Akustische Kopplungsmechanismen von Gebläsen und nachgeschalteten Volumen in Fahrzeug-Klimaanlagen

Kerstin Besserer[1], Thomas Biermeier[2], Ralf Blaschke[2], Stefan Becker[1]

1 Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik , 91058 Erlangen,
E-Mail: kerstin.besserer@ipat.uni-erlangen.de; stefan.becker@ipat.uni-erlangen.de
2 Audi AG, 85045 Ingolstadt,
E-Mail: thomas.biermeier@audi.de; ralf.blaschke@audi.de

Einleitung

Durch die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen tritt aktuell in der Fahrzeugakustik das Klimatisierungssystem immer weiter in den Fokus. In der Literatur werden die Entstehung von akustischen Quelltermen in der Laufradabströmung und die Kopplungsmechanismen mit nachgeschalteten Volumen nur sehr eingeschränkt behandelt. Im Sinne einer gezielten Beeinflussung und Optimierung der Klimatisierungsakustik ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Klimatisierungssystems aber unerlässlich. Um gezielt die Kopplungsmechanismen in der Anregung von Hohlraummoden näher beschreiben zu können, wird im Folgenden das Gebläse als akustische Schallquelle mit einer ähnlichen Charakteristik wie weißes Rauschen betrachtet. Der Schalldruck wird analog zu Rohren [1] ohne Dämpfung durch das System übertragen.

Die Ausnahme hierbei tritt ein, wenn die übertragene Frequenz mit einer Eigenmode des Volumens übereinstimmt und sich diese ausbreitet. In diesem Fall kommt es zu einem Schalldurchgang mit Verstärkung.

Für die Charakterisierung einer Eigenmode nimmt man an, dass der im Folgenden vorgestellte Versuchsaufbau schallharte Randbedingungen aufweist. Das bedeutet, dass der Schalldruck an der Wand ein Maximum aufweist, während die Schallschnelle den Betrag null erreicht. Wenn bei einem Messaufbau die Mikrofonposition mit einem Modenbauch zusammen fällt, ergeben sich lokale Maxima im Amplitudenspektrum, der Kohärenz zwischen zwei gegenüberliegenden Mikrofonpositionen sowie der Übertragungsfunktion. Umgekehrt verhalten sich die Eigenschaften, wenn die Messposition mit einer Knotenlinie übereinstimmt [2].

Durchführung

Messung

Für die Durchführung der Versuche wurden zwei verschiedene Modelle verwendet. In beiden Fällen wurde ein generisches Gebläsemodell verwendet, bei dem die Zunge modular austauschbar ist. Alle Messungen wurden zum einen mit einer 2-dimensionalen Zunge mit einem Zungenabstand-Gebläseradius-Verhältnis von $\Delta r/R=0{,}18$ und einer „schrägen Zunge“, im folgenden 3-D-Zunge genannt, durchgeführt. An dieses Gebläse wurden zwei verschiedene Volumen angeflanscht. Bei der Modellvariante 1 („Modell 1“) folgt auf das Gebläse ein Quader mit den Innenmaßen 400 mm x 400 mm x 450 mm (Abbildung 1). Der Auslass befindet sich um 90° versetzt seitlich am Volumen.

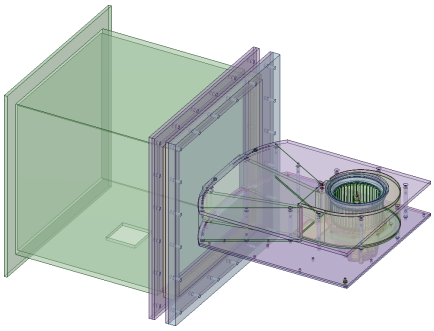

Abbildung 1: Aufbau Modellvariante 1

Die zweite untersuchte Variante („Modell 2“) weist bei den Innenmaßen analoge Geometrieverhältnisse zu in der Serie verwendeten Klimaanlagen auf (Abbildung 2). Hierbei wurde auf eine realistische Umlenkung der Strömung nach dem Gebläse geachtet und es kommen in diesem Modell verschiedene Verdampferkonfigurationen zum Einsatz. Neben einem Serienverdampfer wurde auch die Konfiguration ohne verbauten Verdampfer sowie einem Ersatzverdampfer vermessen. Der Ersatzverdampfer besteht aus einem Quader mit konischen Löchern und generiert einen ähnlichen Druckverlust wie ein Serienverdampfer. Jedoch ist er aufgrund seiner verhältnismäßig kleinen Oberfläche numerisch vernetzbar.

