

Numerische Aeroakustik für Anwendungen im Automobilbereich

Derzeit gibt es kein Berechnungsverfahren, das allgemein, robust und zuverlässig den Entwurf von Bauteilen mit minimalen Um- oder Durchströmungsgeräuschen ermöglicht, so dass nach wie vor aufwändige und teure Messungen in aeroakustischen Windkanälen notwendig sind. Es gibt im Bereich der numerischen Aeroakustik jedoch eine Vielzahl von Rechenansätzen und Modellen, die – mindestens für Spezialgebiete – versprechen, zuverlässige Vorhersagen zu liefern. Einige dieser Ansätze und Verfahren wurden und werden in der Konzernforschung der Volkswagen AG untersucht und mit eigenen Messergebnissen validiert.

1 Einleitung

Strömungsgeräusche bei Fahrzeugen lassen sich grob in tonale und Breitband-Lärmquellen trennen. Bei den tonalen Quellen hebt sich eine Frequenz oder ein schmaler Frequenzbereich deutlich vom Gesamtspektrum ab. Diese Quellen werden meist als sehr störend empfunden, so dass ihre Beseitigung hohe Priorität im Entwicklungsprozess hat. Oft sind tonale Lärmquellen mit strömungsmechanischen Resonanzeffekten verbunden. Breitbandlärm beschreibt dagegen eine Art Grundrauschen. Bei höheren Pegeln kann das, auch wenn es nicht unmittelbar als besonders störend empfunden wird, den Komfort und die Konzentration des Fahrers stark beeinträchtigen. Abhängig von der Frequenz und vom Grundtyp der Lärmquelle sind unterschiedliche Ansätze zur Simulation denkbar und sinnvoll.

2 Methodische Ansätze

Bei der Simulation von Strömungsgeräuschen für Anwendungen im Automobilbereich können derzeit nur theoretisch die hydrodynamischen Grundgleichungen direkt gelöst werden. Zwar ist die komplette Hydrodynamik und Akustik enthalten, diese spielen sich jedoch auf sehr unterschiedlichen Längen, Zeit- und Amplitudenskalen ab. Die in den meisten (kommerziellen) Strömungslösern eingesetzten Diskretisierungsverfahren sind für aeroakustischen Anwendungen nicht ausgelegt und nicht geeignet. Insbesondere Dispersionsfehler können die Lösung bezüglich der Akustik schnell vollkommen unbrauchbar machen und verhindern, dass eine akustische Wellenausbreitung direkt im CFD-Werkzeug berechenbar ist. In der Regel kommen daher hybride Ansätze zum Einsatz, deren gemeinsames Merkmal die Trennung der akustischen Quellberechnung von der Berechnung der akustischen Wellenausbreitung ist. Rückwirkungen der Akustik auf die Strömung (wie etwa beim Schiebedachwummern) können damit grundsätzlich nicht behandelt werden. Abgesehen von solchen Ausnahmen kann diese Rückwirkung für die typischen Anwendungen im Automobilbereich aber meist vernachlässigt werden.

2.1 Analogiegleichungen

Die fundamentale Arbeit von Lighthill [1] ist die wohl am meisten zitierte Arbeit im Bereich der numerischen Aeroakustik. Durch geschickte Umformung der hydrodynamischen Grundgleichungen ist es ihm gelungen, eine gewisse Trennung zwischen akustischen Quelltermen der Strömung und der wellenförmigen Ausbreitung herzustellen:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij} + (p' - c_0^2 \rho')) \quad (1)$$

Gleichung (1) ist zunächst nur eine Vereinigung und Umgruppierung der hydrodynamischen Grundgleichungen und enthält die Dichteschwankung $\rho' = \rho - \rho_0$, die Druckschwankung $p' = p - p_0$, die viskosen Spannungen τ_{ij} , die Absolutgeschwindigkeiten u_i und drei zunächst beliebige Konstanten ρ_0 , p_0 und c_0 .

Wählt man ρ_0 , p_0 und c_0 so, dass sie den Freifeldbedingungen für die Fluid-dichte, den statischen Druck und die Schallgeschwindigkeit entsprechen, dann können alle Terme der rechten Seite im akustischen Fernfeld gegenüber der linken Seite vernachlässigt werden, wenn zusätzlich das Koordinatensystem so gewählt wird, dass das Fluid dort im zeitlichen Mittel ruht. Dort, wo die rechte Seite nicht verschwindet beziehungsweise nicht vernachlässigt werden kann, bleibt die ursprüngliche Nichtlinearität erhalten und die Gleichung kann nicht über eine Greensche Funktion integriert werden. Üblicherweise wird daher ein hybrider Ansatz zur Lösung angewandt. Im Quellbereich muss eine transiente Simulation der kompletten kompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen durchgeführt werden. Anschließend können damit aus der Lösung die Quellterme und schließlich die Schallabstrahlung ins Fernfeld berechnet werden.

In der Praxis werden im Allgemeinen einige Vereinfachungen der Gleichung vorgenommen. Der zweite Term der rechten Seite enthält die Viskositätsterme und ist für die meisten Anwendungen im Automobilbereich (hohe Reynoldszahlen) gegenüber dem ersten Term zu vernachlässigen. Der dritte Term der rechten Seite verschwindet in erster (linearer) Näherung, wenn ρ_0 , p_0 und c_0 wie bereits beschrieben gewählt werden. Für

Die Autoren



Dr. rer. nat.
Michael Hartmann
ist Berechnungsingenieur bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.



Hervé Dechpre
ist Berechnungsingenieur bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

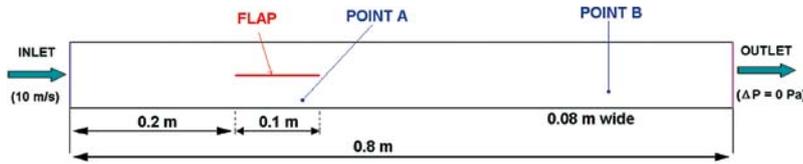


Bild 1: Kanalgeometrie: Auswertepunkt A liegt bei 12,5 % der Kanalhöhe und bei 80 % der jeweiligen Plattenlänge; Auswertepunkt B liegt 0.15 m vor dem Auslass und bei 25 % der Kanalhöhe

die kleinen Machzahlen der automobilen Anwendungen sind auch die Dichteschwankungen (abgesehen von motorischen Strömungen) oft klein, so dass im ersten Term ρ in guter Näherung durch ρ_0 ersetzt werden kann. Dann kann der Quellterm $\rho_0 (\partial^2 / \partial x_i \partial x_i) u_i u_j$ in dieser Näherung auch durch eine inkompressible Strömungssimulation berechnet werden. Die gesamte rechte Seite der Gleichung (1) wird durch die zwei räumlichen Ableitungen als Quadropolquelle interpretiert.

