

# METHODISCHE UNTERSUCHUNG VON TANKSCHWAPPGERÄUSCHEN

Kraftstofftanks gehören zu den eher unauffälligen Komponenten in einem Kraftfahrzeug. Mit dem vermehrten Einsatz von Start-Stopp-Systemen und der Hybridisierung von Antriebssträngen können Tankschwappgeräusche im Fahrzeuginnenraum stärker wahrgenommen werden. Daher hat das Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University Tankschwappgeräusche untersucht und Methoden zur simulationsgestützten Analyse und Optimierung von Kraftstofftanks sowie deren Integration ins Fahrzeug entwickelt.



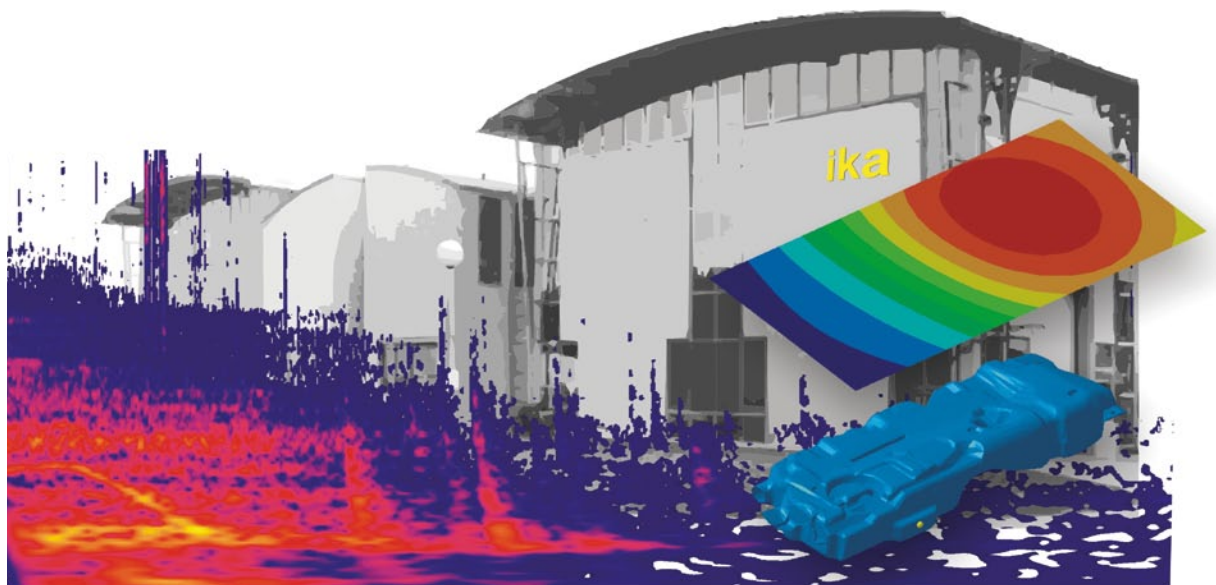
## AUTOREN



**DIPL.-ING.  
CHRISTIAN WACHOWSKI**  
ist Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter des Instituts  
für Kraftfahrzeuge (ika)  
der RWTH Aachen  
University.



**PROF. DR.-ING. HABIL.  
JAN-WELM BIERMANN**  
ist stellvertretender Leiter  
und Leiter des Lehr-  
gebiets Fahrzeugakustik  
des Instituts für Kraftfahr-  
zeuge (ika) der RWTH  
Aachen University.



1	EINLEITUNG
2	UNTERSUCHUNGSANSATZ
3	ENTWICKLUNG VON GERÄUSCHMINDERUNGSMASSNAHMEN
4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 1 EINLEITUNG

Ein Fahrzeug unterliegt einer Vielzahl an Anforderungen bezüglich seiner Eigenschaften. Besonders bei Fahrzeugen aus dem Premiumsegment steht unter anderem die Optimierung der NVH-Eigenschaften (Noise, Vibration, Harshness) im Fokus der Entwicklung. Sich schnell ändernde wirtschaftliche Rahmenbedingungen und gesellschaftliche Trends führen zu immer kürzeren Entwicklungszyklen und zu einem deutlichen Anstieg der Divergenzvielfalt einer Fahrzeugplattform bei einer gleichzeitig hohen Zahl an Gleichteilen. Somit stellt sich für die automobilen Forschung die Aufgabe, geeignete Simulationswerkzeuge und -prozesse zu entwickeln, mit denen bereits in einem frühen Entwicklungsstadium eines Fahrzeugs zuverlässige Aussagen bezüglich seines akustischen Verhaltens möglich sind.

