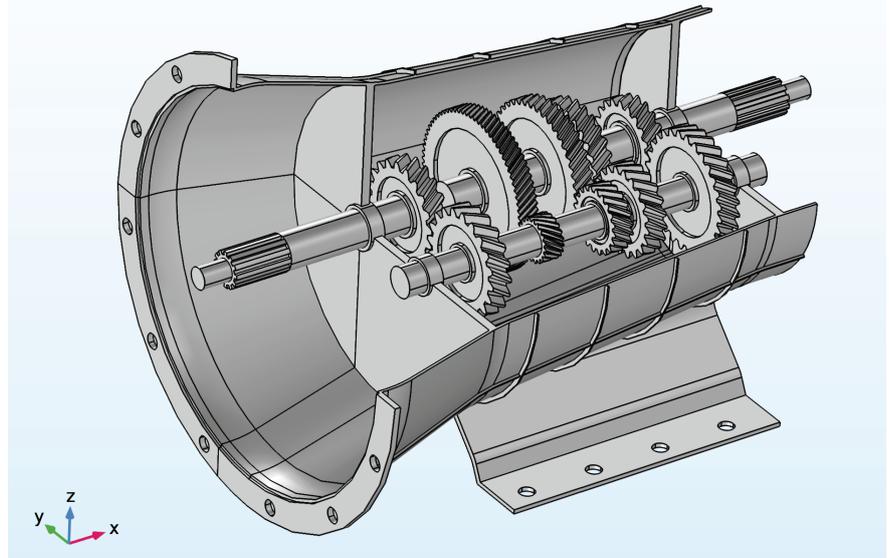


ABBILDUNG 1. Modellgeometrie eines 5-Gang-Synchromesh-Getriebes für ein Fahrzeug mit Handschaltung. Nur die zur Betrachtung in der Mehrkörperanalyse ausgewählten Teile des Getriebes sind abgebildet.

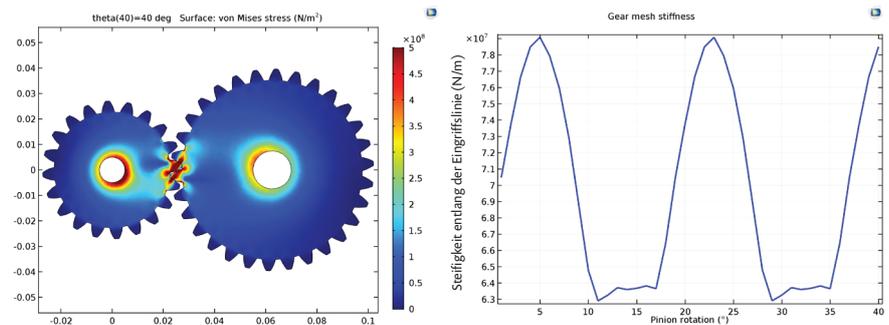


ABBILDUNG 2. Links: Verteilung der Von-Mises-Spannung in einem Zahnradpaar. Rechts: Variation der Steifigkeit des Zahneingriffs bei Wellenrotation.

und von der Mehrkörperanalyse prognostizierte Beschleunigung wird als Schallquelle in der akustischen Analyse verwendet. Die innerhalb des Frequenzbereichs durchgeführte Simulation prognostiziert den Schalldruckpegel

außerhalb des Getriebegehäuses. Da die Werte der normalen Beschleunigung im Zeitbereich liegen, wird eine FFT (schnelle Fourier-Transformation) eingesetzt, um sie in den Frequenzbereich zu konvertieren. Für den das

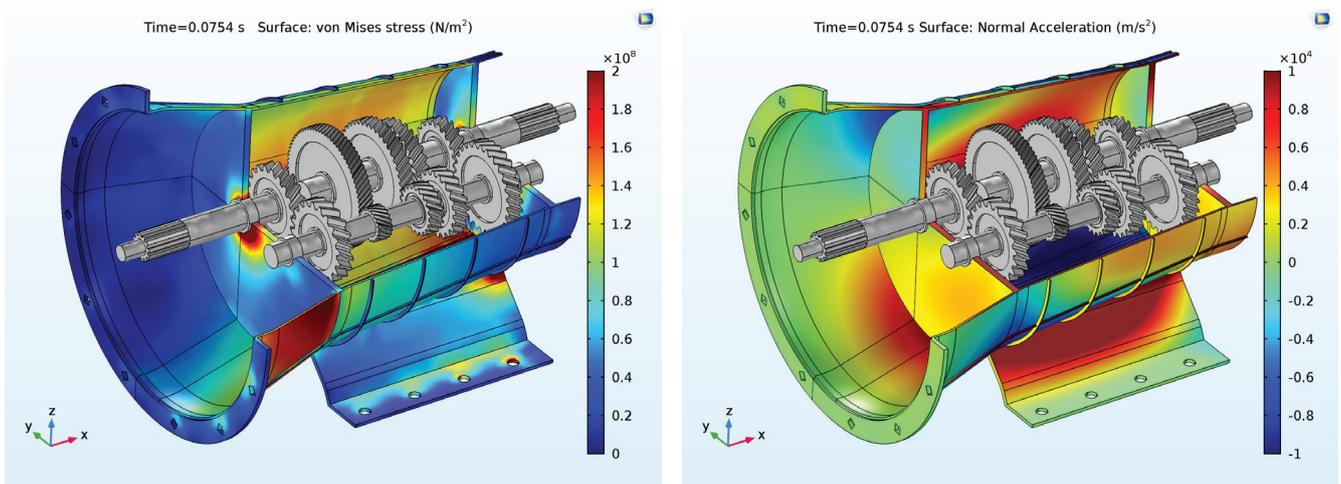


ABBILDUNG 3. Links: Verteilung der Von-Mises-Spannung im Gehäuse. Rechts: Normale Beschleunigung des Gehäuses

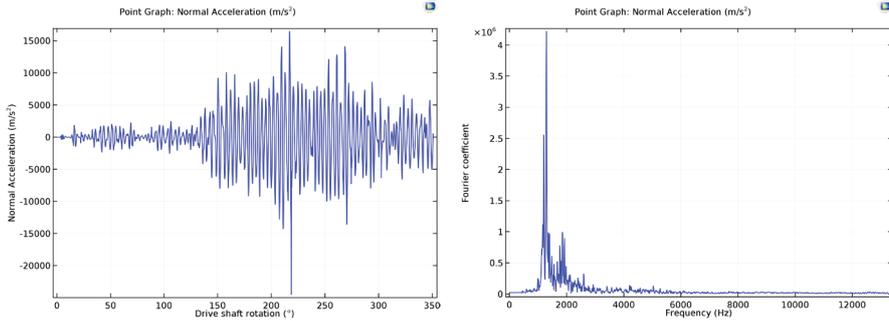


ABBILDUNG 4. Normale Beschleunigung auf der Oberseite des Gehäuses. Links: Zeitlicher Verlauf. Rechts: Frequenzspektrum.

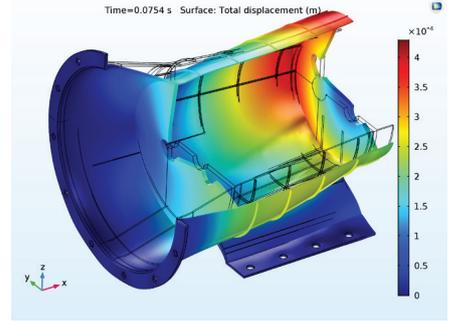


ABBILDUNG 5. Gehäuseverformung, 200-fach verstärkt dargestellt.

Getriebegehäuse umschließenden Luftbereich wird der Schalldruck berechnet (Abbildung 6). Um das Simulationsgebiet ohne Beeinträchtigung der Ergebnissenauigkeit klein zu halten, wird eine sphärische Wellenabstrahlung als Bedingung für die Außenränder des Luftbereichs gesetzt, damit die abgestrahlten akustischen Wellen den Modellierungsbereich mit minimaler Reflexion verlassen können.

Der Schalldruckpegel (SPL) auf der Gehäuseoberfläche und im umgebenden Bereich wird in Abbildung 7 dargestellt. Der SPL kann auch im Fernfeld aufgetragen werden, wie in Abbildung 8 dargestellt. Fernfeld-Darstellungen in verschiedenen Ebenen und einem Abstand von 1 m vermitteln eine Vorstellung der dominanten Richtungen der Schallabstrahlung bei der gewählten Frequenz.

REFERENZEN

- Verwendung von Software für die Bestimmung von Getriebegeräuschen, Auto Tech Review, Juni 2017
- Wie man Geräusche und Vibration des Getriebes in COMSOL Multiphysics® modelliert, COMSOL Blog
- Modellierung von Vibration und Geräuschen in einem Getriebe, COMSOL Application Gallery

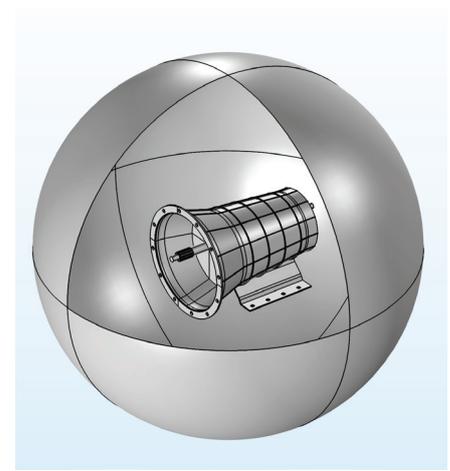


ABBILDUNG 6. Luftbereich um das Getriebegehäuse für die akustische Analyse.

➔ ABSCHLIESSENDE BEMERKUNGEN

Zur Simulation der Schwingungen und des erzeugten Geräusches wird der Ansatz einer Mehrkörper-Akustik-Interaktionsmodellierung verfolgt. Diese Technik kann zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess des Getriebes eingesetzt werden, so dass die Schallabstrahlung für verschiedene Betriebsbedingungen minimiert wird. ❖

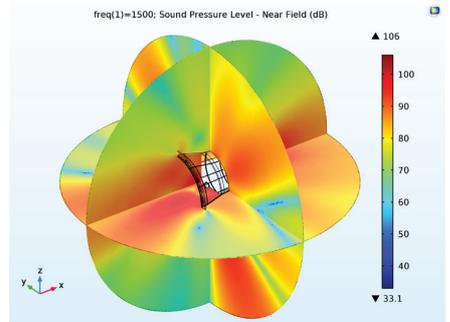
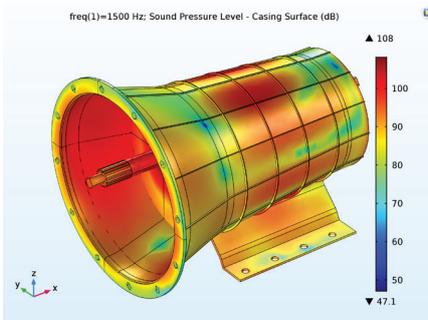
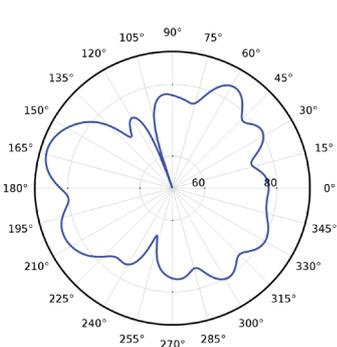
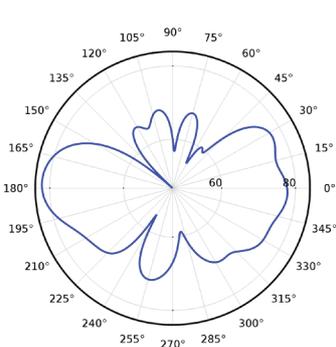


ABBILDUNG 7. Schalldruckpegel bei 1500 Hz. Links: Gehäuseoberfläche. Rechts: Nahfeldbereich.

Sound Pressure Level - Far Field (xy-plane) (dB)



Sound Pressure Level - Far Field (xz-plane) (dB)



Sound Pressure Level - Far Field (yz-plane) (dB)

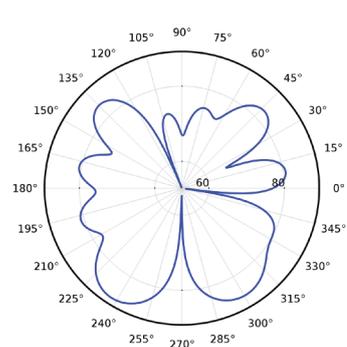


ABBILDUNG 8. Fernfeld-SPL (dB) in den xy-, xz- und yz-Ebenen, Abstand 1 m bei 1500 Hz.

