

Der Einfluss der Grenzschichtdicke auf die aeroakustische Schallentstehung an einem generischen Heckklappenspaltmodell

Philipp Winter¹, Sebastian Haas¹, Marvin Wenzel¹, Manuel Weiß¹, Reinhard Lerch¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland,

Email: philipp.winter@fau.de

Einleitung

In der gegenwärtigen Fahrzeugentwicklung stellen Karoseriespalte eine der Kernquellen aeroakustischer Geräusche im Fahrzeuginnenraum dar [2]. 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. Der mutmaßlich dominierende Anregungsmechanismus für das Resonanzsystem ist die turbulente Grenzschicht (TBL) auf dem Fahrzeugdach. Aus der Turbulenz in der TBL resultierende Oberflächenwechseldrücke werden mit der Strömung über die Spaltöffnung transportiert und prägen dem Resonator eine Anregung auf. In Abhängigkeit von der Übertragungsfunktion des Helmholtz-Resonators und der betrachteten Frequenz werden anregende Wechseldrücke zum Boden des Resonatorvolumens hin durchgereicht, verstärkt oder gedämpft.

Je nach Fahrzeugkontur und Dachlänge ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften der TBL am HKS. Aufgrund der großen Anlaufänge und ggf. vorhandener Druckgradienten auf dem Fahrzeugdach kann die TBL stark anwachsen und verzögert werden. Für TBL-Parameter wie Grenzschichtdicke und Verzögerung ist für die Breite des Produktportfolios der meisten Automobilhersteller ein entsprechend großer Wertebereich zu vermuten. Typischerweise liegt die Grenzschichtdicke am HKS in der Größenordnung einiger Zentimeter. Für unterschiedliche TBL-Parameter liegt auch eine Veränderung der Anregungseigenschaften der dem Resonator aufgeprägten Wechseldruckanregung nahe. So könnten beispielsweise Anregungspegel und spektrale Energieverteilung der Oberflächenwechseldrücke für unterschiedliche TBL-Parameter variieren.

Vorgehensweise und Randbedingungen

Im vorliegenden Beitrag wird der Einfluss der TBL auf Anregung und Resonanzverhalten eines generischen HKS-Modells untersucht. Hierfür werden Grenzschichten mit unterschiedlichen Grenzschichtdicken und Verzögerungen erzeugt und neben den anregenden Oberflächenwechseldrücken und Schalldruckpegeln im Resonatorvolumen messtechnisch erfasst. Die Anregung des HKS-Modells durch die Oberflächenwechseldrücke in der TBL kann zusätzlich durch Scherschichtfluktuationen innerhalb der Spaltöffnung verstärkt werden [1, 3]. Für letzteren Anregungsmechanismus ist die Form der strom-

aufwärts befindlichen Spaltöffnungskante besonders relevant, welche am Fahrzeug eine fertigungsbedingte Rundung aufweist. Für die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellten Experimente sind sämtliche geometrischen Parameter des HKS-Modells gleichbleibend, einschließlich der verwendeten rechtwinkligen Spaltöffnungskanten. Daher wird von einem konstanten, im Vergleich zur TBL-Anregung geringen Anteil der Scherschichtanregung für die unterschiedlichen Grenzschichten ausgegangen.

Messaufbau und Methodik

Abbildung 1 zeigt einen Fahrzeug-HKS, einen Querschnitt eines Fahrzeug-HKS sowie den Querschnitt des für die durchgeführten Messungen verwendeten, generischen HKS-Modells (Helmholtz-Frequenz $f_0 \approx 570$ Hz).

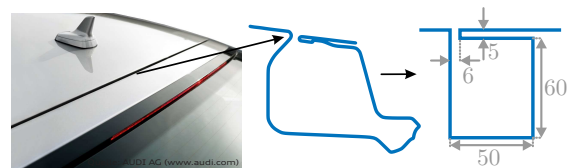


Abbildung 1: Spaltöffnung des oberen HKS eines Fahrzeugs (links), realer HKS-Querschnitt (Mitte) [2] und dessen generisches HKS-Modell (rechts). Abmessungen in mm.