Ein aktueller Trend in der Fahrzeugentwicklung ist die Hybridisierung und die Ausrüstung von Neufahrzeugen mit Start-Stopp-Systemen. Im unteren Geschwindigkeitsbereich und im Stand wird bei beiden Konzepten der Verbrennungsmotor abgeschaltet, sodass auch sein maskierendes Geräusch wegfällt. In diesen Betriebszuständen sind auch die Reifenabrollgeräusche und Windgeräusche entsprechend gering beziehungsweise fehlen. Um die Auswirkung auf die Fahrzeugakustik aufzuzeigen, werden die Innenraumschalldruckpegel eines am Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University aufgebauten Vollhybridfahrzeugs bei rein elektrischer und verbrennungsmotorischer Fahrt verglichen, ❶.

Bis zu einer Geschwindigkeit von circa 20 km/h beträgt der Unterschied zwischen beiden Betriebszuständen etwa 3 bis 5 dB (A). Durch die fehlenden Geräusche des Verbrennungsmotors treten vorher maskierte Geräuschquellen, das heißt die korrespondierenden Komponenten und Aggregate, nun akustisch in den Vordergrund. Dies trifft vor allem für Quellen tieffrequenter Geräusche, wie der im Tank schwappende Kraftstoff, zu.

## 2 UNTERSUCHUNGSANSATZ

In dem am ika entwickelten Untersuchungsansatz soll das Phänomen „Tankschwappgeräusche“ methodisch und ganzheitlich behandelt werden. Zunächst wird das Phänomen in Fahrversuchen detailliert untersucht, um hierauf aufbauend eine geeignete Prüfstandsgebung zu definieren und um tiefergehende Komponentenuntersuchungen durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Messungen werden dann zur Validierung von Simulationsansätzen und -modellen verwendet. Mithilfe der Simulationen werden abschließend Maßnahmen zur Geräuschvermeidung und -minderung entwickelt. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Schwappvorgänge im Tankinneren, die schwingstechnischen Eigenschaften der Tankhüllenstruktur und den Geräuschtransfer in den Fahrzeuginnenraum.

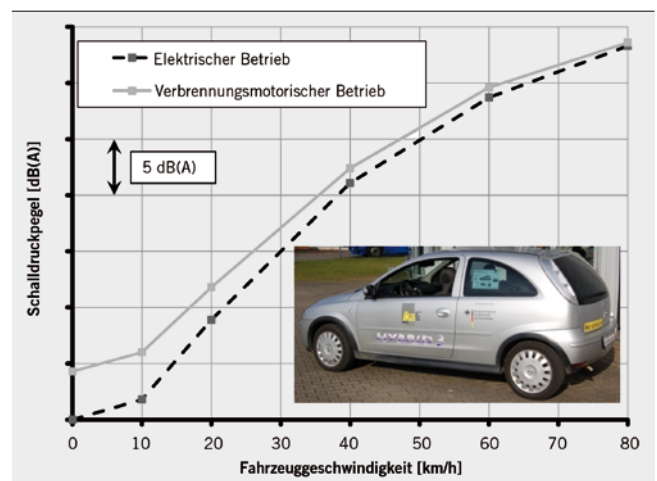
### 2.1 UNTERSUCHUNG DER STRÖMUNGSDYNAMISCHEN VORGÄNGE

Tankschwappgeräusche werden hauptsächlich während oder nach Bremsvorgängen, im Stand sowie bei langsamer Fahrt wahrgenommen. Vor dem Bremsereignis bei konstanter Geschwindigkeit befindet sich die Flüssigkeit im statischen Gleichgewicht. Wird nun das Fahrzeug abgebremst, türmt sich Flüssigkeit aufgrund ihrer Trägheit an der Stirnseite des Tanks auf. Potenzielle Energie wird wie in einer zusammengedrückten Feder gespeichert. Lässt die Verzögerung nach, wird die gespeicherte potenzielle Energie in kinetische gewandelt. Die Flüssigkeit fließt nun in den hinteren Teil des Tanks und türmt sich an der Tankrückseite auf. Nach einmaliger Auslenkung wiederholt sich dieser Vorgang bis die gesamte kinetische Energie dissipiert ist. Diese Schwingbewegung des Kraftstoffs wird Schwappen genannt. Wenn die Wellenfront dabei gegen die Tankdecke schlägt oder die Wellenfronten gegeneinander schlagen, entstehen Schwappgeräusche [1].

