Untersuchung der aeroakustischen Schallentstehung an einem generischen Heckklappenspaltmodell

Philipp Winter[1], Manuel Weiß[1], Michael Wüst[1], Stefan Schimmelpfennig[2], Reinhard Lerch[1]
[1] *Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland,*
Email: philipp.winter@fau.de
[2] *AUDI AG, 85045 Ingolstadt, Deutschland*

Einleitung

In der gegenwärtigen Fahrzeugentwicklung stellen Karosseriespalte eine sehr wichtige Schallquelle für das Fahrzeuginnenraumgeräusch dar [1]. Dem oberen Heckklappenspalt (HKS) am hinteren Ende des Fahrzeugdachs wird dabei eine besonders große Bedeutung beigemessen. Die Spaltöffnung weist mit dem darunterliegenden Hohlraumvolumen ein für Helmholtz-Resonatoren charakteristisches Resonanzverhalten auf. Schimmelpfennig[2] untersuchte den Einfluss abgerundeter und eckiger Spaltöffnungskanten auf den Schalldruckpegel im Resonanzvolumen und im Fahrzeuginnenraum [2]. Am Testfahrzeug zeigten sich ab einer Geschwindigkeit von 140 km/h erhöhte Schalldruckpegel bei der Helmholtz-Frequenz für die fertigungsbedingt abgerundete vordere Spaltkante im Vergleich zu einer scharfkantig aufmodellierten Spaltkante. Im Geschwindigkeitsbereich von 180 km/h bis 250 km/h erreichte diese Schalldruckpegelerhöhung mit etwa 5 dB im Hohlraumvolumen und im Fahrzeuginnenraum ihr Maximum. Mutmaßlich führte eine ab einer Geschwindigkeit von 140 km/h einsetzende Fluktuation der Ablöselinie auf der runden vorderen Spaltkante zu einem erhöhten Energieeintrag in die Scherschicht in der Spaltöffnung, worin Schimmelpfennig die Ursache für den Schalldruckpegelanstieg im Hohlraumvolumen vermutete.

Im vorliegenden Beitrag wird der Einfluss der vorderen Spaltkante auf das Strömungsfeld in der Spaltöffnung an einem generischen HKS-Modell untersucht, um die physikalischen Zusammenhänge zwischen der strömungsmechanischen Anregung und dem Resonanzverhalten näher zu beleuchten. Hierfür wird das Strömungsfeld in der Spaltöffnung mit einer Hitzdrahtsonde ortsaufgelöst erfasst. Dabei werden die Felder für eine rechtwinklige und für eine abgerundete vordere Spaltkante gegenübergestellt und verschiedene Strömungsgrößen quantitativ verglichen. Neben der Analyse des stationären Felds und der Geschwindigkeitsschwankungen bei der Helmholtz-Frequenz werden Kohärenzanalysen zwischen dem Strömungsfeld in der Spaltöffnung und einem Referenzmikrofon im Hohlraumvolumen präsentiert. Hierdurch sollen für die Schallentstehung relevante Bereiche in der Spaltöffnung lokalisiert und darüber hinaus zu Tage gefördert werden, welchen Einfluss die vordere Spaltkante im Schallentstehungsmechanismus ausübt. Dabei werden Anregungszustände **ohne** aktiven Rückkoppelmechanismus betrachtet. Aktive Rückkoppelmechanismen, wie diese z.B. beim *Schiebedachwummern* [3] auftreten, sind nach Wickern und Brennberger für den Fahrzeug-HKS nicht relevant [1].

Generisches Heckklappenspaltmodell

Abbildung 1 zeigt einen Fahrzeug-HKS, einen Querschnitt eines Fahrzeug-HKS sowie den Querschnitt des für die durchgeführten Messungen verwendeten, generischen HKS-Modells.

Abbildung 1: Spaltöffnung des oberen HKS eines Fahrzeugs (links), realer HKS-Querschnitt (Mitte) und dessen generisches HKS-Modell (rechts). Abmessungen in mm.

