



## MOTORKAPSELUNG ZUR CO<sub>2</sub>- UND LÄRMREDUKTION

Die EU hat sich zum Ziel gesetzt, die Lärm- und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs zu verringern. Thermo-akustische Motorkapselungen, die entweder fahrzeug- oder motormontiert sein können, werden in diesem Zusammenhang von mehreren Fahrzeugherstellern untersucht. Autoneum entwickelte hierfür einen Hochleistungs-Hybridwerkstoff. Diese leichte Materialkombination besteht aus einem semi-strukturellen Nadelvlies, das als Trägerschicht eingesetzt wird, und einem extrem leichten Polyurethanschaumstoff zur Wärmeisolation und Schallabsorption.

## AUTOREN



**DIPL.-MASCH.-ING.  
THOMAS BÜRGIN**

ist Head Thermal Testing, Product Acoustic and Thermal Performance bei Autoneum in Winterthur (Schweiz).



**M. SC. CLAUDIO BERTOLINI**

ist Head NVH Tools and Methodologies, Product Acoustic and Thermal Performance bei Autoneum in Winterthur (Schweiz).



**DR. DAVIDE CAPRIOLI**

ist Head Product Acoustic and Thermal Performance bei Autoneum in Winterthur (Schweiz).



**DIPL.-ING. (FH)  
CHRISTIAN MÜLLER**

ist Research Engineer Composite Technologies & Product Development, Center of Excellence Materials and Processes bei Autoneum in Winterthur (Schweiz).

## CO<sub>2</sub>-ZIELE BIS 2020

Verschärfte CO<sub>2</sub>-Ziele, wie sie in der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 beschrieben werden, zwingen Fahrzeughersteller und Zulieferer, an neuen innovativen Lösungen zu arbeiten. Ziel dieser Verordnung ist, den durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß der in Europa verkauften Neuwagen bis 2015 auf 130 g und bis 2020 auf 95 g pro km zu reduzieren [1]. Bei Überschreitung der Zielvorgaben muss der Fahrzeughersteller Abgaben von bis zu 95 Euro pro g CO<sub>2</sub> entrichten [2].

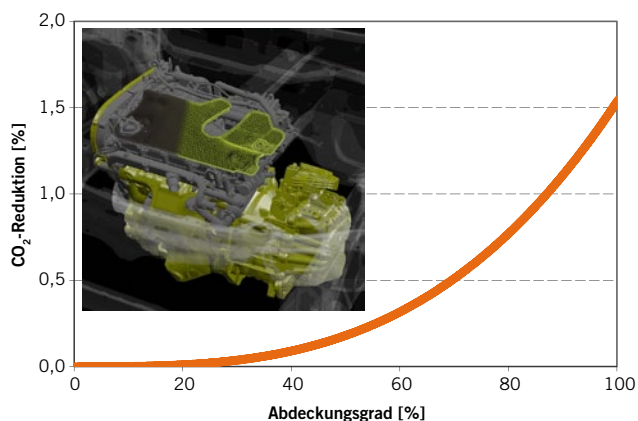
Die bevorstehende Verschärfung der erlaubten Geräuschemissionen bei Vorbeifahrtmessungen, wie sie in der Norm ISO 362 beschrieben ist, führt dazu, dass zukünftig auch an neuen akustischen Lösungen gearbeitet werden muss [3]. Thermoakustische Motorkapselungen, die entweder fahrzeug- oder motormontiert sein können, werden in diesem Zusammenhang von mehreren Fahrzeugherstellern untersucht. Der Grund liegt darin, dass Synergien genutzt werden können, um gleichzeitig die Lärm- und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

Seit über zehn Jahren arbeitet Autoneum an der Thematik der Motorkapselung und hat neue Materialien entwickelt, die speziell für diese Anwendung optimiert wurden. Ziel war, bestmögliche akustische, thermische und mechanische Eigenschaften zu vereinen. Anhand verschiedener Resultate aus Vorentwicklungsstudien wird im Folgenden aufgezeigt, welche Materialanforderungen erfüllt werden müssen, um eine möglichst effektive Motorkapselung umzusetzen.