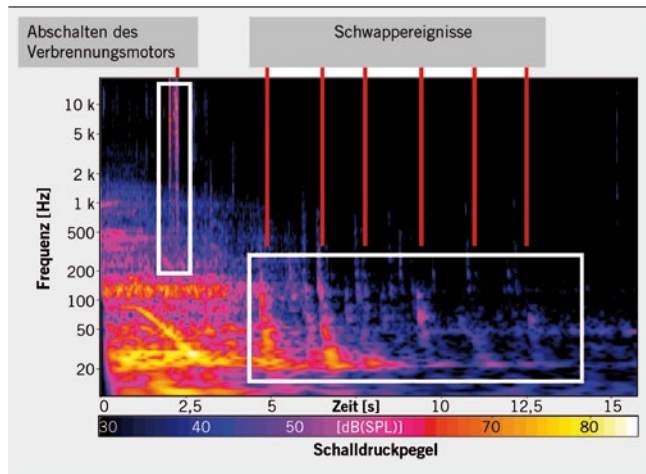
Abhilfemaßnahmen stellen insbesondere Schwallbleche und sogenannte „Igelmaten“ dar. Schwallbleche bewirken, dass der längsgerichteten Strömung im Tank ein Widerstand entgegengestellt wird. Als Igelmaten werden an die innere Tankwand befestigte Schaumstoffelemente bezeichnet, die eine grob genoppte Oberfläche aufweisen. Die eingebrachten Schaumelemente brechen glatte Wellenfronten an der Tankwand auf und dämpfen somit den Auftreffimpuls.

Da, wie eingangs beschrieben, besonders Fahrzeuge mit Hybrid- oder Start-Stopp-Systemen akustische Rahmenbedingungen bieten, die die Wahrnehmung von Tankschwappgeräuschen begünstigen, wird zur versuchstechnischen Simulation dieser Situation bei einem Bremsvorgang mit einem konventionellen Fahrzeug der Verbrennungsmotor abgeschaltet. ❷ zeigt eine Wavelet-Analyse des auf dem Fahrersitz gemessenen Innenraumgeräusches. Deutlich sind die Impulshaftigkeit und der tieffrequente Charakter der einzelnen Schwappgeräusche zu erkennen. Die Schwappgeräusche sind bei diesem Beispiel bis circa 12,5 s nach Stillstand des Fahrzeugs noch wahrnehmbar.

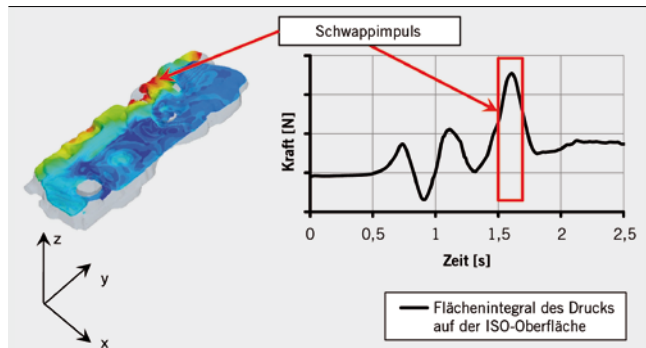
Zur Nachbildung der Manöver in einem reflektionsarmen Schallmessraum ohne störende Einflüsse durch den Fahrzeugbetrieb wird ein Prüfstand konzipiert und aufgebaut [2]. An die Gestaltung des Prüfstands werden die folgenden Anforderungen gestellt:



❶ Innenraumschalldruckpegel eines Hybridfahrzeugs bei verbrennungsmotorischem und rein elektrischem Betrieb



② Schwappgeräusche im Fahrzeuginnenraum



③ Simulation und Visualisierung von Tankschwappen

- : Abbildung von längsdynamischen Bewegungen analog zum Fahrversuch
- : eindimensionale Anregung und Bewegungsmöglichkeit des Schlittens
- : Möglichkeit zum Nachbau der Karosserieanbindungspunkte
- : verbesserte Zugänglichkeit des Tanks
- : Einsatz einer akustischen Kamera zur Schallquellenlokalisierung
- : elektromechanischer Antrieb des Schlittens zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Manöver.

Der diesen Anforderungen entsprechende Prüfstands Aufbau verfügt über einen Schlitten, auf dem der zu untersuchende Tank befestigt wird. Neben einem manuellen Betrieb kann der Schlitten auch elektromechanisch betrieben werden, dadurch wird eine höhere Reproduzierbarkeit der Anregung erzielt. Mit dem Prüfstand ist es möglich, relevante Schnittstellengrößen zwischen Tank und Fahrzeugkarosserie wie Schalldruck und Oberflächenbeschleunigungen der Tankhülle zu ermitteln.