Schall beeinflussen und kontrollieren: Wie die mathematische Modellierung modernste Metamaterialforschung in der Akustik fördert

Von der gängigen Audioanwendung bis hin zur Ultraschallbildgebung: Die Metamaterialforschung impliziert weitreichende und faszinierende Möglichkeiten für die akustische Tarnung. Forscher setzen mathematische Modellierung ein, um in einer Kombination aus Transformationsakustik und hoch anisotropen Strukturen akustische Metamaterialien zu entwickeln.

von **GEMMA CHURCH UND VALERIO MARRA**

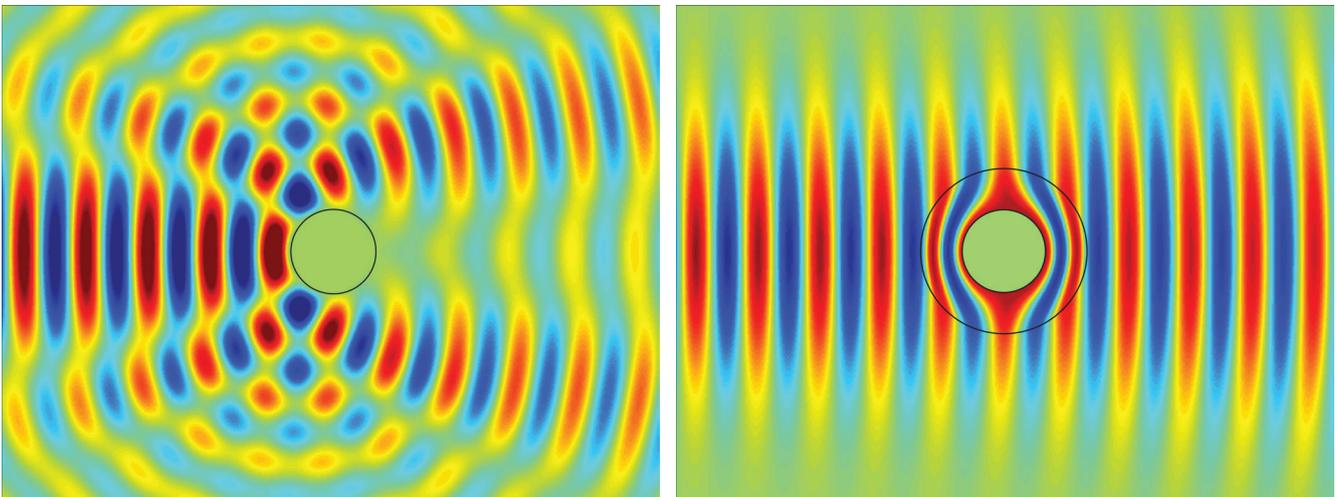


ABBILDUNG 1. Steuerung einer von einem Objekt gestreuten akustischen Welle. Links: Die Streuung einer links von einem festen Objekt ausgehenden Welle ist offensichtlich: Die Reflexion verläuft quasi gerichtet, der Schatten ist tief und ein Teil der Wellenenergie wird in alle Richtungen abgestrahlt. Rechts: Umgibt man dasselbe Objekt mit einer idealen Tarnkappe, fehlen sowohl Reflexion als auch Schatten, während die Energie nahezu verlustfrei um das Metamaterial-Objekt herum übertragen wird.

Metamaterialien sind künstlich hergestellte, speziell angefertigte Materialien mit Eigenschaften, die in der Natur nicht vorkommen, wie etwa ein Brechungsindex von Null oder gar ein negativer Brechungsindex. Das Ergebnis ist die Erschaffung modernster Designs und Funktionen, wie etwa Superlinsen und Schallabsorber. Neueste Forschungen widmen sich der beliebigen Beeinflussung von Schall durch Vorrichtungen aus Metamaterialien, so auch dem Ziel, Objekte akustisch unsichtbar zu machen.

Die Forschungen zeigen Erfolge. Mit wenig mehr als ein paar perforierten Kunststoffplatten sowie beeindruckender mathematischer Modellierung und numerischer Simulation haben Ingenieure an der Duke University der Welt die erste akustische 3D-Tarnkappe präsentiert. Die Vorrichtung lenkt Schallwellen problemlos um ein Objekt herum, füllt den Schatten und

vermittelt den Eindruck, dass die Wellen gerade durch die umgebende Luft gelaufen sind.

Akustische Unsichtbarkeit ist nur ein Aspekt des breiten Begriffs der Transformationsakustik, wo sorgfältig entwickelte Materialien Schallwellen nahezu beliebig verformen und steuern können. Von Science Fiction bis zum Alltagsleben gibt es viele mögliche Einsatzfelder für diesen technologischen Durchbruch.

⇒ ENTWICKLUNG STILLER METAMATERIALIEN

Die Duke University nimmt gemeinsam mit dem MIT, University of California, Berkeley, der Rutgers University und der University of Texas in Austin an einem durch das US-amerikanische Office of Naval Research finanzierten 5-Jahres-Forschungsprogramm teil, das neue Konzepte für akustische Metamaterialien mit effektiven Materialparametern

entwickeln soll, die in der Realität hergestellt werden können. Steve Cummer, Professor für elektrische und computergestützte Technik an der Duke University, berichtet: „Mathematische Modellierung ist der Ausgangspunkt. Das Design der akustischen Metamaterialien

„Mit COMSOL war es leicht und recht unkompliziert, die Materialeigenschaften und die dahinter stehenden dynamischen Gleichungen zu beeinflussen.“

— STEVE CUMMER, ELEKTRISCHE UND COMPUTERGESTÜTZTE TECHNIK, DUKE UNIVERSITY

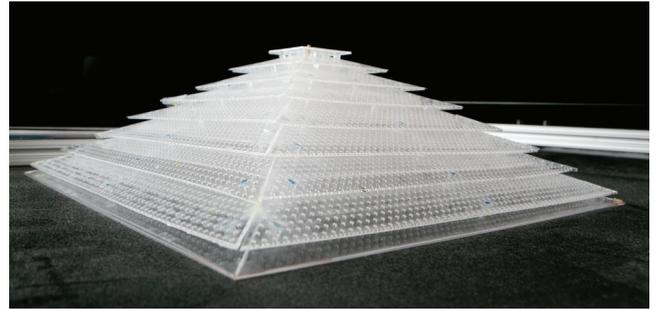
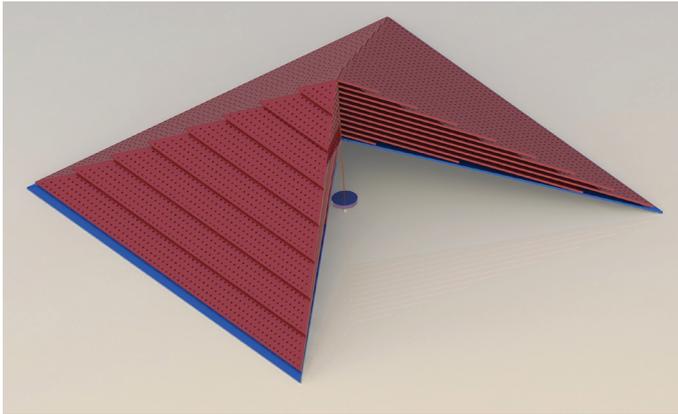


ABBILDUNG 2. Entwurf (links) und Konstruktion (rechts) der pyramidenförmigen akustischen 3D-Tarnkappe

wird durch numerische Simulationen optimiert, die wir dann auf moderne Fertigungstechniken übertragen und experimentell prüfen.“

Derzeit arbeitet die Gruppe konzentriert an der Entwicklung akustischer Metamaterialstrukturen, die in wasserbasierten Umgebungen, einschließlich des menschlichen Körpers, eingesetzt werden können, um eingehende und ausgehende Schallwellen beliebig transformieren und steuern zu können. Akustische Tarnkappen (Abbildung 1) haben sich als nützliche Testplattform zur Demonstration der beliebigen Steuerung durch Transformationsakustik erwiesen. Die Konstruktion innerhalb einer wässrigen Umgebung stellt einen weitergehenden Schritt in der Metamaterialforschung dar, die von der elektromagnetischen Tarnkappe und Transformationsoptik zur akustischen Tarnkappe und Transformationsakustik für 2D- und anschließend 3D-Strukturen in der Luft überging.

Die COMSOL Multiphysics®-Software bietet hier bereits seit den frühen Zeiten der elektromagnetischen Tarnkappe in jedem Stadium der Forschung wertvolle Unterstützung. Cummer erläutert: „Für unseren ersten Artikel, in dem wir Simulationen elektromagnetischer Tarnkappen mit realen elektromagnetischen Materialparametern zeigten, haben wir die COMSOL®-Software insbesondere deshalb verwendet, weil es eines der einzigen elektromagnetischen Software-Tools war, das gezielt anisotropische elektromagnetische Materialparameter berücksichtigen konnte.“

Um das Akustikthema anzugehen, starteten die Forscher mit der Ableitung der erforderlichen Materialeigenschaften. Cummer erklärt: „Um Schall mit Transformationsakustik beliebig zu steuern, wenden wir zunächst eine Koordinatentransformation an um zu beschreiben, wie man das Schallfeld in einer bestimmten Vorrichtung beugen, drehen oder verformen möchte. Ist diese Koordinatentransformation definiert, kann man die

effektiven Materialparameter ableiten, die zur Erzeugung einer bestimmten Verformung des Schallfelds erforderlich sind.“

Der so erhaltene Satz von Materialparametern ist fast immer anisotropisch, was bedeutet, dass die Materialeigenschaften sich je nach Richtung unterschiedlich verhalten. Um dies zu berücksichtigen, mussten die Forscher in der Lage sein, die Gleichungen zu verändern, welche die simulierten physikalischen Effekte darstellten. „Mit COMSOL war es sehr leicht und recht unkompliziert, die Materialeigenschaften und die dahinter stehenden dynamischen Gleichungen zu beeinflussen. Dies war besonders wichtig, denn wir konnten dem Modell genau diesen zusätzlichen Dreh der Anisotropie hinzufügen und mit der Simulation einiger unserer im Rahmen der Transformationsakustik untersuchten Entwürfe beginnen“, fügt Cummer hinzu.

Die so erhaltenen Realmodelle waren sehr erfolgreich und ihre Leistung stimmte nach Ansicht von Cummer „erstaunlich gut“ mit den Simulationen überein. „Um zu zeigen, dass eine Struktur so funktioniert, wie sie soll, und den gewünschten physikalischen Effekt erbringt, ist es bei heutigen Publikationen zu Metamaterialien der goldene Standard, das gesamte vom akustischen Metamaterial erzeugte Schallfeld zu messen und mit der Simulation zu vergleichen“, fügt er hinzu.

Die COMSOL Multiphysics®-Software kann zuverlässig diese Übereinstimmung erreichen, selbst wenn menschliches Versagen den Forschungserfolg behindern sollte. Bei einem früheren Projekt wurde eine akustische 2D-Tarnkappe mit einer Reihe kleiner Löcher entworfen und gebaut. Doch die Tests stimmten nicht mit der Simulation überein. Das Team war verwirrt und konnte keinen vernünftigen Grund für diese

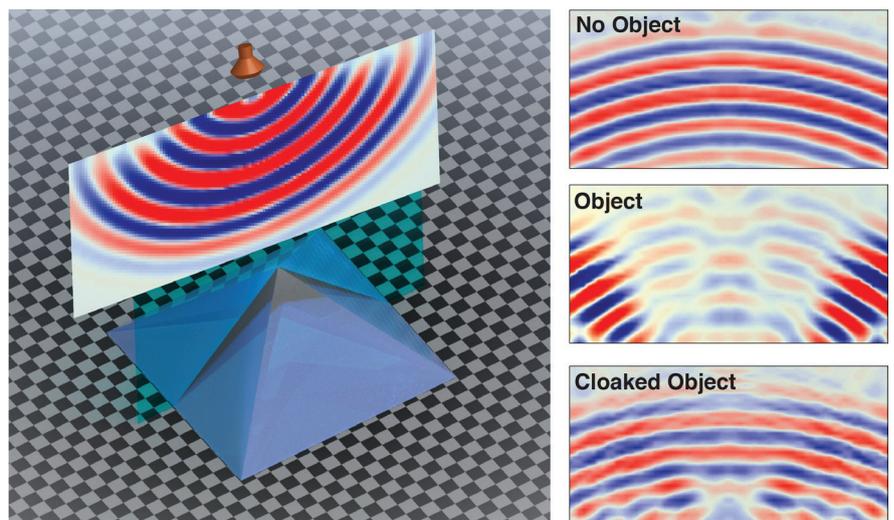


ABBILDUNG 3. (Links) Zur Prüfung der Metamaterial-Tarnkappe wird ein Schallimpuls in drei verschiedenen Konfigurationen gesendet. Der reflektierte Schallimpuls wird mit einem Mikrofon gemessen. (Rechts) Der vom Testobjekt reflektierte Schallimpuls unterscheidet sich deutlich von der Konfiguration ohne Objekt. Wird die Tarnkappe auf dem Objekt platziert, ist der reflektierte Impuls nahezu identisch zur Konfiguration ohne Objekt, was die Unsichtbarkeit gegenüber dem Schall demonstriert.

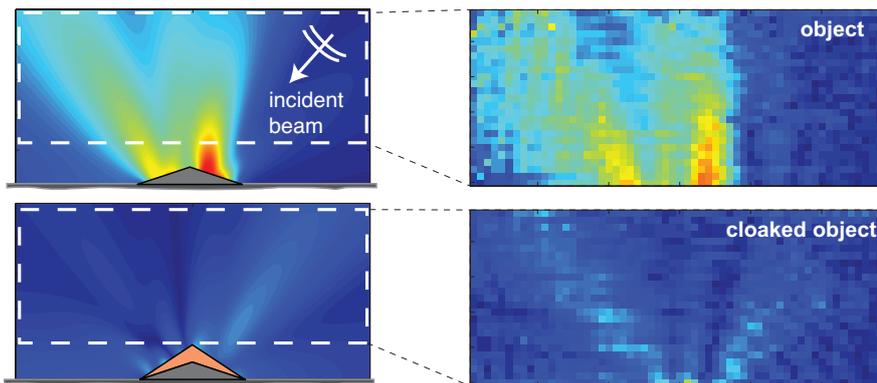


ABBILDUNG 4. Die gute Übereinstimmung zwischen den Simulationen (links) und Messungen (rechts) der akustischen Streufelder zeigt nicht nur den Grad der akustischen Tarnung des Objekts sondern belegt auch die Exaktheit, mit der COMSOL die Leistung der Vorrichtung prognostiziert.

Abweichung finden. Schließlich stellten sie fest, dass die Löcher im Modell aufgrund einer Verwechslung während des Aufbaus nicht die richtige Größe hatten.

Cummer erläutert: „Die Effizienz von COMSOL war bei unserer Arbeit von grundlegender Bedeutung, denn wir können numerische Simulationen sowohl der idealisierten Parameter als auch vom tatsächlich gebauten Modell durchführen, um zu ermitteln, dass beide das gleiche Verhalten aufweisen.“

⇒ HERSTELLUNG UND PRÜFUNG AKUSTISCHER METAMATERIALIEN

Die Entwicklung einer akustischen 3D-Tarnkappe verwendete dieselben perforierten Basisplatten in Pyramidenform (Abbildung 2), unter denen ein Objekt für Schallwellen verborgen werden konnte. Diese Konstruktion mag in ihrem Entwurf zunächst recht simpel erscheinen. Viele Faktoren sind jedoch auszubalancieren, um die gewünschte akustische Transformation zu erzielen, darunter der Lochdurchmesser, die Abstände und die Winkel zwischen den Platten. Alle diese Parameter ergeben in Kombination genau die richtige Menge akustischer Anisotropie, um den gewünschten Effekt zu erzielen.