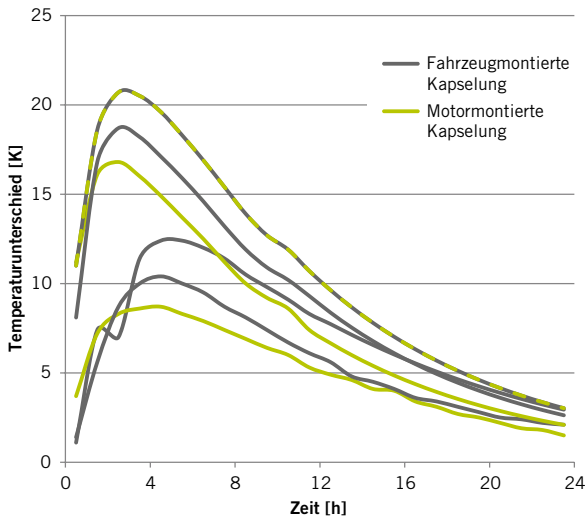
## MOTORMONTIERTES KAPSELUNGSKONZEPT

Untersuchungen haben aufgezeigt, dass das motormontierte Kapselungskonzept eine sehr gute Wärmespeicherung aufweisen kann. Dazu wird ein Material benötigt, das hervorragende Isolationseigenschaften, eine hohe thermische Stabilität sowie eine gute Alterungsbeständigkeit aufweist. Messungen an einem Geländewagen sowie 1D-Simulationen haben belegt, dass eine gute Wärmespeicherung – in anderen Worten: eine hohe CO<sub>2</sub>-Reduktion – stark vom Abdeckungsgrad der Motorkapselung abhängt [4], ❶.

Um eine optimale Wärmespeicherung im Antriebsstrang zu erzielen, muss ein möglichst hoher Abdeckungsgrad erreicht



❶ CO<sub>2</sub>-Reduktion in Abhängigkeit vom Abdeckungsgrad einer motormontierten Kapselung



② Kühlwassertemperaturunterschiede in Abhängigkeit von der Abkühlzeit für drei typische Beispielfahrzeuge (3 × motorgekapselte Varianten, grün – 3 × Originalzustand als fahrzeugmontierte Varianten, grau)