Im Weiteren werden die strömungsdynamischen Vorgänge mithilfe von CFD-Simulationen abgebildet. Ausgehend von CAD-Daten wird zunächst ein geometrisches Modell des Tanks erstellt. Das heißt, das innere Volumen des Tanks wird in viele einzelne Teilzellen unterteilt. Im nächsten Schritt wird die physikalische Modellierung vorgenommen. Neben verschiedenen anderen Teilaspekten ist hier besonders die Modellierung der Trennung von Gas und Flüssigkeit zu erwähnen. Dabei wird die Schnittstelle der Mehrphasenströmung,

also die voneinander getrennten Phasen Gas und Flüssigkeit, in dem Simulationsmodell mittels der Volume-of-Fluid-Methode (VOF) modelliert [2, 3]. Damit lässt sich die freie Oberfläche beziehungsweise die Position des Rands der Flüssigkeitsphase berechnen. Die Trennschicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase wird auch ISO-Oberfläche genannt. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die mithilfe der Simulationen gewonnenen, numerischen Ergebnisse nur Näherungslösungen sind. Neben den Approximationen im Diskretisierungsprozess sind Näherungen beziehungsweise Vereinfachungen in den Differenzialgleichungen enthalten und die Lösung der Gleichungen beruht auf iterativen Methoden.

Für die Simulation von Schwappgeräuschen gibt es keine direkte Möglichkeit, eine akustische Größe wie den Schalldruckpegel zu bestimmen. Weiterhin kommt zur Geltung, dass bei einem Schalldruckpegel von 80 dB der Schalldruck gerade einmal 0,2 Pa entspricht. Dieser Anteil wird partiell bereits durch den Berechnungsfehler überlagert. Es müssen dementsprechend geeignete Indikatoren entwickelt und angewandt werden, die zumindest eine qualitative akustische Aussage zulassen, um verschiedene Tankvarianten vergleichen zu können. ③ zeigt eine beispielhafte Darstellung eines Tankmodells mit visualisierter Druckverteilung auf der ISO-Oberfläche zum Zeitpunkt des Schwappens.

Neben dem Verlauf der Kraft, die sich durch Flächenintegration des Drucks auf der ISO-Oberfläche berechnet, ist die Druckverteilung zum Zeitpunkt des Schwappens in einer 3D-Ansicht dargestellt.

## 2.2 UNTERSUCHUNG DER STRUKTURELLEN EIGENSCHAFTEN VON KRAFTSTOFFTANKS

Aufgrund der impulsartigen Anregung der Tankhülle wird Luftschall abgestrahlt und Körperschall über die Haltebänder in die Karosserie geleitet. Liegt die Tankdecke an der Karosserie an, besteht in jedem Kontaktpunkt ein weiterer Transferpfad. Die Tankhülle bildet demnach ein relevantes Glied in der Transferstrecke zwischen Geräuschenstehung und -wahrnehmung.

Kraftstoffbehälter aus hochmolekularem PE-HD-Kunststoff werden meist im Extrusionsblasformverfahren hergestellt [4]. Dabei wird eine thermoplastische Kunststoffschmelze in zähflüssigem Zustand in eine Halbschalenform eingebracht. Diese wird geschlossen, und ein am Extruder angebrachter Blasdorn im Inneren der Schmelze baut einen Druck auf, der den Kunststoff von innen an die Formwand presst. Nach dem Abkühlen wird der Blasrohling entformt und entgratet.

Die mehrlagige Tankhülle besteht von außen nach innen aus rußgeschwärmtem Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), einer Haftvermittlerschicht, einer im Vergleich zur Wandstärke dünnen Ethylenvinylalkohol-Copolymerharzschicht (EVOH), einem weiteren Haftvermittler und der ungeschwärmten, milchig-weißen Polyethyleninnenschicht. Die EVOH-Schicht dient dabei der Reduzierung von Emissionen auf molekular-osmotischer Ebene. PE-HD ist ein schwach verzweigter teilkristalliner thermoplastischer Kunststoff. Seine kettenförmigen Molekülstrukturen sind also an nur wenigen Stellen durch Querbrücken verbunden. Das dynamische Verhalten von Thermoplasten genügt nicht den Anforderungen an eine lineare Werkstoffcharakteristik, wie beispielsweise Stahl sie aufweist: Größe und zeitliche Dauer der Belastung spielen eine entscheidende Rolle [5].

Zur Bestimmung des Strukturverhaltens wird eine experimentelle Modalanalyse an einem Kunststofftank durchgeführt. ④ zeigt das Ergebnis dieser Messung. Die einzelnen Transferfunktionen sind hier zu einer Kurve gemittelt.