Messaufbau und Methodik

In Abbildung 2 ist der verwendete Messaufbau dargestellt, in dem das generische HKS-Modell zum Einsatz kommt. Zur strömungsmechanischen Anregung des HKS-

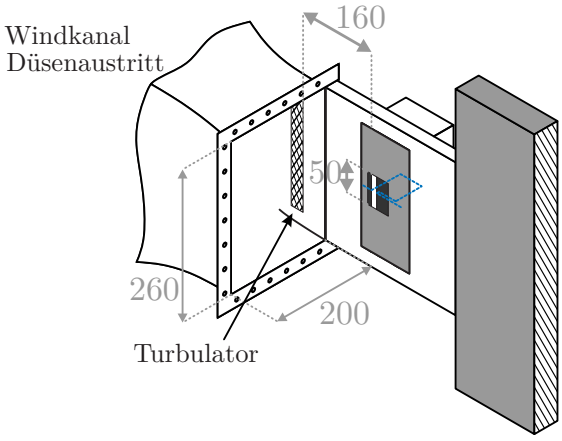

Abbildung 2: Messaufbau mit generischem HKS-Modell. Der Querschnitt des HKS-Modells (vgl. Abbildung 1) ist mit unterbrochenen Linien eingezeichnet. Abmessungen in mm.

Modells wird ein umlaufender Aeroakustik-Windkanal verwendet, dessen Messstrecke sich innerhalb eines reflexionsarmen Akustikraums befindet. Bei der für alle Messungen genutzten Anströmgeschwindigkeit von

40 m/s (144 km/h) liegt eine turbulente Grenzschicht an der Spaltöffnung vor. Die spannweitige Dimension der Spaltöffnung von 50 mm hat sich in Vorversuchen als zu größeren Spannweiten vergleichbar erwiesen. Die Anordnung von Hitzdraht und Mikrofon kann im Detail aus Abbildung 3 entnommen werden. An 1050 Mess-

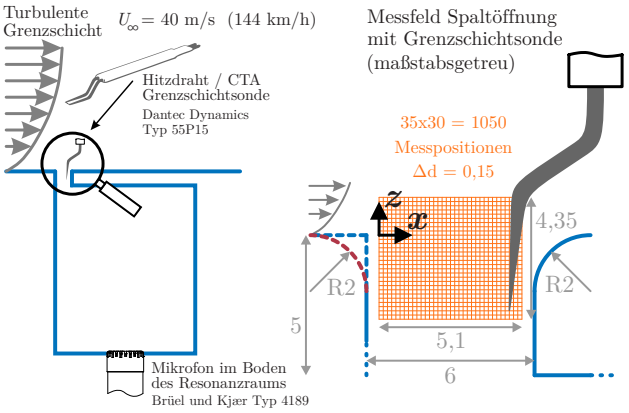

Abbildung 3: Anordnung der Hitzdrahtsonde und des Mikrofons (links). Maßstabsgetreue Detailansicht des Spaltöffnungsbereichs mit Messpositionen für die Grenzschichtsonde (rechts). Abmessungen in mm.

positionen werden Hitzdraht-, Mikrofon- und PT100-Signal zur Temperaturkompensation fünf Sekunden lang, zeitsynchron bei einer Abtastrate von 48 kHz, erfasst. Die Messreihe wird für eine eckige vordere Spaltkante (rechtwinklig) als auch für eine runde vordere Spaltkante ($R = 2$ mm) durchgeführt, wobei die hintere Spaltkante für beide Versuche abgerundet ist. Die Messebene von Hitzdraht und Mikrofon (x-z-Ebene) liegt spannweitig genau in Spaltmitte.

Messergebnisse

Schalldruckpegel im Resonanzvolumen

In Abbildung 4 sind die jeweils über 1050 Messpositionen der Hitzdrahtsonde gemittelten Schalldruckpegelspektren im Resonanzvolumen für beide Messreihen dargestellt. Die zugehörigen Streubänder über die zweifache Standardabweichung ($\pm 2\sigma$) verdeutlichen, dass ein geringer Einfluss der Hitzdrahtposition auf das Mikrofonsignal vorhanden ist. Die Auswertung der 1050 Einzelspektren bei der Helmholtz-Resonanzfrequenz (ohne Abbildung) offenbart einen Anstieg des Schalldruckpegels um rund 2,5 dB bei Änderung der Hitzdrahtposition von $x = 0$ (nahe der vordereren Spaltkante) zu $x = 5,1$ mm (nahe der hinteren Spaltkante). Dieser Einfluss tritt jedoch bei runder und eckiger vorderer Spaltkante jeweils in gleichem Maße auf und wird angesichts der mittleren, absoluten Pegeldifferenz zwischen den beiden Messreihen als systematischer Fehler von untergeordneter Bedeutung eingestuft. Die z-Position der Hitzdrahtsonde hingegen weist keinen systematischen Einfluss auf den Schalldruckpegel bei der Helmholtz-Frequenz auf.

