



FINITE-ELEMENTE-SIMULATION KLEINER NACHHALLRÄUME

Der Diffusfeld-Absorptionsgrad ist eine physikalische Größe, mit deren Hilfe in der Automobilindustrie häufig die Leistung schalldämpfender Teile bewertet wird. Für Experimente in diesem Zusammenhang nutzen Automobilhersteller und Innenausstatter bislang sogenannte Alpha-Kabinen. Als Alternative dazu hat Autoneum, ehemals Rieter Automotive Systems, ein Simulationsverfahren entwickelt.



AUTOR



CLAUDIO BERTOLINI
ist Head NVH Tools and
Methodologies bei der Autoneum
Management AG in Winterthur
(Schweiz).

AUFGABENSTELLUNG

Aus Sicht der Theorie stellt der Diffusfeld-Absorptionsgrad (Diffuse Field Absorption Coefficient – DFAC) den Anteil der Schallenergie dar, der von einem Teil absorbiert wird, wenn es dem Schallfeld ausgesetzt wird, das durch die Überlagerung einer unendlichen Anzahl unkorrelierter ebener Wellen gegeben ist, die aus allen möglichen Richtungen auf dem Teil auftreffen. Ein derartiges Schallfeld wird in der Regel „diffus“ genannt, daher die Bezeichnung „Diffusfeld-Absorptionsgrad“. Es ist bekannt, dass für die experimentelle Realisierung von Diffusfeldern zur Messung des DFAC im Allgemeinen recht große Umgebungen erforderlich sind. Selbst die einzigen beiden Normen, die in diesem Bereich verfügbar sind, ASTM C423 [1] und ISO 354 [2], legen große Nachhallräume (200 m³ oder mehr) und Testmusterflächen zugrunde: Die ASTM-Norm empfiehlt Muster mit einer Fläche von etwa 5 bis 7 m², die ISO-Norm sogar Muster mit einer Fläche von 10 bis 12 m².

Diese Empfehlungen sind der Tatsache geschuldet, dass beide Normen ursprünglich für Messungen an Mustern entwickelt wurden, die für Industrie- und Bauanwendungen geeignet waren. Sie unterscheiden sich deutlich von den typischerweise im Automobilbereich verwendeten Messungen, bei denen die schalldämp-

fenden Teile (Dachhimmel, Teppiche, Sitze) normalerweise relativ klein sind. Ferner wäre es selbst für Messungen an flachen Mustern sehr unpraktisch, wenn nicht gar unmöglich, im alltäglichen Betrieb Muster mit Flächen von 7 m² oder sogar 10 m² zu verwenden. Und schließlich setzt der Bauraum in der Automobilindustrie der Dicke von Ausstattungsteilen enge Grenzen. Außerdem ist ihre Absorption bei niedrigen Frequenzen und damit auch die Ermittlung des Absorptionsverhaltens von Ausstattungsteilen unter 300 bis 400 Hz kaum relevant. Aus all den genannten Gründen ist es in der Praxis der Branche normal geworden, DFAC-Messungen an relativ kleinen Mustern und Teilen durchzuführen – und damit auch, kleinvolumige Nachhallräume als selbstverständliche Option anzusehen [3]. Bestätigt wird dies durch die Tatsache, dass in den USA in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen wurden, um eine entsprechende SAE-Prüfnorm zu entwickeln [4]. Ein unter Automobilherstellern und Innenausstattungen weit verbreiteter kleiner Nachhallraum ist die 6,5 m³ große Alpha-Kabine. Sie wurde ursprünglich als im Maßstab 1:3 reduziertes Modell eines großen Nachhallraums entwickelt, der in einem öffentlichen schweizerischen Labor für die Materialprüfung verwendet wird.

Im Rahmen der Forschungsarbeit bei Rieter Automotive Systems/Autoneum versuchten die Ingenieure zu ermitteln, ob sich ein DFAC-Test in einem solchen verkleinerten Nachhallraum durch reine Simulation nachbilden lässt. Im Mittelpunkt stand dabei der mittlere bis untere Frequenzbereich (< 1,25 kHz). In diesem Frequenzbereich macht die Größe der Alpha-Kabine eine Simulation möglich. Gleichzeitig ist eine derartige Verwendung am interessantesten, da das begrenzte Volumen der Alpha-Kabine die Ergebnisse eines DFAC-Tests insbesondere in diesem Frequenzbereich maßgeblich beeinflussen kann. Die Simulation trägt dazu bei, die physikalischen Zusammenhänge der Messumgebung sowie die Faktoren und Fragen besser zu verstehen, die für eine ordnungsgemäße Messung des DFAC entscheidend sind. Ganz pragmatisch gesehen kann die Simulation außerdem zu einer Verringerung der Anzahl praktischer Tests führen, die während der Entwicklung von Teilen durchgeführt werden.

