Springer Vieweg

ATZ extra

AKUSTIK | NVH

Optimierung mit virtuellem Kunstkopf

HEAD acoustics

NVH-Optimierung mit virtuellem Kunstkopf

Da Entwicklungen in immer kürzerer Zeit und mit immer weniger physischen Prototypen stattfinden, lassen sich die akustischen Eigenschaften eines in der Entwicklung befindlichen Fahrzeugs oft kaum belastbar bewerten. Ein realistisches Hörerlebnis braucht binaurale Kunstkopfaufnahmen. Head acoustics und Porsche zeigen, wie ein virtueller Kunstkopf dieses Problem löst.

VERFASST VON

Dr.-Ing. Matthias Wegerhoff
ist Technischer Geschäftsführer bei Head acoustics in Herzogenrath.

Haiko Brücher, M. Sc.
ist Ingenieur mit dem Schwerpunkt Simulation und Versuch in der Vorentwicklung bei Head acoustics in Herzogenrath.

Dipl.-Ing. Lukas Henseler
ist Entwicklungsingenieur für Akustik und Schwingungstechnik bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Weissach.

Dr.-Ing. Martin Abele
ist Entwicklungsingenieur für Akustik und Schwingungstechnik bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Weissach.

© [M] Head acoustics GmbH | bearbeitet mit KI

Simulationen beschleunigen die Entwicklung, vermeiden kostenintensive Korrekturen im späteren Verlauf des Entwicklungsprozesses und führen so zu einem Wettbewerbsvorteil. Mit lebensnahen Simulationen muss sich niemand allein auf abstrakte Daten mit begrenzter Aussagekraft über das echte Erlebnis verlassen: Erlebbare digitale Prototypen bringen die akustische Realität an die Ohren, bevor sie existiert.

Ein essenzieller Baustein der Bewertung bei NVH-Untersuchungen sind jedoch binaurale Kunstkopfaufnahmen in physischen Prototypen. Sie ermöglichen ein realistisches Hörerlebnis und machen so die Bewertungen verlässlicher. Um vergleichbar aussagekräftige binaurale Simulationsergebnisse zu erhalten, braucht es einen virtuellen – also simulierten – Kunstkopf.

Der virtuelle Kunstkopf berücksichtigt die Beugungseffekte durch Kopf und Schulter sowie den Einfluss des Kunstkopfs auf das Schallfeld im Fahrzeuginnenraum in der Simulation [1]. So erleben alle Beteiligten den realitätsgetreuen akustischen Gesamteindruck in der Simulation noch vor der Fertigung des ersten physikalischen Prototyps.

VIRTUELLES KUNSTKOPFMODELL

Die Grundlage für den virtuellen Kunstkopf bildet das CAD-Modell des HMS IV (Head Measurement System der 4. Generation). Basierend auf der Methode der finiten Elemente (FE) wird ein geschlos-

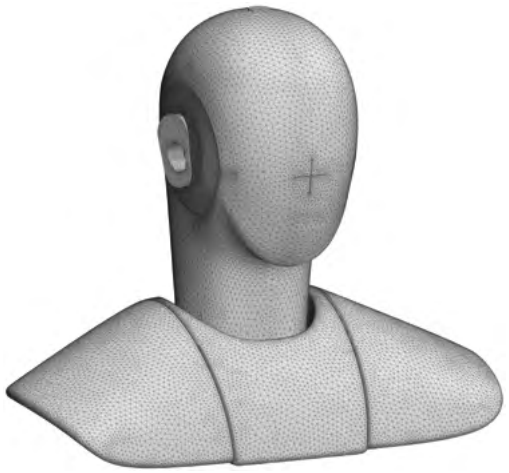

BILD 1 Hochaufgelöstes Finite-Elemente-Modell des HMS IV (© Head acoustics GmbH)

senes Flächenmodell erzeugt, das die Oberflächen der äußerlich sichtbaren Komponenten repräsentiert, **BILD 1** [2]. Es ist modular aufgebaut und besteht wie das HMS IV aus vereinfachten Geometrien von Schulter, Kopf, Ohrmuschel und äußerem Gehörgang. Aufgrund der Komplexität des Innenohres ist dieses jedoch nicht Teil der Betrachtung. Infolgedessen wird für die Simulationsergebnisse eine Frequenzgrenze unterhalb der Grenze des menschlichen Hörbereichs erwartet. Im Rahmen der Studie wird der Frequenzbereich bis 8 kHz analysiert. Das Modell enthält circa 76.000 Dreieck-Elemente mit einer mittleren Kantenlänge von 3 mm. Durch die unmittelbare Nähe der Ohrmuschel und des äußeren Gehörgangs zur Mikrofonposition sowie kleine Radien in diesem Bereich wird die Geometrie an dieser Stelle durch Verwendung deutlich kleinerer Elemente detailgetreu approximiert. Für große Radien und flächige Bereiche wie Kopf und Schulter enthält das Modell hingegen etwas größere Elemente.