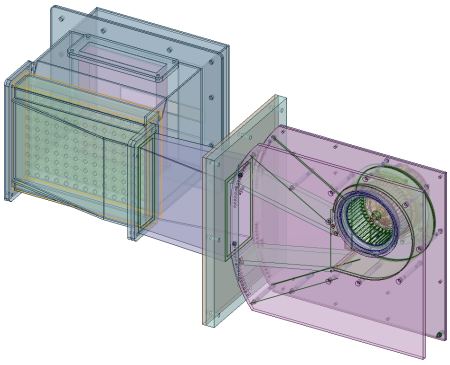

Abbildung 2: Aufbau Modellvariante 2

Die folgenden Messergebnisse wurden bei einer Rotordrehzahl von 1850 U/min und einem Volumenstrom von 3,5 m³/min ermittelt. Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion wurde mittig am Eintritt in das Gebläse ein Druckkammerlautsprecher positioniert und das Volumen mit einem hochlaufenden Sweep angeregt. Bei beiden Messdurchführungen wurden zwei 1/8‘‘-

Wanddruckmikrofone gegenüberliegend an verschiedenen Positionen an den Wänden platziert. Zusätzlich kamen 1/2‘‘-Freifeldmikrofone außerhalb des Volumens zum Einsatz.

Simulation

Neben der experimentellen Bestimmung wurden die Eigenmoden mittels eines FE-Lösers (CFS++) numerisch bestimmt. Da akustische Eigenmoden unabhängig von einer konkreten Anregung sind, wird in diesem Fall das Eigenwertproblem

$$M\vec{p} = \omega\vec{p} \tag{1}$$

durch die Anwendung des Lanczos-Algorithmus [3] gelöst, wobei $\omega=2\pi f$ die Kreisfrequenz ist und die Eigenwerte der Matrix M bezeichnet. Der zugehörige Eigenvektor $\vec{p}$ stellt die Eigenmode dar, wobei die Gittergröße so gewählt wurde, dass eine Bestimmung der Eigenmoden bis 2000 Hz möglich war. Alle Simulationen wurden mit der zweidimensionalen Zungengeometrie $\Delta r/R=0{,}18$ durchgeführt. Im Fall von Modell 2 wurde die Simulation mit der Konfiguration mit Ersatzverdampfer durchgeführt, da diese eine Vernetzbarkeit in der Simulation ermöglicht und bei Durchströmung einen Drucksprung induziert.

Ergebnisse

Modell 1

Bei der numerischen Simulation wurden für Modell 1 insgesamt 102 Eigenmoden im Bereich zwischen 369 Hz und 2012 Hz ermittelt. Jedoch kann nur ein geringer Anteil dieser in den Ergebnissen der Messungen in Spektrum/ Kohärenz oder Übertragungsfunktion nachgewiesen werden. In Abbildung 3 ist die Übertragungsfunktion an zwei verschiedenen Positionen sowie die theoretisch möglichen Eigenmoden zu sehen. Deutlich wird zum einen, dass ein Maximum in beiden Übertragungsfunktionen mit Eigenmoden zusammenfallen kann (z.B. 376 Hz), aber nicht muss (z.B. 550 Hz). Zum anderen liegen die Moden im höherfrequenten Bereich sehr nah beieinander, sodass sie nicht mehr deutlich unterschieden werden können.