MESSUNG DES DFAC IN DER ALPHA-KABINE

Zum Erzeugen des Anregungssignals wurden in der Alpha-Kabine drei Lautsprecher in der Nähe der Ecken aufgestellt, ① (rote Punkte). Für jedes 1/3-Oktavband zwischen 400 Hz und 10 kHz wurde ein transientes Schallfeld erzeugt, indem die Lautsprecher einen frequenzmodulierten Tonimpuls abgaben. Der entstandene Schalldruckpegel (Sound Pressure Level – SPL) wurde an fünf Positionen, ② (gelbe Punkte), jeweils mit einem rotierenden Mikrofon aufgezeichnet. Aus den Aufzeichnungen der Mikrofone berechneten die Ingenieure die Nachhallzeit (Reverberation Time – RT) der Kabine. Dazu wurde zunächst die Rückwärts-Integration nach Schroeder [5] angewendet. Anschließend wurde der Teil des resultierenden Ausklings zwischen 4 und 24 dB in Bezug auf den ursprünglichen SPL mit einer Geraden interpoliert. Das gesamte Messverfahren erfüllte die Anforderungen der Norm ISO 354. Die Absorptionsfläche A der Kabine wurde in Gl. 1 mit Hilfe der „Sabine’schen Nachhallformel“ (gemäß ISO 354) aus der RT ermittelt,

$$GL. 1 \quad A = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot RT} - 4 \cdot V \cdot m$$

wobei V das Volumen der Kabine, c die Schallgeschwindigkeit und m der Dämpfungskoeffizient der Luft im Kehrwert der Meter ist. Bei der Ermittlung von

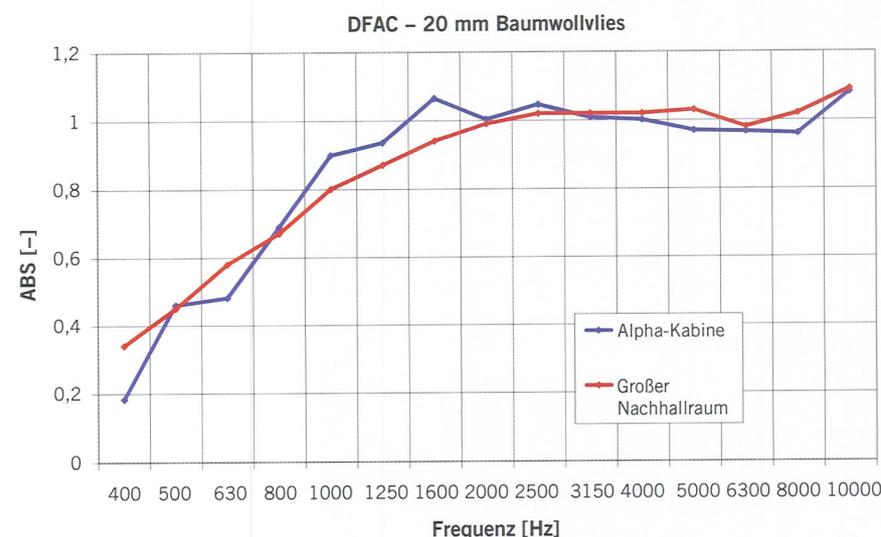


① Ansicht der Alpha-Kabine mit den Positionen der Lautsprecher (rote Punkte) und Mikrofone (gelbe Punkte)