VALIDIERUNG DES VIRTUELLEN KUNSTKOPFMODELLS

Zur Validierung des FE-Modells dient die Gegenüberstellung der kopfbezogenen Außenohrübertragungsfunktionen (Head Related Transfer Functions, HRTF) aus Messung und Simulation.

Der messtechnische Versuchsaufbau im reflexionsfreien Raum des Instituts für Hörtechnik und Akustik der RWTH Aachen besteht aus Lautsprechern, die auf einem vertikal ausgerichteten Halbkreis angeordnet sind [3]. Im Mittelpunkt des Halbkreises (Referenzpunkt) wird mit einem Mikrofon eine Referenzmessung vorgenommen. Anschließend wird der Kunstkopf mit dem Mittelpunkt der beiden Ohrpositionen im Referenzpunkt positioniert. Um HRTF für mehrere Raumrichtungen zu erhalten, lässt sich der Kunstkopf zwischen den Messungen um die vertikale Achse drehen. Die auf die Referenzmessung bezogenen Kunstkopfaufnahmen bilden die HRTF. Sie ist frei vom Einfluss des Raums und des Übertragungsverhaltens der Lautsprecher. Darüber hinaus spielt die genaue Beschaffenheit des Quellsignals keine Rolle (Sweep/Rauschen), solange es Energie im gesamten relevanten Frequenzbereich enthält.

Für die Simulation wird Reziprozität angenommen. An den Lautsprecherpositionen werden Ausgabeknoten für den Schalldruck definiert und sphärische Quellen ersetzen die Mikrofone an den Ohrpositionen. Durch zusätzliche Ausgabeknoten werden mit einer Simulationsrechnung die Daten für sämtliche Raumrichtungen erzeugt. Der Referenzschalldruck lässt sich analytisch berechnen, da in diesem Fall ideale Freifeldbedingungen vorliegen. Um mit der Messung vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden die simulierten Schalldrücke auf den analytisch berechneten Referenzschalldruck bezogen.

BILD 2 zeigt die gemessene HRTF des linken Ohrs im Vergleich zur simulierten HRTF im Polardiagramm exemplarisch für 500 Hz, 3450 Hz und 7650 Hz für die Horizontalebene. Generell zeigt sich eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung der Kurven, auch im höherfrequenten Bereich. Bei 7650 Hz ist eine Abweichung in der Form der Keule im Schatten des Kopfs beim Azimutwinkel von 260° sichtbar, der gleichermaßen sowohl Ungenauigkeiten in der Messung als auch in der geometrischen Modellierung des Simulationsmodells zugrunde liegen können. Über den gesamten simulierten Frequenzbereich von 50-8000 Hz zeigen sich ähnlich gute Übereinstimmungen.

VORBEREITUNG FÜR DEN EINSATZ IM FAHRZEUGMODELL

Für die Verwendung des virtuellen Kunstkopfs im Gesamtfahrzeugmodell und den späteren Abgleich mit Versuchsdaten wird das bestehende FE-Modell unter bestimmten Randbedingungen modifiziert: es wird um eine Torsobox erweitert, um den Head And Torso Simu-

