

BTGNX: Windkanalexperiment zu kopfspaltströmungsinduzierter Geräuscentstehung – Teil 1: Numerische Ergebnisse

Lev Liberson¹, Fabian Reuschling², Roland Ewert³, Michael Pott-Pollenske⁴, und Jan W. Delfs⁵

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland. Email: ¹lev.liberson@dlr.de

Das vorliegende Manuskript stellt den *Teil 1* eines zweiteiligen Beitrages dar und behandelt die Beschreibung der begleitenden, numerischen Arbeiten zum kürzlich durchgeführten „Braunschweig Tip-Gap-Noise eXperiment“ (BTGNX), erstmals vorgestellt im Zuge der DAGA 2023 [1]. Eine aktuelle Beschreibung des untersuchten Aufbaus, der Durchführung des Experimentes sowie erste (vorläufige) Messergebnisse finden sich im *Teil 2: Experimentelle Untersuchung*, auf welchen im Folgenden mehrfach Bezug genommen wird.

Einleitung

Zuordnen lässt sich das BTGNX den Untersuchungen der Schallentstehung auf Grund von Kopfspaltströmungen, wie diese beispielsweise an axialen Turbomaschinen zwischen den rotierenden Blattspitzen und der Rotor-Ummantelung entstehen. Bei diesen tritt, hervorgerufen durch den umströmungsbedingten Unterschied in der Druckverteilung von Druck- und Saugseite, eine Ausgleichsströmung an den Blattspitzen auf – analog zu den markanten Randwirbeln an Flugzeugtragflächen. Zusätzlich wird die resultierende Strömung stark durch die lokale Blatt- und Mantelrohrgeometrie beeinflusst. Dieser mit unerwünschten aerodynamischen Verlusten verbundene und häufig unter „Sekundärströmungen“ zusammengefasste Effekt umfasst komplexe, dreidimensionale Phänomene wie lokale Strömungsablösung und partielles Wiederanlegen, direkte und induzierte Wirbelbildung sowie Interaktion mit der Hauptströmung sowie Geometrie. Ferner ruft die Vielzahl der strömungsmechanischen Effekte entsprechende, aeroakustische Schallentstehungsprozesse hervor. Hier sind der Wirbel-Geometrie-Interaktionsmechanismus zu nennen, die Schallentstehung auf Grund beschleunigter Turbulenz und turbulente Eigenschallerzeugung sowie die Interaktion lokaler, konvektierender Druckfelder mit umliegenden Kanten. Bedingt durch den vielseitigen und beinahe allgegenwärtigen Einsatz von Axialventilatoren findet eine starke Überschneidung mit dem menschlichen Umfeld statt – konkret in Form von Lärmemissionen. Als Beispiel aus jüngster Zeit können hier Wärmepumpen aufgeführt werden, deren hauptsächliche Schallquelle oftmals der verbaute Axialventilator darstellt [2]. Folglich sind günstige akustische Eigenschaften entsprechender Produkte, und in weiterer Konsequenz diejenigen der Ventilatoren selbst, ein deutliches Alleinstellungsmerkmal und resultieren in einem Wettbewerbsvorteil. In diesem Zusammenhang ist die Erforschung und subsequente Minderung der kopfspaltbedingten Schallentstehung ein hoch relevantes Ingenieursziel der Hersteller moderner Axialventilatoren.

Motivation

Zu diesem Zweck wird nebst experimentellen Untersuchungen auf numerische Simulationsmethoden zurückgegriffen bzw. die Möglichkeiten einer gegenseitigen Ergänzung im Rahmen von „Datenfusion“ ausgenutzt. Ein solches Vorgehen hat den Vorteil, kostenintensiven Prototypenbau zu reduzieren und zeitaufwändige Vermessung unterschiedlicher Konfigurationen mittels geeigneter numerischer Abbildungen der Realität in die „digitale Umgebung“ zu verlagern. Ferner können bei einer digital-gestützten Entwicklung interdisziplinäre Konflikte bereits im frühen Auslegungsprozess identifiziert, bestenfalls sogar Synergieeffekte unterschiedlicher Disziplinen ausgenutzt werden – was einen Kerngedanken der Multidisziplinären Design-Optimierung (MDO) darstellt. Die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche MDO bildet selbstverständlich die numerische Vorhersagegüte innerhalb der jeweils eingebundenen Teildisziplinen. Um diese geeignet zu überprüfen und gegenüberzustellen, werden durch Industrie und Forschung entsprechende Validierungs- bzw. Benchmarkexperimente sorgfältig geplant und durchgeführt.