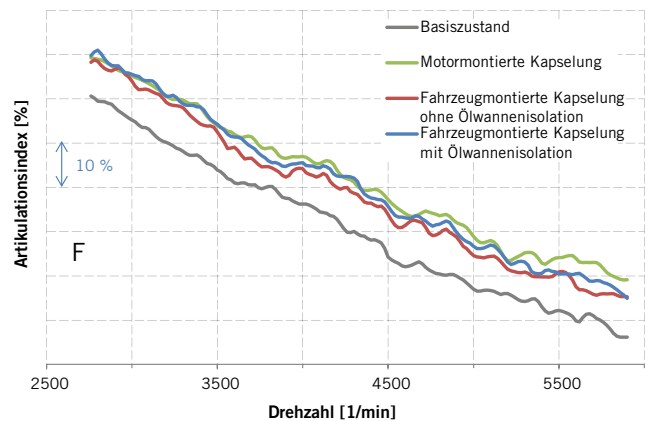
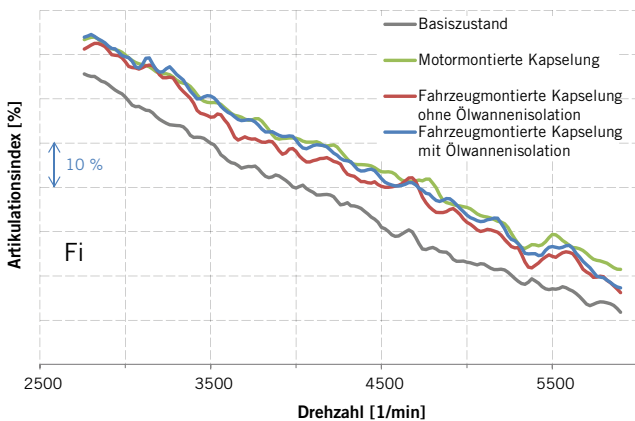
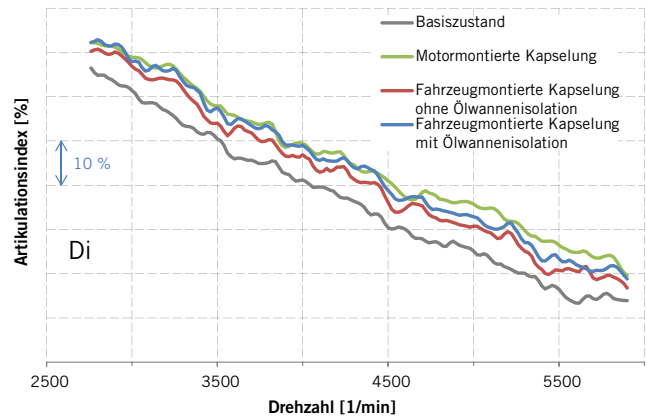
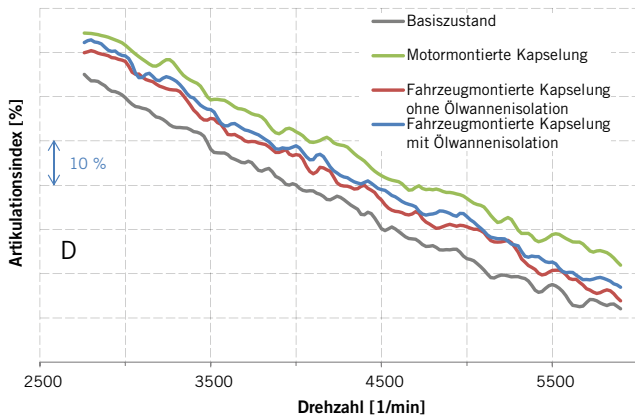
**FAHRZEUGMONTIERTES KAPSELUNGSKONZEPT**

Das fahrzeugmontierte Kapselungskonzept besteht aus Komponenten, von denen bereits mehrere in auf dem Markt befindlichen Fahrzeugen vorhanden sind (wie beispielsweise Haubenabsorber, Stirwandisolationen oder Motorunterschilder). Wenn diese meist akustischen Bauteile thermisch optimiert werden, kann mit nur wenigen zusätzlichen Komponenten eine fahrzeugmontierte Motorkapselung aufgebaut werden. Dies könnte zu der Annahme führen, dass bei einem solchen Kapselungskonzept Materialien mit weniger gutem thermischen Verhalten eingesetzt werden können – was jedoch falsch ist: Die Erfahrung hat gezeigt, dass solche Bauteile nicht nur hervorragende akustische, sondern auch sehr gute thermische Eigenschaften aufweisen müssen, um allen Anforderungen gerecht zu werden.

Versuche mit unterschiedlichen fahrzeugmontierten Kapselungskonzepten haben gezeigt, dass isolierende Seiten-