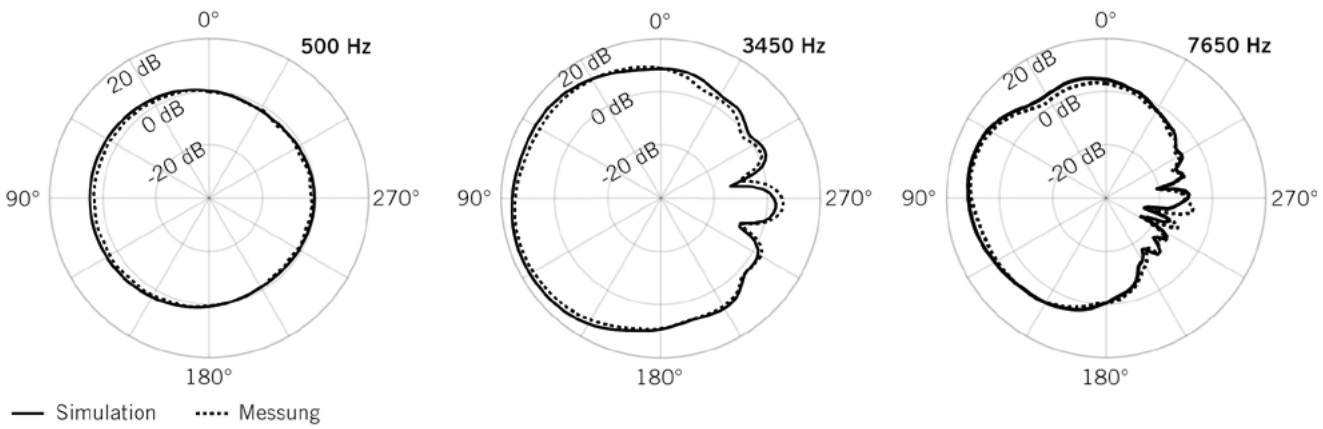

BILD 2 Vergleich von messtechnisch und simulativ erzeugten HRTFs im Polardiagramm in der Horizontalebene für das linke Ohr für 500 Hz, 3450 Hz und 7650 Hz (v.l.n.r.) (© Head acoustics GmbH)

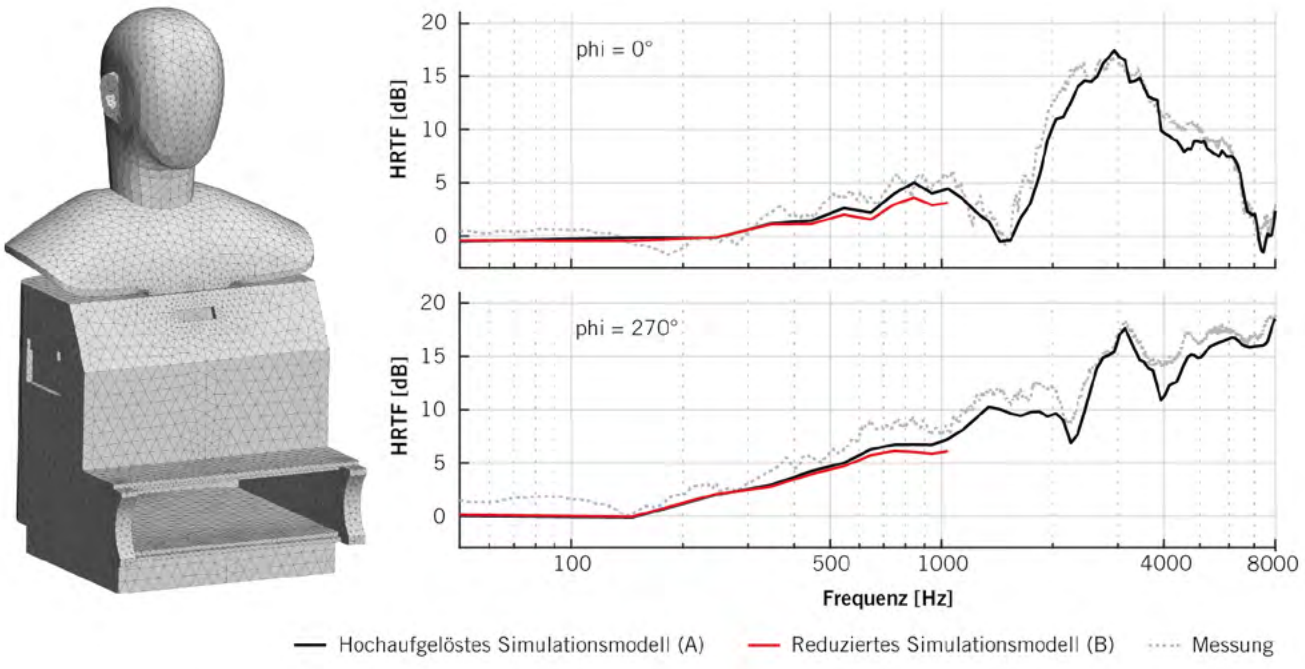

BILD 3 Reduziertes FE-Modell des Head And Torso Simulators und HRTFs des rechten Ohrs für die Richtungen 0°/vorn und 270°/rechts: Vergleich von Messung, hochaufgelöstem und reduziertem Simulationsmodell (© Head acoustics GmbH)

lator (HATS, [4]) zu repräsentieren. Da die obere Frequenzgrenze des Gesamtfahrzeugmodells bei etwa 1 kHz liegt, kann man das FE-Netz des Kunstkopfs aus deutlich größeren Elementen modellieren. Eine erheblich geringere Elementanzahl begrenzt die Komplexität des Gesamtfahrzeugmodells und beschleunigt die Simulationsberechnung.