Die Pyramide stellte die allererste akustische 3D-Tarnkappe dar. Labormessungen bestätigen, dass sie in der Lage ist, Schallwellen so umzuleiten, dass der Eindruck entsteht, dass sowohl die Tarnkappe als auch alles darunter nicht vorhanden ist (Abbildung 3). Die Vorrichtung funktioniert in allen drei Dimensionen, unabhängig von der Position der Schallquelle und der Position des Beobachters. Sie bietet Potential für zukunftssträchtige Anwendungen wie

etwa die Vermeidung der Sonarortung und architektonische Akustik.

Angesichts der erforderlichen Dicke der akustischen Tarnkappe ist Letzteres die plausiblere Möglichkeit: akustische Tarnvorrichtungen könnten eingesetzt werden, um den Klang in einer Konzerthalle zu optimieren oder Geräusche zum Beispiel in einer lauten Restaurantumgebung zu dämpfen. Cummer erläutert: „Das Tarnmaterial ist nicht einfach eine magische Lackierung, die man aufsprühen kann. Ganz allgemein gesagt ist dies nicht die Art und Weise, wie solche Ideen in die Praxis umgesetzt werden können.“

Jenseits der Design-Phase wurden Modellierung und Simulation auch eingesetzt, um die quantitative Leistung solcher Metamaterial-Tarnkappen zu prognostizieren, einschließlich einer detaillierten Analyse der Streuung von einer 2D-Tarnkappenanordnung (Abbildung 4). Dies zeigt nicht nur, in welchem Maß das Streufeld durch die Tarnkappe reduziert wird, sondern COMSOL sagt auch exakt die Menge der Streufeldreduktion für Konstruktionsveränderungen bei der Herstellung des akustischen Metamaterials vorher.

⇒ VON DER LUFT INS WASSER: ANDERES MEDIUM, NEUE HERAUSFORDERUNGEN

Inzwischen liegt besonderes Augenmerk darauf, das Verhalten akustischer Metamaterialien in einer wässrigen Umgebung zu steuern, wie etwa unter der Meeresoberfläche oder innerhalb des menschlichen Körpers. Multiphysikalische Modellierung wird als grundlegendes Design-Werkzeug eingesetzt, um zunächst die zuvor entwickelten Strukturen zu beschreiben und Simulationen auszuführen, um das Verhalten

im Wasser zu prüfen. Der Schritt von der Luft ins Wasser ist schwerer, als es zunächst erscheint.

Das Problem dabei ist, dass die mechanischen Eigenschaften des Wassers stark von jenen der Luft abweichen. Cummer erklärt: „Deshalb ist es in der Luft möglich, akustische Metamaterialien aus Kunststoff oder jedem beliebigen anderen passenden Feststoff herzustellen, denn ein Feststoff kann grundsätzlich als optimal starre Konstruktion zur Steuerung des Schallfelds dienen. Es ist eigentlich egal, woraus sie besteht.“

Doch in der Massendichte und Drucksteifigkeit unterscheidet sich Wasser nicht so sehr von Feststoffen. „Wenn Schallwellen im Wasser auf ein Feststoffobjekt treffen, werden die mechanischen Eigenschaften dieses Feststoffs sehr wichtig. Wir müssen in der Design-Phase neue Techniken einführen, damit wir die Interaktion der Schallwellenenergie mit dem Feststoff steuern und so die gewünschten Eigenschaften bewahren können“, fügt er hinzu.

„Die Möglichkeit, Akustik und Strukturmechanik leicht zusammenzuführen, ist von höchster Bedeutung, wenn wir es mit Strukturen unter Wasser zu tun haben, denn dann können wir die mechanischen Reaktionen des Feststoffs, den wir zur Herstellung des Metamaterials verwenden, nicht ignorieren. Bei akustischen Effekten in der Luft ist es kein Problem, den Feststoff einfach als unbegrenzt steifes Material zu behandeln. Das ist leicht und effizient zu berechnen. Unter Wasser muss jedoch unbedingt die Fluid-Struktur-Wechselwirkung berücksichtigt werden. Mit COMSOL ist das ganz einfach.“

Der Sprung von der Forschung zu kommerziell verwertbaren Metamaterialstrukturen ist alles andere als leicht und bedeutet, dass solche Strukturen zuverlässig und wiederholbar produziert werden können. Cummer fasst zusammen: „Der nächste Schritt bei der Herstellung jeglicher akustischer Metamaterialien ist die Fähigkeit des Materials, bestimmte quantitative Werte zu erfüllen. Dies bringt einen deutlich komplizierteren Design-Prozess mit sich – aber genau dafür wurde COMSOL entwickelt. [Es ermöglicht] eine viel umfassendere Designiteration und den intelligenten Einsatz von Optimierung, um Freiheitsgrade im Design zu ermitteln, die dann zum Erreichen der spezifischen numerischen Ziele genutzt werden kann. Genau das ist der Schlüssel dafür, diese Ideen vom Stadium des Wirksamkeitsnachweises auf den Weg zu etwas tatsächlich in der realen Welt praktisch Nutzbarem zu bringen.“ ❖

Wackeln, Klappern und Schwingen

Norwegische Forscher untersuchen, wie sich niederfrequente Schallwellen in Gebäuden ausbreiten, um Empfehlungen für Konstruktionsanpassungen zu erarbeiten, die störende Vibrationen abmildern.

von **JENNIFER HAND**



Wer schon einmal in der Nähe eines Flughafens übernachtet hat, kennt das Gefühl: Ein Flugzeug am frühen Morgen beendet den Schlaf, nicht nur aufgrund des Motorgeräusches, sondern auch weil alles rundherum zu wackeln scheint. Ähnlich ergeht es Menschen in der Nähe von Windenergieanlagen, Militärstandorten und Krankenhäusern mit Hubschrauberlandeplatz. Oft klagen sie darüber, dass bei Lärm von draußen Fenster klappern und alltägliche Objekte zu summen scheinen. Noch verwirrender für sie ist die Tatsache, dass sie auch dann störende Vibrationen wahrnehmen, wenn gar kein Geräusch zu hören ist.

Liegt die Schallresonanz bei 20 Schwingungen pro Sekunde (20 Hz) oder darunter, wird dies als Infraschall bezeichnet, was bedeutet, dass das eigentliche Geräusch für das menschliche Ohr nicht wahrnehmbar ist. Die Auswirkungen sind jedoch sehr leicht feststellbar. Treffen die Wellen auf Fenster, breiten sich am Boden aus und beeinflussen Innenwände, so erzeugen sie spürbare Schwingungen. Niederfrequente Schallwellen sind bekannt dafür, lästige Störungen zu verursachen.

⇒ NIEDERFREQUENTE SCHALLWELLEN IN GEBÄUDEN

Geräusche gehören zum modernen Leben. Es gibt offizielle Standardwerte, die anhand des Schalldruckpegels hochfrequente Schallwellen als unangenehm, störend oder gefährlich für den Menschen klassifizieren. Nach Ansicht von Finn Løvholt vom Norwegian Geotechnical Institute (NGI) ist die Entstehung von Gebäudeschwingungen aufgrund von Infraschall ein noch nicht umfassend erforschter Bereich. Aus diesem Grund hat das NGI, ein internationales Forschungs- und Beratungszentrum für Geowissenschaften, über einige Jahre hinweg Untersuchungen im Auftrag des norwegischen Verteidigungsministeriums angestellt.

„Niederfrequente Schallwellen werden auf ihrem Weg durch die Luft weniger absorbiert als hochfrequente Schallwellen. Daher überwinden sie größere Entfernungen. Die von außen ins Innere von Gebäuden übertragene Schallmenge ist

„Niemals zuvor haben wir einen solchen Grad an Übereinstimmung mit realen Tests erzielt. Das liegt daran, dass wir mit COMSOL Multiphysics die verschiedenen Strukturelemente exakt modellieren konnten.“

– FINN LØVHOLT, NGI

größer. Uns interessiert, was an der Schwelle des Hörbaren passiert“, erläutert Løvholt. „Wir möchten verstehen, wie Schall von externen Quellen mit Gebäuden interagiert und Schwingungen erzeugt, die vom Menschen wahrgenommen werden. Dann können wir Gegenmaßnahmen empfehlen, um Schwingungen zu verhindern und eventuell Standardwerte vorschlagen, um dem Bedarf nach Anerkennung eines „Störfaktors“ Rechnung zu tragen.“

⇒ SIMULATION DER AUSBREITUNG VON SCHALLWELLEN

Løvholt und seine Kollegen beschlossen, ein Computermodell zu erstellen, um die mechanischen Vorgänge beim Auftreffen und Eindringen niederfrequenter Schallwellen in Gebäude einzeln zu betrachten. Sie setzten die COMSOL Multiphysics®-Software zur Simulation einer Holzkonstruktion mit zwei

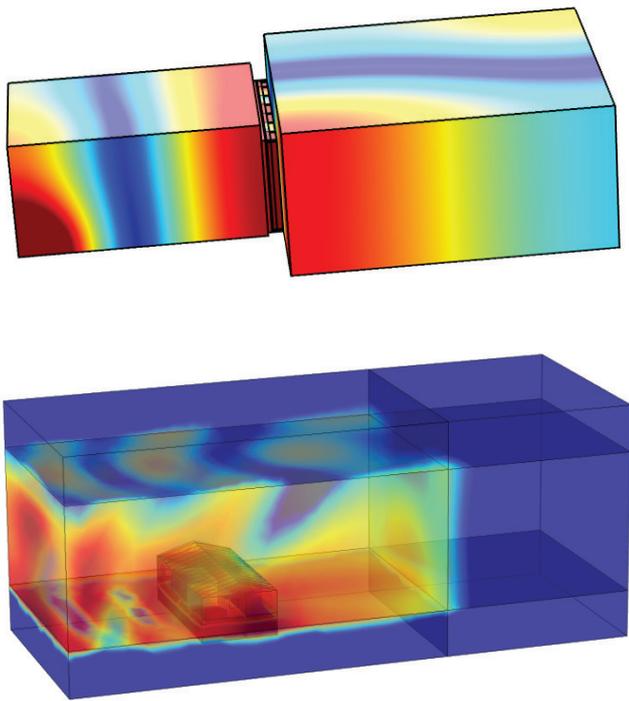


ABBILDUNG 1. Oben: Simulierter Schalldruck in einem Labor mit zwei durch eine Wand getrennten Räumen. Ein Lautsprecher befindet sich im linksseitigen Raum. Die Simulationen zeigen, dass die akustische Resonanz innerhalb jedes Raums die Schalldämmung beeinflusst. Unten: Simulation niederfrequenter Schallwellen von außen, um und innerhalb eines Gebäudes. In beiden Fällen zeigen die Farben die Variation des Schalldruckpegels innerhalb der Räume und der Wandhohlräume.

durch eine Wand getrennten Räumen ein (siehe Abbildung 1, oben), die in etwa die Anordnung des Laborexperiments abbildete. Innerhalb des Modells wiesen sie einem Raum einen Lautsprecher, dem anderen ein Mikrofon zu und verteilten verschiedene Sensoren, um Schalldruckpegel und Schwingungen zu überwachen. Jede Komponente wurde sorgfältig modelliert, so auch der Stahlrahmen und der Lufthohlraum sowie die Wandbalken, Fenster, Sperrholz- und Gipskartonplatten. „Jedes Element verfügt über eine Resonanz, die von der Länge der Schallwelle und von der Druckverteilung abhängig ist. So besteht etwa hoher Druck im Lautsprecherraum und niedriger Druck im Mikrofonraum, und die Resonanz einer Wand hängt von ihrer Länge, Dicke und Steifigkeit ab“, erläutert Løvholt.

Auch die Verbundresonanz

zusammengefügter Komponenten — zum Beispiel zwei miteinander verschraubte Holzteile — war zu berücksichtigen. „Der Vorteil von COMSOL Multiphysics besteht darin, dass wir alle Parameter eingeben können, die wir überwachen müssen. Insbesondere können wir physikalische Effekte koppeln, also zum Beispiel die Interaktion der Außenakustik mit der strukturellen Dynamik in Innenräumen betrachten. Das funktioniert in beide Richtungen, so dass wir Rückkopplungen erkennen können. Für unsere Analyse ist das von grundlegender Bedeutung, denn Schallwellen können eine enorme Bandbreite und Vielzahl von Resonanzen hervorrufen. Mit dem Modell können wir diese tatsächlich sehen.“

Das NGI-Team überprüfte dann seine Simulation anhand von Labortests mit niederfrequenten Schallwellen, die durch eine

Holzkonstruktion mit zwei Räumen übertragen wurden. Løvholt erläutert, dass als wichtigste Daten die Bewegung der Wand und der Schalldruckpegel gemessen wurden. Die Ergebnisse zeigen eine enge Übereinstimmung mit dem COMSOL Multiphysics-Modell (siehe Abbildung 2). „Die Resonanz der Wand ist ganz eindeutig und wird vom Modell nahezu perfekt abgebildet. Das ist der spektakulärste Aspekt.“

Das Modell zeigt, dass die Schallübertragung innerhalb eines Gebäudes von der Art und Weise abhängt, wie niederfrequente Wellen mit den grundlegenden Gebäudekomponenten interagieren, von den Abmessungen des Raums und der Weise, wie Luft aus der Gebäudehülle austritt. Schwingungen in Decken und Wänden scheinen die wichtigste Quelle für niederfrequente Schallwellen in Gebäuden darzustellen, wobei Bodenschwingungen durch den Schalldruck innerhalb des Raums verstärkt werden.