2.2 Störungsgleichungen

Ein anderer Ansatz der Akustiksimulation setzt direkt auf den Impulsgleichungen (meist unter Vernachlässigung der Viskosität) auf. Da die akustischen Schwankungen im Allgemeinen sehr klein im Vergleich zu den hydrodynamischen Größen sind, werden die Impulsgleichungen linearisiert und es werden dann die Schwankungen (ρ' , u'_j , p') um einen gegebenen Mittelwert $\bar{\rho}$, \bar{u}_j , \bar{p}

betrachtet beziehungsweise berechnet. Man gelangt so zu den linearisierten Eulergleichungen (Linearized Euler Equations, LEE):

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \rho'}{\partial x_j} + \bar{p} \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} + \rho' \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + u'_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial u'_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\rho'}{\bar{\rho}} \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial x_i} = 0 \quad (2b)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial p'}{\partial x_j} + u'_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \gamma \bar{p} \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} + \gamma p' \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2c)$$

Die Schwankungsterme beinhalten in dieser Näherung sowohl akustische als auch hydrodynamische und Entropieschwankungen. Die LEE- beziehungsweise die darauf aufbauenden so genannten APE-Gleichungen [2] (Acoustic Perturbation Equations) sind – zusammen mit synthetischen Quellen auf der rechten Seite –

Grundlage der Simulationssoftware „Piano“ [3].

2.3 Der „Piano“-Ansatz

Der Hauptansatz des „Piano“-Verfahrens besteht darin, alle akustischen Druckschwankungen durch eine definierte Störung zu erzeugen und nicht direkt durch das turbulente zeitabhängige Strömungsfeld einer CFD-Simulation. Das hat den großen Vorteil, dass nur eine gemittelte Strömung des zu untersuchenden Aufbaus notwendig ist. Beim „Piano“-Verfahren wird eine definierte Störung in Form eines Einzelwirbels oder eines lokalen Druck- oder Entropieimpulses in das mittlere Strömungsfeld eingebracht. Das daraus resultierende zeitabhängige Verhalten wird durch Lösung der linearisierten Eulergleichungen auf einem akustischen Gitter berechnet. Im Wesentlichen wird die Störung im mittleren Strömungsfeld konvektiert, trifft irgendwann auf die Geometrie und erzeugt dort eine Schallwelle. Die so erzeugte Druckwelle repräsentiert dabei die Fähigkeit der Geometrie hydrodynamische Drücke in Schalldrücke zu konvertieren. Vergleicht man in dieser Art zwei unterschiedliche Geometrien, kann man schnell einen akustischen Vergleich beider Varianten erhalten.

Ein weiterer in „Piano“ vorhandener Ansatz ist das so genannte RPM-Modell (Random Particle Mesh) [4]. Dabei werden dem mittleren Feld keine Einzelstö-

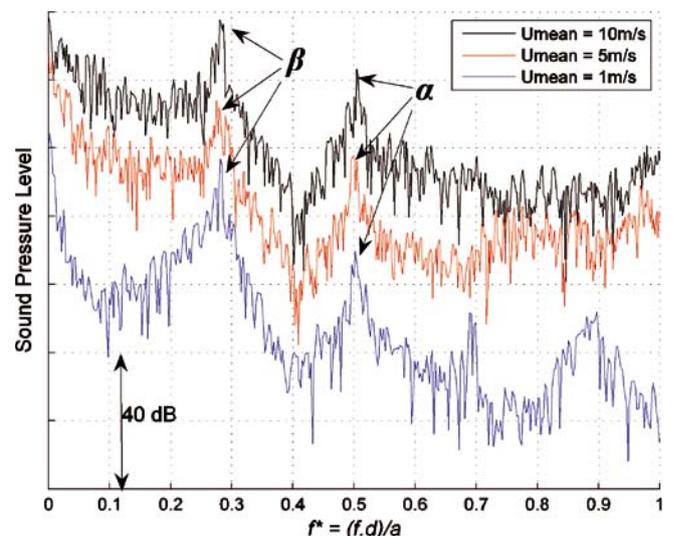
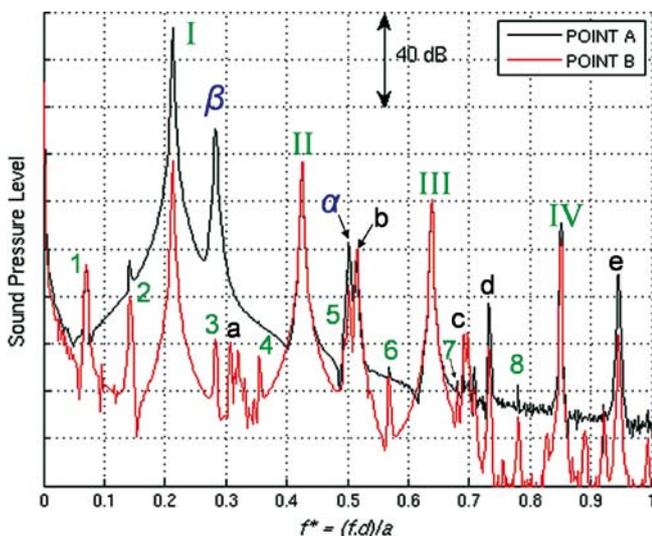


Bild 2: Schalldruckpegel der Wirbelimpftechnik für zwei Auswertepunkte (links) und der RPM-Simulation am Punkt A für unterschiedliche Geschwindigkeiten (rechts) als Funktion der dimensionslosen Frequenz f^*

rungen überlagert, sondern die anregenden Turbulenzschwankungen werden in ausgewählten Bereichen numerisch generiert. Das synthetische Turbulenzfeld wird dabei so erzeugt, dass die Zweipunkt-Korrelationen der realen turbulenten Strömung möglichst gut wiedergegeben werden. Dazu sind zwei unabhängige Turbulenzgrößen (etwa k und ϵ) notwendig. Ähnlich wie beim „Piano“-Wirbelimpfansatz werden anschließend mit den im Zeitbereich erzeugten synthetischen Quellen entsprechende Störungsgleichungen gelöst. Jedoch nicht die linearisierten Eulergleichungen, sondern die APE-Gleichungen. Sie unterscheiden sich von den Eulergleichungen dahingehend, dass nur Druckinstabilitäten ausbreitungsfähig sind, aber keine Entropie oder Wirbelmoden.

3 Validierungsuntersuchungen

Zur Validierung wurden ein Kanal mit angeströmter Platte, Wasserfangleisten, Spaltgeometrien sowie das Schiebgedachwummern untersucht.

3.1 Kanal mit Platte

Untersucht wurde die Akustik einer parallel angeströmten Platte in einer voll turbulenten Kanalströmung. Dabei wurden beide möglichen Modellierungen von „Piano“, die Impftechnik und das RPM-Modell, zur Berechnung herangezogen. Experimentelle Daten liegen für den Fall noch nicht vor. Aber aus theoretischen Betrachtungen können einige Rückschlüsse zum erwarteten Verhalten abgeleitet werden [5]. Das gemittelte Strömungsfeld wurde mit dem SST-Turbulenz-Modell mit der Software „Ansys/CFX 11“ auf einem blockstrukturierten Gitter mit zirka 42.000 Knoten berechnet. Es wurden drei auf die Plattendicke von 2 mm bezogene Reynoldszahlen von 128, 640 und 1280 und drei Plattenlänge mit 0,625 H, 1,25 H und 2,25 H, wobei H der Kanalhöhe entspricht, untersucht, **Bild 1**.