Um die nötige gröbere Vernetzung zu realisieren, sind geometrische Vereinfachungen des Kunstkopfmodells erforderlich. Das entsprechend modifizierte FE-Modell ist in **BILD 3** dargestellt. Trotz einer Vervielfachung der vernetzten Oberfläche durch Hinzufügen der (hohlen) Torsobox besteht es aus nur etwa 20.360 Elementen. Gegenüber dem Ursprungsmodell von Kopf und Schulter kann man als deutlichste geometrische Änderung den geschlossenen Kragen erkennen. Durch die größeren Elemente sind die Radien der Ohren polygonförmig angenähert.

Für die Validierung des Modells betrachten wir in **BILD 3** exemplarisch die HATS-HRTF des rechten Ohrs für die Richtungen phi = 0° (vorn) und phi = 270° (rechts) aus der Messung im Vergleich zu einem hochaufgelösten (A) und dem reduzierten (B) Simulationsmodell. Zunächst lässt sich generell eine gute Übereinstimmung beider Simulationsmodelle mit der Messung feststellen. Unterhalb von 600 Hz liefern A und B annähernd identische Ergebnisse. Oberhalb dieser Frequenz treten durch die größeren Elemente akzeptable Abweichungen in der Größenordnung derer von der Messung zu A auf.

FAHRZEUGMODELL

Um den Einsatz des virtuellen Kunstkopfs im Fahrzeugmodell zu validieren, werden für den Porsche 911 Carrera verschiedene akustische Transferfunktionen (ATFs) im Fahrzeuginnenraum gemessen und berechnet.

Die ATF stellt das Verhältnis des Schalldrucks (p) auf die Quellstärke (Q) dar (ATF = p / Q). Die Anregung des Innenraums erfolgt mithilfe einer Normschallquelle (Monopol). An den Sitzpositionen sowie der Referenzposition im Nahbereich der Schallquellen (10 bis 20 cm Abstand) wird der Schalldruck bestimmt. Für den Fahrzeuginnenraum werden sechs verschiedene Lastfälle mit jeweils unterschiedlich positionierten Schallquellen betrachtet. Der Schalldruck an der Fahrerposition wird je Lastfall einmal mit einem einzelnen Mikrofon und einmal mit einem Kunstkopf ermittelt. Die Quell- und Messpositionen im Fahrzeuginnenraum sind für Berechnung und Versuch identisch und in **BILD 4** dargestellt.

Die simulative Bestimmung der ATFs erfolgt mithilfe eines FE-Modells, das aus einem Strukturmodell (vornehmlich Metallbauteile), der Innenraumkavität, den akustisch wirksamen Dämmungsbauteilen (dem sogenannten Trim) und den Innenverkleidungsteilen (vornehmlich aus Kunststoff) besteht. Die Komponenten sind miteinander gekoppelt, sodass ihre Rückwirkungen aufeinander in der Berechnung Berücksichtigung finden.

Im Versuch werden die ATFs im vollständig ausgestatteten Gesamtfahrzeug bestimmt. Um Störgeräusche und Reflexionen gering zu halten, erfolgen die Messungen an einem Akustikprüfstand des Porsche-Entwicklungszentrums in Weissach.

VALIDIERUNG DES FAHRZEUGMODELLS

Die aktuellen FE-Simulationsmodelle und die zur Verfügung stehende Hardware ermöglichen eine obere Frequenz von 1000 Hz. Im Versuch sind aufgrund des Signal-Rausch-Verhältnisses die Übertragungsfunktionen ab 30 Hz bewertbar. Somit ist ein Vergleich der gemessenen und berechneten Übertragungsfunktionen für den Frequenzbereich von 30 Hz bis 1000 Hz möglich.