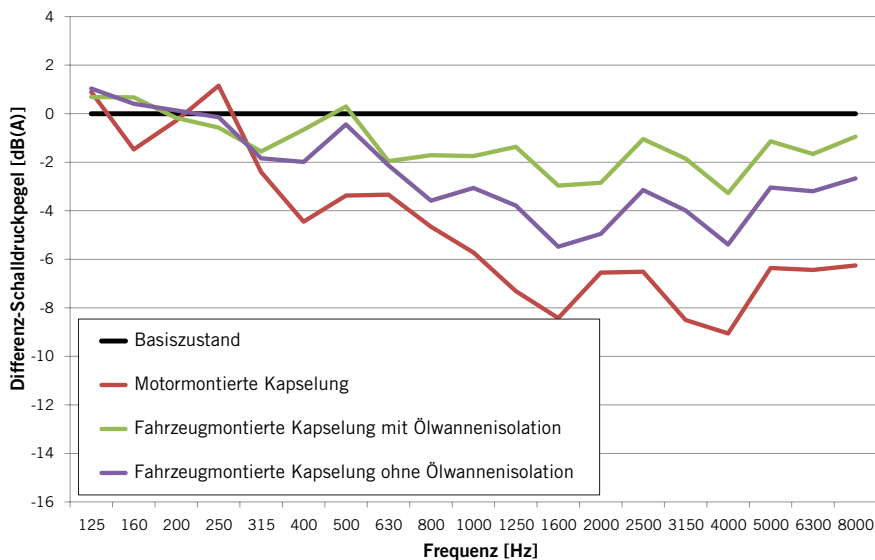
werden. Dies kann dazu führen, dass einzelne Isolationsbauteile nahe an Hitzequellen (zum Beispiel Turbo oder Katalysator) montiert werden müssen. Dies wiederum erfordert eine Materialkombination mit einer hohen thermischen Lang- und Kurzzeitstabilität

sowie einer hohen Entflammbarkeitstemperatur. Weil bei diesem Konzept die Isolationsbauteile direkt am Motor und Getriebe befestigt sind, werden zusätzlich hohe Anforderungen an die Vibrationsbeständigkeit des Materials gestellt.



③ Artikulationsindex (AI) über der Motordrehzahl für die Mikrofone an den äußeren und inneren Positionen des Fahrerohrs (D, Di) sowie des Beifahrerohrs (F, Fi)





4 Schalldruckpegel-Differenzspektren versus Basiszustand, gemessen an den externen Mikrofonpositionen links von Fahrzeug

wände links und rechts vom Motor die Wärmespeicherung erheblich verbessern – im Vergleich zu einem Konzept, bei dem die Isolationsbauteile seitlich an der Innenseite der Kotflügel befestigt werden. Dies liegt zum einen daran, dass solche Seitenwände relativ gut in Richtung der Haubenabsorber abgedichtet werden können, was zu einer Reduzierung des konvektiven Wärmeverlusts führt. Andererseits liegt dies daran, dass das Kapselungsvolumen massiv verkleinert werden kann und somit die für den Wärmeaustausch relevanten Oberflächen reduziert werden. Solche Bauteile benötigen eine gute Eigensteifigkeit, da sie aufgrund des Einbauorts häufig selbsttragende Eigenschaften aufweisen müssen.

## CO<sub>2</sub>-REDUKTION

Beide Kapselungskonzepte weisen ähnlich gute Wärmespeicherungseigenschaften und somit ähnliche CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale nach einem Motorneustart auf. Abkühlungsmessungen nach einem NEFZ haben gezeigt, dass das Kühlwasser nach einer Abkühlzeit von 12 h rund 5 bis 10 K wärmer bleibt, 2.

Gemäß [5] haben Fahrzeughersteller die Möglichkeit, eine Genehmigung für bestimmte innovative Technologien wie beispielsweise die Motorkapselung zu beantragen, die zu einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Um die CO<sub>2</sub>-Einsparung zu ermitteln, müssen die technischen Richtlinien in [6] angewen-

det werden. Mittels dieser Richtlinien konnten dank der Motorkapselung CO<sub>2</sub>-Reduktionen von bis zu 2 % ermittelt werden. Verbrauchsmessungen auf einem Prüfstand haben sogar bis zu 5 % weniger CO<sub>2</sub>-Ausstoß nach einer 7-h-Abkühlungsphase ergeben.

## NVH-VORTEILE

Die Verwendung zusätzlicher thermoakustischer Bauteile im Motorraum, in Form von unterschiedlichen Kapselungskonzepten, wirkt sich vorteilhaft aus sowohl auf das Außengeräusch – sehr aktuell im Hinblick auf die neuen Vorbeifahrergeräusch-Grenzwerte und Messverfahren [3] – wie auch auf die Innenraumakustik. Um die Wirksamkeit von Kapselungssystemen nachzuweisen, wurden akustische Tests auf einem Rollenprüfstand an einem Geländefahrzeug mit Ottomotor durchgeführt. Dabei wurden vier verschiedene Konfigurationen miteinander verglichen [7].

