

Aeroakustik von Fahrzeugklimageräten

Kai Augustin¹, Michael Paul¹, Moritz Späh¹, Friedrich Brotz², Michael Schrupf³

¹ Behr GmbH & Co. KG, Vorentwicklung Produktbereich Klimatisierung, 70469 Stuttgart, Deutschland

² Behr GmbH & Co. KG, Methodenentwicklung 3D Simulation, Technologiecenter, 70469 Stuttgart, Deutschland

³ Behr GmbH & Co. KG, 3D Simulation, Produktbereich Klimatisierung, 70469 Stuttgart, Deutschland

Einleitung

Bei der Entwicklung von Fahrzeugklimasystemen kommt der Akustik eine immer breiter werdende Bedeutung zu. Sie ist neben der thermodynamischen Funktion das wichtigste Merkmal moderner Klimaanlage. Dabei entsteht kein „akustisches Design“ der Klimageräte im Vordergrund sondern Unauffälligkeit des Klimageräuschs und das Stichwort „akustischer Komfort“. Die akustische Entwicklung greift dabei an folgenden Punkten an:

- Geräuschgenerierung an Komponenten
- Übertragung von Geräuschen über Subsysteme
- Ankopplung an die Instrumententafel und Fahrzeugstruktur
- Geräuschabstrahlung in den Fahrzeuginnenraum

Zur Bewältigung der Aufgaben muss somit ein systemischer Ansatz verfolgt werden, der nicht nur einzelne Komponenten isoliert betrachtet, sondern Aeroakustik und Körperschallübertragung inklusive sämtlicher Schnittstellen des Klimasystems zum Fahrzeug. Neben den konventionellen Messmethoden kommen nun neue Ansätze auf der experimentellen Seite wie die akustische Transferpfadanalyse und auf der Simulationsseite Methoden wie CA und CAA zum Einsatz. Im Produktentstehungsprozess kommt zu Beginn den Simulationstools die größte Bedeutung zu, während mit fortschreitender Entwicklung und Verfügbarkeit von Musterteilen der Versuch zunehmend in den Vordergrund tritt.

Simulationsmethoden CA und CAA

Aufbauend auf den „Computational Acoustics (CA)“ Verfahren zur Ausbreitung von Schall in ruhenden, homogenen Medien wird in der „Computational Fluid Dynamics (CFD)“ in letzter Zeit ein so genannter Hybridansatz erfolgt, der eine Kopplung von CFD und CA Methoden vorsieht, um die Ausbreitung von Schall aeroakustischer Quellen in das akustische Fernfeld mittels FEM oder der „Boundary Element Method“ (BEM) zu berechnen.

Dieser Hybridansatz ist der vollständigen, kompressiblen und reibungsbehafteten Berechnung des gesamten aeroakustischen Strömungsfeldes vorzuziehen, welche auf heutigen Rechnern bisher kaum möglich ist. Beim Hybridansatz wird in einem zum akustischen Feld kleinen Integrationsgebiet das Strömungsfeld berechnet und die aeroakustischen Quellen bestimmt. In einem zweiten Schritt werden diese Quellen als Eingangsgrößen für einen Akustiklöser verwendet, der die Schallausbreitung simuliert. Dabei ist die Qualität der Akustiklösung entscheidend von der Güte der Strö-

mungsfeldlösung abhängig. Für CAA Verfahren sind hochaufgelöste, instationäre 3D-Daten erforderlich. Diese stammen idealerweise aus „Detached (DES)“ oder „Large (LES) Eddy Simulationen“. Moderne, kommerzielle Simulationssysteme zur Strömungsberechnung bieten heute schon diese Möglichkeiten, wobei der hohe Aufwand für LES heute noch vielfach den industriell möglichen Rahmen sprengt. So kommen vermehrt DES-Verfahren zur Quellformulierung für die Aeroakustik zum Einsatz.