Kontextuelle Einordnung

Einer ebensolchen Zielsetzung folgt das BTGNX, welches als Teilprojekt in die mehrjährige Kooperation zwischen der Abteilung Technische Akustik (TEA) am DLR Braunschweig mit dem Ventilator- und Elektromotorenhersteller ebmpapst eingebettet ist. Deren längerfristig verfolgtes Ziel ist die Bereitstellung eines effizienten, numerischen Vorhersageverfahrens für Ventilatorengeräusch und folglich dessen Einsatz innerhalb eines MDO-Prozesses zur akustischen Optimierung von Ventilatoren. In diesem Kontext sollen die experimentell erworbenen Ergebnisse des BTGNX zum einen Rückschlüsse auf die Strömungs- sowie resultierenden Schallentstehungsmechanismen der Kopfspaltströmung liefern, zum anderen jedoch eine wichtige Basis an Validierungsdaten für die eingesetzten, aeroakustischen Simulationsmethoden schaffen. Ausdrücklicher Fokus liegt dabei auf der Gewinnung akustischer Daten, zu deren Zweck der experimentelle Aufbau explizit ausgelegt und mit entsprechender Messtechnik ausgestattet worden ist – eine ausführliche Beschreibung hierzu findet sich in *Teil 2: Experimentelle Untersuchung*.

Numerische Vorhersagemethode

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich vorerst auf die reine Validierung, deren erster Schritt die möglichst exakte simulatorische Nachbildung des Experimentes sowie

eine direkte Gegenüberstellung realer und simulierter Daten bildet. Dennoch sollen auch Aspekte bezüglich der Integration einer akustischen Vorhersagemethode in den MDO-Kontext kurz umrissen werden.

Allgemeine Anforderungen

Der Einsatz einer numerischen Vorhersagemethode für physikalische Vorgänge innerhalb eines Optimierungskontextes bringt eine Reihe von Anforderungen mit sich, welche teilweise diametral entgegengesetzt sind. Dies wird insbesondere bei der Gegenüberstellung von Recheneffizienz, d.h. geringem Simulationsaufwand in Verbindung mit möglichst schnellen Durchlaufzeiten, zum Modellierungsgrad der Methode – dem Anteil an tatsächlicher Simulation physikalischer Vorgänge gegenüber Modell-Abstraktion – deutlich. Im Falle aeroakustischer Optimierung erscheint daher ein Vorgehen sinnvoll, welches folgende Prinzipien vereint: (i) Ein **hybrider Simulationsansatz** basierend auf stationärer Strömung mit (ii) **zonalen, stochastischen Wirbelschallquellen** und (iii) **akustischer Metrik**.

Es ergibt sich aus (i) der Vorteil, dass jeweils eine disziplin-spezifische, optimale Simulationsmethode angewandt werden kann. Auch können CAA¹-Simulationen im Nachgang zuvor erfolgter CFD²-Rechnungen (bspw. aerodynamischer Optimierung) durchgeführt werden, welche wiederum aus Effizienzüberlegungen vornehmlich durch Lösung der (stationären) RANS³-Gleichungen erfolgen. Zwar erfordert dies für die inhärent instationären Akustiksimulationen die Rekonstruktion akustischer Quellterme aus den statistischen, d.h. stationären, CFD-Daten, erweist sich jedoch erneut als weitere, entscheidende Effizienzsteigerung. Bei skalenauffösenden Verfahren muss zur korrekten Abbildung akustisch relevanter Turbulenz-Längenskalen ein erheblich breiterer und kleiner werdender Skalenbereich zusätzlich simuliert werden, d.h. die turbulente Dynamik wird sowohl räumlich wie auch zeitlich aufgelöst – verbunden mit drastischem Simulationsaufwand.

Für ein akustisches Entwurfsverfahren ist es aus Effizienzgründen jedoch erforderlich, die Simulation der Turbulenz durch deren Modellierung zu ersetzen [3], beispielsweise mittels des in Punkt (ii) erwähnten Ansatzes. Je nach Komplexität der zur Verwendung kommenden Modellierung ist dies zwar auch mit numerischem Rechenaufwand verbunden, ist vorteilhafterweise allerdings räumlich (zonal) nur dort erforderlich, wo akustische Quellen von Relevanz sind. Zusätzlich können somit unterschiedliche Quellregionen in einzelnen Simulationen getrennt voneinander betrachtet und analysiert werden.