Deutlich ist zu erkennen, dass im Bereich unter 200 Hz Überhöhungen vorliegen, die sich somit in einem Frequenzbereich befinden, in dem auch Überhöhungen im Schwappgeräusch auftreten. Es gilt daher zu prüfen, inwiefern diese Überhöhungen durch strukturelle Maßnahmen gesenkt werden können und welchen Einfluss dies wiederum auf das Schwappgeräusch im Gesamtsystem Fahrzeug hat. Dazu wird zunächst ein FE-Modell des Tanks mit den experimentell ermittelten Transferfunktionen validiert.

### 2.3 UNTERSUCHUNG DER TRANSFERPFADE VOM TANK IN DEN FAHRZEUGINNENRAUM

Mit der Transferpfadanalyse soll ein weit verbreitetes Analysewerkzeug angewendet werden, um die Anteile von Körperschall- und Luftschalltransferpfaden am Schwappgeräusch im Innenraum zu bestimmen [6]. Hierzu werden in einem Fahrzeug die Transferfunktionen zwischen den relevanten Anregungsstellen am Tank und einem Kunstkopf-Messsystem auf dem Beifahrersitz sowie die Karosserieeinertanzen an den Anregungsstellen bestimmt.

Die Informationen zum Transferverhalten des Fahrzeugs werden mit in Versuchen gemessenen Betriebsschwingungen und -geräuschen verknüpft. Mithilfe eines Analysetools lässt sich der von jedem einzelnen Anregungspunkt erzeugte Schalldruckpegel im Innenraum berechnen. 5 zeigt das Ergebnis für den Innenraumgeräuschpegel bei Körperschallanregung. Der durch Luftschall übertragene Anteil am Innengeräuschschalldruckpegel ist im vorliegenden Fall vernachlässigbar und wird hier nicht weiter behandelt.

Hierbei ist in der unteren Reihe das Frequenzspektrum des Innenraumgeräusches dargestellt. Weiterhin zeigt die Auswertung, welche Geräuschanteile laut Berechnung über die einzelnen Pfade in den Innenraum transferiert werden. Es stellt sich somit heraus, dass das Schwappgeräusch maßgeblich über den Pfad 4 in den Innenraum übertragen wird. Im Folgenden wird untersucht, welche Geräuschreduzierung sich durch den Einsatz von Elastomerelementen zur Entkopplung des Tanks von der Karosserie erzielen lässt.

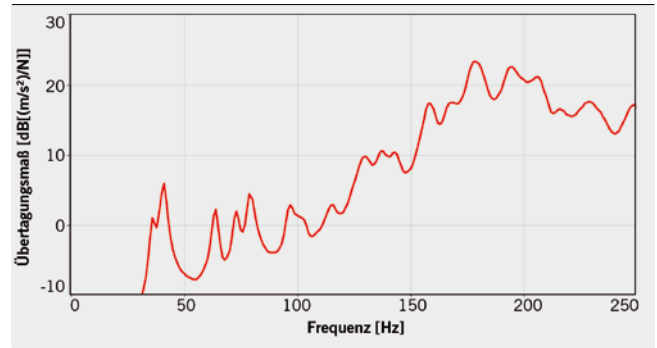
## 3 ENTWICKLUNG VON GERÄUSCHMINDERUNGSMASSNAHMEN

Nach Analyse der Geräuschentstehung und -ausbreitung auf der Grundlage von Versuchs- und Simulationsergebnissen werden anschließend Maßnahmen zur Reduktion von Schwappgeräuschen entwickelt. Die verschiedenen Varianten werden anhand von Simulationsergebnissen bewertet. Es werden Maßnahmen im Tank zur Beeinflussung der strömungsdynamischen Vorgänge, strukturelle Maßnahmen zur Beeinflussung des Schwingungsverhaltens und der Schallabstrahlung der Tankhülle sowie Maßnahmen auf Seiten der Fahrzeugintegration diskutiert.