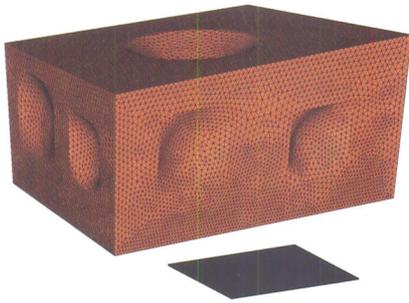
c und m wurde ihre Abhängigkeit von Umgebungsparametern (Temperatur, Feuchtigkeit und Luftdruck) gemäß dem in der ISO-Norm 9613-1 angegebenen Verfahren berücksichtigt. Um den Absorptionsgrad eines Musters zu ermitteln, sind zwei RT-Messungen erforderlich: eine zum Ermitteln der Absorptionsfläche A_{bare} der leeren Kabine (das heißt ohne Teile oder Muster im Inneren) und eine zum Ermitteln der Absorptionsfläche A_{trimmed} der Kabine mit dem zu untersuchenden Muster. Der Absorptionsgrad des Musters ergibt sich dann einfach durch Gl. 2, wobei S die Oberfläche des Musters ist.

$$GL. 2 \quad \alpha = \frac{A_{trimmed} - A_{bare}}{S}$$

Bei der Entwicklung der Alpha-Kabine wurde besonderer Wert darauf gelegt, zu



② Vergleich des in der Kabine gemessenen DFAC und des in einem großen Nachhallraum gemessenen DFAC für ein 20 mm dickes Baumwollvliesmuster mit einem Flächengewicht von 1000 g/m²



3 FE-Modell der Alpha-Kabine und des ebenen Musters aus Teppichvlies

analysieren, wie sich der in der Alpha-Kabine gemessene DFAC im Vergleich zu einem DFAC verhält, der in einem größeren Nachhallraum gemessen wurde. Nach einer umfangreichen Messaktion wurde in Gl. 2 ein Korrekturfaktor von 0,92 eingeführt, der im Durchschnitt eine gute Korrelation mit den in großen Nachhallräumen gemessenen Absorptionsdaten ermöglicht. Als Beispiel zeigt 2 einen Vergleich zwischen der Absorption, die in der Alpha-Kabine an einem flachen, 1 m × 1,2 m großen Muster aus Baumwollvlies (Dicke 20 mm, Flächengewicht 1000 g/m²) gemessen wurde, und derjenigen, die unabhängig davon in einem 200 m³ großen Nachhallraum der Universität Wiesbaden an einem 12 m² großen Muster desselben Materials gemessen wurde. Allgemein zeigen Daten aus der technischen Literatur, dass zumindest bei Mustern mit einer Dicke bis zu 25 mm die Absorptionsergebnisse aus der Kabine gut mit denen aus größeren Nachhallräumen vergleichbar sind.

NUMERISCHE SIMULATION EINES TESTS

In diesem Abschnitt des Artikels wird das für die numerische Simulation eines Tests in der Alpha-Kabine angewendete Verfahren anhand eines 13 mm dicken, 1 m × 1,2 m großen flachen Musters veranschaulicht. Das Muster besteht aus Vlies, wie es normalerweise für Teppichisolierungen benutzt wird. Das Mikrofonsignal im Zeitbereich an einer Position wird nach dem folgenden Verfahren ermittelt: Zunächst wird die Frequenzganggleichung (Frequency Response Function – FRF) der Kabine an der jeweiligen Position berechnet. Danach wird die FRF mit der Fourier-Transformation (FT) des Anregungssignals multipliziert. Das

Ergebnis wird mit einer inversen Fourier-Transformation (IFT) zurück in den Zeitbereich transformiert.

Für die Ermittlung der FRFs an den Mikrofonpositionen in der Alpha-Kabine wurde ein auf finiten Elementen (FE) beruhender Ansatz benutzt. 3 zeigt das FE-Modell der Alpha-Kabine. Es umfasst

694.057 vierflächige lineare Elemente und 124.347 Knoten. Die durchschnittliche Netzgröße liegt bei 45 mm.

Während die Berechnung der FRFs für die leere Alpha-Kabine eher Standard ist, muss bei der Berechnung derselben FRFs für die Ausstattung die porös-elastische Beschaffenheit des Teppichvlieses berück-



Wir bringen Motortechnologie und Klimaschutz zusammen. Emissionsteste bei ISP.



Das neue Forschungszentrum Fahrzeugtechnik bietet mit sechs Einachs- bzw. Allradrollenprüfständen sowie einer Euro 5 Abgasrolle vielfältige Möglichkeiten einer umfangreichen Fahrzeug- und Komponentenerprobung. Unsere bewährten Dienstleistungen im Bereich der chemisch-physikalischen Analytik sowie der Motorenbewertung und -vermessung runden das Leistungsspektrum ab.