Der letzte Punkt (iii) impliziert die Formulierung und den Einsatz einer akustischen Quellmetrik als Möglichkeit zur direkten Bewertung akustischer Eigenschaften einer Konfiguration – bei Vermeidung einer rechenintensiven Simulation der Schallausbreitung im Volumen. Allgemein betrachtet werden in Schritt (ii) zeitlich aufgelöste, akustische Quellterme rekonstruiert. Diese können nun im Kon-

text eines akustischen Analogieansatzes als rechte Seite entsprechender Propagationsgleichungen verwendet werden, wobei letztere anschließend zwecks Bestimmung des instationären Schallfeldes mittels eines beliebigen numerischen Verfahrens (Finite Differenzen, Finite Volumen, Discontinuous Galerkin etc.) gelöst werden. Ist jedoch für eine Schallbewertung die Analyse der Quellterme bereits ausreichend, so kann der Propagationsschritt unter enormer Reduktion des Simulationsaufwandes eingespart werden – zusätzlich verbunden mit einer deutlichen Vereinfachung der Simulationskette. Damit einher geht die Anforderung an den Quellterm, weitestgehend nur ins Fernfeld propagationsfähige Anteile zu enthalten, sodass eine Auswertung innerhalb des sogenannten akustischen Nahfeldes bereits ausreichend ist. Eine solche Option soll basierend auf einer hydrodynamic-acoustic splitting (HAS) Formulierung, wie sie bspw. in [4] ausführlich dargelegt wird, im erweiterten Vorhaben der akustischen Optimierung von Ventilatoren erprobt und bewertet werden.

Verwendete Methodik zur Validierung

Innerhalb der vorliegenden Untersuchung wird jedoch zwecks direkter Validierung mit experimentellen Daten auf Punkt (iii) verzichtet und folglich eine vollständige Schallausbreitung im Volumen berechnet. Die unter Punkt (i) erwähnte Strömungssimulation erfolgt durch Lösung der RANS-Gleichungen mittels des DLR TAU-Codes [5]. Diese liefert zum einen das stationäre Grundströmungsfeld \mathbf{v}_0 , zum anderen für den nachfolgenden Schritt erforderliche Turbulenzstatistiken in Form der turbulenten kinetischen Energie k_t sowie einer Längenskala l_t , welche unter Einbezug der spezifischen Dissipationsrate ω_t berechnet wird. Das Grundströmungsfeld sowie die Turbulenzstatistiken bilden die Eingangsgrößen für die fast Random Particle Mesh (fRPM) Methode [6], welche jene unter (ii) aufgeführten stochastischen Wirbelschallquellen auf einem separaten, zonal begrenzten kartesischen Hilfsgitter (im Weiteren als fRPM-Patch bezeichnet) bereitstellt. Dieser überlappt geometrisch mit dem volumen-diskretisierten Simulationsgebiet des CAA-Lösers, sodass in einem zeitaufgelöstgekoppelten Lauf die Wirbelschallquellen in Form des linearisierten, fluktuierenden Lamb-Vektors als Quellterm der Akustischen Störungsgleichungen (APE)⁴ [7] im Überlappungsgebiet wirksam werden. Bei dem CAA-Löser handelt es sich um den auf der Discontinuous Galerkin Methode basierenden Code DISCO⁺⁺ [8], welcher die APE im Zeitbereich auf Tetraedergittern löst.

Aufbau Simulationsprozesskette

Unterschiedliche Konfigurationen des BTGNX wurden simulatorisch untersucht, indem zu jedem Parameterset stets eine CFD-Rechnung mit nachfolgender CAA-Simulation erfolgte. Als „Referenzkonfiguration“ wird der Aufbau mit unmodifizierter, plan abgeschnittener Flügeloberkante bei einem Anstellwinkel von $\alpha = 12^\circ$, $s = 10$ mm Spalt sowie der Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 40$ m/s definiert. Davon ausgehend sind zu diesem Zeitpunkt die Spaltweiten im Bereich von $s = 2 - 30$ mm