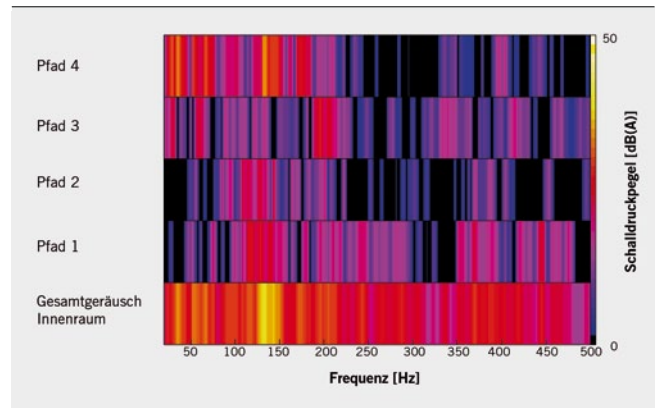
### 3.1 MASSNAHMEN IM TANKINNEREN

6 zeigt beispielhaft verschiedene Schwallblechvarianten, die in das Modell einer Fahrzeugtankgeometrie integriert werden. Auf der linken Seite befinden sich Schwallbleche, die den Tankquerschnitt zu 50% verdecken. Die Varianten der rechten Seite weisen eine Verdeckung des Querschnitts von 90% auf. Die Varianten unterscheiden sich darüber hinaus in Anzahl und Größe von Löchern, die ein hartes und damit geräusch erzeugendes Anschlagen der Wellen reduzieren sollen.

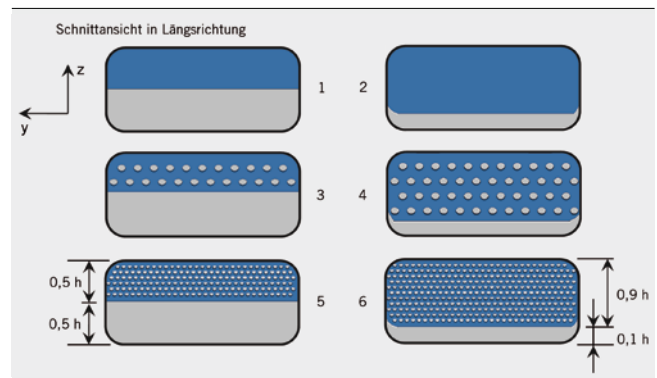
Neben der Gestaltung der Schwallbleche wird auch ihre Position variiert. Hierbei ist besonders die durch die Schwallbleche bedingte Auf-



4 Ergebnis der Strukturuntersuchung



5 Transferpfadanalyse für ein Schwappgeräusch

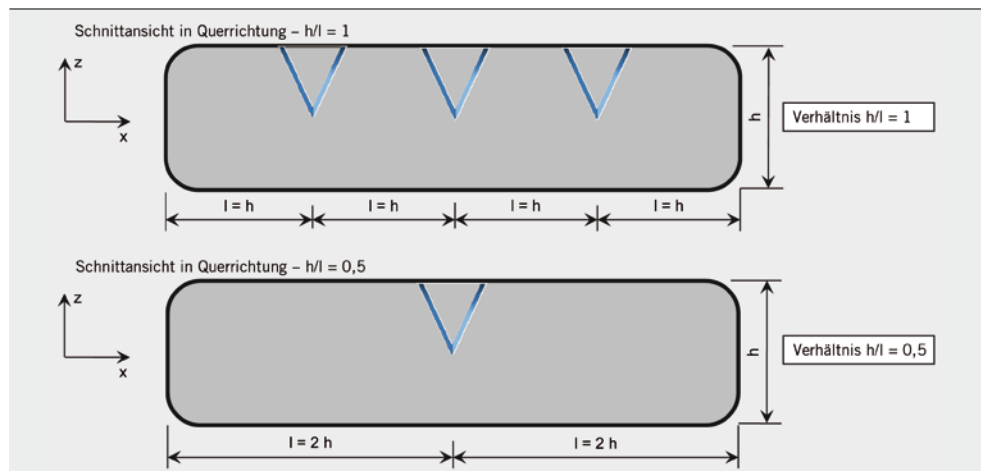


6 Übersicht der Schwallblechvarianten

teilung eines Tanks in einzelne Abschnitte und das sich dabei ergebende Verhältnis aus Kammerlänge und -höhe von Interesse [7]. Somit werden die Verhältnisse  $h/l = 0,5$  und  $h/l = 1$  unterschieden, 7.

Die Tankmodelle mit einem Verhältnis  $h/l = 1$  weisen somit drei Schwallbleche auf. Da CFD-Simulationen auch heute noch mit einem hohen Rechenaufwand verbunden sind, werden nicht alle Füllstände für alle Varianten berechnet. Die Varianten werden anhand folgender berechneter Größen bewertet:

- : Flächenintegral des Drucks auf der ISO-Oberfläche
- : zeitliche Ableitung des oben genannten Verlaufs
- : Druckverläufe an den virtuellen Messstellen
- : zeitliche Ableitung der oben genannten Verläufe.



7 Positionierung der Schwallbleche

Zu jeder Bewertungsgröße wird jeweils das Maximum gebildet. Anhand dieser Größen werden die Ergebnisse der verschiedenen Varianten bewertet. Es werden insgesamt fünf Füllstände untersucht. 8 stellt die Ergebnisse dieser CAE-gestützten Untersuchung tabellarisch dar.