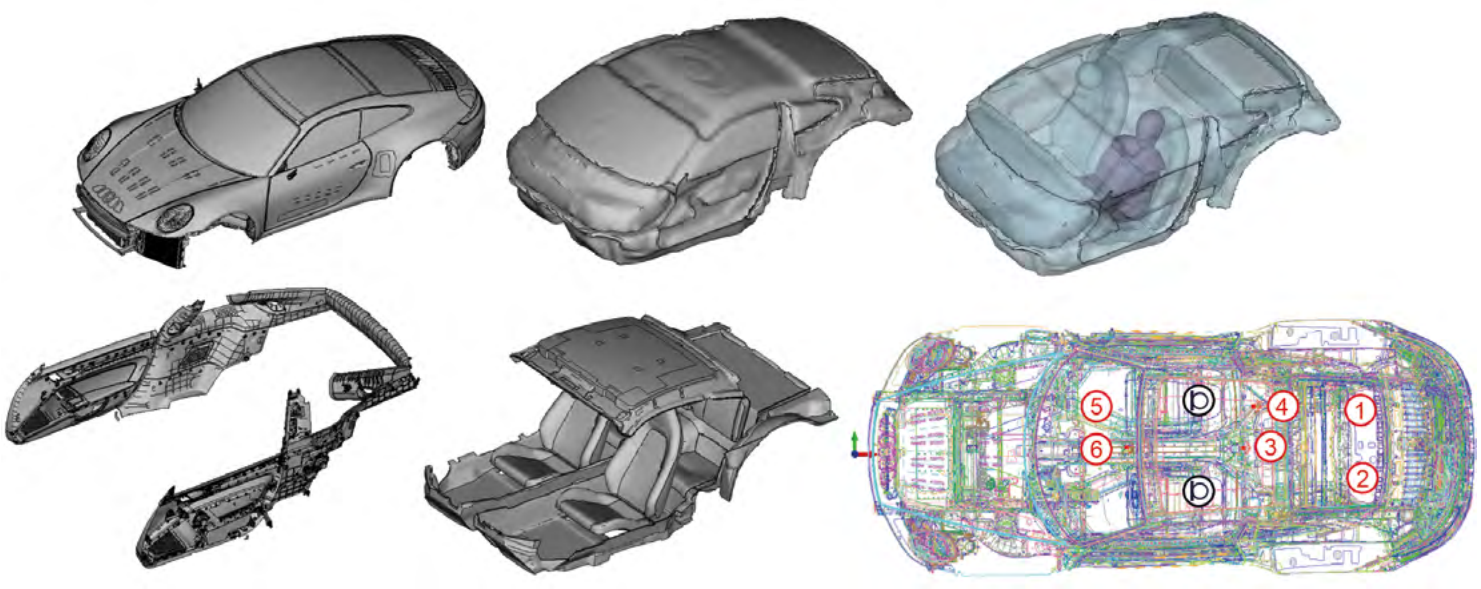

BILD 4 Darstellung des Simulationsmodells bestehend aus Strukturmodell (oben links), Innenraumkavität (oben Mitte und oben rechts mit Kunstkopf), Innenverkleidungsteile (unten links), und Trim (unten Mitte). Die je nach Lastfall nummerierten Anregungspositionen sind rot und die Messpositionen sind schwarz markiert (unten rechts) (© Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG)

Auf den Vergleich der Lastfälle drei und sechs gehen wir im Folgenden näher ein. Für jede Messposition ist in **BILD 5** eine sehr gute Korrelation zwischen Simulation und Versuch erkennbar. Die in der Auswertung im Schmalband vereinzelt erkennbaren Abweichungen lassen sich über die in der Akustik übliche Terzbandmittelung besser einordnen. So zeigt sich deutlich, dass auch für den höheren Frequenzbereich eine zufriedenstellende Korrelation zwischen Versuch und Simulation besteht.

Um die Unterschiede zwischen Mikrofon und Kunstkopf weiter zu verdeutlichen, vergleichen wir in **BILD 6** (oben) das Signal des einzelnen Mikrofons am Fahrerplatz mit den zwei Signalen des Kunstkopfs in der Terzbandmittelung. Der Vergleich zeigt, dass der Pegelunterschied in Messung und Simulation auf ähnliche Weise über der Frequenz wiedergegeben wird. In beiden Lastfällen ist der Luftschallpegel am linken Ohr des Kunstkopfs zwischen 200 Hz und 400 Hz höher als der Luftschallpegel am rechten Ohr und am einzelnen Mikrofon. Oberhalb von 400 Hz ist das Verhältnis umgekehrt, dort weist das rechte Ohr des Kunstkopfs den höchsten Luftschallpegel auf.