¹Aeroakustiksimulationen engl.: Computational Aeroacoustics

²Strömungssimulationen engl.: Computational Fluid Dynamics

³Reynolds-averaged Navier–Stokes

⁴Acoustic Perturbation Equations

und die Anströmgeschwindigkeit zwischen $U_\infty = 40$ m/s bzw. 60 m/s variiert worden. Im weiteren Verlauf der Untersuchung ist zudem die Ausweitung der Parametermatrix (vgl. Experiment) geplant, sodass eine geeignete automatisierte Prozesskette für das Aufsetzen der einzelnen Simulationen von vornherein implementiert wurde. Für ein vorgegebenes Parameterset, zusammengesetzt aus Flügelspitzenausführung, Anstellwinkel, Spalt sowie Anströmgeschwindigkeit, beginnt die Prozesskette mit der allem zugrundeliegenden Geometriemanipulation. Dies erfolgt Python-skriptgesteuert innerhalb der Geometrieaufbereitungs- bzw. Vernetzungssoftware ANSA⁵. Selbige Software wird anschließend zur automatisierten Vernetzung der Konfiguration herangezogen, wobei sämtliche Parameter im Vorhinein für eine Basiskonfiguration ausgearbeitet und abgespeichert worden sind. Je nach Fortschritt in der Prozesskette wird entweder ein CFD- oder ein CAA-bestimmtes Netz generiert – unter Berücksichtigung der deutlich unterschiedlichen Anforderungen. Schlussendlich erfolgt eine automatische Konfiguration und Berechnung der entsprechenden Simulation. Details zu Automatisierungs-, Vernetzungs- sowie jeweiligen Simulationsparametern werden auf Grund der Längenbeschränkung des Beitrages vernachlässigt – es verbleibt der Verweis auf nachfolgende Publikationen.

Erste Ergebnisse

Zur reinen aerodynamischen Auswertung des BTGNX liegen in erster Linie mittels Umfangsbohrungen am Flügel ermittelte Druckverteilungen vor. Daraus wird der dimensionslose Druckbeiwert aus dem lokal ermittelten, statischen Druck p nach $c_p = (p - p_\infty)/q_\infty$ berechnet, wobei der Staudruck $q = \frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2$ anhand der Dichte ρ_∞ und Geschwindigkeit der freien Anströmung U_∞ gegeben ist. Abbildung 1 liefert exemplarisch die Gegenüberstellung der bei $U_\infty = 40$ m/s und $\alpha = 10^\circ$ ermittelten experimentellen und simulierten Verteilung des Druckbeiwertes, aufgetragen über die dimensionslose, auf die Sehnenlänge $c = 200$ mm bezogene Profilkordinate X_c . Es kann im Allgemeinen ein hoher Übereinstimmungsgrad festgestellt werden, was auf eine gute numerische Abbildung der real am Flügel vorliegenden Strömungsbedingungen rückschließen lässt. Die akustische Validierung erfolgt anhand eines direkten Vergleiches von realen und virtuell aufgenommenen Mikrofondaten, wobei die exakten Positionen aus dem Experiment in den entsprechenden Simulationen übernommen wurden. Zwecks Verdeutlichung der Auswerteposition und um eine Impression des simulierten Schallfeldes zu liefern, ist in Abbildung 2 ein horizontaler Schnitt durch das Simulationsgebiet dargestellt, wobei das instantane Schallfeld als Konturplot des akustischen Schwankungsdruckes p' visualisiert wird. Das im weiteren Verlauf für die spektrale Gegenüberstellung herangezogene Mikrofon ist in der Darstellung als grüne Sphäre gekennzeichnet.

Eine solche Gegenüberstellung ist in Abbildung 3 gegeben, wobei die Schallausbreitung an der Referenzkonfiguration bei zwei Anströmgeschwindigkeiten

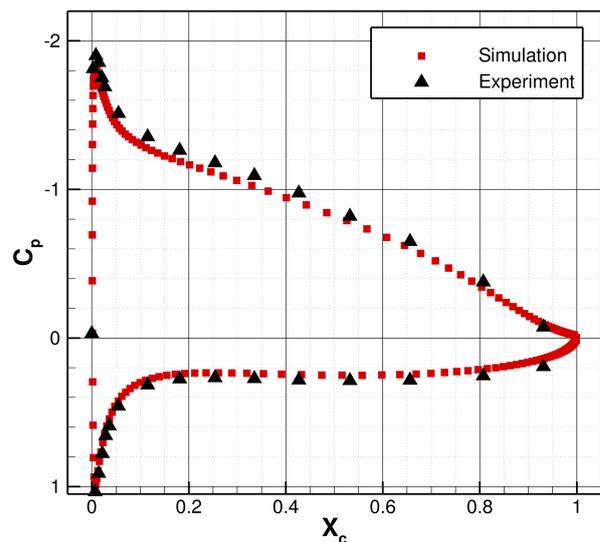


Abbildung 1: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Verteilung des Druckbeiwertes c_p unter $\alpha = 10^\circ$ sowie $U_\infty = 40$ m/s.