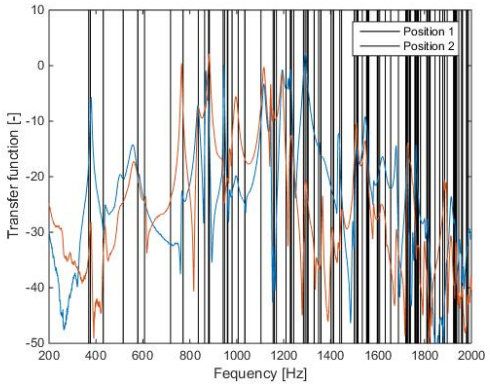

Abbildung 3: Übertragungsfunktion Modell 1 mit Eigenmoden

Exemplarisch für das Modell 1 ist in Abbildung 4 die zweite Eigenmode bei 376 Hz dargestellt. Die gewählte Messposition in Abbildung 4 d) als schwarzer Punkt gekennzeichnet. Bei den Ergebnissen der Messungen mit Strömung, Spektrum und Kohärenz, sowie in der Übertragungsfunktion ist ein lokales Maximum zu erkennen. Es ist somit möglich diese konkrete Eigenmode mit Messungen nachzuweisen. Die erste Eigenmode von 369 Hz jedoch ist in allen drei Graphen nicht als Ereignis wahrnehmbar. Es ist davon auszugehen, dass sich diese nicht im Volumen ausbreitet.

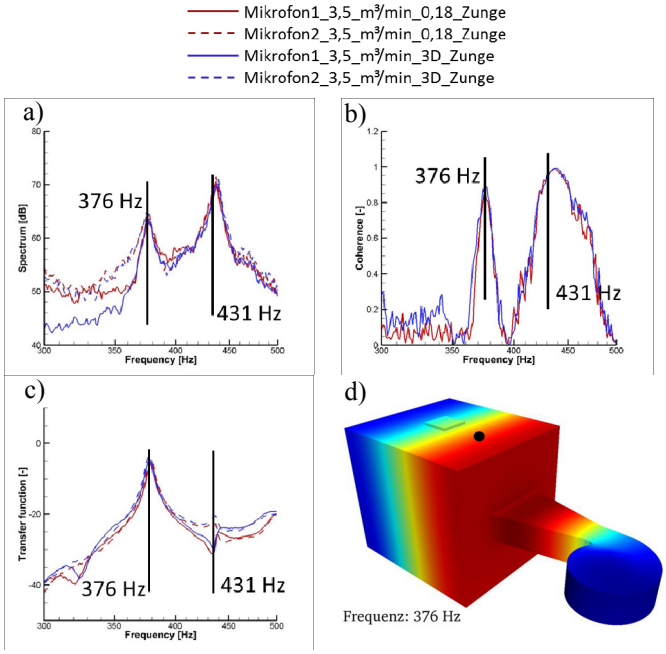

Abbildung 4: Mode 376 Hz a) Spektrum b) Kohärenz c) Übertragungsfunktion d) Eigenmode

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse einer Messung dargestellt, bei der die Mikrofonposition mit einer Knotenlinie übereinstimmt.

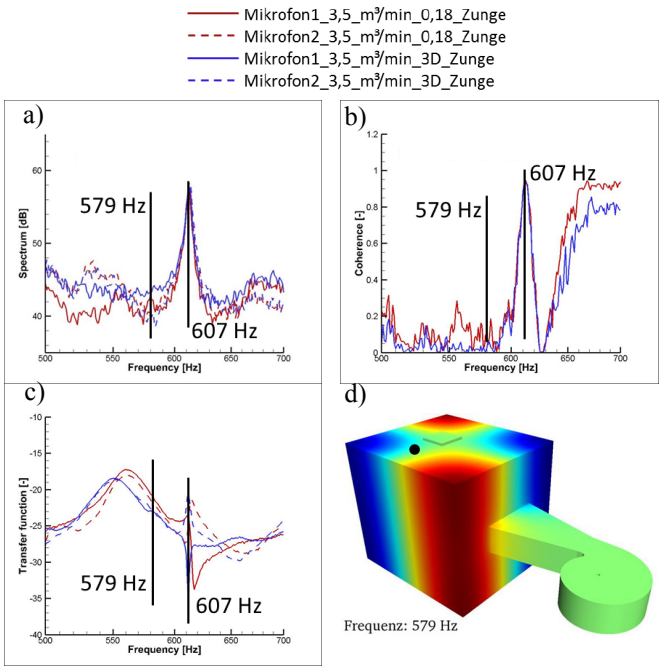

Abbildung 5: Mode 376 Hz a) Spektrum b) Kohärenz c) Übertragungsfunktion d) Eigenmode