Modernste Euro 5 Emissionsmesstechnik inklusive Rohgas- und Modalanalytik ermöglicht Emissions- und Verbrauchsmessungen auf einem Allradrollenprüfstand für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Motorräder. Die Konditionierung der Umgebungsbedingungen in Soak-Area und Prüfraum gewährleistet zudem eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und die Konformität zu den weltweiten gesetzlichen Verbrauchszyklen.

sichtigt werden, aus dem das zu untersuchende Muster besteht. Aus diesem Grund wurden die FRFs für die ausgestattete Alpha-Kabine mit TR2FE [6] ermittelt, einer Software, die vollständig in MSC/Nastran integriert ist und die FE-Simulation von Komponenten aus porös-elastischem Material ermöglicht. Dieses Tool berechnet zunächst die Wandimpedanzmatrix des untersuchten Musters und „klinkt“ diese Matrix dann in einer zweiten Phase in die FE-Gleichungen der Alpha-Kabine ein. Das FE-Modell des untersuchten Musters aus Teppichvlies wird ebenfalls in ③ gezeigt. Dort wurden für die

Dicke fünf Elemente verwendet. In den ebenen Richtungen, die für die Diskretisierung weniger kritisch sind, wurde eine Netzgröße von etwa 15 mm verwendet.

Um die mit dem FE-Modell der Kabine ermittelten FRFs zu überprüfen, wurde ein kleiner Validierungstest durchgeführt. Dieser Test bestand in der Ermittlung der p/Q_{dot} -FRFs zwischen dem Schalldruck p , der an den Mikrofonpositionen in der Kabine aufgezeichnet wurde, und der Volumenbeschleunigung Q_{dot} einer punktförmigen Schallquelle, die in einer der Ecken der Kabine aufgestellt wurde. Die Tests wurden in der leeren Kabine und in der mit dem

untersuchten, 13 mm dicken, flachen Vliesmuster ausgestatteten Kabine durchgeführt. ④ zeigt für die gemessenen wie auch für die simulierten Daten den Vergleich zwischen einer für die leere Kabine berechneten FRF, und der für die ausgestattete Kabine berechneten FRF. Das Frequenzband war bei 1 kHz zentriert.