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

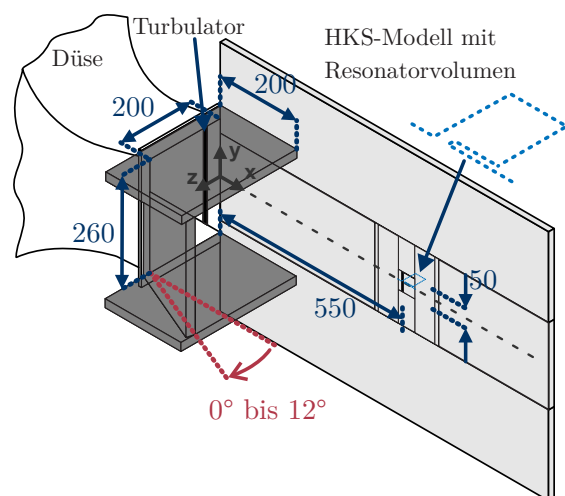


Abbildung 2: Messaufbau mit generischem HKS-Modell und Diffusor am Düsenaustritt mit variablem Öffnungswinkel zur Manipulation der TBL-Eigenschaften. Abmessungen in mm.

Modells wird ein umlaufender Aeroakustik-Windkanal genutzt, dessen Messstrecke sich innerhalb eines reflexionsarmen Akustikraums befindet. Die Manipulation der TBL-Eigenschaften wird mit einem Diffusor am Düsenaustritt realisiert, dessen Öffnungswinkel variabel ist, wodurch unterschiedliche, positive statische Druckgradienten innerhalb des Diffusors erzeugt werden können. Dadurch sollen ähnliche TBL-Eigenschaften wie am HKS eines Fahrzeugs realisiert werden, wo, je nach Fahrzeugkontur und Dachwinkel (relativ zum Erdboden), ebenfalls verschiedene Druckgradienten vorliegen können. Für die Durchführung der Versuche wird folgende Messtechnik verwendet (vgl. Abbildung 3):

1. Eine Grenzschichtsonde zur Erfassung der TBL am Ort der Spaltöffnung. Anstelle des HKS-Modells wird für die Grenzschichtmessungen eine glatte Aluminiumplatte eingesetzt.
2. Ein Mikrofon im Hohlraumboden des Resonatorvolumens zur Erfassung des Schalldruckpegels (*SPL*).
3. Ein für diese Versuchsreihe entworfenes Mikrofonarray mit SMD Mikrofonen zur Erfassung der Wanddruckpegel (*WPL*), um die Auswirkungen der sich ändernden TBL-Eigenschaften als Anregung des Resonanzsystems erfassen zu können. Die 12 Mikrofone sind in einem 4 mm Raster symmetrisch um $y = 0$ mm angeordnet ($y = -22$ mm bis $y = +22$ mm) und decken die spannweite Dimension des HKS-Modells von 50 mm ($y = -25$ mm bis $y = +25$ mm) somit näherungsweise ab. Für Messungen der Wanddruckpegel wird die Spaltöffnung abgeklebt.

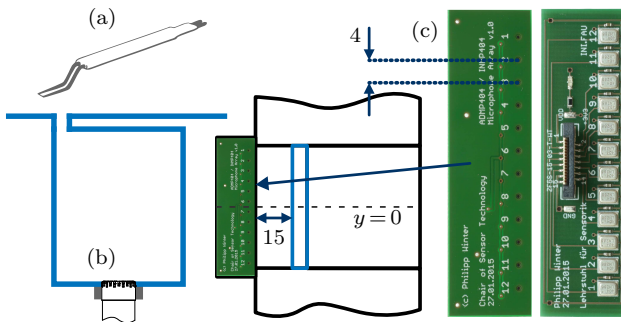


Abbildung 3: Verwendete Messtechnik: Dantec Dynamics Grenzschichtsonde (CTA), Typ 55P15 (a), Brüel und Kjaer Mikrofon, Typ 4189 (b), SMD-Mikrofonarray mit Mikrofonen von InvenSense, Typ INMP404 (c). Abmessungen in mm.

Dabei erfolgen die Messungen der Grenzschichtprofile, Schalldruckpegel und Wanddruckpegel in unterschiedlichen Messreihen, um eine gegenseitige Beeinflussung der Messgrößen auszuschließen.