Der Schalldruck wurde mit vier Innenraum- und sechs Außenbereich-Mikrofonen gemessen. Die vier Mikrofone im Innenraum wurden in der Nähe von Ohrenpositionen (außen- und innenseitig) von Fahrer und Beifahrer (bezeichnet mit D, Di, F und Fi) befestigt. Die sechs Mikrofone im Außenbereich wurden in einem Abstand von 1,5 m seitlich vom Fahrzeug auf einer Höhe von 30 cm über dem Boden positioniert: drei auf jeder Seite des Fahrzeugs. Als Geräusch-

anregung wurde ein langsamer Motorhochlauf im Leerlauf gewählt, der es erlaubt, sich allein auf das Motorengeräusch zu konzentrieren.

3 zeigt den Artikulationsindex (AI offen) für die internen Mikrofone in Abhängigkeit von der Motordrehzahl für alle vier untersuchten Konfigurationen. Die Motorkapselung führt in allen Fällen zu einer wesentlichen Verbesserung des AI (in der Größenordnung von 10 bis 12 %), wobei die größte Verbesserung die motormontierte Kapselungsvariante brachte.

4 zeigt die durchschnittlichen Schalldruckpegel-Differenzspektren für die drei analysierten Kapselungskonfigurationen versus Basiszustand an den externen Mikrofonpositionen links vom Fahrzeug. Einerseits kann man unterhalb von 500 Hz relativ geringe Auswirkungen der Motorkapselungen beobachten, andererseits sind die hochfrequenten Schalldruckpegel-Verbesserungen sehr deutlich: 7 bis 8 dB(A) mit der motormontierten Kapselung und 4 bis 5 dB(A) mit der fahrzeugmontierten Variante. Auch die Wirkung der Ölwanneisolation ist bereits unter 1 kHz gut ersichtlich.

Alle diese Ergebnisse illustrieren das Potenzial einer Motorkapselung zur Verbesserung der Gesamtakustik eines Fahrzeugs. Die größere Wirkung einer motormontierten Kapselung im hochfrequenten Bereich deckt sich gut mit der allgemeinen Erwartung, da diese Art von Kapselung die eigentliche Lärmquelle am direktesten beeinflusst. Dieses Konzept führt allerdings zu einer viel höheren konstruktiven Komplexität (Anzahl und Form der Kapselungsteile), die wiederum direkt mit der Anforderung nach einem hohen Abdeckungsgrad zusammenhängt. Die Erfahrung zeigt, dass eine wirklich effektive motormontierte Kapselung mindestens 80 % der gesamten Motoroberfläche abdecken soll [4].

## ANFORDERUNGEN AN MATERIALIEN PASSEND FÜR EINE MOTORKAPSELUNG

Wie vorangehend erläutert, ist es wichtig, dass die eingesetzten Materialien gleichzeitig Hochleistungs-Wärmedämmung und gute akustische Eigenschaften liefern, um die maximale Wirksamkeit der Kapselung zu ermöglichen. Deshalb müssen die verwendeten Materialaufstellungen Haltbarkeit, thermische Sicherheit

und Formstabilität garantieren. Dies lässt sich in folgende Ansprüche übersetzen:

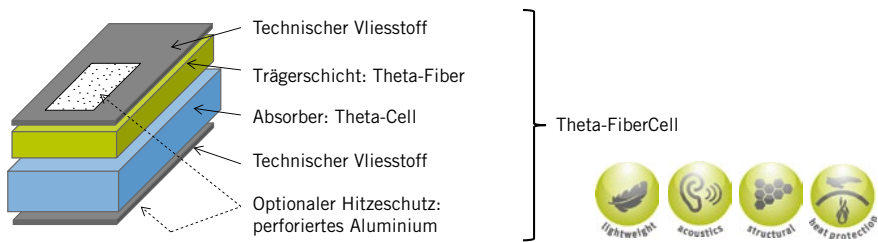
- : hohe Kurzzeit- und Langzeit-Temperaturstabilität
- : sehr hohe Selbstentzündung
- : ausgezeichnete Schwingfestigkeit
- : akustische Eigenschaften kombiniert mit ausgezeichneter Wärmeisolation
- : gute mechanische Eigenschaften, die ein selbsttragendes Design ermöglichen.