Die Wirbelimpfung der Grundströmung regt zunächst eine Kármánsche Wirbelstraße im Nachlauf der Platte an. Neben den zu erwartenden Kanalmoden werden auch ober- und unterhalb der Splitterplatte akustische Moden angeregt. Diese konnten als vom Typ Parker-Mode [6] identifiziert werden.

Tabelle: Dimensionslose Frequenzen der Wirbelablösung von der Plattenhinterkante

Plattenlänge	$Re_H = 52.000, Re_D = 1280$		$Re_H = 26.000, Re_D = 640$	
	$f^* = f \cdot d / a$	$St = f \cdot U / d$	$f^* = f \cdot d / a$	$St = f \cdot U / d$
0,625 H	0,24	0,205	0,106	0,180
1,250 H	0,21	0,184	0,092	0,156
2,250 H	0,19	0,166	0,085	0,145

An zwei „Messpositionen“ wurde der zeitliche Verlauf der Druckschwankungen für die Basiskonfiguration spektral ausgewertet und in **Bild 2** (links) dargestellt. Es zeigt sich eine ganze Reihe von Resonanzen. Die Hauptresonanzen erklären sich aus der Wirbelablösefrequenz (f) und den Parker Moden (β und α). Darüber hinaus sind auch Kombinationsfrequenzen (1, 2, 3, ...) sowie die Harmonischen (II, III, ...) der jeweiligen Frequenzen zu erkennen. Für die Wirbelablösefrequenz finden wir für die Basiskonfiguration (10 cm Plattenlänge, 10 m/s Anströmgeschwindigkeit) eine mit der Plattendicke von 2 mm gebildete Strouhalzahl von $St = f \cdot d / U = 0,18$ und eine mit der Kanalhöhe von 80 mm gebildete dimensionslose Frequenz von $f^* = f \cdot H / a = 0,21$ [6].

Mit sinkender Strömungsgeschwindigkeit (5 m/s) sinkt auch die Wirbelablösefrequenz, jedoch mehr als linear, so dass sich eine Strouhalzahl von $St = 0,156$ ergibt. Insgesamt ergeben sich für die unterschiedlichen Konfigurationen die in der **Tabelle** dargestellten Werte.

Die Plattenlänge hat nur einen vergleichsweise kleinen Einfluss auf die Strouhalzahl, auf die Parkermoden hat sie aber einen deutlichen Einfluss. Je länger die Platte ist, um so tieffrequenter sind die jeweiligen Moden. **Bild 2** (rechts) zeigt eine mit der Impftechnik vergleichbare Darstellung, wenn man statt der Wirbelimpftechnik das RPM-Modell von „Piano“ einsetzt. Auf den ersten Blick scheint die Ähnlichkeit nicht besonders hoch zu sein. Bei näherer Betrachtung werden die Unterschiede erklärbar. Zunächst tauchen in **Bild 2** (rechts) keine zur Wirbelstraße gehörenden Frequenzen auf. Das war aber auch nicht zu erwarten, denn zusammen mit dem RPM-Ansatz werden die APE- und nicht die LEE-Gleichungen gelöst. Alle Wirbelmoden sind damit nicht ausbreitungsfähig

und daher im Spektrum auch nicht vorhanden. Die beiden Parkermoden sind dagegen sehr wohl vorhanden und zwar bei den gleichen Frequenzen wie sie auch mit der Impftechnik gefunden wurden. Auch dass das Spektrum deutlich verrauschter als das der Impftechnik ist, ist verständlich, denn das RPM-Modell reproduziert ein ganzes Turbulenzspektrum und nicht nur einen einzigen Wirbel. Insgesamt sind somit die RPM-Ergebnisse durchaus positiv zu bewerten.

In **Bild 3** sind die spektral ausgewerteten Druckdaten im gesamten Strömungsfeld für ausgewählte dimensionslose Frequenzen dargestellt. Die Kármánsche Wirbelstraße ist bei $f^* = 0,21$ gut zu erkennen. Mit der Ablösefrequenz schwingen auch die Bereiche ober- und unterhalb der Platte. Bei $f^* = 0,28$ finden wir die β -Parker-Mode. Ab $f^* = 0,5$ ist eine Wellenausbreitung für Kanalmoden oberhalb des Grundmode möglich. Drei dieser Moden sind bei $f^* = 0,52, f^* = 0,64$ und $f^* = 0,95$ gut zu erkennen.

3.2 Wasserfangleisten

3.2.1 Messungen im Akustischen Windkanal Braunschweig

Die Breitbandlärmentstehung an vereinfachten Wasserfangleisten wurde im Akustischen Windkanal Braunschweig (AWB) vermessen. Dazu wurden die Konturen von zwei Wasserfangleistengeometrien, **Bild 4**, in die dritte Richtung extrudiert und auf einer ebenen Platte montiert. Die Leisten selbst sind aus Aluminium gefräst, um Einflüsse aus Strukturanregungen zu unterdrücken. Stromauf und stromab der Stufe wurden jeweils drei Mikrofone wandbündig eingebaut, um die turbulenten Oberflächendruckschwankungen (hydrodynamische und akustische) zu messen. Die Schallabstrahlung ins Fernfeld wurde mit einem elliptischen Hohlspiegel vermessen, in