Messergebnisse

TBL-Manipulation mittels Diffusor

Die bei Vergrößerung des Diffusoröffnungswinkels anwachsenden Grenzschichtprofile sind in Abbildung 4 (oben) dargestellt. Zum Vergleich ist ein Grenzschichtprofil unmittelbar stromaufwärts eines Fahrzeug-HKS

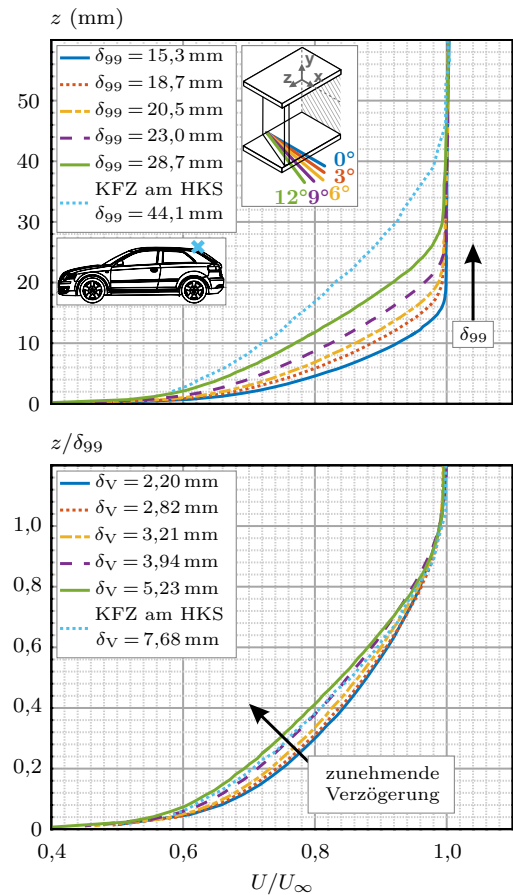


Abbildung 4: Grenzschichtprofile für variierende Diffusoröffnungswinkel an der Position $x = 550$ mm, $y = 0$ mm und Vergleichsprofil an einem Fahrzeug-HKS, jeweils für eine Anströmgeschwindigkeit $U_\infty = 40$ m/s, sowie Grenzschichtdicken δ_{99} (oben). Grenzschichtprofile bei normiertem Wandabstand und berechnete Verdrängungsdicken δ_v (unten).

abgebildet. Durch den positiven statischen Druckgradienten im Diffusor wird neben dem stärkeren Anwachsen der Grenzschicht auch eine Verzögerung derselben verursacht, was in Abbildung 4 (unten) ersichtlich ist. Auch das Profil am Vergleichsfahrzeug weist eine Verzögerung auf, die auf einen positiven Druckgradienten am hinteren Fahrzeugdach hindeutet und der Verzögerung bei einem Diffusoröffnungswinkel von 9° ähnelt. Der mit Vergrößerung des Diffusoröffnungswinkels ansteigende Quotient aus Verdrängungsdicke und Grenzschichtdicke (vgl. Legenden in Abb. 4 unten/oben) ist in Abbildung 5 dargestellt. Bei deckungsgleichen Grenzschicht-

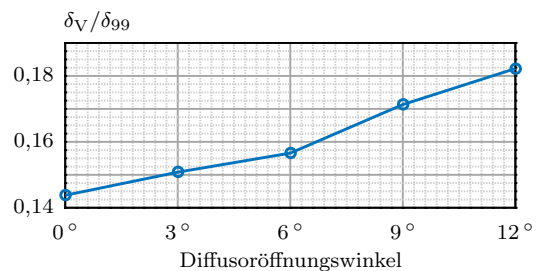


Abbildung 5: Quotient aus Verdrängungsdicke und Grenzschichtdicke über dem Diffusoröffnungswinkel. Der Anstieg des Quotienten von 0° bis 12° beträgt ca. 27%.

profilen in Abbildung 4 (unten) würde dieser Quotient näherungsweise konstant bleiben, steigt jedoch zunehmend an. Die Verdrängungsdicke als integrales Maß über die Grenzschicht bildet die Kombination aus anwachsender Grenzschicht und Verzögerung im Gegensatz zur Grenzschichtdicke somit zweckmäßig ab.