Der Einsatz des virtuellen Kunstkopfs ermöglicht Jury-Bewertungen und die

HEAD acoustics

HEAD acoustics bietet ganzheitliche Lösungen für Schall- und Schwingungsanalysen in NVH-Anwendungen sowie für Sprachqualität in der Telekommunikationsindustrie an.

Das weltweit agierende Unternehmen hat seinen Hauptsitz in Herzogenrath und acht Tochtergesellschaften in China, Frankreich, Indien, Italien, Japan, Südkorea, Großbritannien und den USA. Es integriert die Wahrnehmung des Nutzers und psychoakustische Methoden in seine systemoffenen kundenorientierten Lösungen, die Sound-Engineering für technische Produkte, die Untersuchung von Umgebungsgeräuschen und Sprachqualitäts-Engineering realitätsnah machen.

REAL-LIFE-PROOF.

www.head-acoustics.com/de

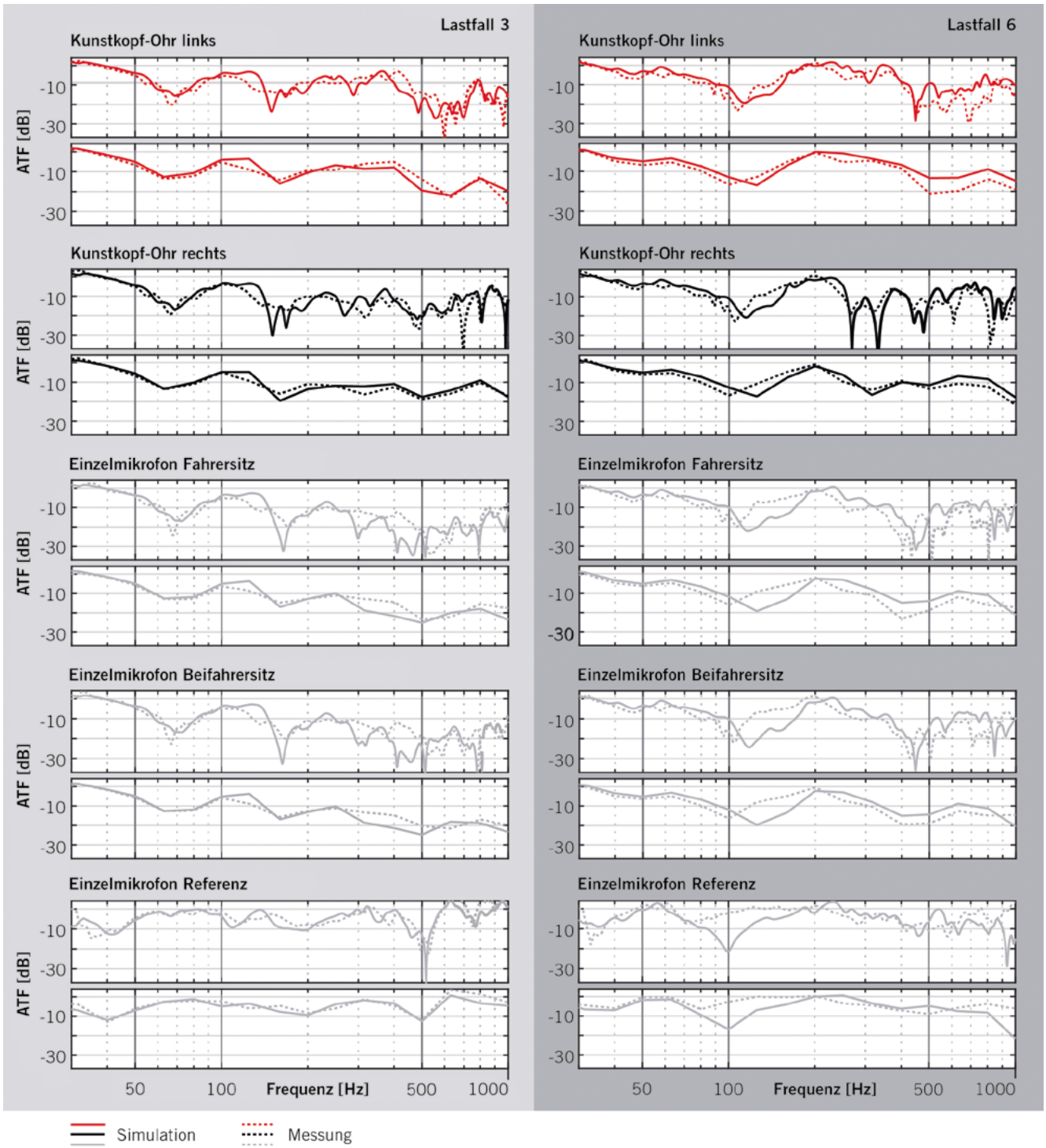

BILD 5 Vergleich der gemessenen und simulierten akustischen Übertragungsfunktionen (ATFs) im Schmalband und Terzband für Lastfall 3 (links) und Lastfall 6 (rechts) (© Head acoustics GmbH | Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG)