⇒ BILLIGER UND SCHNELLER ALS PHYSIKALISCHE PRÜFUNGEN

„Wir verfügen jetzt über ein Werkzeug, um Schall und Schwingungen bei niedrigen Frequenzen zu prognostizieren“, berichtet Løvholt. „Wir können es beim Design einsetzen und Abmilderungsmaßnahmen wie die Beschichtung von Fenstern und die Versteifung von Wänden testen — ob eine Wand oder ein Fenster, dass sich weniger bewegt, weniger Schall überträgt. Außerdem zeigt uns das Modell den Einfluss kleiner Details auf das System: zum Beispiel wie die Schraubenverbindung zwischen Balken und Gipskartonplatten den Effekt einer Gegenmaßnahme abschwächt, da sie tatsächlich die Gesamtsteifigkeit der Konstruktion senkt.“

In einem nächsten Schritt wird das Team umfassende Feldversuche an einem realen Haus in Norwegen durchführen, das Fluglärm ausgesetzt ist. In der Zwischenzeit wird das Modell weiterhin eingesetzt und weiterentwickelt. „Niemand zuvor haben wir einen solchen Grad an Übereinstimmung mit realen Tests erzielt. Das liegt daran, dass wir mit COMSOL Multiphysics die verschiedenen Strukturelemente exakt modellieren konnten“, stellt Løvholt abschließend fest. „Das Modell verschafft uns die Möglichkeit, Entscheidungen zu treffen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Das ist viel billiger und schneller als physikalische Prüfungen. Das Modell kann später erweitert werden, um die Schallausbreitung und Schwingungen in einem vollständigen Gebäude zu simulieren“ (siehe Abbildung 1 unten). ❖

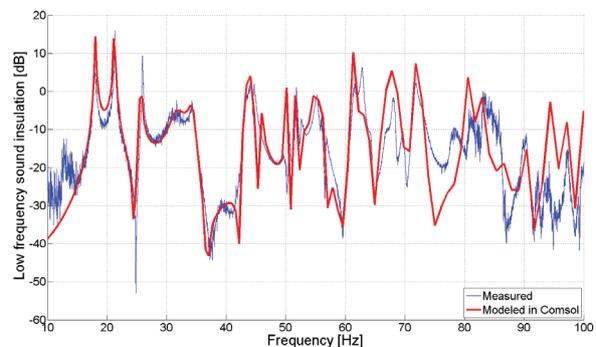


ABBILDUNG 2. Das Modell erfasst exakt den Ort der Resonanz sowie die Stärke mit einer Abweichung im Bereich weniger Dezibel. Mit steigender Frequenz sind mehr Komponenten in immer kleineren Strukturen betroffen. Dies schlägt sich in einer steigenden Abweichung zwischen den Messungen und den Modellergebnissen nieder.

Innovativ in der Forschung für Hörgeräte

Die Ingenieure von Knowles sorgen für Zusammenarbeit in der Hörgerätebranche, um mit multiphysikalischer Simulation Rückkopplungen den Kampf anzusagen.

von **GARY DAGASTINE**

In den USA sind Statistiken zufolge fast 20% der Bevölkerung hörgeschädigt — diese Zahl könnte tatsächlich auch höher sein, da viele Menschen nur zögerlich zugeben, ein Hörproblem zu haben. Wer sich in Behandlung befindet, verlässt sich auf winzige und diskrete Hörhilfen, um das Hören und somit die Lebensqualität zu verbessern. Bedeutende Forschungs- und Entwicklungsbemühungen sind erforderlich, um ein Hörgerät vom Stadium des Prototyps in eine marktfähige Hörhilfe zu verwandeln.

Jeder Tag bringt neue technische Herausforderungen für die Ingenieure der Branche. Ein wichtiges Problem ist die Rückkopplung, die hochtöniges Quietschen oder Pfeifen verursacht und so den Nutzen der Hörhilfe einschränkt. „Rückkopplungen treten meist auf, wenn das Mikrofon einer Hörhilfe Geräusche oder Schwingungen aufnimmt, die versehentlich vom in den Hörkanal geleiteten Klang abgeleitet wurden und sie zurück durch den Verstärker schickt, was zu unerwünschten Oszillationen führt“, erläutert Brenno Varanda, erfahrener Elektroakustikingenieur bei Knowles Corp. in Itasca (Illinois).

„Für die meisten Kunden von Knowles stellt die Entwicklung einer neuen Hörhilfe einen zeit- und kostenintensiven Prozess dar, der bis zu seinem Abschluss zwei bis sechs Jahre in Anspruch nehmen kann“, erklärt Varanda. Exakte Modellierung unterstützt die Entwickler bei der Auswahl von Lautsprechern, einer verfeinerten Anbringung von Schwingungsisolation und Komponenten zur Reduzierung der Lautsprecherenergie, die ins Mikrofon zurückgeleitet wird. Die Branche benötigt dringend einfache Wandlermodelle, die dieses Verfahren beschleunigen und den Kunden effektivere Optionen bereitstellen. Gesamtmodelle von Lautsprechern und Mikrofonen sind sehr komplex und umfassen zahlreiche

Faktoren, die zur Betrachtung von Rückkopplungen nicht erforderlich sind. „Natürlich sind die elektromagnetischen, mechanischen und akustischen Grundlagen unserer Wandler wichtig für die Entwickler dieser Wandler bei Knowles, aber all dieses komplexe Wissen ist für unsere Kunden nicht unbedingt nützlich“, erläutert Varanda.

Als weltweit führendes Unternehmen und Lieferant von Wandlern für Hörhilfen, intelligente Audiosysteme und spezielle Akustikkomponenten hat Knowles eine multilaterale Initiative eingeleitet, um schwingungsakustische Modelle für Wandler zu entwickeln, die leicht zu integrieren und kompatibel mit der Technologie ihrer Kunden sind. Die Modelle sollen dazu beitragen, Entwürfe für Hörhilfen effizienter und gleichzeitig ohne Abstriche bei der Genauigkeit aus dem Prototyp-Stadium zum Endprodukt zu führen.

⇒ HÖRHILFEN-DESIGN UND RÜCKKOPPLUNGEN

Bei der Entwicklung von Hörhilfen müssen die Ingenieure zwei gegensätzliche Anforderungen berücksichtigen. Die Geräte müssen kompakt und unaufdringlich gestaltet werden, jedoch zugleich eine leistungsstarke Klangaussgabe erzeugen, um die Hörschädigung des Nutzers auszugleichen. Kompakt und unaufdringlich gestaltete Hörhilfen werden vom Nutzer eher getragen. Dies macht eine Lösung des Rückkopplungsproblems deutlich schwieriger.

„Die übliche Design-Herausforderung ist es, alle Hardware-Komponenten auf kleinstmöglichem Raum unterzubringen, ohne dass Rückkopplungsinstabilität entsteht“, fährt Varanda fort.

Zu einer typischen Hinter-dem-Ohr-Hörhilfe (HdO-Gerät) gehören Mikrofone zur Umwandlung der Umgebungsgeräusche in elektrische Signale, ein digitaler Signalverarbeiter und Verstärker zur

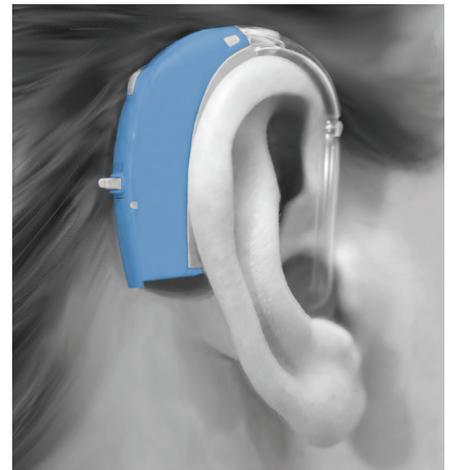
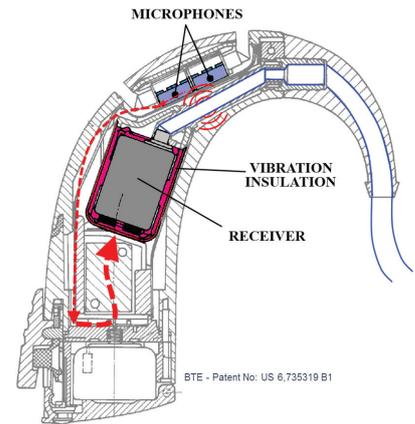


ABBILDUNG 1. Zu einem typischen HdO-Hörgerät gehören neben weiteren Komponenten Mikrofone, Schwingungsisolation und ein Receiver. Das geringe Platzangebot für diese Komponenten kann zu unangenehmen akustischen und mechanischen Rückkopplungen führen. (Bild-Quellenangabe: Knowles Corp.)

Verarbeitung und Verstärkung der elektrischen Signale und ein kleiner Lautsprecher, auch als Receiver bezeichnet (Abbildung 1). Der Receiver oder Lautsprecher empfängt verstärkte elektrische Signale und wandelt sie in akustische Energie, also Schall, um, der dann durch ein Röhrchen oder ein Ohrpassstück in den Hörkanal geleitet wird.

Der Receiver enthält einen elektromagnetisch gesteuerten Hebel — den Reed —, der mit einer Membran verbunden ist, die durch ihre Oszillationsbewegung Schall erzeugt. Die internen elektromagnetischen Kräfte generieren auch Reaktionskräfte, die Schwingungen durch das Hörgerät übertragen und Schall erzeugen, der vom Mikrofon erfasst wird. Dieses Signal wird wiederum vom Verstärker verarbeitet, an den Receiver weitergeleitet und erzeugt so eine Rückkopplung. Dieser Ablauf wird in Abbildung 1 dargestellt.

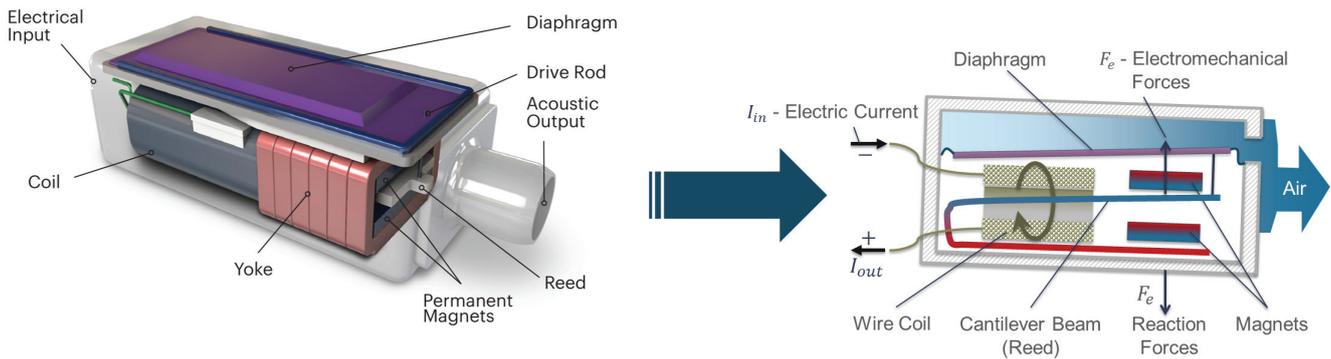


ABBILDUNG 2. Der Receiver, eine wichtige Hörgerätekomponente, enthält einen kleinen Lautsprecher mit einer elektromagnetisch gesteuerten Membran, die Schall erzeugt. Interne elektromagnetische Kräfte verursachen strukturelle Schwingungen, die zu mechanischen Rückkopplungen führen.

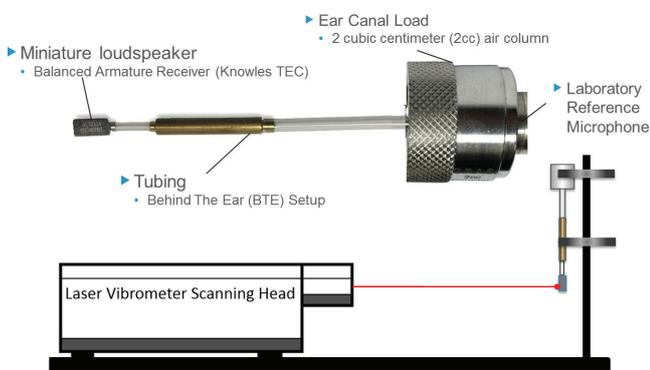


ABBILDUNG 3. Hardware und schematische Darstellung der Testanordnung.

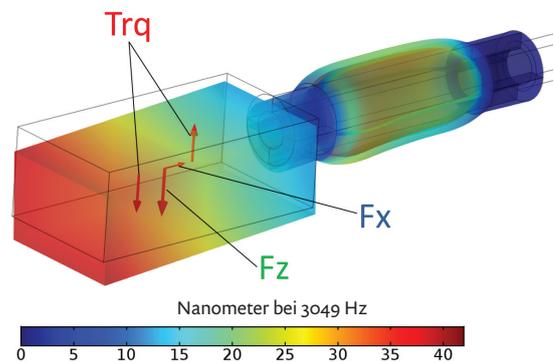


ABBILDUNG 4. Kraft und Verschiebungsergebnisse der Simulation bei 3 kHz für Receiver und Silikonröhrchenaufbau.

⇒ DAS „BLACKBOX“-MODELL

Einzigste Funktion des Receivers ist es, das verstärkte Spannungssignal vom Mikrofon in Klang umzuwandeln. Obwohl die Konstruktion recht simpel erscheint, handelt es sich um einen komplexen Prozess (Abbildung 2). Das elektrische Signal wird zunächst in ein magnetisches Signal, dann in ein mechanisches Signal und schließlich in ein akustisches Signal umgewandelt. Jeder dieser Schritte weist seine eigenen, frequenzbedingten Eigenschaften auf. Das Verständnis der kombinierten Effekte aller interner Komponenten ist grundlegend wichtig für die Fähigkeit, effektive Receiver für die verschiedenen Arten von Hörhilfen zu entwickeln. Die Ingenieure von Knowles setzten bereits seit den 1960-er Jahren komplexe Kreismodelle ein, um alle internen elektrisch-magnetisch-mechanisch-akustischen Effekte abzubilden.