Die Bewertungen werden dabei jeweils auf den ursprünglichen Grundtank ohne Maßnahmen bezogen. Wie zu erwarten, liefert Variante 6 das beste Ergebnis. Viel interessanter ist jedoch, dass trotz Schwallblechen einige Varianten schlechtere Ergebnisse als das Ausgangsmodell liefern. Nicht jede Maßnahme führt somit zu einer Verbesserung. Die Simulation hilft, zielführende Maßnahmen abzuleiten und zu bewerten.

### 3.2 MASSNAHMEN AN DER TANKHÜLLE

Im Weiteren werden FE-Modelle mit unter verschiedenen Rahmenbedingungen optimierten Tankwanddickenverteilungen umgesetzt und anschließend die Schallabstrahlung berechnet [8, 9]. Das Ergebnis wird mit dem Ausgangsmodell verglichen. Mithilfe der Strukturoptimierung werden folgende Variationen analysiert:

- : Bei der Optimierung ist eine Volumenzunahme der Tankhülle von 5, 10, 30 und 50% erlaubt.
- : Bei der Optimierung ist eine maximale Wanddicke von 6,5 mm, 8 mm, 10 mm und 15 mm erlaubt.

Es ergeben sich für den vorliegenden Fall 16 Varianten, 9. Bei einem geschlossenen Fahrzeug ist vor allem der Körperschalltransfer für das vom Fahrer wahrzunehmende Schwappgeräusch verantwortlich. Mit dem Öffnen eines oder mehrerer Fenster (zum Beispiel an einem Drive-In) oder auch für Cabriolets kann der Luftschalltransfer einen höheren Anteil am vom Fahrer wahrgenommenen Schwappgeräusch erhalten. Deshalb werden die optimierten Tankhüllen anhand der Geräuschabstrahlung um 132 Hz verglichen. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Strukturmodifikationen Frequenzverschiebungen einzelner Peaks bewirken.

Es lässt sich erkennen, dass die höchsten Pegelabsenkungen bei einer maximal erlaubten Volumenzunahme von 10% und maximal erlaubten Wanddicke von 15 mm vorliegen.

### 3.3 ÜBERARBEITUNG DER FAHRZEUGINTEGRATION

Die Transferpfadanalyse zeigte, dass der Pfad 4 maßgeblich das Schwappgeräusch in den Innenraum überträgt. Im Folgenden wird

dargestellt, wie sich die Manipulation allein dieses Pfads auf das Innenraumgeräusch auswirkt. Hierbei bedeutet Manipulation, dass das Halteband des Tanks mit einem Elastomerelement von der Karosserie entkoppelt wird. In 10 werden die beiden Varianten Ausgangszustand und Manipulation des Pfads 4 verglichen. Das Diagramm beinhaltet zwei Kurven. Die blaue Kurve zeigt das Innengeräuschspektrum im Ausgangszustand. Die rote Kurve stellt das Ergebnis nach Manipulation des Pfads 4 dar. Für eine deutlich spürbare Auswirkung auf das Innengeräusch ist somit selbst die hier stattgefundenene Manipulation noch nicht ausreichend, da sich die Gesamtgeräuschpegel im Frequenzbereich bis 500 Hz nur um zirka 2 dB(A) unterscheiden. Für eine deutlich spürbare Reduktion des Schwappgeräusches im Innenraum müsste der Gesamtgeräuschpegel um mindestens 6 dB(A) gesenkt werden. Eine weitere Anpassung der Tankanbindung ist demnach erforderlich. Diese Maßnahme ist nicht immer

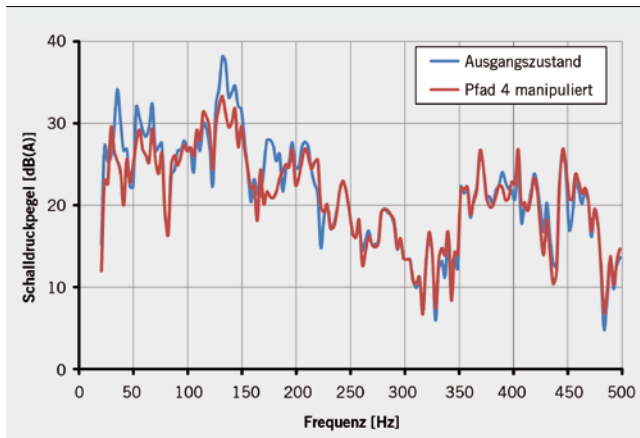
SCHWALLBLECHDESIGN

	Verhältnis h/l	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Füllstand 1	1	o	+	-	o	++	++
	0,5	—	-	-	—	++	++
Füllstand 2 & 3	1	X	X	X	X	+	++
	0,5	X	X	X	X	X	+
Füllstand 3 & 4	1	X	X	X	X	X	++