psychoakustische Auswertung von Simulationsergebnissen. Für die Berechnung der Lautheit nach ECMA-418-2 [5] wird ein Zeitsignal von 3 s weißem Rauschen mit den Transferfunktionen aus Simulation und Messung gefaltet. Durch binaurale Kombination entsteht aus der Lautheitsberechnung für den Kunstkopf eine Kurve, die mit der Lautheitskurve für das einzelne Mikrofon verglichen werden kann, **BILD 6** (unten). Gemäß dem Standard erreicht die Lautheitskurve ab circa 0,3 s ein zu bewertendes Niveau. Die Korrelation der Lautheitsbewertungen bestätigt die vorangegangenen Vergleiche zwischen Simulation und Messung.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Kunstköpfe sind seit Jahrzehnten bei NVH-Untersuchungen unerlässlich. Gleichzeitig sinkt die Anzahl physischer Prototypen. Daher führt der nächste logische Schritt zum virtuellen

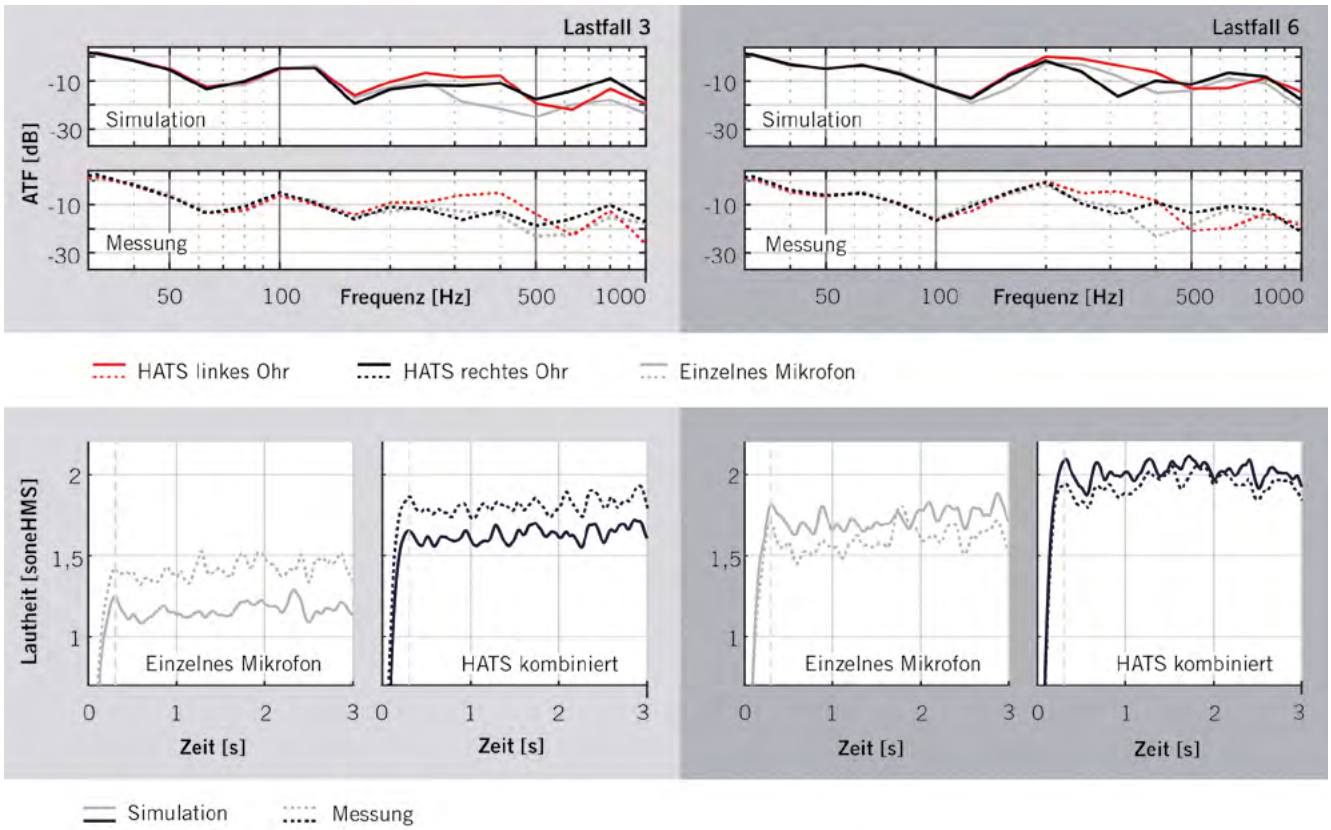

BILD 6 Oben: Vergleich des Schalldrucks am einzelnen Mikrofon zu den Kunstkopfohren für Simulation und Messung im Terzband, Lastfall 3 (links) und Lastfall 6 (rechts). Unten: Vergleich der Lautheitsbewertung nach ECMA 418-2 zwischen Simulation und Messung für das einzelne Mikrofon und kombiniert für den Kunstkopf, Lastfall 3 (links) und Lastfall 6 (rechts) (© Head acoustics GmbH I Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG)

Kunstkopf in entsprechenden Simulationsszenarien.

Im Artikel wird das beschriebene FE-Modell eines Kunstkopfs anhand von messtechnisch ermittelten kopfbezogenen Transferfunktionen für die Horizontalebene bis zu einer oberen Frequenzgrenze von 8 kHz validiert. Dieses validierte virtuelle Kunstkopfmodell ermöglicht eine realitätsnahe Berücksichtigung von Beugungseffekten sowie des akustischen Einflusses des Kunstkopfs auf seine Umgebung und dient als Ersatzmodell für den Einfluss eines menschlichen Passagiers. Gleichzeitig stellt es die Vergleichbarkeit von Simulationen und Messungen im späteren Entwicklungsverlauf sicher.