Zu sehen ist der Frequenzbereich, der die siebte (579 Hz) und die achte Eigenmode (607 Hz) abdeckt. Im Fall der Knotenlinie der Eigenmode bei 579 Hz wäre zu erwarten, dass die Ergebnisse der verschiedenen Versuche lokale Minima aufweisen. Jedoch sind keine charakteristischen Veränderungen der Verläufe zu sehen, die Rückschlüsse auf die Ausbreitung der Mode zulassen. Im Gegensatz dazu ist bei 607 Hz sowohl in Spektrum, Kohärenz und Übertragungsfunktion die Eigenmode mit einem Maximum in den Ergebnissen an der Mikrofonposition nachweisbar.

Modell 2

Im Bereich zwischen 39 Hz und 2039 Hz wurden mit der Simulation insgesamt 64 mögliche Eigenmoden ermittelt. Dies sind verglichen mit der Anzahl der Eigenmoden von Modell 1 nur 63%. Im Fall von Modell 2 ist die sechste Eigenmode bei 540 Hz, die erste deutlich nachweisbare Mode im System.

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse aus den verschiedenen Messungen im Hinblick auf diese Frequenz zusammengefasst. Im Gegensatz zu Modell 1 ergeben sich für die ausgewählten Mikrofonpositionen Unterschiede in den Ergebnissen des Spektrums zwischen Mikrofon 1 (Abbildung 6 d) schwarzer Punkt) und Mikrofon 2 (gegenüberliegende Seite). Dieser Unterschied ist auf die Umlenkung der Strömung stromaufwärts der Mikrofone zurück zu führen. Trotzdem ergibt sich in den Ergebnissen, sowohl in Spektrum, Kohärenz und Übertragungsfunktion, ein lokales Maximum, das als die Ausbreitung der Eigenmode interpretiert werden kann. In der Analyse des Spektrums ist erkennbar, dass die Ergebnisse der Messung mit der 3-D-Zunge einen geringeren Schalldruckpegel aufweisen, als die Ergebnisse der Messung mit der Zungengeometrie Δr/R=0,18.

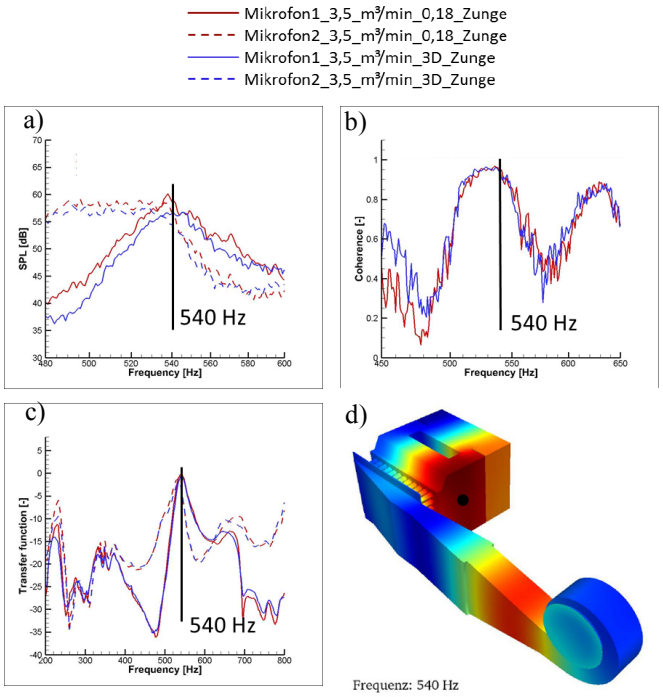

Abbildung 6: Mode 540 Hz a) Spektrum b) Kohärenz c) Übertragungsfunktion d) Eigenmode