($U_\infty = 40$ m/s bzw. 60 m/s) simuliert wurde. Auch diese akustischen Ergebnisse zeigen im aufgelösten Frequenzbereich bereits sowohl in Bezug auf Absolutpegel wie auch die spektrale Form eine gute, erste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Ferner ist zu erkennen, dass der Einfluss der Geschwindigkeit durch die Simulation aufgezeigt wird.

Abschließend ist äußerst wichtig zu erwähnen, dass in der Simulation, bedingt durch die Lage und Ausdehnung des fRPM-Patches, die Schallentstehung lediglich in einem stark begrenzten Bereich um den Kopfspalt berücksichtigt wird. Dementsprechend ist der Einfluss sämtlicher übrigen Schallquellen in den simulierten Spektren nicht enthalten. Daher ist für nachfolgende Untersuchungen vorgesehen, innerhalb der experimentellen Auswertung Array-basierte Spektren beschränkt auf begrenzte Bereiche auszuwerten – somit wäre ein direkterer Vergleich mit dem zonalen Simulationsansatz gewährleistet.

Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend ist abermals zu betonen, dass es sich bei den dargestellten Messergebnissen um vorläufige Daten handelt, welche noch entsprechenden Korrekturen unterzogen werden. Auch konnte für die akustischen Simulationen auf Grund des engen zeitlichen Zusammenhangs mit dem Abschluss der Messkampagne bezüglich der festgelegten Simulationsparameter aber auch bspw. des gewählten Grades der akustischen Quellmodellierung noch keine endgültige „best-practice“ ausgearbeitet werden. Dennoch kann anhand der gezeigten Ergebnisse bereits gezeigt werden, dass die durchaus komplexe Simulationskette bestehend aus Geometriemanipulation, automatischer Vernetzung, Durchführung einer zweistufigen RANS-CFD sowie einer subsequenten akustischen Ausbreitungsrechnung unter Verwendung eines zusätzlichen stochastischen Quellmoduls vollständig einsatzfähig ist. Auch zeigen die dargestellten Gegenüberstellungen mit dem Experiment eine vielverspre-

⁵Automatic Net generation for Structural Analysis – Homepage: <https://www.beta-cae.com/ansa.htm>

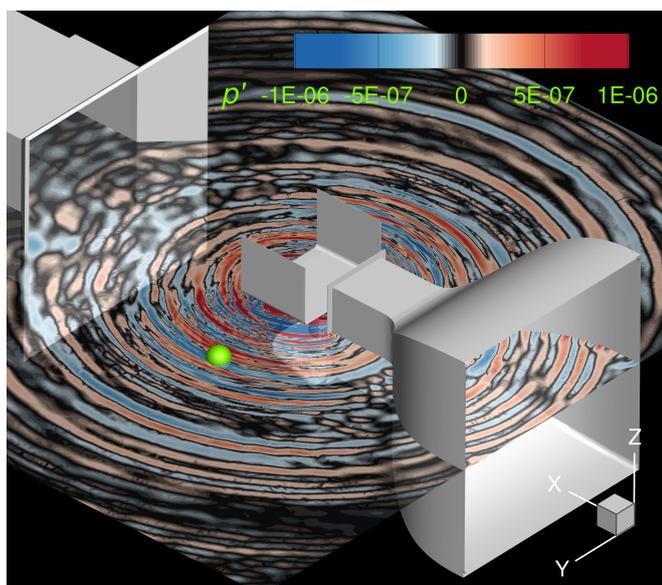


Abbildung 2: Horizontaler Schnitt durch das Simulationsgebiet auf halber Spalthöhe ($s = 10$ mm), Darstellung des instantanen Schallfeldes über Konturplot des akustischen Schwankungsdruckes p' , spektral ausgewertet Mikrofonposition farblich gekennzeichnet.

chende Übereinstimmung, sodass zu erwarten ist, dass im weiteren Verlauf der Validierung auch weitere, zu untersuchen geplante, Parametervariationen ähnliche Ergebnishüten erzielen werden. Ferner ist auch durch detailliertere Einstellung und gezielte Untersuchung der vielzähligen von Stellgrößen in den jeweiligen Teilsimulationen eine allgemeine Verbesserung der Vorhersagen plausibel. Im Anschluss an die Validierungsunter-