Für den Einsatz im Fahrzeugmodell wird das beschriebene Kunstkopfmodell um eine Torsobox erweitert. In der Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Übertragungsfunktionen im Gesamtfahrzeug kann für den eingesetzten Kunstkopf eine sehr zufriedenstellende Übereinstimmung aufgezeigt werden.

Die binaurale Simulation des Fahrzeuginnenraums erhöht die Ergebnisqualität und ermöglicht schon im frühen Stadium der Produktentwicklung eine Bewertung des realitätsnahen Hörerlebnisses und eine auf die menschliche Wahrnehmung fokussierte Optimierung. Simulierte akustische Szenarien lassen sich in unterschiedlichen Kontexten realisieren. Allen am Entwicklungsprozess Beteiligten steht somit ein breites Instrumentarium zur Verfügung, mit dem sie frühzeitig die richtigen wegweisenden Entscheidungen treffen können. Das mögliche Anwendungsspektrum reicht dabei von binauralen Soundbeispielen über den NVH-Desktopsimulator bis hin zu Gesamtfahrzeugsimulatoren, wie dem Porsche NVH-Lab oder dem mobilen NVH-Simulator im realen Fahrzeug.

LITERATURHINWEISE

[1] Brücher, H.; Wegerhoff, M.; Beljan, D.; Kamper, T.: Investigations of the influence of an artificial head on acoustic characteristics of vehicle cabins based on FE simulation results. DAGA Tagung, Hamburg, 2023

[2] Schliephake, C.: Numerische Modellierungsmethodik für ein Kunstkopf-Messsystem und Analyse geometrischer Einflussfaktoren. RWTH Aachen University, Aachen, Masterarbeit, 2022

[3] Richter, J.-G.: Fast Measurement of Individual Head-Related Transfer Functions. RWTH Aachen University, Aachen, Dissertation, 2019

[4] Recommendation ITU-T P.58: Head and torso simulator for telephonometry. 6th edition, June 2021

[5] ECMA-418-2: Psychoacoustic Metrics for ITT Equipment – Part 2: Models based on human perception. 2nd edition, 2022

DANKE

Die Autoren danken ihren Kollegen Tim Kamper, Christoph Nelke und Michael Bruss für ihre Mitwirkung bei der Erstellung der Studie.

IMPRINT

Sonderausgabe 2023 in Kooperation mit HEAD acoustics GmbH I Ebertstraße 30a I 52134 Herzogenrath;
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

GESCHÄFTSFÜHRER:
Stefanie Burgmaier I Andreas Funk I Joachim Krieger

TITELBILD:
© [M] Head acoustics GmbH I edited with AI