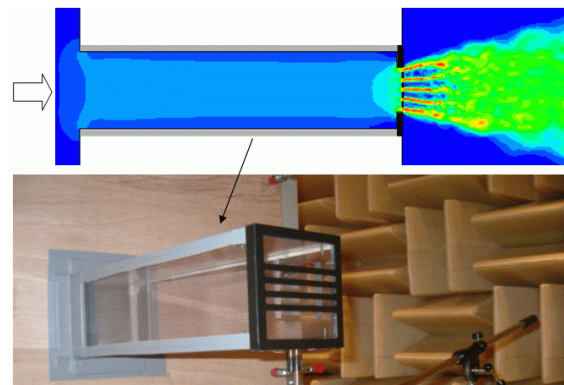


Abbildung 1: Momentaufnahme des Strömungsfeld der DES Simulation sowie experimenteller Aufbau im Freifeldraum.

Im Rahmen des DESTINY Programms wurden verschiedene Ansätze grundsätzlich untersucht. Bei Behr wurde, unter anderem, in diesem Rahmen eine generische Ausströmerkonfiguration, wie in Abbildung 1 dargestellt, experimentell und mittels CAA untersucht. Innerhalb dieser Untersuchungen wurde besonderer Wert auf einen Abgleich von Simulation mit den mittels „Particle Image Velocimetry (PIV)“ gewonnenen experimentellen Ergebnisse gelegt.

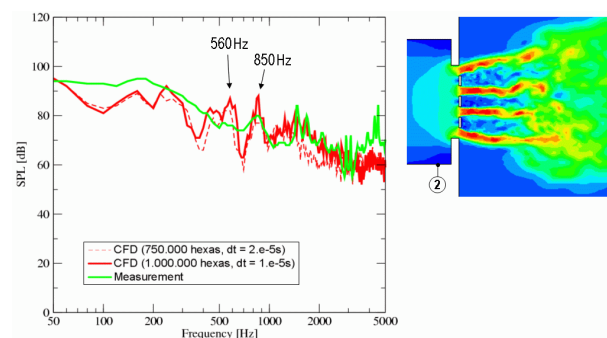


Abbildung 2: Beispielhafter Vergleich der CFD Ergebnisse mit Spektren experimentellen Druckmessungen

Nur so lassen sich neben den Messungen mit Druckaufnehmern und Mikrofonen Aussagen über die Güte der Strömungslösung treffen. Innerhalb dieser Untersuchungen

konnte eine gute bis zufrieden stellende Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulation gefunden werden (vergleiche Abbildung 2). Sowohl die makroskopischen Strukturen als die Instationarität des Strömungsfeldes wurden von der Simulation wiedergegeben. Jedoch ist auch heute noch der Aufwand zur Erreichung guter Simulationsergebnisse groß und bedarf weiterer Grundsatzuntersuchungen.

Experimentelle Methoden

Die Akustik von Klimageräten wird selbstverständlich durch die Fahrzeughersteller spezifiziert und in allen Phasen der Produktentstehung durch den Hersteller überwacht und dokumentiert. Dazu stehen standardisierte Messmethoden zur Verfügung. Die Messung erfolgt im Hall- oder Halbfreifeldraum an einem Klimagerät, welches in Einbaulage an einer Testvorrichtung montiert ist (Abbildung 3). Diese Testvorrichtung erlaubt es, das Gebläse in exakt dem Betriebspunkt zu betreiben, welcher sich im späteren Fahrzeugbetrieb einstellt. Das Gebläse saugt die Luft aus einer Kammer an, deren Querschnitt so groß ist, dass die Luft in ihr annähernd ruht. Auf der Eingangsseite der Kammer ist eine Luftmessstrecke mit variabler Drossel angeschlossen, so dass der Gebläsebetriebspunkt beliebig eingestellt werden kann. Alle Druckabfälle der fahrzeugseitigen Luftführung, wie Wasserabscheidung, Filter, Luftkanäle und Fahrzeugentlüftung werden also durch die Luftmessstrecke simuliert.