Autoneum hat dafür die Werkstoffzusammensetzung Theta-FiberCell entwickelt, die auf besondere Weise Leichtbau-, Akustik-, Formstabilitäts- und Wärmeschutzfunktion vereint. Dieses neue Material ermöglicht leichtgewichtige Kapselungen mit überdurchschnittlicher Schallabsorption und Wärmeisolation.

Theta-FiberCell ist eine Kombination aus einem semi-strukturellen Nadelvlies-Material (Theta-Fiber), das als Trägerschicht eingesetzt wird, und einem extrem leichten Polyurethanschaumstoff (Theta-Cell). Beide Schichten werden gemeinsam zu komplexen Bauteilformen gepresst. Während die Schaumseite hohe Schallabsorption und Wärmeisolation in Richtung des Motors aufweist, liefert die Trägerschicht Steifigkeit und Dauerschwingfestigkeit bei hohen Temperaturen. Diese Verbindung führt aufgrund der mikrozellulären Struktur zu einer sehr geringen thermischen Leitfähigkeit von etwa 0,035 W/mK bei 20 °C (abhängig vom Kompressionsverhältnis im Bauteil).

Das umfangreiche Materialverständnis bei diesen Lösungen zusammen mit den hoch stehenden Simulationswerkzeugen, die ebenfalls unternehmensintern entwickelt wurden, ermöglicht die genaue Vorhersage der Betriebsleistung der thermischen Isolierung, die über die vollständige Kapselungsgeometrie abgebildet wird, 5.

Auf der Basis von Glasfasern und Polyamid-Bindemitteln bietet Theta-Fiber eine maximale Kurzzeit-Temperaturbeständigkeit von 200 °C und eine Langzeit-Temperaturbeständigkeit – über eine Dauer von 1000 h – bis zu 160 °C bei weniger als 25 % Abbau der Zugeigenschaften. Höchsttemperaturen können hauptsächlich in der Nachglühphase auftreten, wenn der Motor abgestellt ist, nachdem er unter Vollast betrieben wurde. Demzufolge können handelsübliche Kapselungswerkstoffe, die auf Bindemitteln aus Phenol oder Polypropylen (PP) basieren, auch kurzzeitig nicht mehr solchen Temperaturen standhalten.



5 Typische Materialaufstellung für Kapselungsbauteile basierend auf Theta-FiberCell

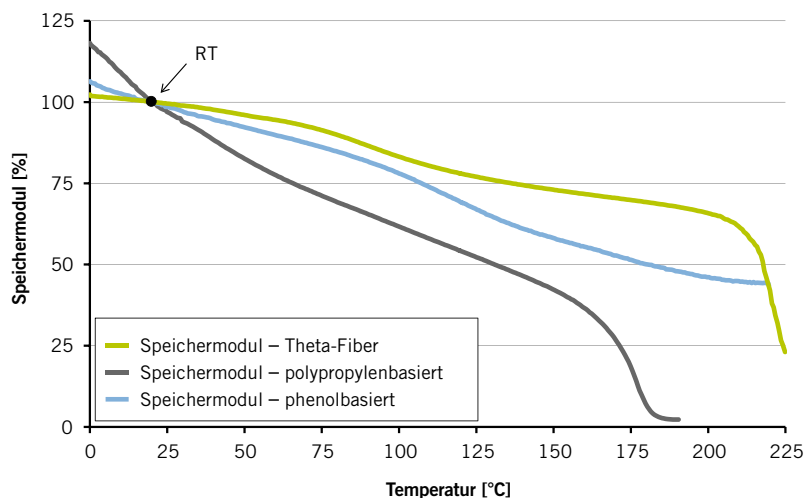
Diese Materialien hängen durch oder versagen an den Befestigungspunkten.