Es sind jedoch nicht nur Maxima von Eigenmoden nachweisbar, sondern auch in einigen Fällen Knotenlinien. Ein Beispiel hierfür stellt eine Mode bei der verhältnismäßig hohen Frequenz von 1020 Hz (Abbildung 7) dar. Die Mikrofonposition befindet sich hierbei im Bereich einer Knotenlinie. Im Verlauf des Spektrums kommt es zu einem deutlichen Einbruch der Amplitude und auch die Kohärenz weist ein Minimum auf. Vervollständigt wird das Ergebnis durch ein Minimum in der Übertragungsfunktion. Bei einem Vergleich zwischen den beiden verwendeten Zungengeometrien kommt es hierbei zu sehr geringen Unterschieden in der Amplitude.

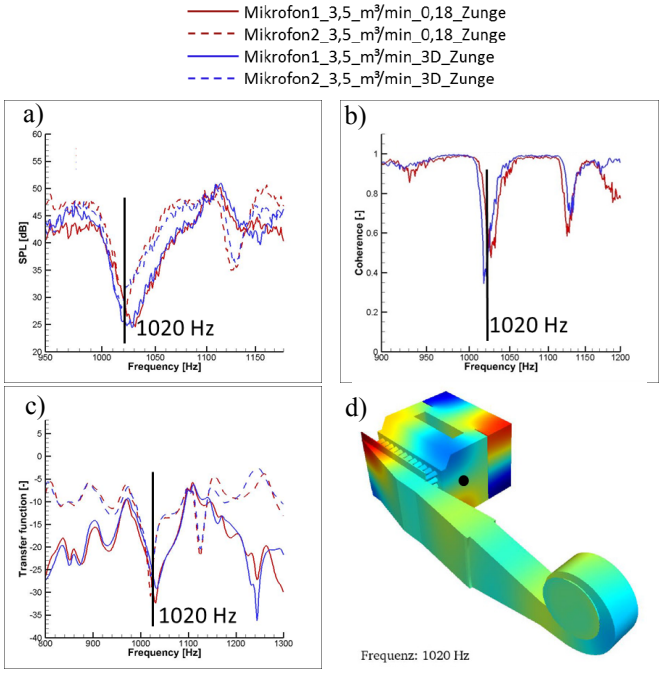

Abbildung 7: Mode 1020 Hz a) Spektrum b) Kohärenz c) Übertragungsfunktion d) Eigenmode

In der folgenden Abbildung 8 werden die Ergebnisse der Messungen mit verschiedenen Verdampferkonfigurationen über einen Frequenzbereich von 100 Hz bis 10 kHz gegenüber gestellt. Deutliche Unterschiede ergeben sich vor allem im niederfrequenten Bereich, hierbei führen die dämpfenden Eigenschaften von Serienverdampfer und Ersatzverdampfer zu einer Verringerung des Schalldruckpegels. Während es bei den Verläufen der Amplitude der Ergebnisse dieser beiden Konfigurationen zu ähnlichen charakteristischen Verläufen kommt. Ein deutliches Maximum in allen drei Spektren bildet sich bei der Frequenz der sechsten Eigenmode von 540 Hz aus. Die Ausbreitungsfähigkeit dieser Mode ist somit unabhängig von der verwendeten Verdampferkonfiguration. Bei der Frequenz von 1020 Hz (vgl. Abbildung 7) weist jedoch lediglich das Ergebnis der Konfiguration mit Ersatzverdampfer ein Minimum auf, somit ist diese Mode wahrscheinlich abhängig von der Verdampferkonfiguration. Zwischen 600 Hz und 1000 Hz ist der Verlauf der Amplitude bei den Messungen mit Ersatzverdampfer deutlich niedriger als die anderen beiden Ergebnisse. Ein Grund hierfür kann sein, dass durch Strahlausbildung nach den konischen Löchern die Strömung im Bereich des Mikrofons noch nicht an der Wand anliegt, wohingegen bei

Verwendung des Serienverdampfers oder ohne verbauten Verdampfer die Strömung bereits anliegt und das Mikrofon neben dem akustischen Druck auch einen erhöhten hydrodynamischen Druck detektiert.