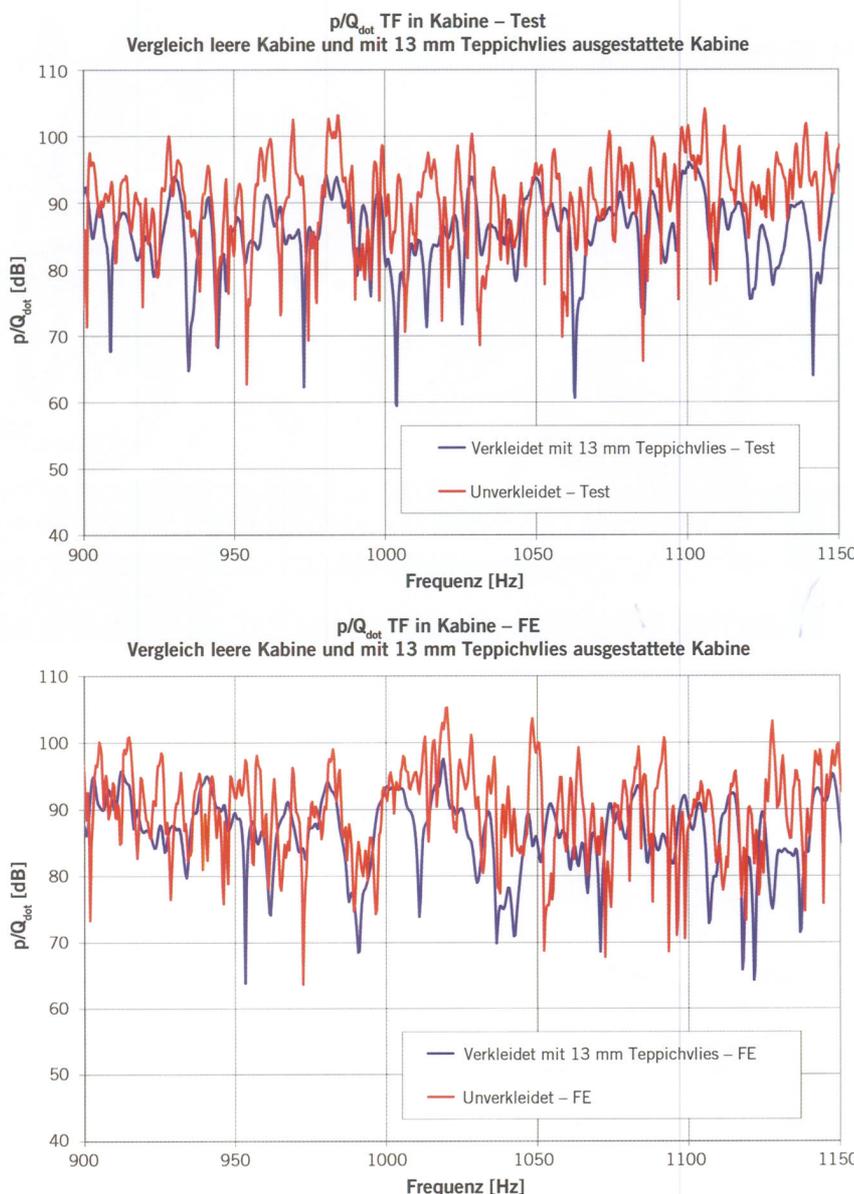
Offenbar kann das FE-Modell die Auswirkungen gut erfassen, die das Materialmuster auf die FRFs der Kabine hat: Die Form der Spitzen in ④ zeigt, dass die Dämpfung aufgrund des vorhandenen Materialmusters gut wiedergegeben wird. Dies ist ein wichtiger Punkt, da aus [7] hervorgeht, dass die RT eines Raums im Grunde ein Maß für seine durchschnittliche mittlere Dämpfung ist. Aus den numerisch ermittelten FRFs wurde nach dem bereits erläuterten Verfahren die RT der Alpha-Kabine berechnet. ⑤ zeigt die Korrelation der gemessenen und der simulierten RT für die leere und für die mit dem 13 mm dicken Teppichvlies ausgestattete Alpha-Kabine. Allgemein kann die Korrelation als recht gut angesehen werden, auch wenn die FE-Berechnungen dazu neigen, die RT leicht zu überschätzen (maximale Abweichung etwa 5 %).

⑥ vergleicht den gemessenen mit dem simulierten Absorptionsgrad. Ferner zeigt die Abbildung den mit der bekannten und weit verbreiteten Transfer Matrix Method (TMM) [8] ermittelten Absorptionsgrad. Es wird deutlich, dass die durch FE ermittelte Korrelation wichtige Verbesserungen erbracht hat, besonders im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 1 kHz, in dem die TMM den Absorptionsgrad normalerweise unterschätzt.

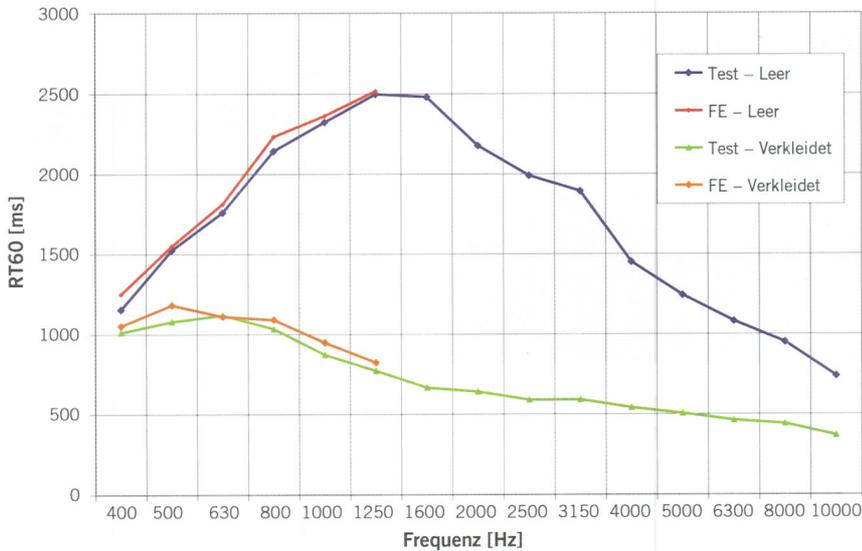
SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die in diesem Artikel genannten Ergebnisse zeigen, dass sich ein DFAC-Test in der Alpha-Kabine im Frequenzbereich unterhalb von 1,25 kHz durch reine Simulation nachbilden lässt. Zu diesem Zweck wurde ein FE-Modell der Alpha-Kabine mit einem porös-elastischen FE-Modell des untersuchten Musters gekoppelt.