Die Temperaturgrenzen können effizient mittels der dynamisch-mechanischen Analyse (DMA) nach ISO 6721-4 bestimmt werden. 6 zeigt, dass Theta-Fiber bei einer Betriebstemperatur von 150 °C weiterhin 73 % der ursprünglichen Materialsteifigkeit bei Raumtemperatur (RT) beibehält. Somit kann sichergestellt werden, dass die Schallabsorption sowie die Resonanz der ersten Eigenschwingform stabil über den gesamten Betriebstemperaturbereich bleibt. Shaker-Tests haben die ausgezeichnete Haltbarkeit von Theta-Fiber bestätigt, indem ein Bauteil bei seiner ersten Resonanzfrequenz mit einer Beschleunigungsanregung von 4 g über mehr als 10 Millionen Zyklen erfolgreich getestet wurde. Auf der anderen Seite zeigen Materialien, die auf PP-Bindemitteln basieren, einen Abfall der komplexen Materialsteifigkeit auf ein Niveau von 58 %. Phenolharz fällt sogar auf 42 % ab und ermöglicht zusätzlich eine große Reduktion der Eigenfrequenzen.

Neben der Funktionalität bei hohen Temperaturen stellt die Betriebssicher-

heit, die durch geringe Entflammbarkeit und hohe Selbstentzündung gekennzeichnet ist, eine wichtige Voraussetzung für die Kapselungsmaterialien dar. Entsprechend der Brennbarkeitsprüfung nach FMVSS 302 (horizontal) wird Theta-FiberCell als Typ B, das „selbstverlöschend“ bedeutet, kategorisiert. Die vertikale Entflammbarkeit der PV-3357-Spezifikation bestätigt, dass das Material unter solchen Bedingungen nicht zu entzünden ist.

Des Weiteren entwickelte Autoneum einen Entflammbarkeitstest, um die spezifische Selbstentzündungstemperatur von Materialien zu bestimmen. Der Test charakterisiert die thermische Beständigkeit der Teile, welche sehr nahe an Wärmequellen wie Turboladern, Katalysatoren oder Auspuffrohren montiert sind. Abhängig von der Materialkompression konnte für Theta-FiberCell eine Selbstentzündungstemperatur im Bereich von 470 bis 510 °C gemessen werden. Hingegen zeigen Kapselungsmaterialien, die aus Naturfasern und PP-Bindemitteln bestehen, eine Selbstentzündung im Bereich von 340 bis 390 °C.



6 Messergebnisse für die Temperaturgrenzen mittels der dynamisch-mechanischen Analyse

## FAZIT UND AUSBLICK

Neue Motorentechnik und strengere Emissionsgesetze erfordern neue thermo-akustische Maßnahmen im Motorraum. Eine Motorkapselung ermöglicht eine verbesserte Fahrzeugakustik bei gleichzeitiger CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Verkürzen der Kaltstartphase.