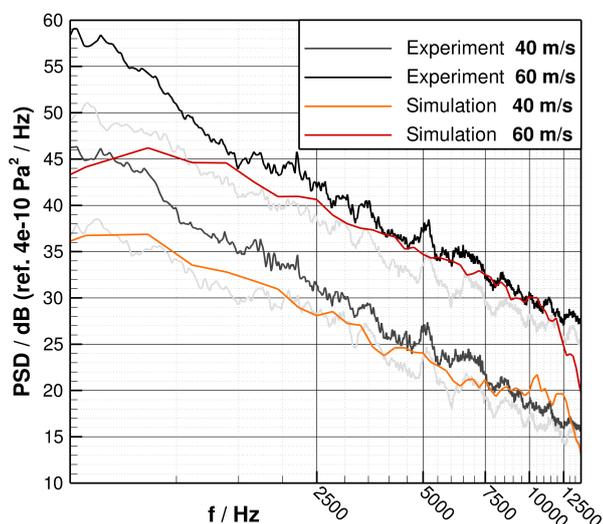


Abbildung 3: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Einzelmikrofon-Fernfeldspektren bei Variation der Anströmgeschwindigkeit U_∞ für Referenzkonfiguration.

suchung wird der Fokus auf die Erarbeitung und Erprobung der akustischen Metrik gelegt, wobei auch hier die einzelnen Schritte stets anhand der experimentellen Daten überprüft werden. Allgemein lässt sich festhalten, dass die enge Zusammenarbeit der experimentellen und numerischen Beteiligten sowie selbstverständlich dem externen Partner ebmapst für den Aufbau eines

solchen aeroakustischen Experimentes deutliche Vorteile liefert. Insbesondere können die gegenseitigen Anforderungen im Vorfeld kommuniziert und bei der experimentellen wie auch numerischen Planung aufeinander abgestimmt werden, um letztendlich Daten zu generieren, deren Nutzen maximal bzw. simulatorische Reproduzierbarkeit gewährleistet ist. Auch hier erweist sich die Durchführung einer solchen disziplinübergreifenden Arbeit im Rahmen einer kleinen, stark vernetzten Arbeitsgruppe als kolossaler Vorteil, da sämtliche, erstaunlich häufig auftauchende Unsicherheiten (Geometriedetails, Messparameter, Datenprozessierung etc.) zeitnah im Gespräch mit dem jeweiligen Verantwortlichen aufzuklären sind.

Die innerhalb dieses und des dazugehörigen Beitrages *Teil 2* durchgeführten und präsentierten Arbeiten bilden nur den ersten Schritt einer andauernden Untersuchung, welche in nachfolgenden Publikationen fortlaufend dokumentiert wird. Die Autoren haben eindeutiges Forschungsinteresse daran, das BTGNX als Benchmark-Fall zu etablieren und sind diesbezüglich offen für Anfragen.

Literatur

- [1] Liberson, L., Anderson, J. L., Reuschling, F., Pott-Pollenske, S.-M., Ewert, R. und Delfs, J. W.: Simulationsgestützte Konzeptionierung eines aeroakustischen Experimentes zur Untersuchung von kopfspaltströmungsinduzierter Geräuschentstehung. Fortschritte der Akustik – DAGA 2023, (2023), 1520-1523.
- [2] Schneider, M.: Akustik von Wärmepumpen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2023, (2023), 1560-1563.
- [3] Delfs, J. W.: Strömungsgeräusche – Beschreibung und Minderung mittels numerischer und experimenteller Simulation. Fortschritte der Akustik - DAGA 2011, (2011), 21-32.
- [4] Ewert, R., Kreuzinger, J.: Hydrodynamic/acoustic splitting approach with flow-acoustic feedback for universal subsonic noise computation. Journal of Computational Physics, (2021), 110548, 444.
- [5] Schwamborn, D., Gerhold, T., Heinrich, R.: The DLR TAU-code: Recent applications in research and industry. Proceedings of ECCOMAS CDF 2006, (2006), 1-25.
- [6] Ewert, R.: Broadband slat noise prediction based on CAA and stochastic sound sources from a fast random particle-mesh (RPM) method. Computers and Fluids, (2008)
- [7] Ewert, R., Schröder, W.: Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering. Journal of Computational Physics, (2003), 365-398, 188(2).
- [8] Lummer, M.: A Hybrid 3D Discontinuous Galerkin Code for CAA Applications. 22ndAIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Lyon, (2016).