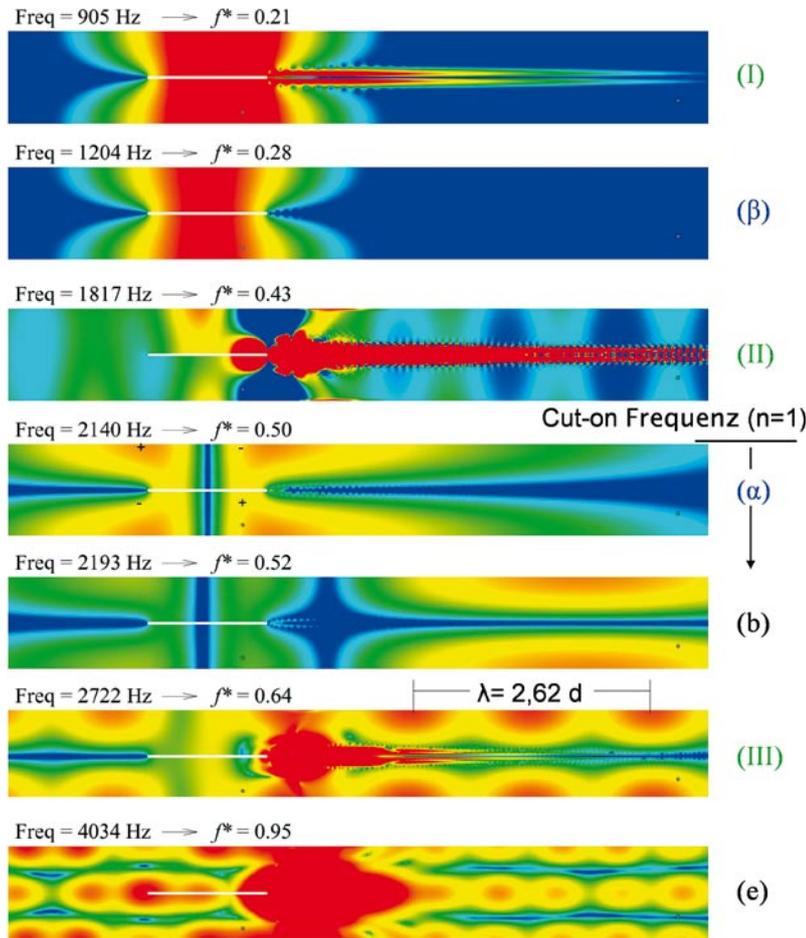


Bild 3: Druckamplituden für ausgewählte Frequenzen im gesamten Strömungsfeld; die Farbskalierung wechselt zwischen den Bildern

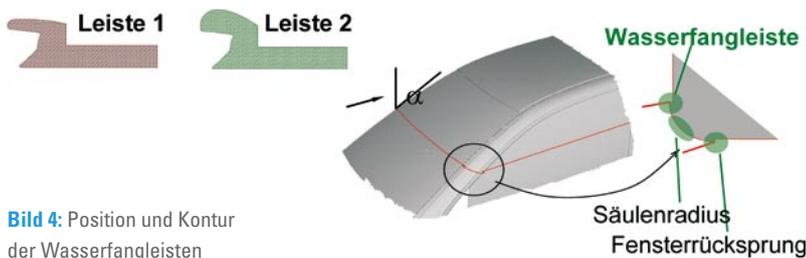


Bild 4: Position und Kontur der Wasserfangleisten

dessen erstem Fokuspunkt ein Mikrophon sitzt und dessen zweiter Fokuspunkt in Hauptströmungsrichtung traversiert wurde, **Bild 5**. Im Vordergrund von Bild 5 ist der Hohlspiegel (gelb) zu sehen. Die Leiste verläuft vertikal auf der weißen Platte. Die zwei dunklen Bereiche etwa in der Mitte der Platte sind Einsätze, in die die Wandmikrophone eingebaut wurden. Die Düse liegt im Bild zwischen dem Hohlspiegel und der Platte.

Bei den gemessenen Geschwindigkeiten von 30, 45 und 60 m/s hat sich ge-

zeigt, dass die optimierte Leiste (Leiste 2) jeweils deutlich leiser als die Ursprungsleiste war. Die Schallintensität skalierte dabei mit der siebten Potenz der Anströmgeschwindigkeit. Bei Schräganströmung hat sich gezeigt, dass der Pegel in beiden Fällen mit steigendem Anströmwinkel abnimmt, **Bild 6**.

3.2.2 Simulationsergebnisse

Der Aufbau wurde numerisch zunächst mit der „Piano“-Wirbelimpftechnik untersucht. Unterschiedliche Turbulenz-

modelle wurden zur Berechnung der Grundströmung eingesetzt. Das Standard- $k\epsilon$ -Modell, das RNG- $k\epsilon$ -Modell und darüber hinaus ein Launder-Gipsen-Reynoldsstress-Modell (RSM). Alle RANS-Lösungen unterscheiden sich nennenswert voneinander, **Bild 7**. Wie zu erwarten, tendiert das Standard- $k\epsilon$ -Modell zum Anliegen der Strömungen, obwohl dort – durch Ölanstrichbilder bestätigt – in der Realität eine Ablösung vorhanden ist. Das RNG- $k\epsilon$ -Modell ist hier etwas besser, die besten Ergebnisse haben wir jedoch mit dem RSM erzielt.

Erfreulich ist, dass die Grundströmung für den untersuchten Fall zwar erwartungsgemäß auch die akustischen Antworten etwas ändert, die Auswirkungen aber insgesamt betrachtet eher gering waren. Für den betrachteten Fall ist das auch verständlich. Der Unterschied im Strömungsfeld ergibt sich primär im Ablösegebiet. Die wesentliche Schallerzeugung findet aber bereits an der Vorderkante statt und bis dahin unterscheiden sich die CFD-Lösungen nicht besonders stark. Ausgewertet wurde in der Simulation, **Bild 8**, auch die Richtcharakteristik der Wasserfangleisten. Hier hat sich gezeigt, dass die Hauptschallabstrahlung fast direkt nach vorne gerichtet ist. Senkrecht zur Leiste wird nur vergleichsweise wenig Schall abgestrahlt, nach hinten wieder etwas mehr. Aus der Richtcharakteristik erkennt man, dass der direkte Vergleich mit den Messwerten in diesem Fall schwierig ist, denn in Messrichtung (90° zur Leiste) wird nur wenig Schall abgestrahlt. Die berechnete Schallintensität skaliert etwa mit $U^{6,5}$ und liegt damit recht nah am experimentellen Wert von U^7 . Die Leiste 2 war wie im Experiment auch in der Simulation deutlich leiser als Leiste 1.

3.3 Spaltgeometrien

In einem weiteren Testfall sollen die Möglichkeiten von „Piano“ zur Simulation von eher tonalem Schall demonstriert werden. Ähnlich wie die 2D-Wasserfangleisten wurden auch 2D-Spaltgeometrien, die Serienkonturen angenähert sind, untersucht. Eine Beispielgeometrie zeigt **Bild 9**.

Wie am echten Fahrzeug zeigen sich auch bei den Messungen der 2D-Validierungsexperimente deutliche Unterschiede zwischen den drei untersuchten Vari-

anten. Die mit S3 bezeichnete Variante, die in Bild 9 dargestellt ist, zeigt einen sehr hohen Pegel bei etwa 900 Hz. Bei der deutlich leiseren A3-Variante ist zwar auch ein lokales Maximum bei zirka 900 Hz im Spektrum zu erkennen, das hat aber eine andere Ursache und ist auch vom Pegel deutlich kleiner als der Peak der S3-Variante.

Berechnet wurde bis jetzt nur die A3-Variante. Dabei hat sich ergeben, dass mit der Impftechnik von „Piano“ die Frequenzen aller Peaks im Fernfeldspektrum sehr gut gefunden werden konnten. Die Pegel können verfahrensbedingt hingegen nicht vorhergesagt werden. Beim Vergleich ist auch zu bedenken, dass die Pegel der Hohlspiegelmessungen über einen gewissen Raumbereich integriert werden. Ein Freifeldmikrofon liefert an derselben Position andere Pegel.

In Bild 10 sind Rechnungen für zwei unterschiedlich feine akustische Netze gezeigt. Nur bei sehr hohen Frequenzen (> 8 kHz) sind dabei nennenswerte Abweichungen zu erkennen. Insgesamt ist die „Piano“-Impftechnik offenbar geeignet, auch tonale Geräusche vorher zu sagen.