Abbildung 3: Aufbau eines Klimageräts im Halbfreifeldraum in der Testvorrichtung

Als Messwert wird der Schalldruck eines oder mehrerer Mikrofone mit spezifizierten Positionen dokumentiert. Natürlich ist nicht der Schalldruckpegel allein für die Qualität oder Anmutung eines Geräusches entscheidend. Gewünscht ist, wie eingangs erwähnt, ein geräuschlich unauffälliges Klimasystem. Um dies zu erreichen ist es erforderlich, auch die spektrale Verteilung der Klimageräusche zu betrachten. Störend wirken sich insbesondere Rauschanteile im Frequenzbereich oberhalb 1 kHz aus, da diese durch die Passagiere deutlich und belästigend wahrgenommen und insbesondere bei langsamerer Fahrt nicht maskiert werden. Ebenso werden tonale Überhöhungen im tieferen Frequenzbereich als unangenehm empfunden. Als ideal wird ein Spektrum betrachtet, das zu hohen und tiefen Frequenzen hin kontinuierlich abfällt. Als störend werden immer auch tonale Komponenten wie Pfeif- oder Heulgeräusche empfunden.

In Ergänzung messtechnisch spezifizierter Grenzwerte kommt also der subjektiven Geräuschbewertung nach wie vor ein hoher Stellenwert zu. Sie ist insbesondere notwendig, um während des Betriebs der Klimaanlage unerwartete oder

veränderliche Geräusche zu bewerten. Unerwartete Geräuschereignisse können z.B. Knack- oder Zischgeräusche sein, die scheinbar zufällig oder in bestimmten Situationen auftreten. Veränderliche Geräusche werden insbesondere durch die Eingriffe einer automatischen Klimaregelung erzeugt.

Weiterhin unterliegt der Kältekreislauf einem komplexen Zusammenspiel unterschiedlicher Systeme. So wird der Kältemittelverdichter je nach Motordrehzahl und am Verdampfer abverlangten Kälteleistung auf einen bestimmten Hub geregelt, gleichzeitig wird jedoch die Kühlleistung des Kondensators oftmals durch die Abwärme sonstiger Kühlkreisläufe beeinträchtigt. Überdies muss der Kältekreis sowohl unter tropischen Umgebungsbedingungen als auch im Schwachlastfall bei 10°C Außentemperatur ohne Sonneneinstrahlung zuverlässig funktionieren. Infolge der riesigen Bandbreite von Einflussfaktoren kann es im realen Betrieb der Klimaanlage durchaus zu akustischen Effekten kommen, welche in den standardisierten Tests nicht auftreten.

Aus solchen Gründen ist es unbedingt notwendig, die Akustik des Klimasystems auf umfangreichen Testfahrten unter möglichst vielen äußeren Randbedingungen subjektiv zu bewerten.

Oftmals gestaltet es sich als äußerst schwierig, subjektiv erkannte transiente Geräuschereignisse auf einem Prüfstand reproduzierbar darzustellen. Doch auch wenn dies gelingt, ist es in vielen Fällen ein langer Weg, bis die Geräuschursache analysiert und abgestellt ist. Hier helfen neuartige, quantitative Verfahren, um schneller und kostengünstiger Lösungen zu entwickeln. Bildgebende Schallortungsmethoden erlauben es, die Quelle der Schallabstrahlung zuverlässig zu lokalisieren, wodurch der schallerzeugende Effekt in der Regel gefunden wird. Im Bereich des Kältekreislaufs hat sich die Schall-Transferpfadanalyse als hilfreiche Technik erwiesen, die dominanten Schalleinleitungspfade des Verdichtergeräusches in den Innenraum zu finden. Sind allerdings mehrere benachbarte Koppelstellen an der Schalleinleitung beteiligt, wird die Genauigkeit dieser Methode durch die Querbeeinflussung der verschiedenen Koppelstellen stark eingeschränkt.

Zusammenfassung

Die akustische Auslegung der Fahrzeugklimatisierung erfordert intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit, um den Herausforderungen, die die Akustik moderner Fahrzeuge stellt, gerecht zu werden. Dazu ist es neben den Standardmethoden notwendig, neue Ansätze in den Entwicklungsprozess mit aufzunehmen und zu etablieren.

Literatur

- [1] F. Brotz, Th. Wetzel, M. Schrupf, M. Jung, K. Augustin, M. Lang: Aeroacoustic CFD Simulation for Automotive Air Conditioning Applications: Behr's Experience, Vehicle Thermal Management Systems (VTMS8), Nottingham, UK, 2008