Eine präzise Modellierung des komplexen Receivers erfordert ein abschreckend umfassendes und komplexes multiphysikalisches Finite-Elemente-Modell, das für eine schnelle und effiziente Entwicklung von Hörhilfen unpraktisch ist. Das Problem wurde gelöst, als Dr. Daniel Warren, ein anerkannter

Experte für Empfänger- und Mikrofonforschung der Hörgerätebranche, 2013 ein „Blackbox“-Modell einführte. Dieses Modell verwendet ein Minimum einfacher Schaltkreiskomponenten zur Erfassung der wichtigsten elektroakustischen Übertragungsfunktionen zwischen Spannung und Ausgabeschalldruck für vorgesteuerte Magnetankerreceiver, wobei Faktoren nicht berücksichtigt werden, die für die Betrachtung von Rückkopplungen nicht benötigt werden.

Wichtiger Schritt bei der Vereinfachung des Modells war der Nachweis durch Warren und Varanda, dass der vereinfachte elektroakustische Schaltkreis durch eine lediglich geringfügig erhöhte Komplexität zu einem leistungsfähigen schwingungsakustischen Modell umgewandelt werden konnte. „Dies wird durch Abtastung eines Abschnitts des „Blackbox“-Schaltkreises erreicht, wo die Spannung an den Drosseln direkt proportional zu den internen mechanischen Kräften ist, die für die strukturellen Schwingungen verantwortlich sind“, erläutert Warren.

Das „Blackbox“- und das schwingungsakustische Modell mussten getestet und mittels realer akustischer und mecha-

nischer Erweiterungen des Receivers validiert werden, bevor sie für die Produktentwicklung eingesetzt werden konnten. 2014 begann eine internationale Zusammenarbeit zwischen Knowles und seinen Kunden der Hörgerätebranche, um die Modelle unter Einsatz der COMSOL Multiphysics®-Software und mit Standardtests zu validieren.

⇒ ZUSAMMENARBEIT FÜR DIE VALIDIERUNG

Zur Validierung der Modelle mussten die Ingenieure unter Verwendung einer leicht mit FEA modellierbaren Struktur die akustische Ausgabe und die Schwingungskräfte gleichzeitig messen. Wie gewöhnliche Tests für Hörhilfen sah dieser Test ein kurzes Röhrchen vor, das zu einem umschlossenen Hohlraum mit einem Volumen von 2 Kubikzentimetern führt — ein Standardwert für die akustische Last im Hörkanal (Abbildung 3). Der Schalldruck innerhalb des Hohlraums wird mit einem Mikrofon in Laborqualität gemessen. Zur weiteren Prüfung der Gültigkeit des Modells wurde der Receiver auch unter Verwendung einer komplexen Röhrchenanordnung in Anlehnung an

ein HdO-Hörgerät getestet. Die langen Röhren dieser Anordnung verfügen über unterschiedliche Durchmesser und sind lang genug, um multiple akustische Resonanzen zu unterstützen. Gleichzeitig wurde die akustische Ausgabe gemessen und die strukturelle Bewegung des Receivers wurde mit einem Laser-Schwingungsmesser erfasst. Sowohl translatorische als auch rotierende Bewegung wurden durch Überwachung der Bewegung an mehreren Punkten an der Oberfläche des Receiver-Gehäuses gemessen.

Warren und Varanda arbeiteten mit verschiedenen Knowles-Kunden zusammen, um die vorstehend beschriebenen Messungen auszuführen. Mit der Unterstützung durch COMSOL Multiphysics konnten sie das vereinfachte schwingungsakustische Stromkreismodell in einer simulierten Nachbildung

des beschriebenen Testaufbaus implementieren. Die Simulation koppelt die mechanische Interaktion zwischen der Bewegung von Receiver und Silikonröhrenaufbau, den thermoviskosen Verlusten innerhalb der verschiedenen Röhrendurchmesser und der akustischen Schalldrucklasten innerhalb des Hohlraums und der Röhren mit den internen elektromagnetisch-akustischen Effekten im „Blackbox“-Receivermodell.

Das COMSOL-Modell zeigte die Abhängigkeit zwischen dem Ausgabedruck und den mechanischen Kräften der angelegten Spannung, Frequenz und Materialeigenschaften. Abbildung 4 zeigt die Verschiebungsergebnisse der Simulation bei 3 kHz und die mit dem Receiver gekoppelten Reaktionskräfte.

Varandas Vergleich der Simulationsergebnisse mit den physikalischen Ergebnissen ergab eine ausgezeichnete Übereinstimmung (Abbildung 5). Die auf die Membran wirkenden Kräfte und der Reed stehen in akustischer Abhängigkeit zum Ausgabeschalldruck. Die Kopplung zwischen den auf die Membran wirkenden Kräften mit den strukturellen Reaktionskräften erwies sich jedoch wie erwartet als direkt proportional.

⇒ WEITERGABE DER ERKENNTNISSE

Knowles stellte den Technikern anderer Hörgeräteunternehmen sein Modell bereit, damit auch dort die jeweiligen Rückkopplungsprobleme gelöst werden könnten. Mit dieser umfassenden Darstellung des akustischen, mechanischen und elektromagnetischen Verhaltens in der Hardware sind die Entwickler bestens ausgerüstet, um ihre Produkte zu optimieren.

„COMSOL ist eines der wenigen Modellierungs- und Simulations-Tools, mit dem man den vereinfachten „Blackbox“-Receiverkreis mit Akustik und Feststoffmechanik koppeln kann“, erläutert Varanda.

„Bisher waren Tests und Optimierung von Hörgeräntwürfen gleichermaßen Kunst wie Wissenschaft. Wir freuen uns darauf, neue Hörgerätmodelle kennenzulernen, die von diesen Modellen profitieren konnten.“

Die gemeinsamen Anstrengungen der verschiedenen Unternehmen haben es für alle in der Hörgerätebranche leichter gemacht. „Schließlich möchten Hörgeräteentwickler sich nicht mit komplexen Wandlermodellen und zeitraubenden Simulationen herumschlagen. Sie möchten sich einfach auf ihre eigene Entwicklungstätigkeit konzentrieren und Wandler austauschen können, um festzustellen, wie alle Komponenten miteinander arbeiten“, fügt er hinzu. „Mit dem COMSOL-Modell ist das möglich geworden. Das jeweilige Verhalten einer Vielzahl von Wandlern kann für ein und dasselbe Hörgerät ganz einfach verglichen werden.“

Hörgeräteentwickler verfügen jetzt über eine bessere, schnellere und wirtschaftlichere Möglichkeit, Rückkopplungen zu reduzieren und die Gesamtleistung zu verbessern. Dies wird Hörgeschädigten weitere Optionen eröffnen. ✦



Brenno Varanda, Chefindgenieur für Elektroakustik, Knowles Corp.

Mit multiphysikalischer Simulation verfügen Hörgeräteentwickler jetzt über eine bessere, schnellere und wirtschaftlichere Möglichkeit, Rückkopplungen zu reduzieren und die Gesamtleistung zu verbessern. Dies wird Hörgeschädigten weitere Optionen eröffnen.

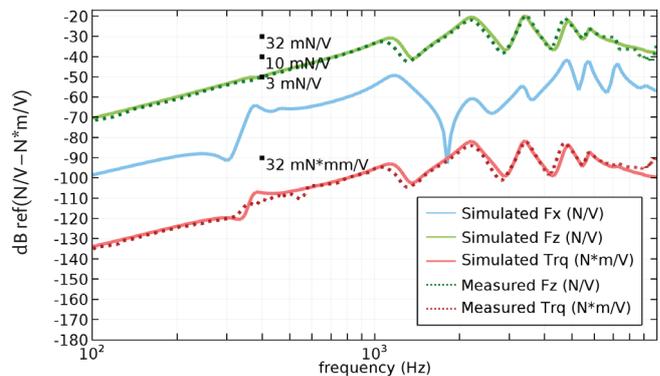
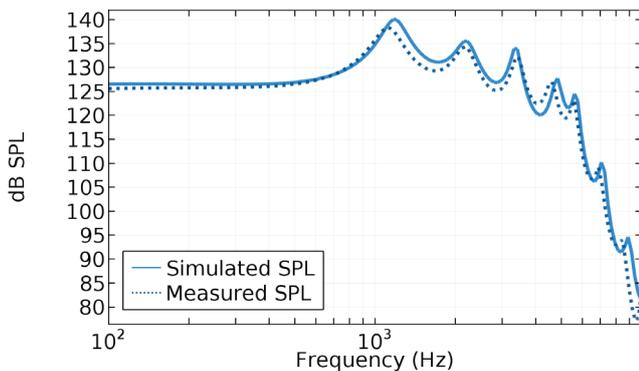


ABBILDUNG 5. Links: Schalldruckpegel in einem 2cm³-Koppler: Gemessen (gepunktete Linie) gegenüber Simulation (durchgezogene Linie) Rechts: Auf den Receiver einwirkende Kräfte und Drehmoment: Gemessen (gepunktete Linie) gegenüber Simulation (durchgezogene Linie).

MULTIPHYSIKALISCHE ANALYSE VERBESSERT DIE LECKAGEORTUNG IN WASSERLEITUNGEN

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ist wichtig für die exakte Ortung von Lecks in unterirdischen Rohren wie etwa Wasserleitungen. Echologics Engineering hat eine Finite-Elemente-Simulation entwickelt, um das akustische Verhalten in Rohrleitungen zu modellieren und Abweichungen in der Schallgeschwindigkeit zu bewerten.

von VALERIO MARRA

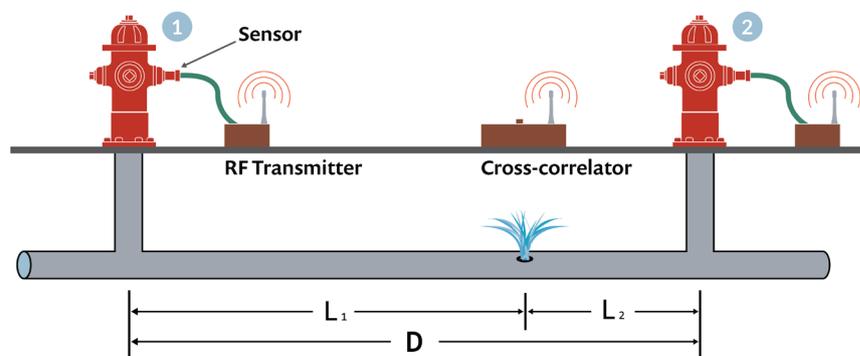


ABBILDUNG 1. Links: Untersuchte Rohrleitung mit Leckage. Rechts: Schema einer Leckageortung. Ein Leck liegt zwischen zwei Sensoren, deren Abstand zueinander D beträgt. Das Geräusch der Leckage breitet sich in beide Richtungen aus. Ein Korrelator misst jeweils die Zeit, bis der Sensor erreicht ist. Auf Grundlage der Schallgeschwindigkeit in den Rohrleitungen kann die genaue Leckposition ermittelt werden.

Frisches, sauberes Wasser ist ein wertvolles Gut, das in unseren Städten und Gemeinden nicht einfach aus undichten Rohren im Boden versickern darf. Mit der Zeit wird es schwieriger, Leckagen zu orten, da die Leitungsinfrastruktur altert. Es wird immer wichtiger, Leckagen zu orten, da der Wert des Wassers zunimmt.

In diesem Szenario kommt Echologics aus dem kanadischen Toronto, ein Unternehmensbereich von Mueller Canada, Ltd., mit seiner einzigartigen, nichtinvasiven akustischen Technologie zur Leckageortung zum Einsatz. „Leckagen erzeugen Geräusche“, erläutert Sebastien Perrier, Akustikexperte in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Echologics. Perrier ist ein Maschinenbautechniker mit den Spezialbereichen Akustik und Schwingungen, Kopplung von Strukturen sowie Signalverarbeitung. „Die Leitungen sprechen und, wenn man zuhört, sagen sie dir, wo sich die Leckage befindet“, erklärt er.

Echologics misst die Schalllaufzeit mittels einer Korrelationsfunktion und akustischen Sensoren an den Rohrleitungen

oder Hydranten. Entsteht irgendwo zwischen zwei Sensoren ein Leck, wird dies erkannt und das Korrelationsergebnis wird verwendet, um den Unterschied bei der Laufzeit des Leckgeräusches zum jeweiligen Sensor zu ermitteln. Dies ergibt den Abstand des Lecks zu jedem Sensor, sofern die Schallgeschwindigkeit innerhalb der untersuchten Rohrleitungen bekannt ist (Abbildung 1).

Als führendes Unternehmen für innovative akustische Systeme in der Wasserversorgung entwickelt Echologics Technologien, die diese Korrelation nutzen, um Leckagen zu orten und Leitungen kontinuierlich auf Undichtigkeit zu überwachen. Zu den Produkten von Echologics gehört der LeakFinderST™ Schall-Korrelator (Abbildung 2) und das EchoShore®-DX Rohrleitungsüberwachungssystem (Abbildung 3). Mit Korrelatoren von Echologics können Experten vor Ort Leckagen in verschiedenen Rohrleitungen mittels Sendern, Sensoren und einer Benutzerschnittstelle untersuchen, die auf einem Standard-Laptop verwendet werden kann. Die akustische Technologie erkennt

sogar kleinste Undichtigkeiten im Frühstadium ihrer Entstehung. So entstehen für die Gemeinden geringere Kosten und Leitungsschäden, denn sie überwachen Leckagen in ihrer Entwicklung und können schnell Gegenmaßnahmen ergreifen.

Die Technologie hinter den Echologics-Produkten erfordert eine genaue Kenntnis der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Arten von Rohrleitungen. Sie ist abhängig vom Material, proportional zur Steifigkeit der Rohrleitung und wird auch durch die Leitungsgeometrie beeinflusst. „Ein zentraler Punkt war es, die Technologie so empfindlich zu gestalten, dass Leckagen in PVC-Leitungen erkannt werden können“, berichtet Perrier. Kunststoff bewirkt im Vergleich zu Metall eine starke Abschwächung und Dämpfung. Noch komplizierter wurde es dadurch, dass alte Leitungssysteme zunächst mit gusseisernen Rohrleitungen erstellt und später – an einzelnen Stellen – mit Kunststoffleitungen instand gesetzt wurden.