Schalldruckpegel im Resonatorvolumen

Abbildung 6 zeigt die im Resonatorvolumen des generischen HKS-Modells gemessenen Schalldruckpegel für verschiedene Diffusoröffnungswinkel. Der Schalldruckpegel

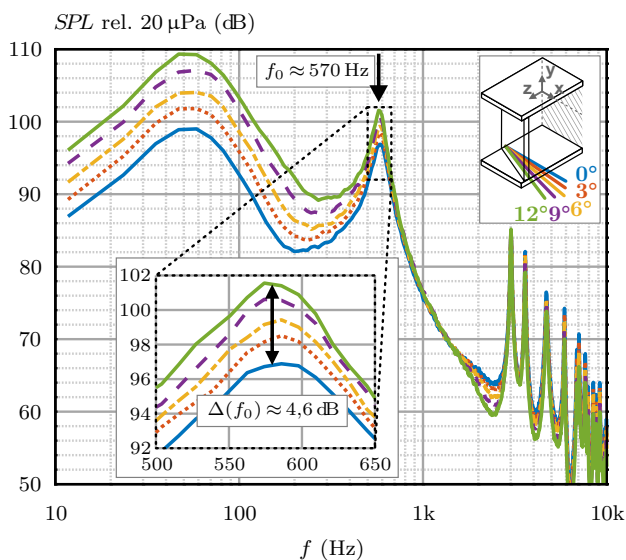


Abbildung 6: Schalldruckpegel im Resonatorvolumen bei Variation des Diffusoröffnungswinkels für $U_\infty = 40$ m/s.

bei der Resonanzfrequenz wächst für den Öffnungswinkel von 0° bis 12° um 4,6 dB an.

Wanddruckpegel am Mikrofonarray

Die im Resonatorvolumen vorliegende Pegelerhöhung für steigende Verdrängungsdicken bei sonst identischen Randbedingungen wird im Folgenden mithilfe der Wanddruckpegel analysiert, um die Kausalitätskette zwischen geänderten TBL-Eigenschaften und Schalldruckpegelanstieg zu vervollständigen. Abbildung 7 zeigt die gemessenen Wanddruckpegel unter Variation des Öffnungswinkels. Die Drucksignale der 12 Mikrofone wurden im Zeitbereich arithmetisch gemittelt und anschließend zu Pegelspektren überführt. Die somit kohärent gemittelten Pegel können als äquivalente Gesamtanregungspegel über die Spannweite des HKS-Modells interpretiert werden. Letztere steigen bei der Resonanzfrequenz für den Öffnungswinkel von 0° bis 12° um 2,6 dB an. Das Spektrum lässt sich in zwei Bereiche einteilen:

Unterhalb von ca. 250 Hz treten Pegelüberhöhungen auf, die auch in den Resonator übertragen werden (vgl. Abb. 6). Sie sind auf große Linienwirbel im Nachlauf der Diffusorschicht an der einstellbaren Diffusorwand zurückzuführen, wodurch Druckimpulse auf die überströmte Wand mit dem Mikrofonarray übertragen werden (s. Skizze in Abb. 7, links unten).

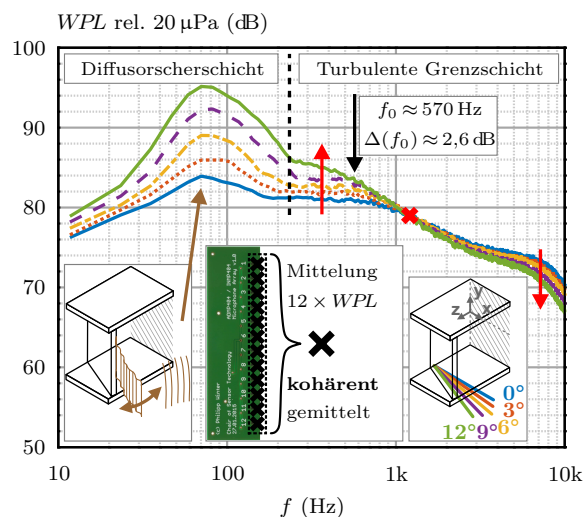


Abbildung 7: Wanddruckpegel am Mikrofonarray bei Variation des Diffusoröffnungswinkels für $U_\infty = 40$ m/s. Die Pegel wurden dabei jeweils kohärent über die 12 Mikrofonarraypositionen gemittelt.

Oberhalb von 250 Hz werden die Auswirkungen der TBL-Eigenschaften auf die Wanddruckpegel erkennbar: Im tieffrequenten Bereich steigen die Pegel mit anwachsender Verdrängungsdicken an (linker roter Pfeil), wobei dieser Anstieg bis zu einem charakteristischen Punkt (rotes \times) immer geringer wird und sich dann für den höherfrequenten Bereich genau umkehrt (rechter roter Pfeil). Dieses Verhalten lässt sich über die anwachsende Grenzschicht begründen: Größere Turbulenzstrukturen, die sich über eine Oberfläche fortbewegen, können mit größeren hydrodynamischen Wellenlängen und daher mit tieferen Frequenzen assoziiert werden. Die anwachsende Grenzschicht scheint demnach mit einer energetischen Verlagerung der Turbulenz von hohen zu tiefen Frequenzen einherzugehen.