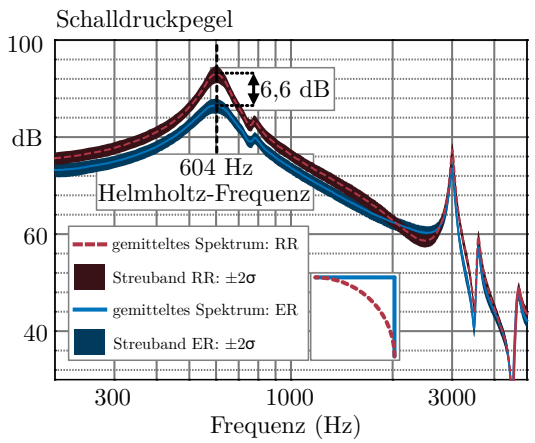

Abbildung 4: Über 1050 Messpositionen der Hitzdrahtsonde gemitteltes Schalldruckpegelspektrum im Resonanzvolumen für die Spaltkantenkombinationen *rund-rund* (RR) und *eckig-rund* (ER), wobei der erste Buchstabe jeweils für die Form der vorderen Spaltkante steht. 95 % der Messwerte der jeweils für das gemittelte Spektrum genutzten 1050 Einzelspektren liegen innerhalb der dargestellten $\pm 2\sigma$-Streubänder.

Stationäres Strömungsfeld

Das über fünf Sekunden Messdauer gemittelte, stationäre Strömungsfeld in der Spaltöffnung in Abbildung 5 ermöglicht eine Einteilung in vier Bereiche. Diese verlagern sich beim Wechsel von der eckigen zur runden vorderen Spaltkante. Dabei vergrößert sich einerseits das

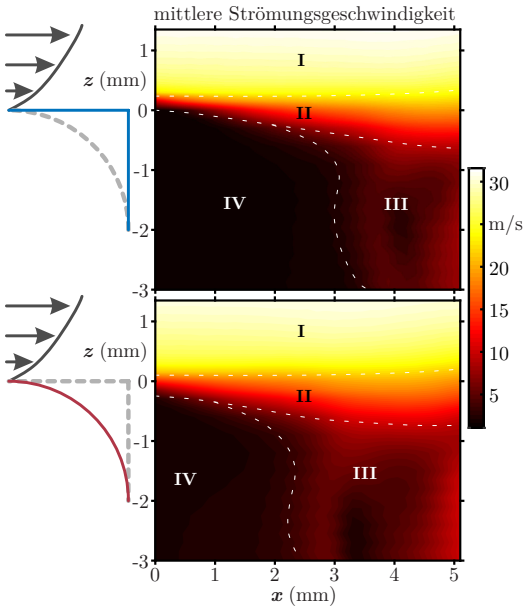

Abbildung 5: Gemitteltes, stationäres Strömungsfeld in der Spaltöffnung mit eckiger vorderer Spaltkante (oben) und runder vorderer Spaltkante (unten). Bereichseinteilung: ungestörte Außenströmung (I), Scherschichtbereich (II), Rezirkulationsgebiet (III), strömungsberuhigter Bereich (IV).

Rezirkulationsgebiet III bei gleichzeitiger Verkleinerung des strömungsberuhigten Bereichs IV, andererseits wird der Scherschichtbereich II verbreitert und dessen Bereichsgrenzen weiter in die Spaltöffnung hinein verlagert. Welche Auswirkungen die Bereichsverlagerungen

auf die Anregung des Resonanzsystems haben, lässt sich aus dem stationären Verhalten jedoch nicht ableiten. Im nächsten Abschnitt erfolgt daher die Analyse der dynamischen Geschwindigkeitsfelder bei der Helmholtz-Resonanzfrequenz.