Eine der Aufgaben von Sebastien Perrier ist es, die ausgefeilten Algorithmen



ABBILDUNG 2. Der LeakFinderST™ Korrelator: ein kompakter, intuitiv bedienbarer Schallkorrelator.

wurde. Perriers Simulation prognostiziert mit der Weiterleitung der akustischen Welle zum Sensor auch den Druck in einem Leitungsnetz sowie mechanische Dämpfung, die auf Abschnitte mit unterschiedlichen Materialien hinweist, so dass das Problem visualisiert werden kann (Abbildung 4).

⇒ **ROUTINEEINSATZ UND SIMULATIONS-APPS**

Mit dem routinemäßigen Einsatz des Computermodells erkannte Perrier den Vorteil, den die Entwicklung einer individuellen Simulations-App erbringen würde. Auf Grundlage seiner COMSOL Multiphysics®-Softwareanalyse und mit den in der Software integrierten Werkzeugen erstellte er seine eigene App, die Akustik-Struktur-Wechselwirkung, Rohrakustik sowie zeit- und frequenzbasierte Untersuchungen kombiniert (Abbildung 5). Mit der App kann der Nutzer Geometrie- und Materialeigenschaften in mehrfachen Durchläufen variieren und ein Leitungssegment oder ein gesamtes Netzwerk analysieren.

Auch ist es möglich, ein Wasserleitungsnetzwerk durch die Angabe der Segmentlängen, die Anzahl der Segmente und der Leitungseigenschaften zu definieren. Die Schallgeschwindigkeit wird nach Auswahl von Materialeigenschaften aus einer vorgegebenen Liste, z. B. Gusseisen oder Kunststoff, berechnet. Die Simulation bezieht dann



ABBILDUNG 3. Das The EchoShore®-DX System verwandelt vorhandene Hydranten in intelligente Technologie zur Leakageortung.

der akustischen Korrelation auf dem neuesten Stand zu halten. Er muss die beteiligten physikalischen Effekte genau kennen, um zukunftsfähige Lösungen für unterirdische Rohrleitungssysteme weiterentwickeln und optimieren zu können. Um diesen Entwicklungsprozess zu beschleunigen und seine Erkenntnisse anderen Abteilungen bereitstellen zu können, erstellt Perrier computergestützte akustische Modelle und entwickelt auf deren Grundlage Simulations-Apps.

⇒ **LECKAGEORTUNG VOR EINEM DROHENDEN VERSAGEN**

Wie unterstützt numerische Simulation die Einschätzung der Ausbreitung akustischer Wellen in Rohrleitungen? Die Analyse des Leitungsnetzes kann komplex und zeitaufwändig sein. Kenntnisse über die Schallausbreitung und Schwingungsresonanz können sowohl für die Betrachtung einzelner Leitungen wie auch für das gesamte Netzwerk von Interesse sein. Deshalb ändert sich die Komplexität des Modells und der Zeitaufwand für die Analyse erheblich je nach Umfang der

erforderlichen Detailangaben über die im Modell beteiligten physikalischen Effekte, die für exakte Ergebnisse erforderlich sind.

Sicherzustellen, dass die Schallausbreitungsgeschwindigkeit für jedes Leitungssegment exakt bekannt ist, stellt den Kern des Problems dar, das Perrier bereits in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses löste. Er setzte zunächst multiphysikalische Simulation ein, damit er schneller auf die für seine Arbeit relevanten Daten zugreifen konnte. In einer Rohrleitungsanalyse sind multiphysikalische Kopplungen zwischen Akustik, Strömung und struktureller Mechanik erforderlich.

Bei Perriers Arbeiten ergaben sich viele Einsatzfelder für die Simulation. So etwa zur Erkennung kleiner Fehlermargen und zur Feinabstimmung der Technologie. Die Untersuchung der Material- und Geometrieparameter in einem Rohrleitungsnetz durch akustische Simulation ergibt Prognosen für verschiedene Szenarien. Die akustische Simulation meldet das Vorhandensein eines Signalgeräusches, wenn der Sensorabstand sich ändert, oder zeigt an, dass eine Kunststoffreparatur erfolgt sein muss, die im Test nicht einbezogen

„Durch die Simulations-Apps kann ich Kollegen ein komplexes Modell bereitstellen, sodass es überall zugänglich ist.“

— SEBASTIEN PERRIER, AKUSTIKEXPERTE, FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSABTEILUNG, ECHOLOGICS

die Ergebnisse von Messungen vor Ort ein, die der Nutzer manuell auf der Grundlage von Korrelationen eingibt, um Leckagen zu orten.

Die Umwandlung des multiphysikalischen Modells in eine Simulations-App bietet eine bequemere Interaktion mit anderen Mitarbeitern im Unternehmen. „Durch die Simulations-Apps kann ich Kollegen ein komplexes Modell bereitstellen, sodass es überall zugänglich ist“, berichtet Perrier. Simulations-Apps können mit einem Passwortschutz versehen und mit einer lokalen Installation des COMSOL Server™ eingesetzt werden,

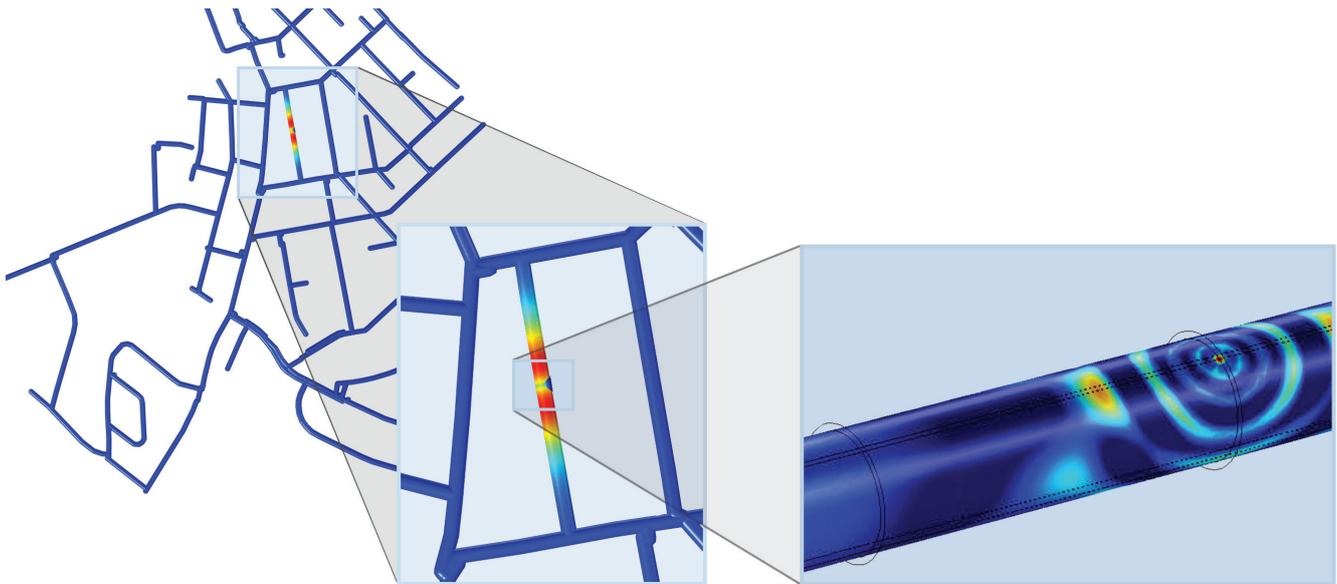


ABBILDUNG 4. Analyse der Schallausbreitung eines Leckagegeräusches in einem Leitungsnetz. Die Darstellung zeigt den Schalldruck im Bereich um die Leckage.

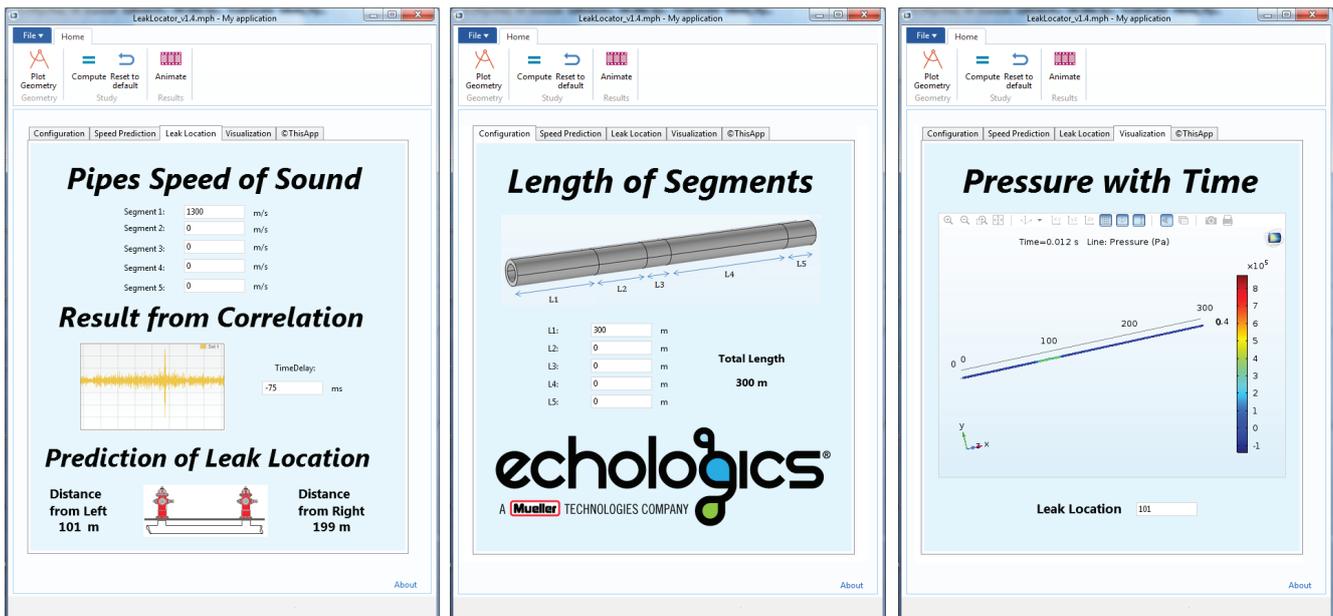


ABBILDUNG 5. Eine benutzerfreundliche Schnittstelle ermöglicht eine exakte Prognose zur Leckageortung durch Definition von Geometrie und Rohrleitungseigenschaften. Die App berechnet die Schallgeschwindigkeit in der Rohrleitung und visualisiert für den Nutzer mit einer Animation die Ausbreitung des Schalls von der Leckage aus, verbirgt dabei jedoch die komplexen Berechnungen für Akustik-Struktur-Wechselwirkung und Verortungsprognose.

so dass unter Wahrung der Vertraulichkeit Updates der App schnell verbreitet werden können. Diese Eigenschaft war wichtig für Perrier, denn ein Großteil seiner Arbeit ist vertraulich. Er hat die App erstellt, um sie den Technikern im Einsatz vor Ort bereitzustellen.

Er geht davon aus, dass die App innerhalb von Echologics auf breiter Ebene genutzt werden wird. Für die Außendiensttechniker von Echologics ist es wichtig, Leckagen schnell und exakt zu

orten, ohne sich genau mit der Mechanik oder Mathematik hinter der Simulation auseinander setzen zu müssen. Ein leistungsfähiges Werkzeug nach Perriers Geschmack wäre eine Simulation, welche die Schallausbreitung visualisiert und dem Nutzer zeigt, ob die Schallgeschwindigkeit ab- oder zunimmt, wenn Geometrie oder Materialeigenschaften sich ändern. ❖



Sebastien Perrier, Akustikexperte, Forschungs- und Entwicklungsabteilung, Echologics

Musik für Ihre Ohren: Neue Wandler für elektrostatische Kopfhörer



Ein StartUp für Audiotechnologie entwickelt leichter produzierbare Wandler für hochwertige elektrostatische Kopfhörer und reduziert das Low-end Roll-off

von **JENNIFER HAND**

Echte HiFi-Fans sind begeistert vom musikalischen Erlebnis mit elektrostatischen Kopfhörern. Mit ihrem natürlichen, luftigen Sound sorgen sie für mehr Klarheit, weniger Verzerrung und eine höhere Bandbreite im Vergleich zu anderen Kopfhörertypen, wenn es um hochauflösende Audioquellen geht.

Bei den meisten elektrostatischen Lautsprechern wirkt eine elektrische Ladung auf eine dünne, elastische Membran zwischen zwei leitfähigen Platten. Die geladene Membran bewegt sich in direkter Reaktion auf die elektrische Eingabe und erzeugt Schallwellen, die unsere Ohren und unser Gehirn als Musik interpretieren, die uns lachen und weinen lässt.

Mit ihrer hohen Qualität und der exakten Audiowiedergabe können elektrostatische Lautsprecher dennoch unerschwinglich teuer sein, manchmal empfindlich, und bis vor Kurzem mussten sie aufgrund der hohen mechanischen Präzisionsanforderungen in Handarbeit hergestellt werden. Warwick Audio Technologies Limited (WAT) erkannte den Bedarf an erschwinglichen, qualitativ hochwertigen und einfacher zu produzierenden Kopfhörern — und entwickelte den High-Precision Electrostatic Laminate (HPEL) Wandler, eine patentierte Technologie, basierend auf einer besonders dünnen Membran und einer einzelnen leitfähigen Platte statt eines Plattenpaares. Das aus der britischen Warwick University hervorgegangene Unternehmen WAT entwickelte eine leichtgewichtige, nur 0,7 mm dicke Laminatmembran, die sich perfekt für elektrostatische Kopfhörer eignet.

Die neuen HPEL-Wandler sind foliendünne Konstruktionen, die in einem kontinuierlichen Walzverfahren hergestellt werden. „Wir haben eine

einzigartige Technologie entwickelt“, erläutert Martin Roberts, CEO von WAT. „Der HPEL-Wandler besteht aus einer metallisierten Polypropylen-Folie, einem Polymer-Abstandshalter mit hexagonalen Zellen und einem leitfähigen Netz“ (Abbildung 1).

In einem typischen Aufbau wird Gleichstrom-Vorspannung auf die elastische Membran und ein Wechselstrom-Steuersignal auf die umgebenden Platten aufgebracht. Beim einseitigen WAT-Lautsprecher werden sowohl die Gleichstrom-Vorspannung als auch das Wechselstrom-Steuersignal auf die elastische Membran aufgebracht, wobei ein einzelnes Drahtgitter (Platte) als Grundfläche gegenüber der Membran positioniert wird.