Dass es sich in beiden Frequenzbereichen ($\leq/\geq 250$ Hz) um Phänomene unterschiedlicher physikalischer Natur handelt, lässt sich auch mit Abbildung 8 begründen. Hierin sind die Wanddruckpegel bei 20 m/s und 40 m/s über der Strouhal-Zahl aufgetragen. Während alle markanten Punkte der Diffusorschicht bedingten Pegelüberhöhungen einen linearen Zusammenhang zwischen Frequenz und Geschwindigkeit aufweisen (exemplarisch: schwarze Linie durch den Maximalpegel), steigt der mit der TBL assoziierte charakteristische Punkt (rotes \times) im Strouhal-Bereich an. Demnach verschiebt sich der TBL-Einflussbereich mit der Geschwindigkeit überproportional stark zu höheren Frequenzen (f ist etwa proportional zu $U_\infty^{1,3}$).

Neben dem grundlegenden Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Wanddruckpegel¹ ist die Geschwindigkeit somit ausschlaggebend dafür, ob für eine gegebene Frequenz und steigende Verdrängungsdicken ein Ansteigen oder Abfallen des Wanddruckpegels vorliegt. Exempla-

¹Mit steigender kinetischer Energie der Zuströmung steigt auch die kinetische Energie in der TBL: Der Effektivwert der Oberflächenwechseldrucke ist etwa proportional zu U_∞^2 .

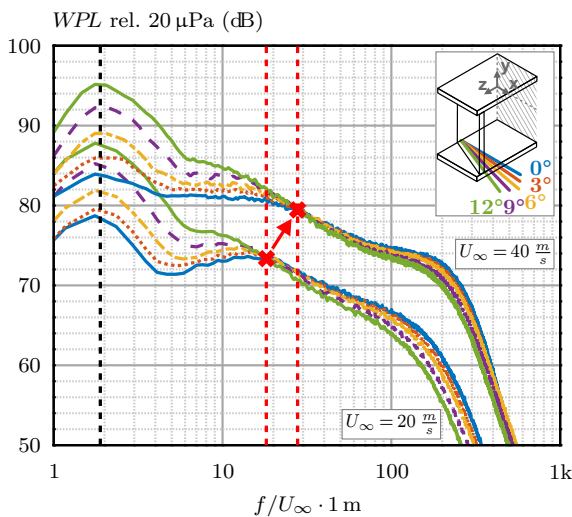


Abbildung 8: Kohärent gemittelter Wanddruckpegel am Mikrofonarray bei Variation des Diffusoröffnungswinkels für $U_\infty = 20 \text{ m/s}$ und $U_\infty = 40 \text{ m/s}$, über der Strouhal-Zahl mit der frei gewählten charakteristischen Länge von 1 m.

risch liegt für eine Geschwindigkeit von etwa 24 m/s Ko-
 zidenz des charakteristischen Punkts mit der Frequenz
 von 570 Hz vor. Oberhalb dieser Geschwindigkeit treten
 steigende Pegel für steigende Verdrängungsdicken auf.
 Unterhalb der Geschwindigkeit kehrt sich der Einfluss
 der Verdrängungsdicke um. Wie groß der Einfluss auf den
 Pegel ist und wie steil der Pegelanstieg für steigende Ge-
 schwindigkeiten ausfällt (Steigung im charakteristischen
 Punkt), hängt jedoch von der Verdrängungsdicke ab.

Synthese der Messergebnisse

Abbildung 9 stellt den Verlauf der Schall- und Wand-
 druckpegel bei der Resonanzfrequenz über der Ver-
 drängungsdicke dar (Synthese der Abbildungen 4, 6
 und 7). Die prinzipielle Ähnlichkeit der Verläufe hebt die

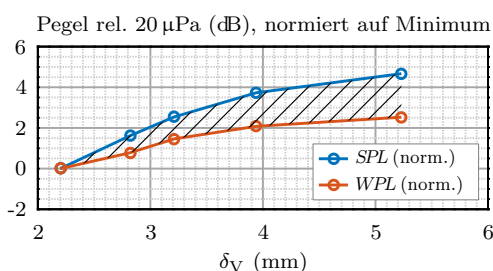


Abbildung 9: SPL und WPL bei $f_0 = 570 \text{ Hz}$ (jeweils normiert auf den Wert bei 0° Öffnungswinkel) für $U_\infty = 40 \text{ m/s}$.