Dynamisches Strömungsfeld

Geschwindigkeitsschwankungsfeld bei der Helmholtz-Resonanzfrequenz

Abbildung 6 zeigt die auf die maximale Amplitude der beiden Messreihen normierten, logarithmierten Geschwindigkeitsamplituden im Frequenzband der Helmholtz-Resonanzfrequenz um $604\,\mathrm{Hz} \pm 3\,\mathrm{Hz}$. Im

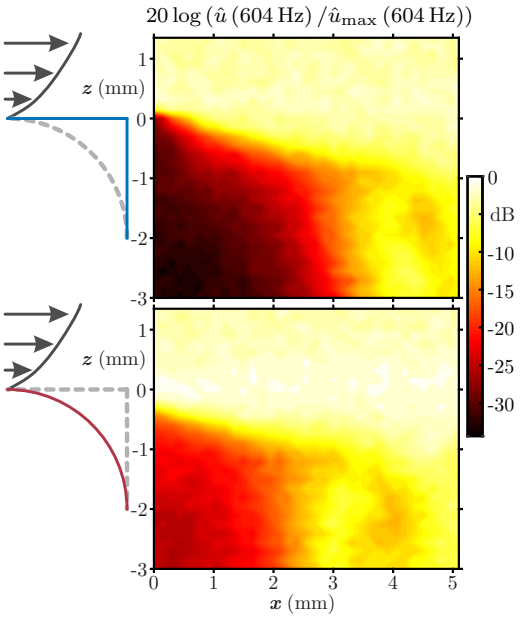

Abbildung 6: Auf den Maximalwert der beiden Messreihen normierte, logarithmierte Geschwindigkeitsamplitude im Frequenzband der Helmholtz-Frequenz um $604\,\mathrm{Hz} \pm 3\,\mathrm{Hz}$.

Geschwindigkeitsschwankungsfeld bei der Helmholtz-Resonanzfrequenz werden die Bereichsverlagerungen beim Wechsel von einer eckigen zu einer runden vorderen Spaltkante besonders deutlich: Die bei einer runden Spaltkante verursachten Geschwindigkeitsschwankungen lassen sich als eine Verschiebung der bei einer eckigen Spaltkante auftretenden Geschwindigkeitsschwankungen in negativer x- und z-Richtung interpretieren.

Verschiebung des Geschwindigkeitsschwankungsfelds beim Wechsel der vorderen Spaltkante

In Abbildung 7 wird die Verschiebung des Geschwindigkeitsschwankungsfelds auf Basis des Vergleichs der Farbkonturübergänge zwischen den beiden Feldern aus Abbildung 6 veranschaulicht. Es ergibt sich ein um $-1,01\,\mathrm{mm}$ in x- und um $-0,17\,\mathrm{mm}$ in z-Richtung verschobener Ablösepunkt an der runden Spaltkante im Vergleich zum scharf definierten Ablösepunkt an der eckigen Spaltkante. Es lässt sich somit prinzipiell eine Anregungsäquivalenz zwischen einer runden und einer wie in Abbildung 7 angedeuteten eckigen vorderen Spaltkante vermuten. Ein Ablösepunkt auf einer abgerundeten Kante mit stetigem

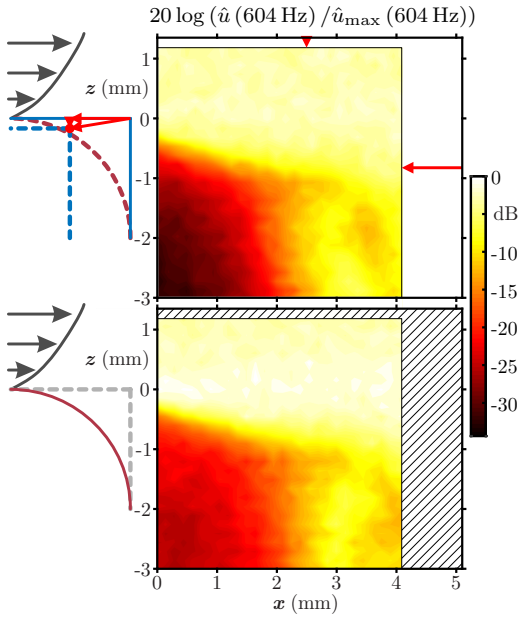

Abbildung 7: Ermittlung von Ablösepunkt und -winkel auf der runden Spaltkante durch Vergleich der Farbkonturübergänge in den beiden Feldern und entsprechende Verschiebung des oberen Felds. Verschiebung in x-Richtung: $-1,01\,\mathrm{mm}$; Verschiebung in z-Richtung: $-0,17\,\mathrm{mm}$.