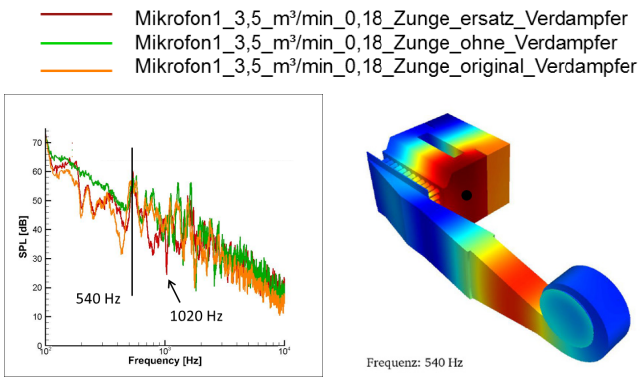

Abbildung 8: Vergleich verschiedener Verdampfer

Zusammenfassung

Um die Mechanismen der Modenausbreitung in Volumen besser verstehen zu können, erfolgten Untersuchungen mit unterschiedlichen generischen Volumenmodellen. Um die Eigenmoden in diesen Volumen bestimmen zu können wurden drei verschiedenen Methoden angewendet. Zum einen wurde das Volumen mit einem Volumenstrom von 3,5 m³/min durchströmt. Als zweites wurde mittels eines Lautsprechers das Volumen synthetisch akustisch angeregt und so die Übertragungsfunktion ermittelt. Bei der dritten Methode wurde eine FE-Simulation durchgeführt, um die theoretisch auftretenden Moden zu bestimmen. Es konnte in den Ergebnissen der Messungen nachgewiesen werden, dass akustische Moden sowohl durch akustische Quellen in einer Strömung als auch durch eine synthetische akustische Quelle anregbar sind. Hierbei wurde auch deutlich, dass nicht nur Modenmaxima sondern auch Knotenlinien bei der Analyse von Spektrum, Kohärenz und Übertragungsfunktion in Abhängigkeit ihrer charakteristischen Ausprägung zu unterscheiden sind. Neben der Variation der Volumen wurde auch der Einfluss verschiedener Zungengeometrien auf die Modenausbreitung betrachtet. Hierbei hat es sich in den Auswertungen ergeben, dass die Wahl der Zunge Einfluss auf den Amplitudenverlauf hat, jedoch keinen auf die Ausbreitung von Moden oder die Frequenzen der Moden. Des Weiteren wurden in Modell 2 verschiedene Verdampferkonfigurationen betrachtet. Die Ergebnisse der Messungen im Vergleich zeigen einen Unterschied der Amplitudenverläufe, wobei sich aber die Mode von 540 Hz bei allen drei untersuchten Konfigurationen ausbreiten kann. Bei Betrachtung jeglicher möglicher Eigenmoden, stellt sich jedoch heraus, dass nur ein geringer Anteil aller theoretisch auftretenden Moden auch experimentell nachweisbar ist. Hieraus ergeben sich weiterführende Fragestellungen. Unter anderem gilt es zu ermitteln welche Charakteristik die anregbaren Moden aufweisen sowie die Frage wie eine Anregung beschaffen sein muss, damit eine Mode sich ausbreitet.

Literatur

[1] Rienstra; Hirschberg: An Introduction to acoustics. Eindhoven University of Technology, 2012

[2] Lerch: Technische Akustik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007

[3] Calvetti; Reichel; Sorensen: An Implicitly Restarted Lanczos Method for Large Symmetric Eigenvalue Problems. Electronic Transactions on Numerical Analysis 2, p 1–21, 1994