3.4 Schiebedachwummern

Der letzte Validierungsfall wurde dem Arbeitskreis Aeroakustiksimulation der deutschen Automobilhersteller entnommen. Audi, BMW, Daimler, Porsche und Volkswagen haben in einem gemeinsamen Forschungsprojekt zusammen mit den CFD-Softwareherstellern CD-adapco und Exa die aeroakustischen Möglichkeiten der jeweiligen CFD-Programme untersucht. Betrachtet wurden das Wummerverhalten bei geöffnetem Schiebedach [7] und die Lärmentstehung in einem stark vereinfachten Klimakrümmern mit Drosselklappe [8]. Berechnet wurden in beiden Testfällen jeweils transiente Strömungsfelder mit Hilfe der „Detached Eddy“- („Star-CD“) beziehungsweise der „Very Large Eddy“- („PowerFlow“-) Simulation.

Beim Schiebedachwummern handelt es sich um eine recht komplexe Kopplung zwischen Strömungsmechanik und Strömungsakustik. Die Grenzschicht stromauf der Schiebedachvorderkante wird in der freien Strömung nach der Kante instabil und rollt sich zu einem starken Wirbel auf. Wenn dieser auf die hintere Kante der Schiebedachöffnung trifft,

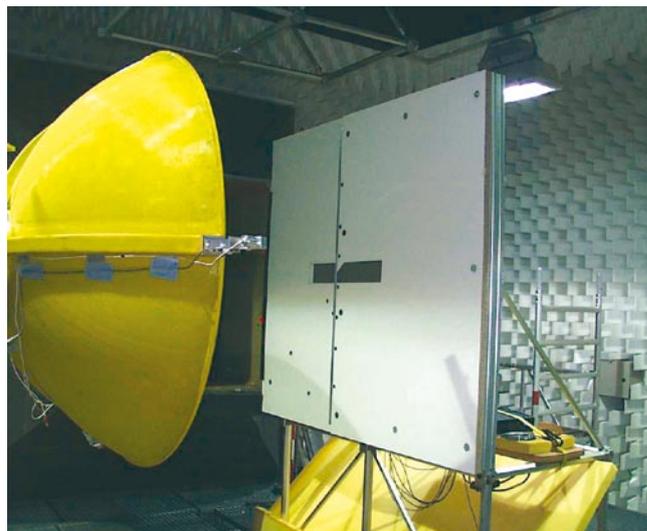


Bild 5: Wasserfangleiste im Akustischen Windkanal Braunschweig

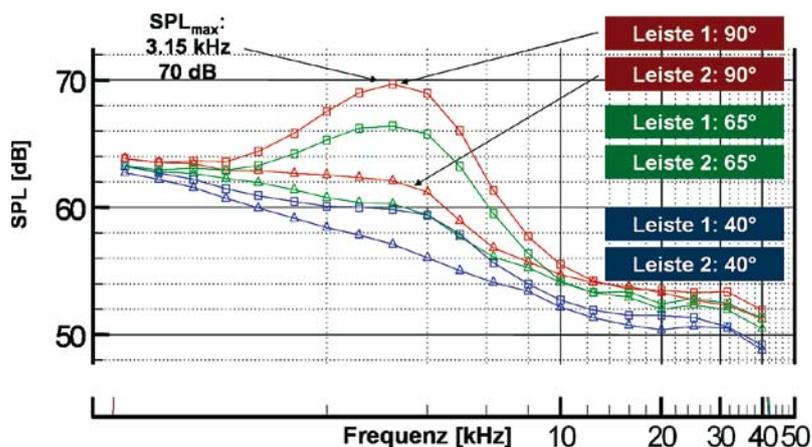


Bild 6: Schalldruckpegel der Hohlspiegelmessungen bei Fokussierung auf eine Messposition direkt hinter der Wasserfangleiste für drei Anströmwinkel und bei einer Anströmgeschwindigkeit von 30 m/s für beide Leisten

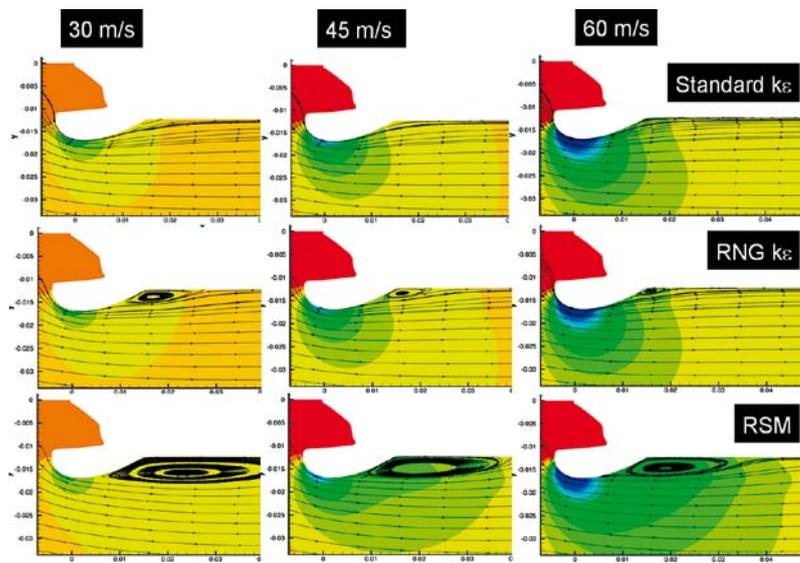


Bild 7: RANS-Lösungen zur Wasserfangleiste 2 – die Leiste ist nach unten orientiert, und es sind Stromlinien und der statische Druck gezeigt

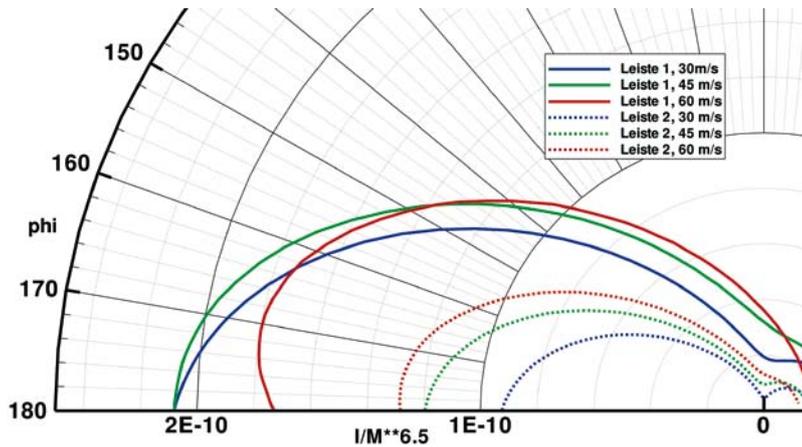


Bild 8: Richtcharakteristik der Wasserfangleisten (Leiste 1: durchgezogene Linie, Leiste 2: gepunktete Linie) für die drei Geschwindigkeiten 30 m/s (blau), 45 m/s (grün) und 60 m/s (rot); gezeigt ist die skalierte Intensität des Schalldrucks

wird ein Druckimpuls erzeugt, der eine Triggerung einer neuen Ablösung an der Vorderkante hervorrufen kann. Die Fahrgastzelle selbst stellt im Wesentlichen einen Helmholtz-Resonator dar. Wenn dieser durch den abgelösten Wirbel angeregt wird, kann sich eine selbst erregte Druckschwingung im Innenraum ausbilden, die in der Lage ist, sehr hohe Schalldruckpegel zu erzeugen, was zu einer erheblichen Beeinträchtigung der

Fahrzeuginsassen führen kann. Bei den Experimenten wurde Wert auf eine möglichst steife Struktur des Fahrgastraumes gelegt. Durch die hohe Güte des daraus resultierenden Resonators wurden Schalldruckpegel von mehr als 140 dB erreicht. Die Druckoszillation ist dann nahezu sinusförmig.