Die Herstellungsmethode ermöglicht eine Produktion der Wandler zu deutlich geringeren Kosten als bei herkömmlichen elektrostatischen Lautsprechern. Dies bedeutet, dass Elektrostatik erstmals als wirtschaftlich tragfähige hochauflösende Audio-Option für eine breite Spanne von Gerätetypen und Marktsegmenten gesehen werden kann.

⇒ SIMULATION AKUSTISCHER WIEDERGABE

Um einen Wandler zu entwickeln, der

leicht und kostengünstig ohne Kompromisse bei der Klangqualität hergestellt werden kann, hat das WAT-Team vor der Entscheidung für eine Endversion den Einfluss vieler Konstruktionselemente sorgfältig untersucht. „Wir haben viele Prototypen mit guter Leistung entwickelt. Das große Problem dabei war, dass wir nicht völlig sicher sein konnten, wie die Änderung einzel-

ner Material- und Designparameter die Leistung des Wandlers beeinflussen würde“, berichtet Roberts.

Die Dynamik des HPEL wird von einem äußerst komplexen Zusammenspiel von Membranspannung, Steuersignalstärke, Lautsprechergeometrie, elastischen und dielektrischen Materialeigenschaften, thermoakustischen Verlusten und der zusätzlichen Massenwirkung der Luft an der

„Wir mussten nicht mehr jede Woche von Hand eine Vielzahl neuer Prototypen bauen, sondern konnten einfach einen neuen in der Software auswählen. So fanden wir nicht nur zu unserem endgültigen, für uns perfekten Entwurf, sondern können unsere Wandler jetzt auch ganz einfach auf die individuellen Anforderungen unserer Kunden zuschneiden.“

— MARTIN ROBERTS, CEO, WAT

Membran beeinflusst. Die Entwickler wollten die Bassleistung durch eine Reduzierung des Low-end Roll-off, eine Minimierung der Verzerrung und eine Maximierung des Schalldruckpegels für eine bestimmte elektrische Eingabe verbessern. Sie mussten jedoch feststellen, dass kleine Änderungen an jeder Komponente die akustische Ausgabe stark beeinträchtigen.

Zwar verfügt WAT über bedeutende



ABBILDUNG 1. Von oben nach unten: HPEL-Wandler von WAT; Einzellaminat, Gesamt- und Explosionsansicht eines fertiggestellten HPEL-Wandlers. Alle Laminare werden im Vereinigten Königreich hergestellt.

Fachkenntnisse in den Bereichen Mechanik, Elektronik und Akustik, doch gab es niemanden im Unternehmen, der dieses Zusammenspiel mittels einer Simulation hätte verdeutlichen können. Um das Design des HPEL-Wandlers virtuell zu optimieren, versicherte man sich der Unterstützung von Xi Engineering, zertifizierter COMSOL Consulting Partner, Experten für computergestützte Modellierung, Designempfehlungen und für die Lösung schall- und schwingungsbedingter Probleme in Maschinen und anderen technologischen Erzeugnissen.

Dr. Brett Marmo, Technischer Leiter bei Xi Engineering, leitete die Entwicklung der COMSOL

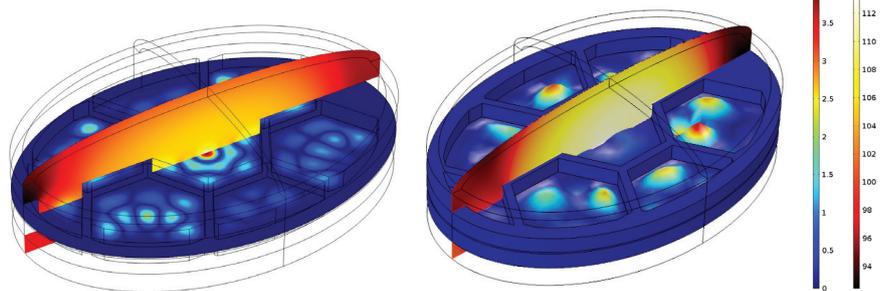


ABBILDUNG 2. Simulationsdarstellung des Schalldruckpegels (Fläche in Thermofarben) in dB und Membranverschiebung (Fläche in Regenbogenfarben) in mm aus einem vollständig gekoppelten Akustik-MEMS-Modell, aufgelöst nach Frequenzbereich. Links: Lösung bei 5000 Hz. Rechts: Lösung bei 5250 Hz.

Multiphysics®-Softwaremodelle, die zur Analyse des Verhaltens des HPEL-Wandlers verwendet wurden. Mittels der Software konnte Xi Engineering nicht-lineare Effekte modellieren, die aus Veränderungen am asymmetrischen Design des HPEL entstehen würden.

„Wir hielten das frühe Modell einfach und konzentrierten uns auf Spezifikationen, die Einfluss auf die Klangqualität haben, zum Beispiel die erste Harmonische so niedrig wie möglich zu halten, um die Akustik-Struktur-Wechselwirkung zu verstehen und die Leistung des HPEL bei niedriger Frequenz“, berichtet Marmo über die Vorabtests. „Unser Modell zeigte, wie die angelegte Spannung die Signalstärke beeinflusste, so dass wir die Klangverzerrung bei einem ersten Fall verstehen konnten.“

Da der Wandler einseitig aufgebaut ist, variiert die elektrostatische Kraft mit der Position der schwingenden Membran und fällt mit dem Quadrat des Abstands zwischen Membran und Netz. Als die resultierende nichtlineare Verzerrung erklärt und ihre Auswirkungen vorhersagbar waren, konnten die WAT-Ingenieure die entsprechenden Verzerrungen elektrisch abstellen.

⇒ OPTIMIERUNG DES HPEL-WANDLER-DESIGNS

In einer umfassenderen Simulation mit einer Struktur-MEMS-Akustik-Kopplung wurde die Auswirkung einer Parameteranpassung wie etwa der Größe der hexagonalen Zellen im Drahtgitter, der Dicke des Drahtes, der Membranspannung, der Abstände zwischen Membran und Gitter sowie der Materialeigenschaften jeder Komponente untersucht. Marmo und seine Kollegen prüften auch die Auswirkung unterschiedlicher Gleichstrom-Spannungen, die häufig Verzerrungen bei niedrigen Frequenzen verursachen, ebenso wie die Leitfähigkeit entlang der Platte, um festzustellen, ob die Spannungswerte in manchen

Bereichen höher sind, als in anderen. Anschließend setzten sie COMSOL ein, um die thermoakustischen Verluste zu untersuchen und die Membranverschiebung bei verschiedenen Frequenzen zu modellieren (Abbildung 2).

„Wir stellten fest, dass diese Art von Simulation die einzige exakte Möglichkeit darstellte, elektrostatische Planarwandler wirklichkeitsgetreu zu modellieren“, fährt Marmo fort. „In diesem Fall kann das vereinfachte Effektivparameter-Modell (Lumped Parameter Model) begrenzte Leistungsaspekte wie etwa die Amplitudenresonanz bei niedrigen Frequenzen beschreiben. Ein Parameter kann perfekt sein, während an anderer Stelle eine deutliche Verzerrung entsteht. Multiphysikalische Modellierung erfasst alle Dimensionen, die unsere Klangwahrnehmung beeinflussen, wie etwa die Zeitbereich-Resonanz und die nichtlineare Verzerrung.“

Mittels der Simulationen konnten die WAT-Ingenieure Designparameter gezielt manipulieren, um die Gesamtleistung zu optimieren. Letztendlich konnte das Team prognostizieren, was die Spitzen im Frequenzgang verursachte und das Signal im Hinblick auf eine bessere Wiedergabetreue glätten.

„So konnten wir enorm viel Kosten und Zeit sparen“, berichtet Roberts. „Wir mussten nicht mehr jede Woche von Hand eine Vielzahl neuer Prototypen bauen, sondern konnten einfach einen neuen in der Software auswählen. So fanden wir nicht nur zu unserem endgültigen, für uns perfekten Entwurf, sondern können unsere Wandler jetzt auch ganz einfach auf die individuellen Anforderungen unserer Kunden zuschneiden.“

Marmos Team verglich jedes Modell mit den physischen Messungen des WAT-Designteams. „Die Simulationsergebnisse kamen den physischen Messungen verblüffend nahe“, kommentiert Dan Anagnos, CTO bei WAT. „Es war wohl der spannendste Aspekt

zu sehen, wie die Simulation abläuft und zu wissen, dass wir hier ein exaktes Abbild der späteren realen Leistung des Lautsprechers erhielten.“

⇒ FREIHEIT UND FLEXIBILITÄT DURCH SIMULATIONS-APPS

Die Simulationsergebnisse waren geprüft und validiert, WAT war mit dem Design zufrieden. Für Xi Engineering galt es nun, WAT zukünftige Modellierungen zu ermöglichen. Mit dem integrierten Application Builder der COMSOL-Software erstellte Marmos Team eine App aus der Simulation und stellte sie online bereit.

Die Benutzerschnittstelle der App bietet verschiedene Eingabemöglichkeiten zur Änderung einer Reihe von Parametern: Gleichstrom-Spannung, Wechselstrom-Signalstärke, Frequenzbereich und Auflösung, Materialeigenschaften, Lautsprechergröße, Form und Größe des Drahtgitters sowie die Positionierung des Abstandshalters (Abbildung 3). Auf die ursprüngliche Modellanordnung kann über die App nicht zugegriffen werden. Stattdessen kann der Nutzer weitere Tests durchführen, ohne die Software erlernen zu müssen.

„Da wir WAT die Simulations-App bereitgestellt haben, muss das Unternehmen weder die Software kaufen, noch einen erfahrenen Nutzer beschäftigen“, erläutert Marmo. „Simulations-Apps verleihen unseren Kunden die Selbständigkeit, auch ohne uns kleinere Änderungen selber auszuführen und genau das zu testen, was sie testen möchten. Dies lässt uns die Freiheit, neue Herausforderungen anzugehen, statt weiter an Variationen desselben Problems zu arbeiten.“ Xi Engineering geht davon aus, bei seiner zukünftigen Arbeit für andere Kunden in wachsendem Maß computergestützte Apps einzusetzen.

Auch WAT geht diesen Weg und stellt die App seinen eigenen Kunden zur Verfügung — Unternehmen, die nach dem besten HPEL-Wandler für ihr jeweiliges Kopfhörer-Design suchen. „Das Xi Engineering-Team war enorm hilfreich. Sie verfügen über umfassende Fachkenntnisse und haben uns dabei unterstützt, die Komplexität unseres Produkts zu entzerrern“, fügt Roberts hinzu. „Dabei ist die von Xi Engineering entwickelte App für uns ein zusätzlicher Bonus. Ohne Preisgabe unseres geistigen Eigentums können wir unseren eigenen Kunden über die App den Zugriff auf unser Design ermöglichen, so dass sie unsere Technologie in ihren eigenen, hoch entwickelten Kopfhörern testen können.“ ❖

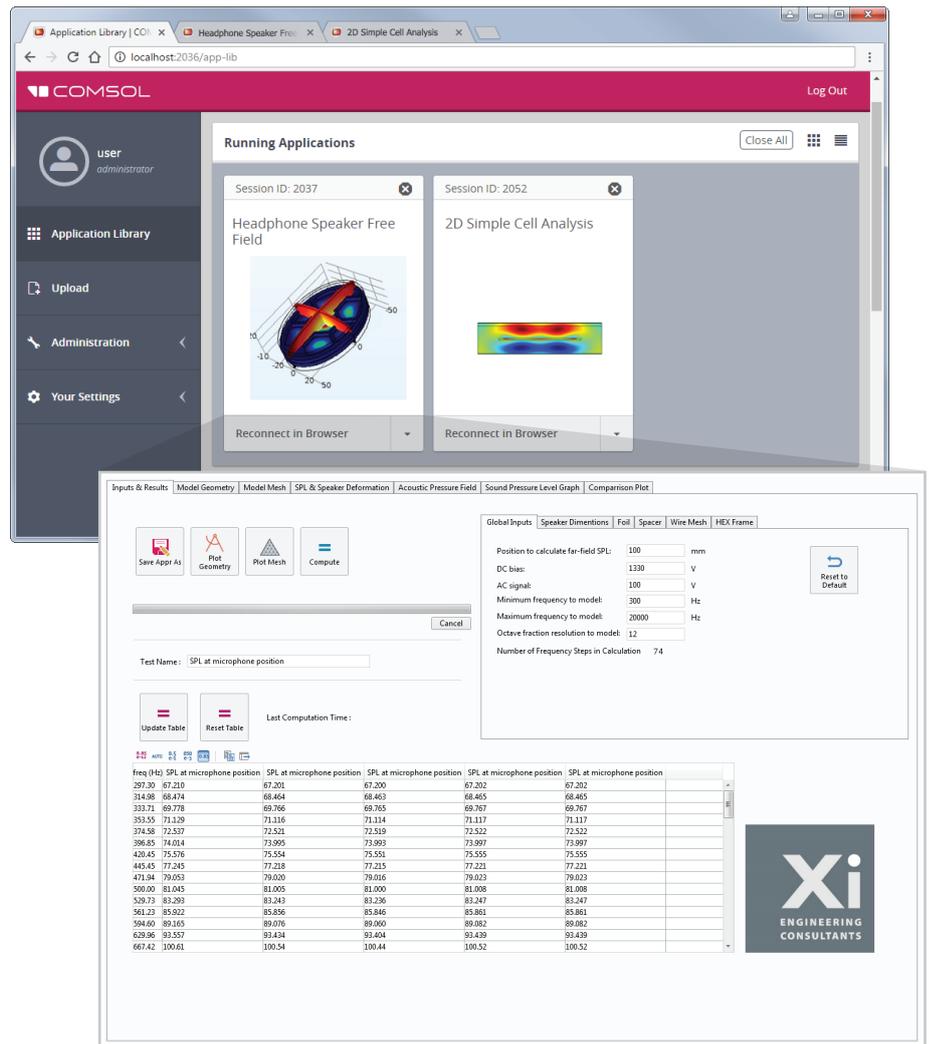


ABBILDUNG 3. Vordergrund: Mit der von Xi Engineering entwickelten App können Ingenieure Parameter wie Frequenz, elektrisches Eingangssignal, Lautsprecherabmessungen und Eigenschaften von Membran, Abstandhalter und Drahtgitter variieren. Das Ergebnis zeigt die Schalldruckpegel für unterschiedliche Fälle, die Membranverschiebung, den Frequenzgang für verschiedene Gleichstrom-Spannungen und einen Vergleich des simulierten Designs mit Testergebnissen. Hintergrund: Die App wird über COMSOL Server™ bereitgestellt. Der Zugriff darauf erfolgt über einen Web-Browser oder einen COMSOL Client für Windows® Betriebssysteme.