9 Tabellarischer Vergleich der verschiedenen Varianten

VARIANTE	6,5 mm	8 mm	10 mm	15 mm
5 %	-8,3 dB(A)	-9,8 dB(A)	-6,8 dB(A)	-4,2 dB(A)
10 %	-5,9 dB(A)	-7 dB(A)	-9 dB(A)	-15,3 dB(A)
30 %	-8,1 dB(A)	-2,4 dB(A)	-6,5 dB(A)	-15,3 dB(A)
50 %	-8 dB(A)	-3,4 dB(A)	-8,4 dB(A)	4 dB(A)
	> -2,5 dB(A)	-2,5 ≥ -7 dB(A)	-7 ≥ x > -9 dB(A)	≤ -9 dB(A)

10 Schalldruckpegeldifferenzen um 132 Hz



10 Einfluss der Transferpfadmanipulation auf das Innenraumgeräusch

umsetzbar, sodass zur Absenkung der Schwappgeräusche für ein Fahrzeug zusätzliche Maßnahmen im Tankinnen beziehungsweise strukturelle Maßnahmen an der Tankhülle abzuwägen sind.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dem vermehrten Einsatz von Start-Stopp-Systemen und der Hybridisierung von Antriebssträngen können Tankschwappgeräusche im Fahrzeuginnenraum stärker wahrgenommen werden. Zur frühzeitigen Untersuchung von Kraftstofftanks und ihrer Fahrzeugintegration bezüglich ihrer Schwappempfindlichkeit in einem ganzheitlichen Ansatz wurde am ika ein entsprechendes Vorgehen entwickelt. Dieser Ansatz wird als nächstes noch weiter verfeinert und kann dann bei der Produktentwicklung in der Industrie eingesetzt werden.

#### LITERATURHINWEISE

- [1] Aus der Wiesche, S.: Noise due to sloshing within automotive fuel tanks. In: Forschung im Ingenieurwesen, Heidelberg: Springer-Verlag, Volume 70, Number 1, S. 13 – 24, 2005
- [2] Wachowski, C.; Biermann, J.-W.; Gies, S.; Middelhaue, G.; Schala, R.; Kopp, P.; Schrüllkamp, T.: Holistic Investigation on Sloshing Noise. TankTech 2009, Bad Gögging, 2009
- [3] Hirt, C. W.; Nichols, B. D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. In: Journal of Computational Physics, Volume 39, Issue 1, S. 201 – 225, 1981
- [4] Brinkmann, T.; Michaeli, W.; Lessenich-Henkys, V.: Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren. München: Carl Hanser Verlag, 1995
- [5] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. München: Carl Hanser Verlag, 2006
- [6] Graeff, L.; Biermann, J.-W.: Optimierung der Antriebsstrangakustik am Beispiel eines SUV: Gesamtsystembetrachtung. In: Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik IV, Renningen: Expert Verlag, S. 95 – 110, 2007
- [7] Dodge, F. T.: The new "dynamic behavior of liquids in moving containers". San Antonio, Southwest Research Institute, 2000
- [8] Schwarz, D.: Gestaltung optimierter Sickenbilder für flächige Strukturen unter Einsatz numerischer Optimierungsverfahren. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2003
- [9] Graf, B.: Validierung von Methoden zur Berechnung und Reduzierung der Schallabstrahlung von Getriebegehäusen. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 2008



DOWNLOAD DES BEITRAGS  
www.ATZonline.de



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

# Ideen auf Rädern.



Früher konnte man die Qualität eines Autos an der Zahl seiner Spiegelflächen ablesen. Heute muss es vor allem mit Sparsamkeit glänzen. Zum Beispiel durch den Einsatz von hocheffizienten LED-Scheinwerfern. Für deren hocheffiziente Kühlung sorgt ebm-papst. Denn als führender Automotive-Entwickler von Lufttechnik und BLDC-Antrieben sind es gerade die Zukunftsthemen wie LED-Kühlung, aber auch Hybrid- und Umwelttechnologie, Fahrodynamik und Komfortlösungen, die uns immer wieder auf glänzende Ideen bringen. Um sie auf die Räder zu stellen, brauchen wir aber noch etwas: nämlich Sie! Lassen Sie uns also gemeinsam herausfinden, wo sich Ihre Anforderungen mit unseren Lösungswegen treffen.

[www.ebmpapst.com](http://www.ebmpapst.com)



Die Wahl der Ingenieure

**ebmpapst**