Die so genannte Wummerkurve, **Bild 11**, zeigt den Schalldruckpegel im Innenraum als Funktion der Anströmgeschwindigkeit.

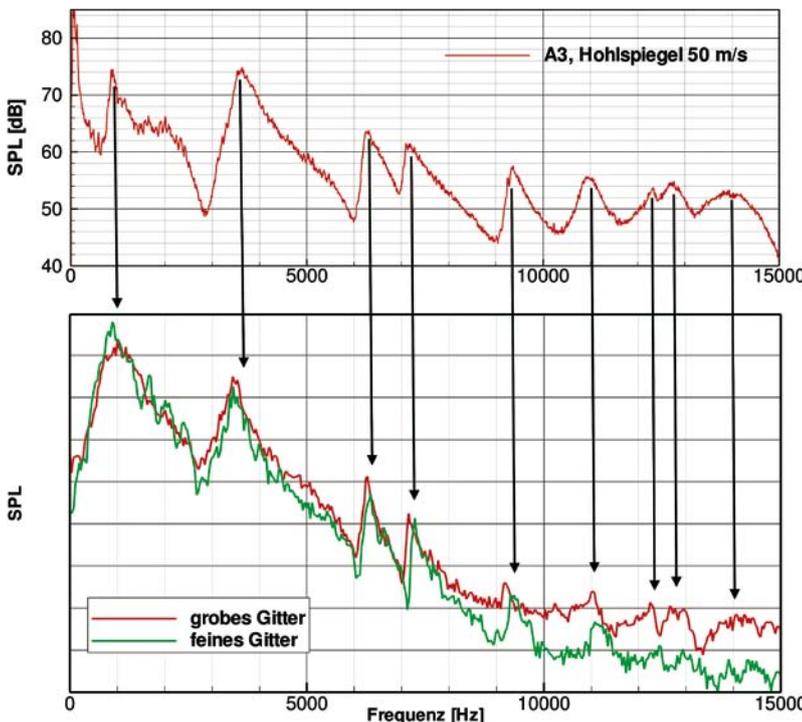


Bild 10: Gemessener (oben) und berechneter Schalldruckpegel als Funktion der Frequenz

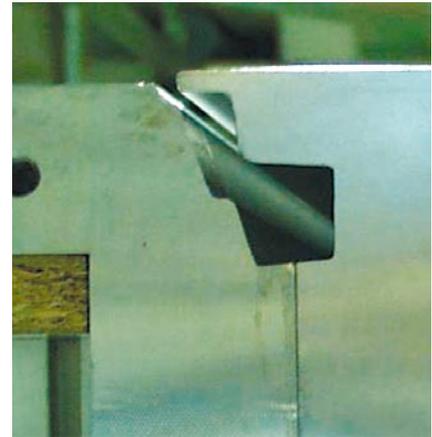


Bild 9: Modellaufbau des Spaltexperimentes; die Spaltgeometrie ist in die Tiefenrichtung extrudiert

Beide CFD-Berechnungen liefern hier recht gute Ergebnisse und können sowohl den Beginn als auch das Ende des Wummerbereiches gut voraussagen. Die hohe Struktursteifigkeit des Modells ermöglicht es der Simulation die Wände als vollkommen starr anzunehmen. Ist das, wie bei einem realen Fahrzeug, nicht gegeben, dann muss dieser Effekt geeignet modelliert oder durch eine echte Fluid-Struktur-Kopplung berechnet werden [7]. Es hat sich gezeigt, dass der Hauptwirbel durch die Simulationen für alle Geschwindigkeiten sehr gut berechnet werden kann, **Bild 12**, und nahezu perfekt mit dem durch zeitlich hochauflösende PIV-Messungen (Particle Image Velocimetry) gemessenen Wirbel übereinstimmt. Der Messausschnitt in Bild 12 ist in allen Abbildungen als Rahmen mit eingezeichnet. Messwerte außerhalb des Rahmens können durch Randeffekte kleine Fehler enthalten. In der Mitte ist das Ergebnis des Lattice-Bolzmenn-Verfahrens und unten das Ergebnis des Finite-Volumen-Verfahrens dargestellt.

Ein großer Vorteil der Simulation ist, dass das komplette Strömungsfeld in der Simulation erfasst wird, so dass umfangreiche Auswertungen möglich sind. So zeigt **Bild 13** die Wirbelstärkenverteilung für vier ausgewählte Phasen des Wummerzyklus – jetzt über die gesamte Schiebedachöffnung von 30 cm und zusammen mit dem zugehörigen Innenraumdruck zu der entsprechenden Phasenlage. Der typische Weg des Wirbels verläuft von der Vorderkante ins Fahrzeuginnere und dann wieder aufwärts Richtung

Kompakt, umfassend, kompetent: Der Klassiker von Bosch jetzt in der 26. Auflage



Robert Bosch GmbH (Hrsg.)

Kraftfahrtechnisches Taschenbuch

26., akt. u. erg. Aufl. 2007. 1192 S. Br. EUR 39,90

ISBN 978-3-8348-0138-8

Dieses Buch ist aus der Welt des Automobils nicht wegzudenken. Seit nunmehr 75 Jahren hat es seinen festen Platz in den Werkstätten und auf den Schreibtischen. Als handliches Nachschlagewerk mit kompakten Beiträgen bietet es einen zuverlässigen Einblick in den aktuellen Stand der Kfz-Technik. Der Schwerpunkt ist die Personen- und Nutzkraftfahrzeugtechnik. In dieser Auflage sind besonders die neuen Abschnitte über Schadstoffminderung beim Dieselmotor, Hybridantrieb, Aktivlenkung und Vernetzung im Kfz hervorzuheben.

Autoren | Herausgeber

Die Robert Bosch GmbH ist der weltweit größte Automobilzulieferer. Die Vorrangstellung wird eindrucksvoll durch die Anzahl der jährlichen Patent- und Gebrauchsmusteranmeldungen dokumentiert.