Konturverlauf kann jedoch dynamisch fluktuieren. Daher muss besagte Anregungsäquivalenz nicht grundsätzlich gegeben sein. Tatsächlich werden durch die runde Spaltkante auch erhöhte Geschwindigkeitsschwankungen in der Spaltöffnung verursacht, die im Folgenden genauer quantifiziert werden.

Differenz der Geschwindigkeitspegel

Um die Unterschiede der auftretenden Geschwindigkeitsschwankungen bei Anregung mit eckiger und runder Spaltkante deutlicher erkennbar zu machen, wird in Abbildung 8 die Differenz der Pegel der beiden Geschwindigkeitsschwankungsfelder aus Abbildung 6 gebildet. Dabei werden die bei eckiger Spaltkante auftreten-

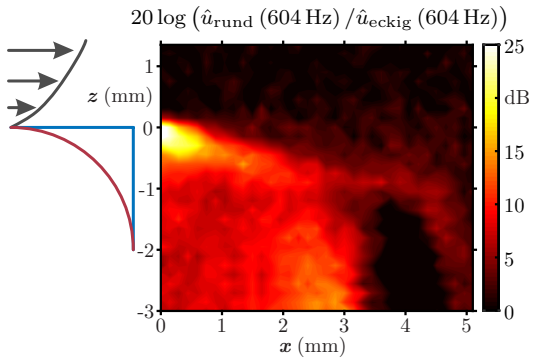

Abbildung 8: Geschwindigkeitspegeldifferenz bei der Helmholtz-Resonanzfrequenz zwischen den Schwankungsfeldern mit runder und eckiger Spaltkante (vgl. Abbildung 6).

den Geschwindigkeitspegel von denen bei runder Spaltkante abgezogen. Es zeigen sich um bis zu 25 dB erhöhte Pegel für die runde Spaltkante nahe des Ablösebereichs. Auch im hinteren Scherschichtbereich II (vgl. Abbil-

dung 5) sind die Pegel für die runde Spaltkante je nach Ort um 1 dB bis 4 dB erhöht. Es lässt sich demnach festhalten, dass die runde Spaltkante auch höhere Geschwindigkeitsschwankungen in der Spaltöffnung verursacht, die mutmaßlich für die höheren Schalldruckpegel im Resonanzvolumen verantwortlich sind.

Schallentstehungsmechanismus

Die im vorherigen Abschnitt erläuterten Ergebnisse lassen die von der runden im Vergleich zur eckigen vorderen Spaltkante verursachten, erhöhten Geschwindigkeitsschwankungen als Ursache für die erhöhten Schalldruckpegel vermuten. Jedoch wäre eine Rückführung der ortsaufgelösten Geschwindigkeitsfluktuationen in der Spaltöffnung auf die Druckschwankungen im Resonanzvolumen wünschenswert, um den Wirkmechanismus bei der Schallentstehung besser interpretieren zu können. Über die Kohärenzfunktion

$$\gamma^2(f) = \frac{\left|\underline{S}_{\mathrm{xy}}(f)\right|^2}{S_{\mathrm{xx}}(f) \cdot S_{\mathrm{yy}}(f)} \tag{1}$$

kann der Grad der linearen Abhängigkeit zweier Zeitsignale $x(t)$ und $y(t)$ mithilfe des auf die Autoleistungsdichtespektren der Einzelsignale normierten Betragsquadrats des komplexen Kreuzleistungsdichtespektrums abgebildet werden. Abbildung 9 zeigt die Kohärenzfunktion für beide Spaltkanten bei der Helmholtz-Resonanzfrequenz. Mit Ausnahme des