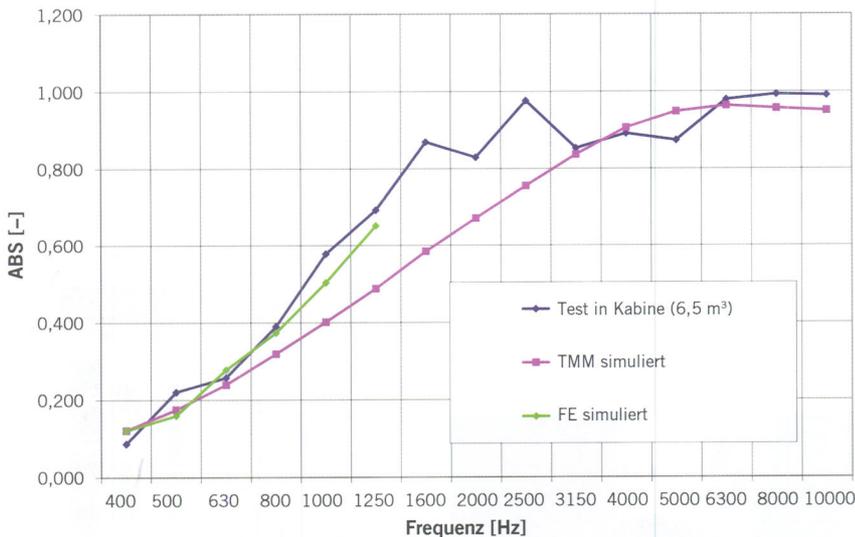
Die Möglichkeit, einen Alpha-Kabinen-Test per Simulation nachzubilden, kann in mehrfacher Hinsicht von Interesse sein: um die Anzahl der Tests zu reduzieren, die normalerweise mit flachen Mustern bei der Entwicklung eines Teils durchgeführt werden, aber auch um die physikali-



④ Vergleich der FRFs, die in der leeren und der „ausgestatteten“ Alpha-Kabine gemessen wurden; oben: Test, unten: Simulation



5 Vergleich der gemessenen und der simulierten RT in der Alpha-Kabine



6 Vergleich des gemessenen und des simulierten Absorptionsgrads für ein 13 mm dickes Muster aus Teppichvlies

schen Vorgänge in der Alpha-Kabine als Messumgebung besser zu verstehen. Zu letzterem Punkt sind bereits weitere Aktivitäten im Gange.

LITERATURHINWEISE

[1] ASTM C423-08a: Standard Test Method for Sound Absorption and Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method, 2008
 [2] ISO 354: Acoustics – Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room. Second Edition, 2003-05-15
 [3] Chappuis: Small Size Defices for Accurate Acoustical Measurements of Materials and Parts Used in Automobiles. SAE paper 931266, SAE NVC 1993
 [4] Saha, P.; et al.: Thoughts Behind Developing SAE standard J2883 – Random Incidence Sound Absorption Tests Using a Small Reverberation Room. SAE paper 2009-01-2141, SAE NVC 2009
 [5] Schroeder, M. R.: New Method of Measuring Reverberation Time. In: Journal of the Acoustical Society of America, Volume 37, S. 409 – 412, 1965
 [6] Bertolini, C.; et al.: Treasuri2FE, a Tool for the Simulation of Sound Package Parts Fully Integrated in Nastran. SAE paper 2009-01-2216, SAE NVC 2009
 [7] Kuttruff, H.: Room Acoustics. 5th Edition, Spon Press, 2009
 [8] Brouard, B.; Lafarge, D.; Allard, J. F.: A General Method of Modeling Sound Propagation in Layered Media. In: Journal of Sound and Vibration, Volume 183, Issue 1, S. 129 – 142, 1995



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
SAM-service@springer.com

Sika Automotive

Engineered Acoustic System

The Sika Acoustic System is designed to seal vehicle body cavities and to damp the vibration of the body panels resulting in driving and riding comfort.

**Sika Automotive –
 Solutions for Bonding, Sealing,
 Damping and Reinforcing.**

www.sika.com

Innovation & Consistency since 1910