Pressestimmen

„Mit den handlichen Abmessungen von 12x18x4 cm und dem beachtlichen Umfang von fast 1200 Seiten enthält die 26., aktualisierte und ergänzte Auflage schlicht alles, was ein Autointeressierter oder -profi wissen will – von den Grundlagen bis ins kleinste technische Detail.“

Automobil Revue 12/2007

„Auch in Zukunft wird das Kraftfahrtechnische Taschenbuch ein verlässliches Nachschlagewerk sein, in dem alle diese Technologien prägnant beschrieben sind.“

Galvanotechnik 11/2007

„Das Standardwerk von Bosch bietet seit sechs Jahrzehnten umfassendes Automobiltechnik-Basiswissen – fachlich fundiert, verständlich erklärt und klar gegliedert. Die jetzt erschienene 26. Auflage enthält den neusten Stand der Technik. [...] Das handliche Kompendium eignet sich als Referenzwerk nicht nur für Ingenieure in der Kfz-Werkstatt, sondern auch für Maschinenbau-Studenten.“

Industrieanzeiger 35-36/2007

Ja, ich bestelle

Exemplare
**Kraftfahrtechnisches
Taschenbuch**
ISBN 978-3-8348-0138-8
EUR 39,90

Fax +49(0)611.7878 - 420

Firma	Name, Vorname	321 08 568
Abteilung		
Straße (bitte kein Postfach)		PLZ Ort
Datum Unterschrift		

Änderungen vorbehalten. Erhältlich im Buchhandel oder beim Verlag, zuzüglich Versandkosten
Geschäftsführer: Dr. Ralf Birkelbach, AG Wiesbaden HRB 9754

TECHNIK BEWEGT.



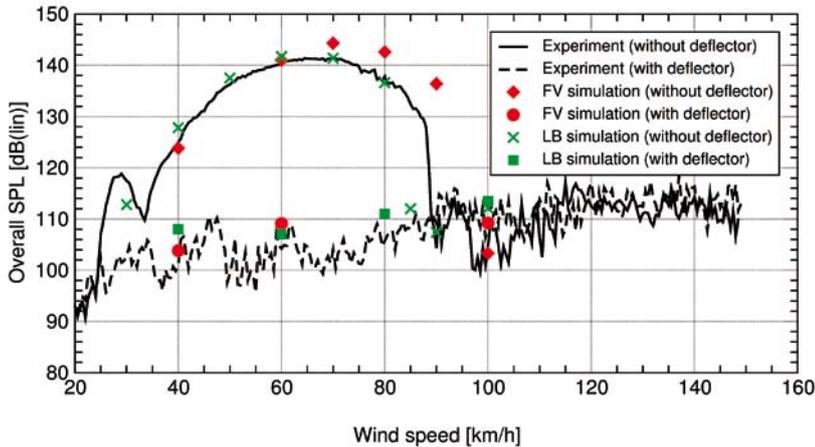


Bild 11: Schalldruckpegel als Funktion der Anströmgeschwindigkeit

Schiebedach-Hinterkante. Wenn der Wirbel maximal tief „eingetaucht“ ist (C), ist der Innenraumdruck maximal. Ein neuer Wirbel löst sich an der Vorderkante ab, wenn der Innenraumdruck minimal ist (A).

4 Zusammenfassung

Es wurden in diesem Beitrag von Volkswagen unterschiedliche Beispiele von typischen aeroakustischen Problemen in der Automobilindustrie gezeigt. Die ge-

zeigten Rechenansätze decken nur einen kleinen Teilbereich der vorhandenen Verfahren zur Akustikberechnung in Strömungen ab. Insbesondere sind für industrielle Anwendungen auch weitere Schallausbreitungsprogramme (etwa LMS SysNoise oder FFT Actran) vorhanden, die im Zusammenhang mit einem hybriden Rechenansatz verfolgt werden können.

Es ist ein Trend bei den CFD-Software-Hersteller zu beobachten, direkt akustische Ausbreitungseffekte mit ihren CFD-Softwareprodukten zu ermöglichen. Insgesamt wird der Stand der Technik für die numerische Vorhersage von Strömungsgeräuschen für realen Fahrzeuggeometrien von Volkswagen als noch unzureichend für einen routinemäßigen Einsatz im Entwicklungsprozess eingeschätzt. Zwar konnten für einige der gezeigten Validierungsfälle plausible und mit dem Experiment vergleichbare Ergebnisse erzielt werden, man muss jedoch bedenken, dass es sich um stark vereinfachte Geometrien