Links: Brett Marmo, Technischer Leiter bei Xi Engineering. Mitte: Martin Roberts, CEO, Warwick Audio Technology. Rechts: Dan Anagnos, CTO, Warwick Audio Technology.

Simulation der Welt durch die Augen der Multiphysik

Reale Anwendungsbereiche sind von Natur aus multiphysikalisch. So sollte man sie auch behandeln.

VON **ED FONTES**

Einzigartig bei der COMSOL®-Software ist die Art und Weise, wie die Eingabe des Nutzers angenommen und in eine mathematische Modellierung umgewandelt wird, die aus Differentialgleichungen zur Beschreibung physikalischer Phänomene besteht. Jede CAE-Software der heutigen Zeit basiert auf vordefinierten numerischen Modellen, die eine Näherungslösung der zugrundeliegenden Differentialgleichungen darstellen. Diese Näherungen sind erforderlich, da in den meisten Fällen die entsprechenden Differentialgleichungen nicht analytisch gelöst werden können. Dies bedeutet: eine exakte Lösung kann nicht ermittelt werden. Stattdessen werden Methoden der Diskretisierung wie etwa Finite Differenzen, Finite Volumen und Finite Elemente verwendet, um eine Annäherung an die jeweiligen Differentialgleichungen zu erzielen. Es ist schwierig, einem Modell weitere Phänomene und Beschreibungen von Variablen und multiphysikalischen Kopplungen hinzuzufügen, wenn diese nicht von Anfang an in den Differentialgleichungen einbezogen waren. COMSOL unterscheidet sich von anderen Software-Lösungen darin, dass erst unmittelbar auf Grundlage der Eingabe des Nutzers ein vollständiges mathematisches Modell erzeugt wird, bevor die Diskretisierung durch einen Klick des Nutzers auf die Solve-Schaltfläche erfolgt. Diese Kerntechnologie ermöglicht es dem Nutzer, seine eigenen Ausdrücke und multiphysikalischen Kopplungen durch die Verwendung

von Variablennamen und Koordinaten und durch direkte Eingabe der mathematischen Ausdrücke in die Benutzerschnittstelle zu erstellen. Bei herkömmlicher Software müssen nicht integrierte Beschreibungen auf numerischer Ebene erstellt und, nach der Diskretisierung, als nutzerdefinierte Subroutine ausgeführt werden, was ungenau und/oder schwer umzusetzen sein kann.

COMSOL verfügt über eine intuitive Benutzerschnittstelle, über die der Nutzer beliebige mathematische Ausdrücke eingeben kann, um Materialeigenschaften, Lasten, Quellen, Senken und multiphysikalische Kopplungen zu beschreiben. Dies ist in gewisser Weise paradox, da Mathematik üblicherweise als kompliziert wahrgenommen wird – unsere Software macht es wirklich möglich, schnell äußerst komplexe mathematische Modellierungen zu erstellen. Die Fähigkeit zur mathematischen Modellierung von COMSOL ist transparent, leicht zu verwenden und passt sich dem spezifischen Bedarf des Nutzers optimal an.

Forscher und Wissenschaftler mögen über ein tiefes Verständnis und eine Intuition zu einem Prozess ihres Fachbereichs verfügen. In den meisten Fällen sind sie jedoch keine Experten in mathematischer Modellierung. Es ist wichtig, dass dieses Verständnis und diese Intuition bei der Erstellung von Modellierungen und der Ausführung von Simulationen genutzt werden, denn dies führt zu exakteren Modellen

und besseren Designs. Aus diesem Grund bietet COMSOL den Application Builder zur Erstellung von Apps mit individuell angepassten Benutzerschnittstellen für spezielle Einsatzzwecke an. Die Apps ermöglichen es sowohl Experten als auch Nicht-Experten der mathematischen Modellierung, Modelle zu validieren und auch bei der Optimierung und Entwicklung neuer Prozesse und Designs von ihnen zu profitieren.

Ein Beispiel hierfür ist die Erfahrung von Mahindra Two Wheelers (siehe Seite 15). Das Unternehmen setzt Simulationen ein, um das NVH-Verhalten (Noise, Vibration, Harshness) der Motoren, Ansaug- und Ausblasseysteme von Motorrädern zu untersuchen. Ulhas Mohite, Manager für Forschung und Entwicklung bei Mahindra, hat uns berichtet, dass sie „mit dem Application Builder der COMSOL Multiphysics®-Software eine Simulations-App erstellt haben, um die Ausgabedateien der Analyse zu vergleichen und die SPL-Daten aufzuzeichnen — mit enormem Zeitgewinn.“ In diesem Fall wurde ein akustisches Problem gelöst und die App gleichzeitig eingesetzt, um Simulationsdaten zu vergleichen und zu analysieren.

Viele Nutzer haben uns mit ihren kreativen Designs und Einsatzmöglichkeiten für Apps überrascht, die wir niemals hätten vorhersehen können — die Betrachtung ihrer Arbeiten und ihre Rückmeldungen waren zentraler Antrieb bei der Einführung vieler neuer Softwarefunktionen. All unsere Entwicklungstätigkeit an der Software, in Vergangenheit und Zukunft, hat das Ziel, die Anpassung numerischer Simulationen in einem frühen Stadium zu erleichtern, um physikalische Phänomene besser verstehen und Designs besser und schneller optimieren zu können. Das Kerndesign unserer Software spiegelt unsere Philosophie wider: die Untersuchung realer Phänomene durch die realitätsgetreue Linse multiphysikalischer Modellierung und Simulationen. ❖

PRODUKTPALETTE

- › COMSOL Multiphysics®
- › COMSOL Server™

ELEKTROMAGNETIK

- › AC/DC Module
- › RF Module
- › Wave Optics Module
- › Ray Optics Module
- › Plasma Module
- › Semiconductor Module
- › MEMS Module

MECHANIK & AKUSTIK

- › Structural Mechanics Module
- › Nonlinear Structural Materials Module
- › Geomechanics Module
- › Fatigue Module
- › Multibody Dynamics Module
- › Rotordynamics Module
- › Acoustics Module

STRÖMUNGSMECHANIK & WÄRME

- › CFD Module
- › Mixer Module
- › Subsurface Flow Module
- › Pipe Flow Module
- › Microfluidics Module
- › Molecular Flow Module
- › Heat Transfer Module

CHEMIE

- › Chemical Reaction Engineering Module
- › Batteries & Fuel Cells Module
- › Electrodeposition Module
- › Corrosion Module
- › Electrochemistry Module

MODULÜBERGREIFEND

- › Optimization Module
- › Material Library
- › Particle Tracing Module

PROGRAMMSCHNITTSTELLEN

- › LiveLink™ for MATLAB®
- › LiveLink™ for Excel®
- › CAD Import Module
- › Design Module
- › ECAD Import Module
- › LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- › LiveLink™ for Inventor®
- › LiveLink™ for AutoCAD®
- › LiveLink™ for Revit®
- › LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- › LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- › LiveLink™ for Solid Edge®
- › File Import for CATIA® V5

Wie die computergestützte Akustik von der Multiphysik profitiert

von **NAGI ELABBASI, VERYST ENGINEERING**

Das Gebiet der Akustik ist sehr vielfältig. Dies gilt auch für den Bedarf an computergestützten Werkzeugen zu seiner Unterstützung. Akustische Simulation ist in Anwendungsbereichen wie dem Lärmschutz für Kraftfahrzeuge, Raumakustik, Lautsprecher, Miniaturlautsprecher, Musikinstrumente, akustische Sensoren und Aktoren sowie zerstörungsfreie Prüfverfahren weit verbreitet. Sie verschafft Ingenieuren wertvolle und zeitsparende Erkenntnisse, die sie bei der Verbesserung ihrer Produkte und der Bewertung neuer Designkonzepte unterstützen. Bei Veryst Engineering sind wir an akustischer Simulation ganz besonders interessiert — insbesondere an Anwendungsbereichen mit medizinischen Geräten und MEMS-Sensoren.

Die geeigneten Formulierungen für computergestützte Akustik sind für einige der vorgenannten Anwendungsbereiche sehr unterschiedlich. In vielen Fällen kann das akustische Problem nicht isoliert von anderen Physikbereichen betrachtet werden, insbesondere Strukturen, Fluide, Elektrizität, Wärmeübertragung und poröse Medien. Die multiphysikalische Kopplung zwischen akustischen und anderen Phänomenen wird üblicherweise umso bedeutsamer, je kleiner die Geräte werden.

Besonders spannend erscheint mir in diesem Bereich die wachsende Anzahl akustischer Anwendungen, insbesondere in zwei wichtigen Bereichen: medizinische Geräte und tragbare Technologien.

Vor Kurzem haben wir an einem multiphysikalisch-akustischen

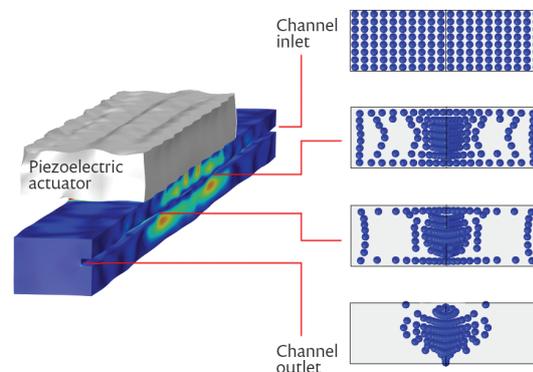
„Besonders spannend erscheint mir in diesem Bereich die wachsende Anzahl akustischer Anwendungen, insbesondere in zwei wichtigen Bereichen: medizinische Geräte und tragbare Technologien.“

Simulationsproblem im Bereich Medizintechnik-Industrie gearbeitet: ein Lab-on-a-Chip für Körperfluide mit dem Schwerpunkt Akustophorese. Bei dieser Methode geht es um die durch ein oszillierendes akustisches Feld erzeugte Bewegung von Partikeln, die in Anwendungen wie Fluidreinigung, Fluidabscheidung und akustische Levitation eingesetzt wird. Dieses spezielle Modell bezieht Druckakustik, Festkörpermechanik, elektrische Felder, Fluidströme und Partikelverfolgung ein. Geometrie und Partikeleigenschaften des vorliegenden Beispielmodells sind der verfügbaren Literatur entnommen. Die Abbildung zeigt die Partikelverteilung im Kanal mit einer effektiven Partikelkonzentration im Bereich der Kanalmitte. Das computergestützte Modell erleichtert den Entwicklern die Auswahl der Abmessungen, Materialien, Betriebsfrequenz und Strömungsrate des Geräts.

Zwei großen Herausforderungen begegnen wir oft in der akustischen Simulation, ähnlich wie in anderen Physikbereichen: die Ermittlung exakter Materialeigenschaften und die Modellvalidierung. Nach meiner Erfahrung ist die Dämpfung eine der Eigenschaften, die bei akustischen Problemen am schwierigsten zu bewerten ist. Arbeitet ein akustischer Aktor im Bereich einer Resonanzfrequenz, was ebenfalls häufig vorkommt, ist die

Auswirkung der Dämpfung auf die Ergebnisse von großer Bedeutung. Sind im Gerät auch polymere Komponenten vorhanden, was ebenfalls häufig vorkommt, ist die Dämpfung vermutlich abhängig von der Frequenz. Eine einzelne Dämpfungsmessung des Herstellers, wie etwa der Q-Faktor oder der Verlustfaktor, ist einfach nicht ausreichend für eine exakte Analyse. Oft sind weitere Material- und Gerätetests erforderlich.

Um diesen und weiteren Herausforderungen zu begegnen, haben wir begonnen, mehr Simulations-Apps für Kunden zu entwickeln. Mit dem in die COMSOL Multiphysics®-Software integrierten Application Builder sind wir in der Lage, Apps mit einer intuitiven Benutzerschnittstelle zu erstellen, die vollständig an den Bedarf jedes Kunden angepasst werden kann. Wir hoffen, dass diese Apps Nicht-Analysten über einfache Benutzerschnittstellen direkten Zugriff auf die Vorzüge der computergestützten Akustik verschaffen werden. Kunden werden in der Lage sein, mit Parametern zu experimentieren oder auf Grundlage ihrer speziellen Fähigkeiten Designiterationen vorzuschlagen. Dank der Leistungsfähigkeit multiphysikalischer Simulation hat sich das Gebiet der Akustik großartig entwickelt. Wir freuen uns auf eine weitere Expansion dieses Bereichs durch den Einsatz von Simulations-Apps.



Konzentration akustophoretischer Partikel in einem Mikrokanal, simuliert mit der COMSOL® Multiphysics-Software. Verformung und Von-Mises-Spannung werden ebenfalls dargestellt.



ÜBER DEN AUTOR

Dr. Nagi Elabbasi ist Chefingenieur bei Veryst Engineering, LLC. Sein zentraler Fachbereich ist die Modellierung multiphysikalischer Systeme. Er verfügt über umfassende Erfahrung mit Simulationen in den Gebieten Strukturmechanik, CFD, Wärmeübertragung, gekoppelte Systeme sowie Entwicklung von Finite-Elemente-Software. Er trägt den Titel eines PhD für Maschinenbau der University of Toronto. Weitere Informationen über Beratung, Prüfung und Schulungsdienstleistungen von Veryst finden Sie unter veryst.com/mechanical-engineering-services.