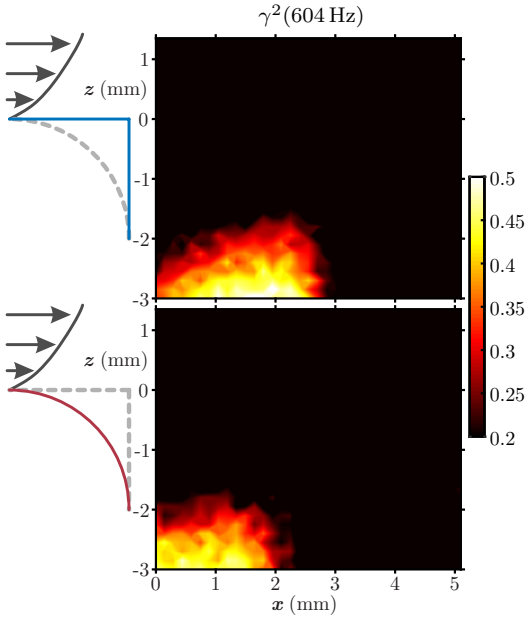

Abbildung 9: Kohärenzfunktion $\gamma^2(604\,\mathrm{Hz})$ zwischen Hitzdrahtsignal in der Spaltöffnung und Mikrofonsignal im Resonanzvolumen für beide Spaltkanten.

strömungsberuhigten Bereichs IV ergeben sich für die Kohärenzfunktion zwischen Hitzdraht- und Mikrofonsignal im gesamten Messfeld bei beiden Spaltkanten Werte unterhalb von 0,2 - teils nahe Null. Als Hauptursache hierfür wird die hohe Querempfindlichkeit der 1D-Hitzdrahtsonde auf Strömungskomponenten in Raumrichtungen vermutet, die für die Anregung des Resonanzsystems wahrscheinlich von geringer Bedeutung sind (x- & y-Komponente). Die Anregung des vom Helmholtz-Resonator bekannten, auf- und abschwingenden Luftmasseelements in der Spaltöffnung (z-Komponente) wird mutmaßlich von inkohärenten Geschwindigkeitsschwankungen, beispielsweise in Strömungsrichtung, maskiert. Lediglich im strömungsberuhigten Bereich IV können die niedrigen Schwankungsamplituden des Luftmasseelements in z-Richtung aus den überlagerten Signalkomponenten anderer Raumrichtungen hervortreten und kohärente Bereiche offenbaren. Diese sind in Abbildung 9 deutlich zu erkennen.

Zusammenfassung

Die in der Spaltöffnung ortsaufgelöst erfassten Geschwindigkeitsschwankungen bei der Helmholtz-Frequenz sind für eine runde im Vergleich zu einer eckigen vorderen Spaltkante teils deutlich erhöht. Ursächlich hierfür ist die stetige Kontur der runden Spaltkante, die einen instabilen, vorgezogenen Ablösepunkt im Vergleich zur eckigen Spaltkante aufzuweisen scheint. Mit Ausnahme des instabilen Ablösepunkts und der dadurch erhöhten Geschwindigkeitsschwankungen in der Spaltöffnung lässt sich die runde Spaltkante hinsichtlich ihrer Wirkung als eckige Spaltkante mit verschobenem Ablösepunkt interpretieren. Die Verschiebungsvektoren hierfür konnten ermittelt werden. Als Konsequenz der erhöhten Geschwindigkeitsschwankungen in der Spaltöffnung erhöhen sich mutmaßlich auch die Druckschwankungen im Resonanzvolumen.

Durch die Kohärenzanalyse zwischen Hitzdraht- und Mikrofonsignal konnten keine im Schallentstehungsmechanismus besonders relevanten Bereiche innerhalb der Spaltöffnung identifiziert werden. Als Ursache hierfür wird vor allem die Querempfindlichkeit der Hitzdrahtsonde auf Strömungskomponenten in Raumrichtungen vermutet, die für die Anregung des Resonanzsystems bei der Helmholtz-Frequenz wahrscheinlich unbedeutend sind. Dadurch können an der Anregung des Resonators beteiligte, kohärente Signalanteile von inkohärenten Signalanteilen anderer Raumrichtungen überdeckt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der AUDI AG für die Finanzierung des Projekts im Rahmen einer INI.FAU-Kooperation.

Literatur

[1] Wickern, G. und Brennberger, M.: Helmholtz Resonators Acting as Sound Source in Automotive Aeroacoustics. SAE Technical Paper 2009-01-0183 (2009)

[2] Schimmelpfennig, S.: Influence of Edge Geometry of Automotive Body Gaps on the Interior Noise, AIA-DAGA 2013, Merano (2013)

[3] Islam, M., et al.: Investigations of Sunroof Buffeting in an idealised Generic Vehicle Model - Part I: Experimental Results, 29th AIAA Aeroacoustics Conference, Vancouver (2008)