Kausalität zwischen steigenden Wanddruckpegeln und
 Schalldruckpegeln bei steigenden Verdrängungsdicken
 hervor. Dennoch sind WPL und SPL-Anstieg nicht
 identisch. Es ergeben sich zunehmende Differenzen für
 anwachsende Verdrängungsdicken (schraffierte Fläche).
 Mutmaßlich könnten die geänderten TBL-Eigenschaften
 auch den Anteil der Scherschichtanregung in der
 Spaltöffnung (s. *Vorgehensweise und Randbedingungen*)
 beeinflussen, der im Wanddruckpegel nicht enthalten
 ist. Ebenfalls bildet der über die Spannweite kohärent

gemittelte Wanddruckpegel keine Änderungen hinsicht-
 lich der Erhaltungstendenzen in Strömungsrichtung ab
 (Stichwort: Corcos-Modell). Eine Änderung des Corcos-
 Abklingfaktors in Strömungsrichtung bei unterschied-
 lichen Verdrängungsdicken kann vom Wanddruckpegel
 nicht erfasst werden, könnte aber die Wirksamkeit der
 Anregung auf die Anregungsfläche (Öffnungsfläche des
 HKS-Modells) verändern.

Im Allgemeinen lässt sich eine schalldruckpegelbeeinflussende
 Wirkung im Resonatorvolumen für anwachsende
 Verdrängungsdicken konstatieren. Dabei spielen die von
 der Verdrängungsdicke abhängige Steigung im charakte-
 ristischen Punkt (rotes x, s. Abb. 7 und 8), die Geschwin-
 digkeit und die Resonanzfrequenz entscheidende Rollen:
 Je größer die Steigung im charakteristischen Punkt, desto
 steiler fällt der Wanddruckpegel- und Schalldruckpegel-
 anstieg für steigende Geschwindigkeiten aus. Weiterhin
 werden für eher tiefe Resonanzfrequenzen, z. B. 500 Hz ,
 bereits bei Geschwindigkeiten unterhalb von 100 km/h
 Pegelsteigerungen für größere Verdrängungsdicken vor-
 liegen. Für eher hohe Resonanzfrequenzen, z. B. 2000 Hz ,
 werden von der Verdrängungsdicke abhängige Pegelstei-
 gerungen hingegen erst oberhalb von 200 km/h auftreten.

Aus der abnehmenden Steigung des Schalldruckpegel-
 verlaufs in Abbildung 9 lässt sich außerdem eine mut-
 maßliche Sättigung der pegelsteigernden Wirkung ab
 Verdrängungsdicken von etwa 7 Millimetern extrapoli-
 eren. Diese Größenordnung wird wahrscheinlich für viele
 Fahrzeuge am HKS erreicht (Vergleichsfahrzeug aus
 Abb. 4: $\delta_V = 7,68 \text{ mm}$), wodurch für einen typischen
 Fahrzeug-HKS ($450 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 1250 \text{ Hz}$) ein geschwin-
 digkeitsbedingt eher ungünstiger Fall (s. vorheriger Absatz)
 hinsichtlich des von der Verdrängungsdicke abhängigen
 Anregungspotenzials vorliegt.

Fazit

Der Einfluss der Verdrängungsdicke auf den Schalldruck-
 pegel im Resonatorvolumen hängt stark von Resonanz-
 frequenz und Geschwindigkeit ab. In Berechnungsmodel-
 len zur Schalldruckpegelprognose sollte der Einfluss der
 Grenzschicht berücksichtigt werden, da die Pegel sonst
 um einige Dezibel überschätzt werden könnten.

Danksagung

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

Literatur

- [1] Schimmelpfennig, S.: Aeroakustik von Karosserie-
 spalten, Dissertation, FAU-Erlangen-Nürnberg, 2015
- [2] Wickern, G. und Brenner, M.: Helmholtz Reso-
 nators Acting as Sound Source in Automotive Aeroa-
 coustics, SAE Technical Paper 2009-01-0183, 2009
- [3] Winter, P., et al.: Untersuchung der aeroakustischen
 Schallentstehung an einem generischen Heckklappen-
 spaltmodell, DAGA 2015, Nürnberg, 2015