Eine gewisse Sorgfalt bei der konstruktiven Umsetzung ist Voraussetzung für eine möglichst effektive thermo-akustische Motorkapselung. Zusätzlich wird eine Materialtechnik benötigt, die sowohl die benötigten thermischen als auch die akustischen Anforderungen erfüllen kann und zudem hervorragende mechanische Eigenschaften aufweist, um den anspruchsvollen Bedingungen im Motorraum gerecht zu werden. Autoneum hat mit Theta-FiberCell eine Materialkombination entwickelt, die diese Bedingungen erfüllt, und ist somit gerüstet für aktuelle und zukünftige Motorkapselungskonzepte.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 Setting Emission Performance Standards for New Passenger Cars as part of the Community's Integrated Approach to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions From Light-duty Vehicles
- [2] [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/faq\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/faq_en.htm)
- [3] Gruber, A.; Bohlen, S.: New Noise Regulations for Passenger Cars. Lecture, ATZlive Automotive Acoustics Conference, Zurich, 26 and 27 June 2013
- [4] Bürgin, T.: CO<sub>2</sub> and Emission Reduction by Means of Heat Storage in The Powertrain. Gaydon, VTMS 10, 2011
- [5] Commission Implementing Regulation (EU) No 725/2011 of 25 July 2011 Establishing a Procedure for the Approval and Certification of Innovative Technologies for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Passenger Cars Pursuant to Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council
- [6] Technical Guidelines for the Preparation of Applications for the Approval of Innovative Technologies Pursuant to Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council, Version 11 July 2011
- [7] Bertolini, C. et al.: Acoustic Benchmark of Different CO<sub>2</sub> Encapsulation Strategies: Application Examples and Methods for the Design of Powertrain Encapsulations. Lecture, ATZlive Automotive Acoustics Conference, Zurich, 26 and 27 June 2013



DOWNLOAD DES BEITRAGS

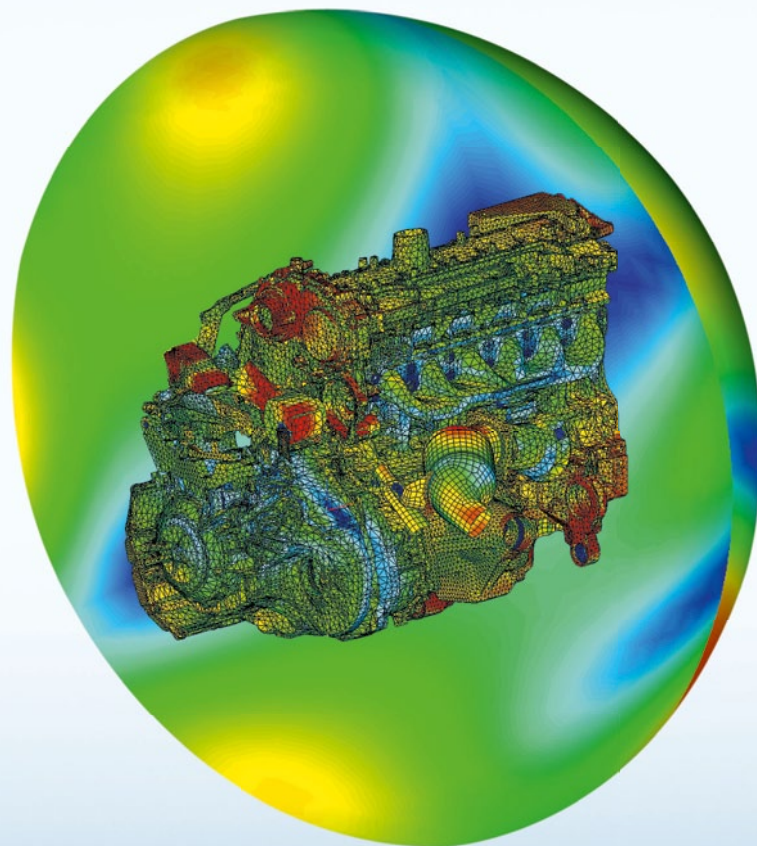
[www.springerprofessional.de/ATZ](http://www.springerprofessional.de/ATZ)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

order your test issue now:

[springervieweg-service@springer.com](mailto:springervieweg-service@springer.com)



## AVL EXCITE Acoustics

Hocheffiziente Berechnung der Schallabstrahlung von Antriebseinheiten mit der Wave Based Methode:

- in kürzester Zeit vom Modell zum Ergebnis
- einzigartige, automatisierte Vernetzung des akustischen Modells
- ein Akustiknetz für den gesamten Frequenzbereich
- schnelle und flexible Ergebnisauswertung

[www.avl.com/ast](http://www.avl.com/ast)  
[ASTMarketing@avl.com](mailto:ASTMarketing@avl.com)