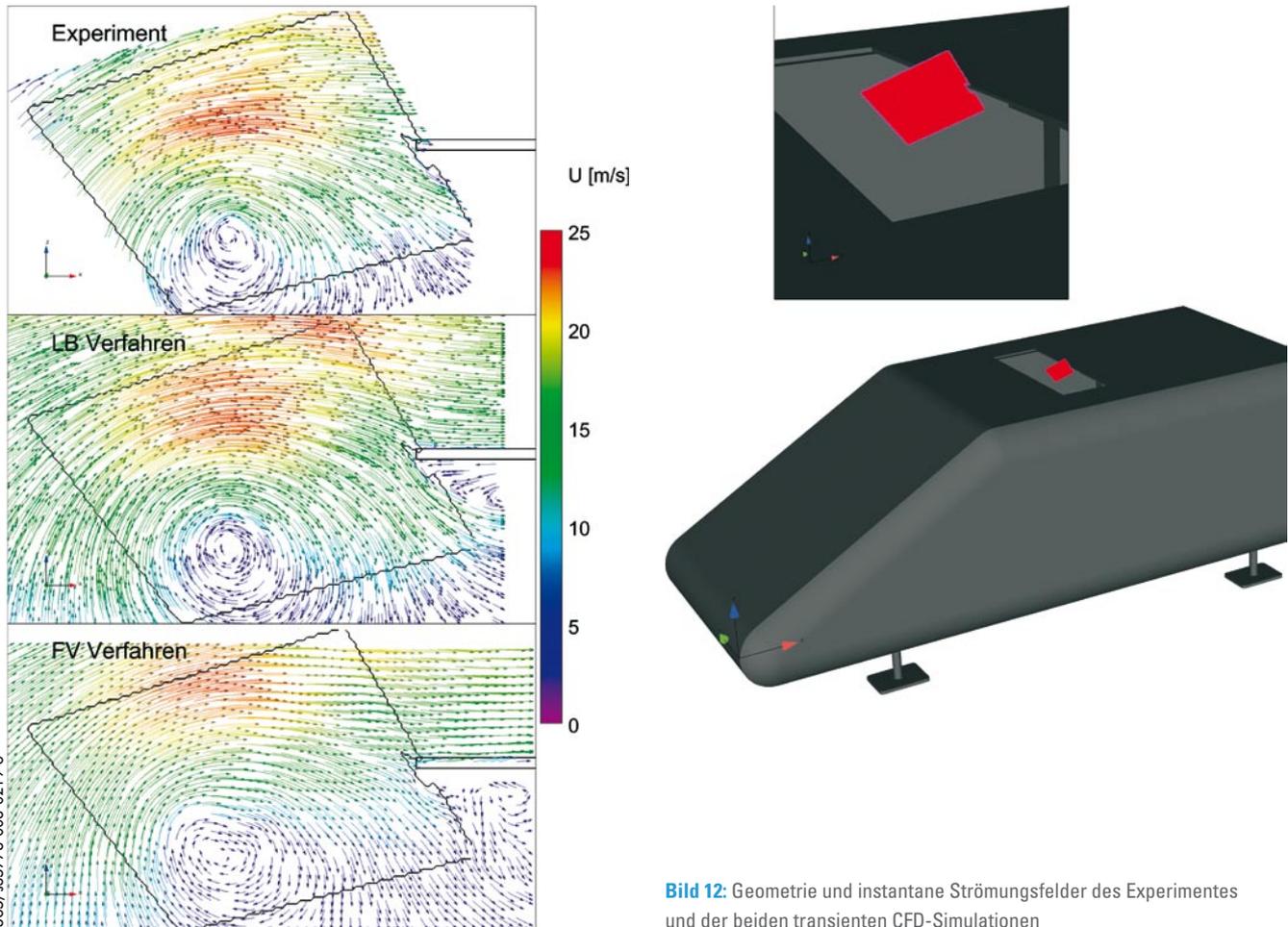


Bild 12: Geometrie und instantane Strömungsfelder des Experimentes und der beiden transienten CFD-Simulationen

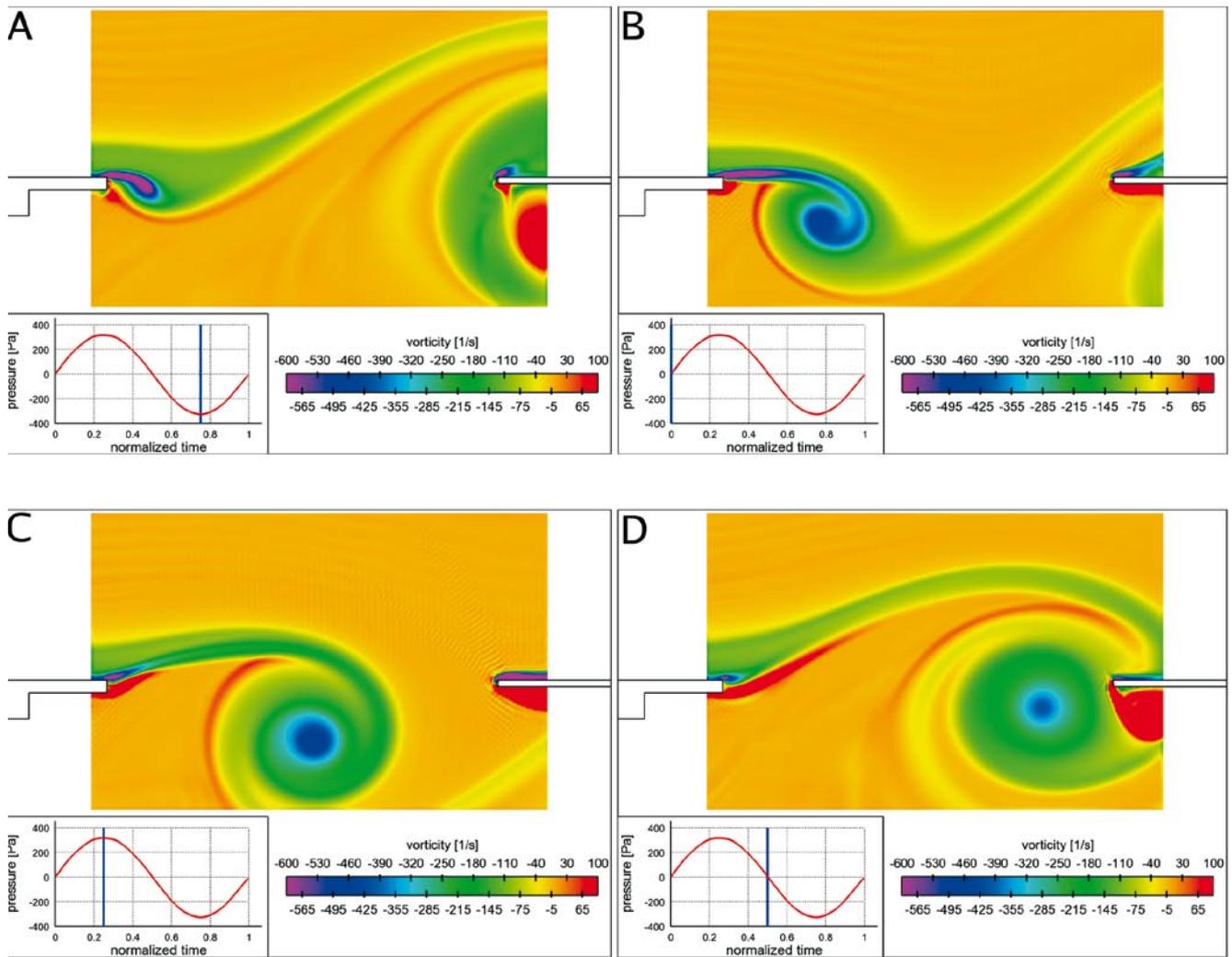


Bild 13: Wirbelstärke der Lattice-Boltzmann-Simulation für vier unterschiedliche Phasen (A bis D) des Wummerzyklus bei einer Anströmgeschwindigkeit von 60 km/h

handelt. Auch ist der Rechenaufwand, insbesondere bei den direkten Methoden oft extrem hoch.

Literaturhinweise

- [1] Lighthill, M. J.: On Sound Generated Aerodynamically. Proc. Roy. Soc., London (A) Part I: A211, S. 564-584, 1952; Part II: A222, pp 1–31, 1954
- [2] Ewert, R.; Schröder, W.: Acoustic Perturbation Equations Based on Flow Decomposition via Source Filtering. Journal of Computational Physics, 188(2), pp 365–398, 2003
- [3] Delfs, J.; et al.: Numerical Simulation of Aerodynamic Noise with DLR's Aeroacoustic Code PIANO. PIANO manual, version 5.2, Braunschweig 2007
- [4] Ewert, R.: RPM – The Fast Random Particle-mesh Method to Realize Unsteady Turbulent Sound Sources and Velocity Fields for CAA Applications. AIAA Paper 2007-3506, 2007
- [5] Dechpre, H.; Hartmann, M.: Aeroacoustic Simulation Based on Linearized Euler Equations and Stochastic Sound Source Modelling. Acoustics 08 Paris, pp 1071–1076, 2008
- [6] Koch, W.: Resonant Acoustic Frequencies of Flat Plate Cascades. J. Sound Vibr., Vol. 88, pp 233-242, 1983
- [7] Islam, M.; et al.: Investigation of Sunroof-Buffering in an Idealized Generic Vehicle Model. – Part I: Experimental Results, AIAA Paper 2008-2900, Part II: Numerical Simulations, AIAA Paper 2008-2901, 2008
- [8] Jäger, A.; et al.: Numerical and Experimental Investigations on the Noise Generated by a Flap in a Simplified HVAC Duct. AIAA Paper 2008-2902, 2008